

ISSN 1026-2237

DOI 10.18522/1026-2237

ИЗВЕСТИЯ
ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

*Северо-Кавказский
регион*

ЕСТЕСТВЕННЫЕ

НАУКИ

2023

1

Журнал основан в 1972 г. Ю.А. Ждановым

Главная редакция:

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

Редакционная коллегия:

М.А. Боровская – главный редактор, чл.-корр. РАО, доктор эконом. наук, профессор, Южный федеральный университет, Россия
В.Е. Закруткин – председатель редколлегии, доктор геол.-мин. наук, профессор, Южный федеральный университет, Россия
Я.М. Ерусалимский – зам. председателя редколлегии, кандидат физ.-мат. наук, доктор техн. наук, профессор, Южный федеральный университет, Россия
В.А. Бабешко – академик РАН, доктор физ.-мат. наук, профессор, Кубанский государственный университет, Россия
Б.С. Карамурзов – доктор техн. наук, профессор, Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова, Россия
В.И. Колесников – академик РАН, доктор техн. наук, профессор, Ростовский государственный университет путей сообщения, Россия
А.Г. Кусраев – доктор физ.-мат. наук, профессор, Южный математический институт ВНЦ РАН, Россия
Г.Г. Матишов – академик РАН, доктор геол.-мин. наук, профессор, Федеральный исследовательский центр Южный научный центр РАН, Россия
В.И. Минкин – академик РАН, доктор хим. наук, профессор, Южный федеральный университет, Россия
М.Х. Рабаданов – доктор физ.-мат. наук, профессор, Дагестанский государственный университет, Россия
А.В. Абанин – доктор физ.-мат. наук, профессор, Южный федеральный университет, Россия
Г.Г. Бабаян – доктор техн. наук, Центр эколого-ноосферных исследований НАН РА, Армения
О.С. Безуглова – доктор биол. наук, профессор, Южный федеральный университет, Россия
Н.И. Бойко – доктор геол.-мин. наук, профессор, Южный федеральный университет, Россия
А.В. Бочкарев – доктор геол.-мин. наук, профессор, Российский государственный университет нефти и газа им. И.М. Губкина, Россия
Л.С. Ворович – кандидат физ.-мат. наук, доцент, Южный федеральный университет, Россия
О.Н. Демина – доктор биол. наук, профессор, Карачаево-Черкесский государственный университет им. У.Д. Алиева, Россия
М.Ю. Жуков – доктор физ.-мат. наук, профессор, Южный федеральный университет, Россия
А.Г. Захаров – доктор техн. наук, профессор, Южный федеральный университет, Россия
Л.М. Зубов – доктор физ.-мат. наук, профессор, Южный федеральный университет, Россия
А.Н. Карапетянц – доктор физ.-мат. наук, профессор, Южный федеральный университет, Россия
Д.В. Карелин – доктор биол. наук, Институт географии РАН, Россия
М.И. Карякин – доктор физ.-мат. наук, доцент, Южный федеральный университет, Россия
С.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. Фатталь – доктор наук, профессор, Университет Нанта, Франция
Ю.А. Федоров – доктор геогр. наук, профессор, Южный федеральный университет, Россия
А.Д. Хованский – кандидат геол.-мин. наук, доктор геогр. наук, профессор, Южный федеральный университет, Россия

Учредители:

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

Journal was founded in 1972 by Yu.A. Zhdanov

Main Edition:

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

Editorial Board:

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

The Founders

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

ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ. СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ РЕГИОН

BULLETIN OF HIGHER EDUCATIONAL INSTITUTIONS. NORTH CAUCASUS REGION

doi: 10.18522/1026-2237-2023-1

Свидетельство о регистрации
ПИ № ФС 77 – 77252 от 25.11.2019,
выдано Федеральной службой по надзору
в сфере связи, информационных технологий
и массовых коммуникаций
Научный журнал
Издаётся с 1973 г.
Периодичность серии 4 номера в год
№ 1 (217) 2023 г.

Registration certificate
PI No. FS 77 - 77252 dated 25.11.2019
issued Federal Service for Supervision
of Communications, Information Technology,
and Mass Media
Science magazine
Published since 1973.
4 issues per a year
No. 1 (217) 2023

ЕСТЕСТВЕННЫЕ НАУКИ

NATURAL SCIENCE

СОДЕРЖАНИЕ

CONTENTS

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ

PHYSICAL AND MATHEMATICAL SCIENCES

<i>Галаев С.В.</i> О почти квазисасакиевых параконтактных структурах на распределениях субримановых многообразий.....	4
<i>Кауров П.В.</i> Определение прогибов физически нелинейной балки на упругом основании	11
<i>Рошаль Д.С., Аззаг К., Федоренко К.К., Рошаль С.Б., Багдигьян С.</i> Проявление сферической геометрии в монослоях клеток.....	17
<i>Хопёрский А.Н., Конеев Р.В.</i> О суммировании $3j$ -символов Вигнера.....	24
<i>Шармин Д.В., Шармина Т.Н., Шармин В.Г.</i> Тензор кривизны n -поверхности и ее сферического образа в E^{n+k}	29

<i>Galaev S.V.</i> On Almost Quasi-Sasakian Paracontact Structures on Distributions of Sub-Riemannian Manifolds.....	4
<i>Kaurov P.V.</i> Determination of Deflections of a Physically Non-Linear Beam on Elastic Base.....	11
<i>Roshal D.S., Azzag K., Fedorenko K.K., Rochal S.B., Baghdiguan S.</i> Manifestation of Spherical Geometry in Cell Monolayers.....	17
<i>Hopersky A.N., Koneev R.V.</i> On Summation of $3j$ -Wigner Symbols.....	24
<i>Sharmin D.V., Sharmina T.N., Sharmin V.G.</i> The Curvature Tensor of the n -Surface and Its Spherical Image in E^{n+k}	29

НАУКИ О ЗЕМЛЕ

SCIENCES OF EARTH

<i>Бабич О.О., Рада А.О., Куликова Ю.В., Сухих С.А.</i> Изучение уровня эвтрофикации прибрежных вод Гданьского залива Балтийского моря с использованием данных дистанционного зондирования Земли.....	35
<i>Бурдуковский М.Л., Перепелкина П.А., Киселева И.В.</i> Агрофизические свойства и степень гумусированности аллювиальной серогумусовой почвы (Приморский край)	43
<i>Дегтярева Т.В.</i> Особенности трансформации микроэлементного состава почв города Ставрополя под влиянием урбогенеза	49

<i>Babich O.O., Rada A.O., Kulikova Yu.V., Sukhikh S.A.</i> Study of Coastal Waters Eutrophication Level of Gdansk Bay (Baltic Sea) Using Earth Remote Sensing Data.....	35
<i>Burdukovskii M.L., Perepelkina P.A., Kiseleva I.V.</i> Agrophysical Properties and Degree of Humification of Alluvial Gray Humus Soils (Primorsky Region) ...	43
<i>Degtyareva T.V.</i> Features of Transformation of the Microelement Composition of Soils in the City of Stavropol Under the Influence of Urbogenesis.....	49

Ергина Е.И., Горбунов Р.В., Табуницкий В.А., Петлюкова Е.А. Почвенное разнообразие территории Крымского полуострова.....	61	Ergina E.I., Gorbunov R.V., Tabunshchik V.A., Petlyukova E.A. Soil Diversity of the Crimean Peninsula	61
Ипполитова Н.А. Пространственная динамика численности населения малых городов сибирских регионов	70	Ippolitova N.A. Spatial Dynamics of the Population of Small Towns in the Siberian Regions	70
Калинин А.А., Пономаренко Н.В., Матвейкина Ж.В. Мониторинг состояния земель сельскохозяйственного назначения Ростовской области и эффективности их использования	79	Kalinin A.A., Ponomarenko N.V., Matveikina Zh.V. Monitoring of the State of Agricultural Lands of the Rostov Region and the Effectiveness of Their Use....	79
Каранин А.В., Беликова М.Ю. Оценка влияния магнитных и гравитационных аномалий на формирование грозных пожаров на территории Республики Алтай.....	87	Karanin A.V., Belikova M.Yu. Assessment of the Magnetic and Gravitational Anomalies Influence on Thunderstorm Fires Formation on the Altai Republic Territory	87
Плуталова Т.Г., Чернова Е.О. Динамика урожайности зерновых культур Алтайского края в условиях изменения климата	101	Plutalova T.G., Chernova E.O. Yield Dynamics of Grain Crops Under Climate Change in Altai Krai ...	101
Радионофф А.А. Математическая модель равновесия столба сжимаемой атмосферы. Часть 3: Нестационарные решения	112	Radionoff A.A. Mathematical Study of Equilibrium of the Column of Compressible Atmospheric Air. Part 3: Non-Stationary Solutions	112
Фролова Т.С. Управление водными ресурсами в мире	120	Frolova T.S. Water Resources Management in the World	120
Bashirova A.A. Statistical Analysis of Convective Processes Over the Absheron Peninsula.....	129	Bashirova A.A. Statistical Analysis of Convective Processes Over the Absheron Peninsula	129

БИОЛОГИЧЕСКИЕ НАУКИ

BIOLOGICAL SCIENCES

Гайворонский В.Г., Колесников С.И., Кузина А.А., Казеев К.Ш. Изменение активности каталазы в почвах Крыма при загрязнении мазутом.....	137	Gaivoronsky V.G., Kolesnikov S.I., Kuzina A.A., Kazeev K.Sh. Changes in Catalase Activity in Crimean Soils Due to Fuel Oil Contamination	137
Цепина Н.И., Колесников С.И., Минникова Т.В., Русева А.С., Труфанов Д.А. Влияние загрязнения AgNPs на эмиссию углекислого газа черноземом.....	142	Tsepina N.I., Kolesnikov S.I., Minnikova T.V., Ruseva A.S., Trufanov D.A. Influence of AgNPs Pollution on Carbon Dioxide Emission by Chernozem	142

НАШИ ЮБИЛЯРЫ

OUR PERSONS

Абанин А.В., Ватульян А.О., Карякин М.И., Мелихов С.Н. Анатолий Георгиевич Кусраев (к 70-летию со дня рождения)	148	Abanin A.V., Vatulyan A.O., Karyakin M.I., Melikhov S.N. Anatoly Georgievich Kusraev (to the 70th Birthday)	148
Ватульян А.О., Ерусалимский Я.М. Михаил Игоревич Карякин (к 60-летию со дня рождения)	151	Vatulyan A.O., Yerusalimsky Ya.M. Mikhail Igorievich Karyakin (to the 60th Birthday)	151

НАУЧНАЯ ЖИЗНЬ

SCIENTIFIC LIFE

Миноранский В.А., Тимофеев Ю.В. III Международная научно-практическая конференция «Биологическое разнообразие: изучение, сохранение, восстановление, рациональное использование» (г. Керчь, 13–18 сентября 2022 г.)	154	Minoransky V.A., Timofeev J.V. III International Scientific and Practical Conference “Biological Diversity: Study, Conservation, Restoration, Rational Use” (Kerch, September 13-18, 2022).....	154
--	-----	--	-----

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ

PHYSICAL AND MATHEMATICAL SCIENCES

Научная статья

УДК 514.76

doi: 10.18522/1026-2237-2023-1-4-10

О ПОЧТИ КВАЗИСАСАКИЕВЫХ ПАРАКОНТАКТНЫХ СТРУКТУРАХ НА РАСПРЕДЕЛЕНИЯХ СУБРИМАНОВЫХ МНОГООБРАЗИЙ

Сергей Васильевич Галаев

Саратовский национальный исследовательский государственный университет

имени Н.Г. Чернышевского, Саратов, Россия

sgalaev@mail.ru

Аннотация. Вводится понятие почти квазисасакиевой параконтактной структуры. В отличие от квазисасакиевой параконтактной структуры введенная структура не обладает свойством нормальности. Исследуются инварианты внутренней геометрии почти квазисасакиевой параконтактной структуры. Под внутренней геометрией почти параконтактного метрического многообразия понимаются те его геометрические свойства, которые зависят только от параллельного перенесения, определяемого внутренней связностью. В частности, доказывается, что из обращения в нуль тензора Схоутена следует, что структурное векторное поле является киллинговым. Приводится пример почти квазисасакиевой параконтактной структуры, которая естественным образом возникает на распределениях субримановых многообразий. На неинволютивном распределении D субриманова многообразия M контактного типа определяется почти параконтактная метрическая структура, названная в работе продолженной. Доказывается, что на распределении нулевой кривизны продолженная структура является почти квазисасакиевой параконтактной. Характеристическим свойством распределения нулевой кривизны является обращение в нуль тензора кривизны Схоутена. Проводится анализ известной классификации продолженных структур, основанный на свойствах фундаментального, ассоциированного с продолженной структурой тензора F типа $(0, 3)$. В соответствии с указанной классификацией имеется 2^{12} классов почти параконтактной метрической структуры, среди которых – 12 базисных. Найден класс, содержащий продолженную почти квазисасакиеву параконтактную структуру.

Ключевые слова: субриманово многообразие контактного типа, внутренняя геометрия субриманова многообразия, продолженная почти параконтактная метрическая структура, распределение нулевой кривизны субриманова многообразия, почти квазисасакиева параконтактная структура

Для цитирования: Галаев С.В. О почти квазисасакиевых параконтактных структурах на распределениях субримановых многообразий // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. 2023. № 1. С. 4–10.

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

Original article

ON ALMOST QUASI-SASAKIAN PARACONTACT STRUCTURES ON DISTRIBUTIONS OF SUB-RIEMANNIAN MANIFOLDS

Sergei V. Galaev

Saratov State University, Saratov, Russia
sgalaev@mail.ru

Abstract. The concept of an almost quasi-Sasakian paracontact structure is introduced. In contrast to the quasi-Sasakian paracontact structure, the introduced structure does not have the normality property. The invariants of the intrinsic geometry of an almost quasi-Sasakian paracontact structure are studied. The intrinsic geometry of an almost paracontact metric manifold is understood to mean those of its geometric properties that depend only on the parallel translation determined by the intrinsic connection. In particular, it is proved that the vanishing of the Schouten tensor implies that the structure vector field is a Killing vector field. An example of an almost quasi-Sasakian paracontact structure is given. Almost quasi-Sasakian paracontact structures arise naturally on distributions of sub-Riemannian manifolds. On a non-involutive distribution D of a sub-Riemannian manifold M of contact type, an almost paracontact metric structure is defined, which is called an extended structure. It is proved that on a distribution of zero curvature, the extended structure is an almost quasi-Sasakian paracontact structure. A characteristic property of a distribution of zero curvature is the vanishing of the Schouten curvature tensor. The well-known classification of extended structures is analyzed based on the properties of the fundamental tensor F of type $(0, 3)$ associated to the extended structure. In accordance with this classification, there are 2^{12} classes of almost paracontact metric structure, among which there are 12 basic ones. A class containing an extended almost quasi-Sasakian paracontact structure is found.

Keywords: sub-Riemannian manifold of contact type, intrinsic geometry of a sub-Riemannian manifold, extended almost paracontact metric structure, distribution of zero curvature of a sub-Riemannian manifold, almost quasi-Sasakian paracontact structure

For citation: Galaev S.V. On Almost Quasi-Sasakian Paracontact Structures on Distributions of Sub-Riemannian Manifolds. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2023;(1):4-10. (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

Почти параконтактная структура определена в работе [1]. Подробному исследованию геометрии почти параконтактных метрических многообразий посвящена работа [2]. В настоящей работе вводится понятие почти квазисасакиева параконтактного многообразия ($AQSP$ -многообразия). $AQSP$ -многообразие является параконтактным аналогом почти контактного кэлера многообразия [3].

Под субримановым многообразием контактного типа понимается гладкое многообразие M размерности $n = 2m + 1$ с заданной на нем субримановой структурой (M, ξ, η, g, D) , где $D = \ker(\eta)$; $D^\perp = \text{span}(\xi)$; g – риманова метрика на многообразии M , относительно которой распределения D и D^\perp взаимно ортогональны. Идея продолжения почти контактных структур тесно связана с развитием аппарата связностей над распределением и теории продолженных связностей [4–6]. В настоящей работе показано, что $AQSP$ -структуры естественным образом возникают на распределениях нулевой кривизны субримановых многообразий. Если размерность субриманова многообразия M равна $n = 2m + 1$, то размерность его распределения D как тотального пространства векторного расслоения равна $n = 4m + 1$.

В работах [7, 8] введено понятие внутренней геометрии субриманова многообразия контактного типа M . К ее основным инвариантам относятся: тензор кривизны Схоутена; 1-форма η , порождающая распределение D ; производная Ли $L_\xi g$ метрического тензора g вдоль векторного поля ξ ; тензорное поле P , компоненты которого в адаптированных координатах выражаются с помощью равенства $P_{ad}^c = \partial_n \Gamma_{ad}^c$. Показано, что из обращения в нуль тензора Схоутена следует равенство нулю инвариантов $L_\xi g, P$. В настоящей работе проводится анализ известной классификации продолженных структур, основанный на свойствах фундаментального, ассоциированного с продолженной структурой тензора F типа $(0, 3)$. В соответствии с указанной классификацией имеется 2^{12} классов почти параконтактной метрической структуры, среди которых – 12 базисных [9].

О геометрии почти квазисасакиевых параконтактных многообразий

Пусть M – псевдориманово многообразие размерности $n = 2m + 1$ с заданной на нем почти параконтактной метрической структурой $(M, \xi, \eta, g, \varphi, D)$, где η и ξ – 1-форма и единичное векторное поле, порождающие, соответственно, ортогональные между собой распределения D и D^\perp ; φ – структурный эндоморфизм. При этом выполняются следующие условия:

$$\varphi\xi = 0, \quad \varphi^2 = I - \eta \otimes \xi, \quad \eta \circ \varphi = 0, \quad \eta(\xi) = 1, \quad \eta(X) = g(X, \xi),$$

$$g(\varphi X, \varphi Y) = -g(X, Y) + \eta(X)\eta(Y).$$

Дополнительно потребуем, чтобы $d\eta(\xi, \cdot) = 0$. Форма Ω , определяемая равенством $\Omega(X, Y) = g(X, \varphi Y)$, называется фундаментальной.

Многообразие M с заданной на нем почти параконтактной метрической структурой называется почти параконтактным метрическим многообразием. Многообразие M называется нормальным почти параконтактным метрическим многообразием, если выполняется равенство $N_\varphi^{(1)} = N_\varphi - 2d\eta \otimes \xi = 0$, где $N_\varphi(X, Y) = [\varphi X, \varphi Y] + \varphi^2[X, Y] - \varphi[\varphi X, Y] - \varphi[X, \varphi Y]$ – тензор Нейенхейса эндоморфизма φ . Часто выделяют следующие основные классы почти параконтактных метрических многообразий [2, 10]:

- 1) параконтактное метрическое многообразие – $\Omega = d\eta$;
- 2) квазисасакиевы параконтактные многообразия – $d\Omega = 0, N_\varphi^{(1)} = 0$;
- 3) парасасакиевы метрические многообразия – нормальное параконтактное метрическое многообразие;
- 4) почти паракосимплектическое метрическое многообразие – $d\eta = 0$ и $d\Omega = 0$.

В настоящей работе вводится новый класс почти параконтактных метрических многообразий – почти квазисасакиевы параконтактные многообразия. Назовем почти параконтактное метрическое многообразие почти квазисасакиевым параконтактным многообразием ($AQSP$ -многообразием), если выполняются следующие условия: $d\Omega = 0, \tilde{N}_\varphi = N_\varphi - 2\varphi^*d\eta \otimes \xi = 0$.

Пусть ∇ – внутренняя линейная связность на субримановом многообразии контактного типа [11].

Карту $k(x^i)$ ($i, j, k = 1, \dots, n; a, b, c = 1, \dots, n - 1; I, J, K = 1, \dots, 2n - 1$) многообразия M будем называть адаптированной к распределению D , если $\partial_n = \xi$. Пусть $P: TM \rightarrow D$ – проектор, определяемый разложением $TM = D \oplus D^\perp$, и $k(x^i)$ – адаптированная карта. Векторные поля $P(\partial_a) = e_a = \partial_a - \Gamma_a^n \partial_n$ линейно независимы и в области определения соответствующей карты порождают распределение $D: D = span(e_a)$. Условие $d\eta(\xi, X) = 0$ эквивалентно справедливости равенства $\partial_n \Gamma_a^n = 0$.

Легко установить, что производные $\partial_n \Gamma_{ac}^d$ являются компонентами допустимого тензорного поля [3].

Пусть $\tilde{\nabla}$ – связность Леви-Чивиты и $\tilde{\Gamma}_{jk}^i$ – ее коэффициенты. В результате непосредственных вычислений, основанных на применении равенства

$$2\tilde{\Gamma}_{ij}^m = g^{km}(e_j g_{ik} + e_k g_{ij} - e_k g_{ij} + \Omega_{kj}^l g_{li} + \Omega_{ki}^l g_{lj}) + \Omega_{ij}^m (\Omega_{ab}^n = 2\omega_{ba}, \Omega_{an}^n = \partial_n \Gamma_a^n),$$

убеждаемся в справедливости следующего предложения.

Предложение 1. Ненулевые коэффициенты $\tilde{\Gamma}_{ij}^k$ связности Леви-Чивиты почти параконтактных метрических многообразий в адаптированных координатах имеют вид $\tilde{\Gamma}_{ab}^c = \Gamma_{ab}^c$,

$\tilde{\Gamma}_{ab}^n = \omega_{ba} - C_{ab}$, $\tilde{\Gamma}_{an}^b = \tilde{\Gamma}_{na}^b = C_a^b + \psi_a^b$, где $\Gamma_{bc}^a = \frac{1}{2}g^{ad}(\mathbf{e}_b g_{cd} + \mathbf{e}_c g_{bd} - \mathbf{e}_d g_{bc})$, $\psi_a^b = g^{bc}\omega_{ac}$, $C_{ab} = \frac{1}{2}\partial_n g_{ab}$, $C_a^b = g^{bc}C_{ac}$. Здесь эндоморфизм $\psi: TM \rightarrow TM$ определяется из равенства $d\eta(\mathbf{X}, \mathbf{Y}) = \omega(\mathbf{X}, \mathbf{Y}) = g(\psi\mathbf{X}, \mathbf{Y})$. Выполняются также следующие соотношения: $C(\mathbf{X}, \mathbf{Y}) = \frac{1}{2}(\mathbf{L}_\xi g)(\mathbf{X}, \mathbf{Y})$, $g(C\mathbf{X}, \mathbf{Y}) = C(\mathbf{X}, \mathbf{Y})$. Как видно из последних равенств, символом C в зависимости от контекста обозначаются тензоры разных валентностей.

Под внутренней геометрией почти параcontactного метрического многообразия M будем понимать те геометрические свойства M , которые зависят только от параллельного перенесения, определяемого внутренней связностью, и от оснащения D^\perp . К основным инвариантам внутренней геометрии почти параcontactного метрического многообразия мы относим тензор кривизны Схоутена $(R(\mathbf{X}, \mathbf{Y})\mathbf{Z}) = \nabla_X \nabla_Y \mathbf{Z} - \nabla_Y \nabla_X \mathbf{Z} - \nabla_{P[\mathbf{X}, \mathbf{Y}]} \mathbf{Z} - P[Q[\mathbf{X}, \mathbf{Y}], \mathbf{Z}]$, $Q = 1 - P$.

Компоненты тензора Схоутена в адаптированных координатах имеют вид $R_{abc}^d = 2\mathbf{e}_{[a}\Gamma_{b]c}^d + 2\Gamma_{[a|e|}^d \Gamma_{b]c}^e$.

К другим инвариантам внутренней геометрии относятся: дифференциальная форма $\omega = d\eta$, производная Ли $S = \frac{1}{2}\mathbf{L}_\xi g$ метрического тензора g вдоль векторного поля ξ и тензорное поле P , компоненты которого в адаптированных координатах представлены в виде $P_{ad}^c = \partial_n \Gamma_{ad}^c$.

Пусть M – субриманово многообразие контактного типа [7]. Наиболее просто устроены субримановы многообразия с нулевым тензором кривизны Схоутена. Многообразия с нулевым тензором кривизны Схоутена подробно изучались в случае контактного метрического многообразия в работах [6, 8].

Пусть ∇ – внутренняя метрическая связность: $Zg(\mathbf{X}, \mathbf{Y}) = g(\nabla_Z \mathbf{X}, \mathbf{Y}) + g(\mathbf{X}, \nabla_Z \mathbf{Y}) = 0$, $\mathbf{X}, \mathbf{Y}, \mathbf{Z} \in \Gamma(D)$. Дифференцируя последнее равенство повторно и альтернируя полученный результат, получаем $2\omega_{ea}\partial_n g_{bc} - g_{ac}R_{eab}^d - g_{bd}R_{eac}^d = 0$. Учитывая неинвюлятивность распределения D , заключаем, что равенство $R_{eac}^d = 0$ влечет равенство $\partial_n g_{bc} = 0$, откуда следует обращение в нуль тензора P . Заметим, что для отдельных классов многообразий одновременно выполняются следующие условия: $\partial_n g_{bc} \neq 0$, $P_{ad}^c = \partial_n \Gamma_{ad}^c = 0$ [12].

В заключение раздела приведем пример $AQSP$ -многообразия.

Пусть $M = \{(x, y, z, u, v) \in R^5: y \neq 0\}$ – гладкое многообразие размерности 5, оснащенное почти параcontactной метрической структурой $(M, \xi, \eta, \varphi, g, D)$. Здесь: 1) $D = \langle \mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2, \mathbf{e}_3, \mathbf{e}_4 \rangle$, где $\mathbf{e}_1 = \partial_1 - y\partial_5$, $\mathbf{e}_2 = \partial_2$, $\mathbf{e}_3 = \partial_3$, $\mathbf{e}_4 = \partial_4$; $(\partial_1, \partial_2, \partial_3, \partial_4, \partial_5)$ – естественный базис пространства R^5 ; 2) $\xi = \partial_5$; 3) $\eta = dz + ydx$; 4) $\varphi\mathbf{e}_1 = \mathbf{e}_3$, $\varphi\mathbf{e}_2 = \mathbf{e}_4$, $\varphi\mathbf{e}_3 = \mathbf{e}_1$, $\varphi\mathbf{e}_4 = \mathbf{e}_2$, $\varphi\xi = 0$; 5) базис $(\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2, \mathbf{e}_3, \mathbf{e}_4, \xi)$ состоит из ортонормированных векторов. Непосредственно проверяется, что почти параcontactное метрическое многообразие M не является нормальным, но является почти нормальным многообразием. Действительно, $N_\varphi^{(1)}(\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2) = \varphi^2[\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2] + [\mathbf{e}_3, \mathbf{e}_4] - \varphi[\mathbf{e}_3, \mathbf{e}_2] - \varphi[\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_4] - 2d\eta(\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2)\xi = -\varphi^2\xi + \eta(\xi)\xi = \xi$. С другой стороны, $\tilde{N}_\varphi(\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2) = -2d\eta(\mathbf{e}_3, \mathbf{e}_4)\xi = 0$. Таким образом, M – почти квазисасакиево параcontactное многообразие.

Продолженные почти параcontactные метрические структуры

Пусть M – гладкое многообразие нечетной размерности $n = 2m + 1$, $m \geq 1$, с заданной на нем почти параcontactной структурой $(M, \xi, \eta, \varphi, D)$. Тензорное поле $F(\mathbf{X}, \mathbf{Y}, \mathbf{Z}) = g((\tilde{\nabla}_X \varphi)\mathbf{Y}, \mathbf{Z})$, где $\tilde{\nabla}$ – связность Леви-Чивиты, введено и названо в работе [9] фундаментальным тензорным полем, ассоциированным со структурой почти параcontactного метрического многообразия. В зависимости от строения поля F выделяют 12 базисных классов почти параcontactных структур.

Покажем, какое имеют строение фундаментальные тензорные поля, ассоциированные со структурой почти параcontactного метрического многообразия, соответствующие двум наиболее интересным для нас классам F_8 и F_9 . Полный список базисных классов содержится в [9].

$$F_8: F(\mathbf{X}, \mathbf{Y}, \mathbf{Z}) = -\frac{1}{4}\eta(\mathbf{Y})\{F(\varphi^2\mathbf{X}, \varphi^2\mathbf{Z}, \xi) + F(\varphi\mathbf{X}, \varphi\mathbf{Z}, \xi) - F(\varphi^2\mathbf{Z}, \varphi^2\mathbf{X}, \xi) - F(\varphi\mathbf{Z}, \varphi\mathbf{X}, \xi)\} + \\ + \frac{1}{4}\eta(\mathbf{Z})\{F(\varphi^2\mathbf{X}, \varphi^2\mathbf{Y}, \xi) + F(\varphi\mathbf{X}, \varphi\mathbf{Y}, \xi) - F(\varphi^2\mathbf{Y}, \varphi^2\mathbf{X}, \xi) - F(\varphi\mathbf{Y}, \varphi\mathbf{X}, \xi)\} - \\ - \frac{\Theta_{F_5}(\xi)}{2m}\{\eta(\mathbf{Y})g(\varphi\mathbf{X}, \varphi\mathbf{Z}) - \eta(\mathbf{Z})g(\varphi\mathbf{X}, \varphi\mathbf{Y})\};$$

$$F_9: F(\mathbf{X}, \mathbf{Y}, \mathbf{Z}) = -\frac{1}{4}\eta(\mathbf{Y})\{F(\varphi^2\mathbf{X}, \varphi^2\mathbf{Z}, \xi) + F(\varphi\mathbf{X}, \varphi\mathbf{Z}, \xi) - F(\varphi^2\mathbf{Z}, \varphi^2\mathbf{X}, \xi) - F(\varphi\mathbf{Z}, \varphi\mathbf{X}, \xi)\} + \\ + \frac{1}{4}\eta(\mathbf{Z})\{F(\varphi^2\mathbf{X}, \varphi^2\mathbf{Y}, \xi) + F(\varphi\mathbf{X}, \varphi\mathbf{Y}, \xi) - F(\varphi^2\mathbf{Y}, \varphi^2\mathbf{X}, \xi) - F(\varphi\mathbf{Y}, \varphi\mathbf{X}, \xi)\}.$$

Пусть теперь D – распределение субриманова многообразия контактного типа. Адаптированной карте $k(x^i)$ многообразия M поставим в соответствие адаптированную карту $\tilde{k}(x^l)$, $(x^l) = (x^i, x^{n+a})$. Если $\mathbf{p} \in D_x$, то $\tilde{k}: \mathbf{p} \rightarrow (x^i, x^{n+a})$, где $\mathbf{p} = x^{n+a}\mathbf{e}_a$.

Векторные поля $(\mathbf{e}_a = \partial_a - \Gamma_a^n \partial_n - \Gamma_{ac}^b x^{n+c} \partial_{n+b}, \partial_n, \partial_{n+a}) = (A_I)$ определяют [13] на распределении D как на гладком многообразии неголономное (адаптированное) поле базисов, а формы $(dx^a, \Theta^n = dx^a + \Gamma_a^n dx^a, \Theta^{n+a} = dx^{n+a} + \Gamma_{bc}^a x^{n+c} dx^b)$ – соответствующее поле кобазисов. Проводя необходимые вычисления, получаем следующие структурные уравнения:

$$\begin{aligned} [\mathbf{e}_a, \mathbf{e}_b] &= 2\omega_{ba}\partial_n + x^{n+d}R_{bad}^c\partial_{n+c}, \\ [\mathbf{e}_a, \partial_n] &= x^{n+d}\partial_n\Gamma_{ad}^c\partial_{n+c}, \\ [\mathbf{e}_a, \partial_{n+b}] &= \Gamma_{ab}^c\partial_{n+c}, \end{aligned}$$

где R_{bad}^c – компоненты тензора Схоутена в адаптированных координатах.

Предложение 2 [3, 13, 14]. Пусть ∇ – внутренняя связность с тензором кривизны Схоутена $R(\mathbf{X}, \mathbf{Y})\mathbf{Z}$. Тогда для всех $\mathbf{X}, \mathbf{Y} \in \Gamma(D)$ и $\mathbf{p} \in D$ имеют место следующие равенства:

$$\begin{aligned} [\mathbf{X}^h, \mathbf{Y}^h]_{\mathbf{p}} &= [\mathbf{X}, \mathbf{Y}]^h - \{R(\mathbf{X}, \mathbf{Y})\mathbf{p}\}^v, [\mathbf{X}^h, \xi^h]_{\tilde{\mathbf{p}}} = [\mathbf{X}, \xi]^h + \{P(\mathbf{X}, \mathbf{p})\}^v, \\ [\mathbf{X}^h, \mathbf{Y}^v] &= (\nabla_{\mathbf{X}}\mathbf{Y})^v, [\mathbf{X}^v, \xi^h] = [\mathbf{X}, \xi]^v, \\ \mathbf{X}^h &= \mathbf{X}^a\mathbf{e}_a, \mathbf{X}^v = \mathbf{X}^a\partial_{n+a}, \text{ если } \mathbf{X} = \mathbf{X}^a\mathbf{e}_a. \end{aligned}$$

Определим на многообразии D почти параконтактную структуру $(\tilde{D}, J, \mathbf{u}, \lambda = \eta \circ \pi_*, D)$, полагая $J\mathbf{X}^h = \mathbf{X}^v, J\mathbf{X}^v = \mathbf{X}^h$. Здесь $\pi: D \rightarrow M$ – естественная проекция. Определим далее на многообразии M метрику \tilde{g} , подчиняющуюся равенствам

$$\tilde{g}(\mathbf{X}^h, \mathbf{Y}^h) = -\tilde{g}(\mathbf{X}^v, \mathbf{Y}^v) = g(\mathbf{X}, \mathbf{Y}), \quad \tilde{g}(\mathbf{X}^h, \mathbf{Y}^v) = \tilde{g}(\mathbf{X}^h, \mathbf{u}) = \tilde{g}(\mathbf{X}^v, \mathbf{u}) = 0.$$

Имеют место следующие предложения.

Предложение 3. Структура $(\tilde{D}, J, \mathbf{u} = \partial_n, \lambda = \eta \circ \pi_*, \tilde{g}, D)$ является почти параконтактной метрической структурой.

Доказательство. В соответствии с определением тензоров J, \tilde{g} получаем

$$\begin{aligned} 1) \tilde{g}(J\mathbf{X}^h, J\mathbf{Y}^h) &= \tilde{g}(\mathbf{X}^v, \mathbf{Y}^v) = -g(\mathbf{X}, \mathbf{Y}) = -\tilde{g}(\mathbf{X}^h, \mathbf{Y}^h); \\ 2) \tilde{g}(J\mathbf{X}^v, J\mathbf{Y}^v) &= \tilde{g}(\mathbf{X}^h, \mathbf{Y}^h) = g(\mathbf{X}, \mathbf{Y}) = -\tilde{g}(\mathbf{X}^v, \mathbf{Y}^v). \end{aligned}$$

Пусть $F(\mathbf{X}, \mathbf{Y}, \mathbf{Z})$ – фундаментальное тензорное поле, ассоциированное с продолженной структурой. Проводя необходимые вычисления, получаем следующие значения $F(\mathbf{X}, \mathbf{Y}, \mathbf{Z})$ для базисных векторов:

$$\begin{aligned} F(\mathbf{e}_a, \mathbf{e}_b, \mathbf{e}_c) &= F(\mathbf{e}_a, \partial_{n+b}, \partial_{n+c}) = \frac{1}{2}(R_{baoc} - R_{obac}), \\ F(\partial_{n+a}, \mathbf{e}_b, \partial_{n+c}) &= -F(\partial_{n+a}, \partial_{n+c}, \mathbf{e}_b) = -\frac{1}{2}R_{oabc}, \\ F(\mathbf{e}_a, \mathbf{e}_b, \partial_n) &= -F(\mathbf{e}_a, \partial_n, \mathbf{e}_b) = \frac{1}{2}\partial_n\Gamma_{ao}^e g_{eb}, \\ F(\mathbf{e}_a, \partial_{n+b}, \partial_n) &= -F(\mathbf{e}_a, \partial_n, \partial_{n+b}) = C_{ab} + \omega_{ab}, \\ F(\partial_{n+a}, \mathbf{e}_b, \partial_n) &= -F(\partial_{n+a}, \partial_n, \mathbf{e}_b) = C_{ab}, \\ F(\partial_{n+a}, \partial_{n+c}, \partial_n) &= -F(\partial_{n+a}, \partial_n, \partial_{n+c}) = -\frac{1}{2}\partial_n\Gamma_{bo}^e g_{ea}, \\ F(\partial_n, \mathbf{e}_b, \mathbf{e}_c) &= F(\partial_n, \partial_{n+b}, \partial_{n+c}) = -\frac{1}{2}(\partial_n\Gamma_{co}^e g_{eb} + \partial_n\Gamma_{bo}^e g_{ec}), \\ F(\partial_n, \mathbf{e}_a, \partial_{n+b}) &= -F(\partial_n, \partial_{n+b}, \mathbf{e}_a) = \omega_{ab}. \end{aligned}$$

Здесь использованы следующие обозначения: $R_{aob}^e = R_{adb}^e x^{n+d}$, $\Gamma_{ao}^e = \Gamma_{ad}^e x^{n+d}$, $R_{badc} = R_{bad}^e g_{ec}$.

Пусть теперь M – субриманово многообразие с нулевым тензором Схоутена. В этом случае тензор $F(\mathbf{X}, \mathbf{Y}, \mathbf{Z})$ имеет 4 ненулевые компоненты:

$$\begin{aligned} F(\mathbf{e}_a, \partial_{n+b}, \partial_n) &= F(\partial_n, \partial_{n+b}, \mathbf{e}_a) = \omega_{ba}, \\ F(\mathbf{e}_a, \partial_n, \partial_{n+b}) &= F(\partial_n, \mathbf{e}_a, \partial_{n+b}) = \omega_{ab}. \end{aligned}$$

Теорема 1. Пусть M – субриманово многообразие с нулевым тензором Схоутена. Тогда продолженная почти параконтактная метрическая структура $(\tilde{D}, J, \mathbf{u} = \partial_n, \lambda = \eta \circ \pi_*, \tilde{g}, D)$ является почти квазисасакиевой параконтактной структурой.

Доказательство. Докажем, что фундаментальная форма $\Omega(\mathbf{X}, \mathbf{Y}) = g(\mathbf{X}, J\mathbf{Y})$ замкнута. Действительно, полагая, например, $\mathbf{X} = \boldsymbol{\varepsilon}_a$, $\mathbf{Y} = \boldsymbol{\varepsilon}_b$, $\mathbf{Z} = \partial_{n+c}$, получаем

$$3d\Omega(\boldsymbol{\varepsilon}_a, \boldsymbol{\varepsilon}_b, \partial_{n+c}) = \boldsymbol{\varepsilon}_a \Omega(\boldsymbol{\varepsilon}_b, \partial_{n+c}) + \boldsymbol{\varepsilon}_b \Omega(\partial_{n+c}, \boldsymbol{\varepsilon}_a) + \partial_{n+c} \Omega(\boldsymbol{\varepsilon}_a, \boldsymbol{\varepsilon}_b) - \Omega([\boldsymbol{\varepsilon}_a, \boldsymbol{\varepsilon}_b], \partial_{n+c}) - \Omega([\boldsymbol{\varepsilon}_b, \partial_{n+c}], \boldsymbol{\varepsilon}_a) - \Omega([\partial_{n+c}, \boldsymbol{\varepsilon}_a], \boldsymbol{\varepsilon}_b) = \boldsymbol{\varepsilon}_a g_{bc} - \boldsymbol{\varepsilon}_b g_{ca} + g(\Gamma_{bc}^d \boldsymbol{\varepsilon}_a, \partial_{n+a}) - g(\Gamma_{ac}^d \partial_{n+d}, \partial_{n+b}) = 0.$$

Теорема 2. Пусть M – субриманово многообразие с нулевым тензором Схоутена. Тогда продолженная почти квазисасакиева параконтактная структура $(\tilde{D}, J, \mathbf{u} = \partial_n, \lambda = \eta \circ \pi_*, \tilde{g}, D)$ принадлежит классу $F_8 \oplus F_9$.

Доказательство. Для случая продолженных структур $F_8 \oplus F_9$: $F(\mathbf{X}, \mathbf{Y}, \mathbf{Z}) = -\frac{1}{2}\eta(\mathbf{Y})\{F(\varphi^2\mathbf{X}, \varphi^2\mathbf{Z}, \xi) + F(\varphi\mathbf{X}, \varphi\mathbf{Z}, \xi) - F(\varphi^2\mathbf{Z}, \varphi^2\mathbf{X}, \xi) - F(\varphi\mathbf{Z}, \varphi\mathbf{X}, \xi)\} + \frac{1}{2}\eta(\mathbf{Z})\{F(\varphi^2\mathbf{X}, \varphi^2\mathbf{Y}, \xi) + F(\varphi\mathbf{X}, \varphi\mathbf{Y}, \xi) - F(\varphi^2\mathbf{Y}, \varphi^2\mathbf{X}, \xi) - F(\varphi\mathbf{Y}, \varphi\mathbf{X}, \xi)\}.$

Подставляя в левую часть последнего равенства поочередно $F(\boldsymbol{\varepsilon}_a, \partial_{n+b}, \partial_n)$, $F(\boldsymbol{\varepsilon}_a, \partial_n, \partial_{n+b})$, убеждаемся в справедливости теоремы.

Список источников

1. Kaneyuki S., Willams F.L. Almost paracontact and parahodge structures on manifolds // Nagoya Math. J. 1985. № 99. P. 173–187.
2. Zamkovoy S. Canonical connections on paracontact manifolds // Ann. Glob. Anal. Geom. 2009. № 36. P. 37–60.
3. Galaev S.V. Intrinsic geometry of almost contact Kahlerian manifolds // Acta Mathematica Academiae Paedagogicae Nyiregyhaziensis. 2015. Vol. 31, № 1. P. 35–46.
4. Букушева А.В. Нелинейные связности и внутренние полупульверизации на распределении с обобщенной лагранжевой метрикой // ДГМФ. 2015. № 46. С. 58–62.
5. Galaev C.B. N-продолженные симплектические связности в почти контактных метрических пространствах // Изв. вузов. Математика. 2017. № 3. С. 15–23.
6. Galaev C.B. Допустимые гиперкомплексные структуры на распределениях сасакиевых многообразий // Изв. Саратовского ун-та. Нов. сер. Сер. Математика. Механика. Информатика. 2016. Т. 16, № 3. С. 263–272.
7. Galaev C.B. Классификация продолженных биметрических структур на распределениях ненулевой кривизны субримановых многообразий // Изв. Саратовского ун-та. Нов. сер. Сер. Математика. Механика. Информатика. 2018. Т. 18, № 3. С. 263–273.
8. Galaev C.B. О классификации продолженных биметрических структур на субримановых многообразиях с нулевым тензором кривизны Схоутена // Вестн. Башкирского ун-та. 2017. Т. 22, № 4. С. 936–939.
9. Nakova G., Zamkovoy S. Eleven classes of almost paracontact manifolds with semi-Riemannian metric of $(n+1; n)$ // Recent Progress in Differential Geometry and its Related Fields. Adachi T., Hashimoto H., Hristov M., eds. Singapore: World Scientific Publ., 2012. P. 119–136.
10. Welyczko J. On Legendre Curves in 3-Dimensional Normal Almost Paracontact Metric Manifolds // Result. Math. 2009. № 54. P. 377–387.
11. Bukusheva A.V., Galaev S.V. Almost contact metric structures defined by connection over distribution // Bulletin of the Transilvania University of Brasov Series III: Mathematics, Informatics, Physics. 2011. Vol. 4 (53), № 2. P. 13–22.
12. Букушева А.В. Многообразия Кенмоцу с распределением нулевой кривизны // Вестн. Томского гос. ун-та. Математика и механика. 2020. № 64. С. 5–14.
13. Galaev C.B. Геометрическая интерпретация тензора кривизны Вагнера для случая многообразия с контактной метрической структурой // СМЖ. 2016. Т. 57, № 3. С. 632–640.
14. Galaev S.V. Admissible Hyper-Complex Pseudo-Hermitian Structures // Lobachevskii J. of Mathematics. 2018. Vol. 39, № 1. P. 71–76.

References

1. Kaneyuki S., Willams F.L. Almost paracontact and parahodge structures on manifolds. *Nagoya Math. J.* 1985;(99):173-187.
2. Zamkovoy S. Canonical connections on paracontact manifolds. *Ann. Glob. Anal. Geom.* 2009;(36):37-60.
3. Galaev S.V. Intrinsic geometry of almost contact Kahlerian manifolds. *Acta Mathematica Academiae Paedagogicae Nyiregyhaziensis.* 2015;31(1):35-46.
4. Bukusheva A.V. Nonlinear connections and intrinsic semi-spray on distribution with generalized lagrangian metric. *DGMF = Differential Geometry of Manifolds of Figures.* 2015;(46):58-62. (In Russ.).

5. Galaev S.V. N-extended symplectic connections in almost contact metric spaces. *Russian Mathematics*. 2017;61(3):12-19.
6. Galaev S.V. Admissible hypercomplex structures on distributions of Sasakian manifolds. *Izvestiya Saratovskogo universiteta. Novaya seriya. Seriya. Matematika. Mekhanika. Informatika = Izvestiya of Saratov University. Mathematics. Mechanics. Informatics*. 2016;16(3):263-272. (In Russ.).
7. Galaev S.V. Classification of prolonged Bimetric structures on distributions of non-zero curvature of sub-Riemannian manifolds. *Izvestiya Saratovskogo universiteta. Novaya seriya. Seriya. Matematika. Mekhanika. Informatika = Izvestiya of Saratov University. Mathematics. Mechanics. Informatics*. 2018;18(3):263-273. (In Russ.).
8. Galaev S.V. On classification of continuous Bimetric structures on sub-riemannian manifolds with zero Schouten tensor. *Vestnik Bashkirskogo universiteta = Bulletin of Bashkir University*. 2017;22(4):936-939. (In Russ.).
9. Nakova G., Zamkovoy S. Eleven classes of almost paracontact manifolds with semi-Riemannian metric of $(n+1; n)$. Adachi T., Hashimoto H., Hristov M. (Eds.). *Recent Progress in Differential Geometry and its Related Fields*. Singapore: World Scientific Publ.; 2012:119-136.
10. Welyczko J. On Legendre Curves in 3-Dimensional Normal Almost Paracontact Metric Manifolds. *Result. Math*. 2009;(54):377-387.
11. Bukusheva A.V., Galaev S.V. Almost contact metric structures defined by connection over distribution. *Bulletin of the Transilvania University of Brasov Series III: Mathematics, Informatics, Physics*. 2011;4(2):13-22.
12. Bukusheva A.V. Kenmotsu manifolds with a zero curvature distribution. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika = Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics*. 2020;(64):5-14. (In Russ.).
13. Galaev S.V. Geometric interpretation of the Wagner curvature tensor in the case of a manifold with contact metric structure. *Siberian Mathematical Journal*. 2016;57(3):498-504, doi: 10.1134/S0037446616030101.
14. Galaev S.V. Admissible Hyper-Complex Pseudo-Hermitian Structures. *Lobachevskii Journal of Mathematics*. 2018;39(1):71-76.

Информация об авторе

С.В. Галаев – кандидат физико-математических наук, доцент, заведующий кафедрой геометрии.

Information about the author

S.V. Galaev - Candidate of Science (Physics and Mathematics), Associate Professor, Head of the Department of Geometry.

Статья поступила в редакцию 26.09.2022; одобрена после рецензирования 24.10.2022; принята к публикации 02.03.2023.
The article was submitted 26.09.2022; approved after reviewing 24.10.2022; accepted for publication 02.03.2023.

Научная статья

УДК 539.384.2

doi: 10.18522/1026-2237-2023-1-11-16

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОГИБОВ ФИЗИЧЕСКИ НЕЛИНЕЙНОЙ БАЛКИ НА УПРУГОМ ОСНОВАНИИ

Павел Викторович Кауров

Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна,
Санкт-Петербург, Россия
pusto@mail.ru

Аннотация. Рассмотрены вопросы определения прогибов балки, лежащей на упругом основании с постоянным коэффициентом жесткости, при этом балка выполнена из материала, имеющего нелинейную зависимость между напряжением и деформацией. Физическая нелинейность материала балки учитывается путем аппроксимации зависимости между напряжением и деформацией кубической параболой; такая аппроксимация хорошо описывает кривые деформирования нелинейно-упругого тела с одинаковой диаграммой работы материала на растяжение и сжатие. В качестве примера рассмотрены прогибы нелинейно-упругой балки прямоугольного поперечного сечения, лежащей на основании Винклера и несущей равномерно распределенную нагрузку по всей длине для трех случаев опорных закреплений по краям: с двумя шарнирными опорами, с двумя заделками и с заделкой и шарнирной опорой. Методом последовательных приближений получено решение нелинейного уравнения для прогибов, зависящее от безразмерных параметров, учитывающих влияние упругого основания, физическую нелинейность материала и равномерно распределенную нагрузку. Приведена зависимость изменения величины максимального относительного прогиба от коэффициента постели и распределенной нагрузки, полученная с учетом влияния физической нелинейности материала для трех случаев опорных закреплений. Результаты проведенных расчетов показали, что наличие дополнительных связей уменьшает влияние физической нелинейности материала балки на её прогибы.

Ключевые слова: физическая нелинейность, упругое основание, прогиб балки, распределенная нагрузка

Для цитирования: Кауров П.В. Определение прогибов физически нелинейной балки на упругом основании // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. 2023. № 1. С. 11–16.

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

Original article

DETERMINATION OF DEFLECTIONS OF A PHYSICALLY NON-LINEAR BEAM ON ELASTIC BASE

Pavel V. Kaurov

Saint Petersburg State University of Industrial Technology and Design, Saint Petersburg, Russia
pusto@mail.ru

Abstract. The article deals with the issues of determining the deflections of a beam lying on an elastic foundation with a constant coefficient of rigidity, while the beam is made of a material that has a non-linear relationship between stresses and deformations. The physical non-linearity of the beam material is taken into account by approximating the relationship between stresses and strains with a cubic parabola; such an approximation well describes the deformation curves of a non-linear elastic body with the same diagram of the work of the material in tension and compression. As an example, the deflections of a non-linear elastic beam of rectangular cross

© Кауров П.В., 2023

section, which lies on the Winkler base and carries a uniformly distributed load along the entire length, are considered for three cases of support fastenings at the edges: with two hinged supports, with two terminations, and with termination and hinged support. The method of successive approximations is used to obtain a solution to the non-linear equation for deflections, which depends on dimensionless parameters that take into account the influence of an elastic foundation, the physical non-linearity of the material, and a uniformly distributed load. The dependence of the change in the value of the maximum relative deflection on the coefficient of the bed and the distributed load, obtained by calculation, taking into account the influence of the physical non-linearity of the material for three cases of support fastenings, is given. The results of the calculations showed that the presence of additional bonds reduces the influence of the physical non-linearity of the beam material on its deflections.

Keywords: physical non-linearity, elastic base, beam deflections, distributed load

For citation: Kaurov P.V. Determination of Deflections of a Physically Non-Linear Beam on Elastic Base. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2023;(1):11-16. (In Russ.).

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

Введение

При математическом моделировании напряженно-деформированного состояния элемента конструкции в виде стержня необходимо знать физико-механические характеристики его материала. Экспериментальные данные по исследованию упругих свойств материалов при растяжении и сжатии в большинстве своем показывают нелинейную зависимость между напряжением и деформацией [1, 2], поэтому для учета физической нелинейности материала применяется аппроксимация диаграммы деформирования степенными зависимостями [3, 4].

В работах [5, 6] рассматривается расчет балок симметричного сечения, выполненных из нелинейно-упругого материала, для которого зависимость между напряжением и деформацией описывается кубической параболой и приведен расчет балки на действие сосредоточенной силы с использованием обобщенного метода конечных разностей. В [7] показан пример расчета балки из нелинейно-упругого материала модифицированным методом последовательных нагружений. В статьях [3, 4] приводятся результаты расчетов прогибов балок из цементного и полимерного бетона методом последовательных нагружений при аппроксимации диаграмм деформирования комбинированными степенными зависимостями. В статье [8] рассматривается задача о нестационарных упругодиффузионных колебаниях ортотропной балки Бернулли – Эйлера, находящейся под действием распределенной поперечной нагрузки. Балка находится на упругом основании, моделью которого является основание Винклера. В работе [9] рассматривается шарнирно опертая армированная балка из бимодульного материала на упругом основании Винклера под действием сосредоточенной силы. В публикации [10] представлены результаты расчета системы шарнирно соединенных железобетонных балок на упругом основании Винклера с учетом физической нелинейности материала балок, которая учитывается через переменную жесткость участков Жемочкина.

Приведенный анализ литературных данных показывает, что определение напряженно-деформированного состояния физически нелинейной балки на упругом основании исследовано недостаточно и поэтому является актуальной задачей.

Постановка задачи и основные уравнения

Рассматривается балка длиной L прямоугольного поперечного сечения шириной b и высотой h на упругом основании Винклера с коэффициентом постели K , с тремя случаями опорных закреплений по краям: схема I – левая опора шарнирно-неподвижная, правая опора шарнирно-подвижная (рис. 1а), схема II – левая опора жестко заделана, правая опора шарнирно-подвижная (рис. 1б), схема III – левая и правая опоры жестко заделаны (рис. 1в). Для каждой из трех расчетных схем балки начало координат выбрано на левой опоре, горизонтальная ось X направлена вправо, а вертикальная ось Y – вниз; балка нагружена равномерно распределенной нагрузкой интенсивностью p (рис. 1).

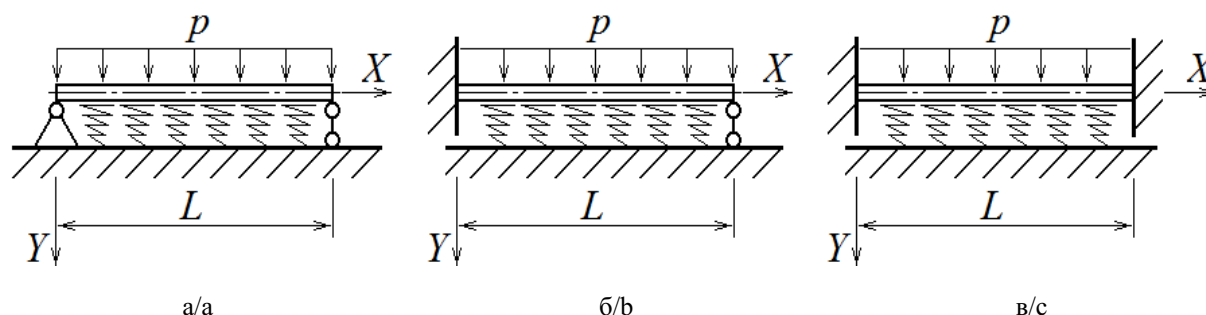


Рис. 1. Расчетные схемы балки на упругом основании: а – схема I; б – схема II; в – схема III
 / Fig. 1. Design schemes of a beam on an elastic foundation: a - scheme I; b - scheme II; c - scheme III

Зависимость между напряжением σ и деформацией ε для материала балки принята в виде выражения $\sigma = E_1 \varepsilon - E_3 \varepsilon^3$, где E_1 – начальный модуль упругости; E_3 – постоянная, учитывающая физическую нелинейность материала. Такое выражение, основанное на гипотезе о нелинейно-упругом теле с одинаковой диаграммой работы материала на растяжение и сжатие, хорошо описывает кривые деформирования бетона [2, 11, 12], композитов [13], некоторых видов сплавов и сталей [1, 2, 14], которые имеют достаточно сильную физическую нелинейность.

Выражение для зависимости изгибающего момента M от кривизны в пределах малых прогибов имеет вид [3–7]

$$M(X) = E_1 I_1 \frac{d^2 Y}{dX^2} - E_3 I_3 \left[\frac{d^2 Y}{dX^2} \right]^3, \quad (1)$$

где $I_1 = bh^3/12$, $I_3 = bh^5/80$ – осевые моменты инерции поперечного сечения.

Для случая балки на упругом основании уравнение равновесия принимает вид [8–10]

$$\frac{d^2 M}{dX^2} = p - KY(X). \quad (2)$$

Дважды продифференцировав выражение (1) и подставив в уравнение для изгибающего момента (2), получим уравнение для прогибов в безразмерном виде

$$\frac{d^4 y}{dx^4} = q - 4\beta^4 y(x) + R \left[6 \frac{d^2 y}{dx^2} \left(\frac{d^3 y}{dx^3} \right)^2 + 3 \left(\frac{d^2 y}{dx^2} \right)^2 \frac{d^4 y}{dx^4} \right], \quad (3)$$

где $y = Y/L$ – безразмерная вертикальная координата; $x = X/L = 0 \dots 1$ – безразмерная горизонтальная координата; $q = pL^3/E_1 I_1$ – безразмерный параметр распределенной нагрузки; $\beta = L \cdot [K/(4 \cdot E_1 I_1)]^{1/4}$ – безразмерный параметр, учитывающий влияние упругого основания; $R = E_3 I_3 / (E_1 I_1 \cdot L^2)$ – безразмерный параметр, учитывающий физическую нелинейность материала.

Для схем I–III (рис. 1) граничные условия для прогибов y_I – y_{III} имеют вид

$$y_I(0) = 0, \quad \left. \frac{d^2 y_I}{dx^2} \right|_{x=0} = 0, \quad y_I(1) = 0, \quad \left. \frac{d^2 y_I}{dx^2} \right|_{x=1} = 0, \quad (4)$$

$$y_{II}(0) = 0, \quad \left. \frac{dy_{II}}{dx} \right|_{x=0} = 0, \quad y_{II}(1) = 0, \quad \left. \frac{d^2 y_{II}}{dx^2} \right|_{x=1} = 0, \quad (5)$$

$$y_{III}(0) = 0, \quad \left. \frac{dy_{III}}{dx} \right|_{x=0} = 0, \quad y_{III}(1) = 0, \quad \left. \frac{dy_{III}}{dx} \right|_{x=1} = 0. \quad (6)$$

Метод решения

Для решения нелинейного уравнения (3) в данной работе используется метод последовательных приближений Пикара [15], согласно которому сначала решается уравнение для определения нулевого приближения в виде $\frac{d^4 y_0}{dx^4} = F_0 = q$, затем находятся последующие приближения путем последовательного решения уравнений:

$$\frac{d^4 y_i}{dx^4} = F_{i-1}(x) = q - 4\beta^4 y_{i-1} + R \left[6 \frac{d^2 y_{i-1}}{dx^2} \left(\frac{d^3 y_{i-1}}{dx^3} \right)^2 + 3 \left(\frac{d^2 y_{i-1}}{dx^2} \right)^2 \frac{d^4 y_{i-1}}{dx^4} \right],$$

где выражения для прогибов $y_i(x)$ для каждого приближения имеют вид

$$y_i(x) = U_{4,i}(x) + A_i \frac{x^3}{6} + B_i \frac{x^2}{2} + C_i x + D_i,$$

$$\begin{aligned} \frac{d^2 y_i}{dx^2} &= U_{2,i}(x) + A_i x + B_i, & \frac{d^3 y_i}{dx^3} &= U_{1,i}(x) + A_i, \\ U_{4,i}(x) &= \int U_{3,i}(x) dx, & U_{3,i}(x) &= \int U_{2,i}(x) dx, \\ U_{2,i}(x) &= \int U_{1,i}(x) dx, & U_{1,i}(x) &= \int F_{i-1}(x) dx. \end{aligned}$$

Постоянные интегрирования A_i , B_i , C_i и D_i определяются из граничных условий (4)–(6) для каждой из схем I–III:

$$\begin{aligned} D_i &= 0, \quad A_{I,i} = -U_{2,i}(1), \quad B_{I,i} = 0, \quad C_{I,i} = \frac{U_{2,i}(1)}{6} - U_{4,i}(1), \\ A_{II,i} &= 3U_{4,i}(1) - 1,5U_{2,i}(1), \quad B_{II,i} = 0,5U_{2,i}(1) - 3U_{4,i}(1), \quad C_{II,i} = 0, \\ A_{III,i} &= 12U_{4,i}(1) - 6U_{3,i}(1), \quad B_{III,i} = 2U_{3,i}(1) - 6U_{4,i}(1), \quad C_{III,i} = 0. \end{aligned}$$

Численные результаты

Начиная с третьего приближения, выражения для интегралов U_1 – U_4 имеют громоздкий вид, поэтому для их определения использовался численный метод трапеций с равномерным шагом 0,01. Расчеты, проведенные для десяти приближений, показывают, что, начиная с пятого приближения, результаты решения практически не отличаются друг от друга.

Величины максимальных относительных прогибов $f = Y_{max}/L$, полученных расчетом в десятом приближении для трех схем балки, в зависимости от безразмерных параметров задачи q , β и R показаны на рис. 2.

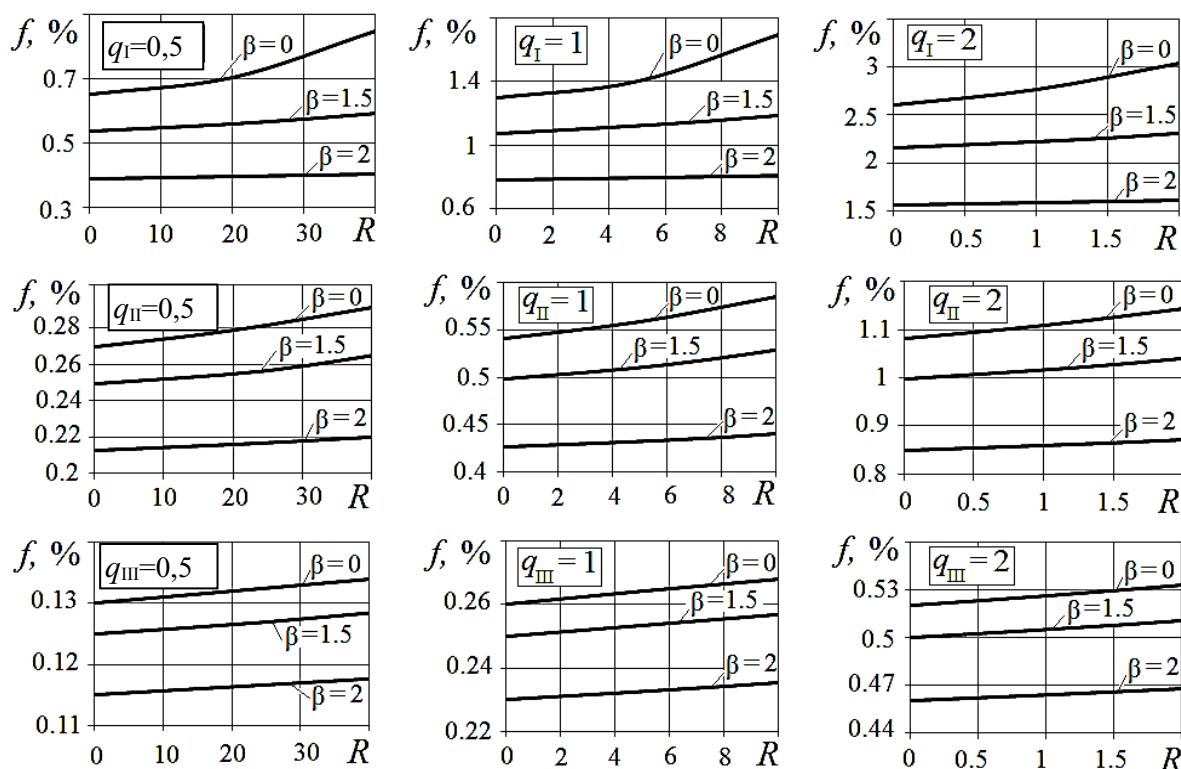


Рис. 2. Зависимость максимального относительного прогиба f от безразмерных параметров задачи q , β и R
 / Fig. 2. The dependence of the maximum relative deflection f on the dimensionless parameters q , β and R

Сравнивая влияние нелинейности на прогибы при различных вариантах закрепления (рис. 2), можно сделать следующие выводы:

1) для всех рассмотренных случаев зависимость максимального относительного прогиба f от параметра физической нелинейности материала R близка к линейной, кроме шарнирно опертой балки без упругого основания (кривые $\beta=0$ для $q=0,5\dots 2$), где эта зависимость близка к параболической;

2) наложение дополнительных связей, таких как наличие заделки вместо шарнира в схемах II и III, увеличение параметра β , учитывающего влияние упругого основания, ведет к уменьшению влияния физической нелинейности материала балки на её прогибы.

Заключение

В результате нелинейного расчета исследовано напряженно-деформированное состояние физически нелинейной балки прямоугольного поперечного сечения на упругом основании Винклера, нагруженной равномерно распределенной нагрузкой с тремя случаями опорных закреплений по краям.

Расчет выполнен методом последовательных приближений для случая описания зависимости между напряжением и деформацией материала балки кубической параболой.

Приведена зависимость максимального относительного прогиба от параметра физической нелинейности материала балки при различных значениях величины коэффициента постели и распределенной нагрузки для трех видов опорных закреплений.

Список источников

1. Лукаш П.А. Основы нелинейной строительной механики. М.: Стройиздат, 1978. 208 с.
2. Петров В.В., Кривошейн И.В. Методы расчета конструкций из нелинейно деформируемого материала. М.: АСВ, 2009. 206 с.
3. Селяев В.П., Уткина В.Н., Грязнов С.Ю., Бабушкина Д.Р. Определение прогибов балки из нелинейно-упругого материала методом Ритца – Тимошенко при аппроксимации диаграмм деформирования комбинированными степенными зависимостями // Эксперт: теория и практика. 2021. № 2. С. 42–50. Doi: 10.51608/26867818_2021_2_42.
4. Селяев В.П., Грязнов С.Ю., Безрукова Е.С., Бабушкина Д.Р. Влияние вида функциональной зависимости « $\sigma - \epsilon$ » на расчетные прогибы балки из нелинейно деформируемого материала // Эксперт: теория и практика. 2022. № 1. С. 46–54. Doi: 10.51608/26867818_2022_1_46.
5. Александровский М.В. Использование обобщенного метода конечных разностей для расчета балок из нелинейно-упругого материала // Транспортные сооружения. 2019. № 4. URL: <https://t-s.today/PDF/05SATS419.pdf> (дата обращения: 01.06.2022). Doi: 10.15862/05SATS419.
6. Александровский М.В. Использование метода последовательных аппроксимаций для расчета балок из нелинейно-упругого материала // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. 2019. № 5. С. 242–247.
7. Горбачева О.А. Расчет конструкций из нелинейно-упругого материала модифицированным методом последовательных нагружений // Эксперт: теория и практика. 2022. № 2. С. 28–31. Doi: 10.51608/26867818_2022_2_28.
8. Вестяк А.В., Земсков А.В., Тарлаковский Д.В. Модель нестационарного изгиба упругодиффузионной балки Бернулли – Эйлера на винклеровском основании // Механика композиционных материалов и конструкций. 2021. Т. 27, № 1. С. 110–124. Doi: 10.33113/mkkm.ras.2021.27.01.110_124.08.
9. Кадомцева Е.Э., Стрельников Г.П., Кармазина Л.А. Исследование влияния коэффициента постели на НДС армированных балок с заполнителем из бимодульного материала на упругом основании // Инженерный вестн. Дона. 2017. № 3. URL: <https://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2017/4271> (дата обращения: 01.06.2022).
10. Козунова О.В. Развитие теории расчета шарнирно соединенных балок на упругом основании // Наука и техника. 2020. Т. 19, № 5. С. 389–394. Doi: 10.21122/2227-1031-2020-19-5-389-394.
11. Карпенко Н.И. Общие модели механики железобетона. М.: Стройиздат, 1996. 416 с.
12. Залигер Р. Железобетон, его расчет и проектирование. М.: ГНТИ, 1931. 694 с.
13. Тарнопольский Ю.М., Кинцыа Т.Я. О механизме передачи усилий при деформации ориентированных стеклопластиков // Механика полимеров. 1965. № 1. С. 28–36.
14. Писаренко Г.С., Яковлев А. П., Матвеев В.В. Вибропоглощающие свойства конструкционных материалов. Киев: Наукова думка, 1971. 325 с.
15. Корн Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров. М.: Наука, 1973. 832 с.

References

1. Lukash P.A. *Fundamentals of non-linear structural mechanics*. Moscow: Stroiizdat Publ.; 1978. 208 p. (In Russ.).
2. Petrov V.V., Krivosheyn I.V. *Methods for calculating structures from non-linearly deformable material*. Moscow: ASV Publ.; 2009. 206 p. (In Russ.).
3. Selyaev V.P., Utkina V.N., Gryaznov S.Yu., Babushkina D.R. Determination of beam deflections from a non-linear elastic material during the approximation of deformation diagrams by combined degree dependences using the Ritz-Timoshenko method. *Ekspert: teoriya i praktika = Expert: Theory and Practice*. 2021;(2):42-50, doi: 10.51608/26867818_2021_2_42. (In Russ.).
4. Selyaev V.P., Gryaznov S.Yu., Bezrukova E.S., Babushkina D.R. Influence of the type of functional dependence " $\sigma - \varepsilon$ " on the designed bending of a beam from non-linear deformable material. *Ekspert: teoriya i praktika = Expert: Theory and Practice*. 2022;(1):46-54, doi: 10.51608/26867818_2022_1_46. (In Russ.).
5. Aleksandrovskii M.V. Use of generalized finite difference method for calculation of beams from non-linear elastic material. *Transportnyye sooruzheniya = Journal of Transport Engineering*. 2019;(4), doi: 10.15862/05SATS419. Available from: <https://t-s.today/PDF/05SATS419.pdf> [Accessed 1st June 2022]. (In Russ.).
6. Aleksandrovskii M.V. Using the method of sequential approximations for the calculation of beams from a non-linear-elastic material. *Izvestiya vyzov. Tekhnologiya tekstil'noi promyshlennosti = Bulletin of Higher Educational Institutions. Technology of the Textile Industry*. 2019;(5):242-247. (In Russ.).
7. Gorbacheva O.A. Calculation of structures made of nonlinear elastic material by the modified method of sequential load. *Ekspert: teoriya i praktika = Expert: Theory and Practice*. 2022;(2):28-31, doi: 10.51608/26867818_2022_2_28. (In Russ.).
8. Vestyak A.V., Zemskov A.V., Tarlakovskii D.V. Unsteady elastic diffusion bending model for a Bernully-Euler beam on a Winkler foundation. *Mekhanika kompozitsionnykh materialov i konstruksii = Mechanics of Composite Materials and Structures*. 2021;27(1):110-124, doi: 10.33113/mkmk.ras.2021.27.01.110_124.08. (In Russ.).
9. Kadomtseva E.E., Strelnikov G.P., Karmazina L.A. Investigation of the influence of the bed coefficient on the stress-strain state of reinforced beams with a filler from a bimodular material on an elastic base. *Inzhenernyi vestnik Dona = Engineering Bulletin of the Don*. 2017;(3). Available from: <https://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2017/4271> [Accessed 1st June 2022]. (In Russ.).
10. Kozunova O.V. Development of Calculation Theory for Hinged-Connected Beams on Elastic Base. *Nauka i tekhnika = Science and Technique*. 2020;19(5):389-394, doi: 10.21122/2227-1031-2020-19-5-389-394. (In Russ.).
11. Karpenko N. I. *General models of reinforced concrete mechanics*. Moscow: Stroiizdat Publ.; 1996. 416 p. (In Russ.).
12. Zaliger R. *Reinforced concrete, its calculation and design*. Moscow: GNTI Press; 1931. 694 p. (In Russ.).
13. Tarnopolsky Yu. M., Kintsya T. Ya. On the mechanism of force transfer during deformation of oriented glass-reinforced plastics. *Mekhanika polimerov = Polymer Mechanics*. 1965;(1):28-36. (In Russ.).
14. Pisarenko G.S., Yakovlev A.P., Matveev V.V. *Vibration-absorbing properties of structural materials*. Kyiv: Naukova dumka Publ.; 1971. 325 p. (In Russ.).
15. Korn G. *Mathematical handbook for scientists and engineers*. Moscow: Nauka Publ.; 1973. 832 p. (In Russ.).

Информация об авторе

П.В. Кауров – кандидат технических наук, доцент, кафедра основ конструирования машин, Высшая школа технологии и энергетики.

Information about the author

P.V. Kaurov - Candidate of Science (Technical Science), Associate Professor, Department of Fundamentals of Machine Construction, High School of Technology and Energy.

Статья поступила в редакцию 06.06.2022; одобрена после рецензирования 14.07.2022; принята к публикации 02.03.2023.
The article was submitted 06.06.2022; approved after reviewing 14.07.2022; accepted for publication 02.03.2023.

Научная статья

УДК 514.8, 577.35

doi: 10.18522/1026-2237-2023-1-17-23

ПРОЯВЛЕНИЕ СФЕРИЧЕСКОЙ ГЕОМЕТРИИ В МОНОСЛОЯХ КЛЕТОК*

Д.С. Рошаль^{1✉}, К. Аззаг², К.К. Федоренко³, С.Б. Рошаль⁴, С. Багдигьян⁵

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

²Университет Миннесоты, Миннеаполис, США

⁵Университет Монпелье, Монпелье, Франция

¹ roshal@sfedu.ru ✉

² kazzag@umn.edu

³ fedorenkokiri@bk.ru

⁴ sbroshal@sfedu.ru

⁵ stephen.baghdiguiian@univ-montp2.fr

Аннотация. Представление об эпителии как разбиении плоскости на многоугольники существует уже несколько столетий, но до сих пор точно неясно, как клеточная геометрия влияет на процессы, происходящие во время трансформации плоских эпителиальных монослоев в структуры со сложной геометрией. В данной работе исследованы топологические характеристики упаковки клеток в зависимости от формы эпителия. С этой целью проанализировано более 50 микрофотографий плоского и сферического эпителия. Проведено сравнение средней топологической дефектности плоских и сферических монослоев. Полученные распределения клеток по числу их соседей демонстрируют неизвестные ранее различия между сферическим и плоским случаями. Обсуждаются топологические дефекты в упаковке данных клеток. В отличие от более упорядоченных абиотических упаковок в сферических монослоях исследуемых клеток невозможно выделить линейные топологические дефекты в виде рубцов или складок.

Ключевые слова: эпителиальные клетки, топологические дефекты, сферическая геометрия, распределение клеток по числу их соседей, клетки COS, клеточные упаковки, пролиферативный эпителий, самоорганизация

Благодарности: исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-72-00128, <https://rscf.ru/project/22-72-00128/>.

Для цитирования: Рошаль Д.С., Аззаг К., Федоренко К.К., Рошаль С.Б., Багдигьян С. Проявление сферической геометрии в монослоях клеток // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. 2023. № 1. С. 17–23.

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

Original article

MANIFESTATION OF SPHERICAL GEOMETRY IN CELL MONOLAYERS

D.S. Roshal^{1✉}, K. Azzag², K.K. Fedorenko³, S.B. Rochal⁴, S. Baghdiguiian⁵

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

² University of Minnesota, Minneapolis, USA

⁵ Université de Montpellier, Montpellier, France

¹ roshal@sfedu.ru ✉

² kazzag@umn.edu

³ fedorenkokiri@bk.ru

⁴ sbroshal@sfedu.ru

⁵ stephen.baghdiguiian@univ-montp2.fr

© Рошаль Д.С., Аззаг К., Федоренко К.К., Рошаль С.Б., Багдигьян С., 2023

Abstract. *Despite the fact that the representation of epithelium as a tessellation of a plane into polygons has existed for several centuries, it is still not clear exactly how cellular geometry affects the transformation from plane epithelial monolayers into structures with complex geometry. In this work we study the topological characteristics of cell packing depending on the shape of the epithelium. More than 50 micrographs of plane and spherical epithelium were analyzed. The average topological defectiveness of flat and spherical monolayers is compared. The obtained distributions of cells according to the number of their neighbors demonstrate a previously unknown difference between spherical and planar cases. Topological defects in the packing of these cells are also analyzed in the work. In contrast to more ordered abiotic packings, it is impossible to distinguish linear topological defects in the form of scars or pleats in the spherical monolayers of investigated cells.*

Keywords: *epithelial cells, topological defects, spherical geometry, distribution of cells by the number of their neighbors, COS cells, cell packing, proliferative epithelium, self-organization*

Acknowledgments: *the study was supported by the Russian Science Foundation grant No. 22-72-00128, <https://rscf.ru/project/22-72-00128/>.*

For citation: Roshal D.S., Azzag K., Fedorenko K.K., Rochal S.B., Baghdiguan S. Manifestation of Spherical Geometry in Cell Monolayers. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2023;(1):17-23. (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

Геометрические и топологические методы важны в биологических исследованиях. Благодаря им были построены современные теории строения ДНК [1], вирусных оболочек [2], особенностей филотаксиса (расположение листьев на стебле растения) [3]. Исторически одним из первых геометрических наблюдений в биологии было исследование Р. Гуком топологических характеристик отдельных клеток лукового эпителия. В 1665 г. он обнаружил, что границы клеток выглядят как многоугольники. Первый статистический анализ распределения клеток по числу их ближайших соседей был проведен в 1926 г. для эпителия огурца [4]. Значительно позже, в 2006 г., было показано, что сходные распределения характерны для ряда пролиферативных (медленно делящихся) эпителиев многих видов растений и животных [5]. Очевидно, что данная топологическая инвариантность (сходство распределений) тесно связана с физиологической инвариантностью нормального эпителия [5]: у всех многоклеточных организмов эпителий действует как селективный барьер, который контролирует потоки питательных веществ, регулирует ионный и водный баланс и защищает хозяина от антигенов и микробов.

На ранних стадиях эмбрионального развития у млекопитающих плоские эпителиальные монослои могут образовывать структуры сложной геометрии. Например, примитивная эндодерма трансформируется в желточный мешок, который выполняет множество функций в зародыше [6]. Изменение формы также происходит во время образования эпителиальных трубок, которые затем войдут в состав различных желез, легких, почек и других органов животных и человека [7]. Изгиб, наблюдаемый при формировании кишечных ворсинок, является еще одним примером трансформации плоской структуры [8].

Недавно были найдены общие морфологические признаки (специфические топологические дефекты) сферического эпителия икринок асцидий [9] и коллоидных кристаллов [10, 11]. Другие топологические дефекты, подобные типичным для жидких кристаллов, контролируют апоптоз (смерть) и экструзию (выталкивание) клеток из монослоя [12]. Топологические методы успешно используются для объяснения различных морфологических преобразований эпителия. Например, нормальное развитие эпителия включает переход от быстро делящихся мезенхимальных (стволовых) клеток к обычному пролиферативному эпителию, что приводит к резкому снижению подвижности и скорости деления клеток. При этом переходе клетки принимают более правильную форму с меньшим средним периметром. Обратный процесс, приводящий к появлению вытянутых клеток с высокой подвижностью, связан с формированием раковых опухолей и метастазов [13].

Цель данной работы – рассмотреть топологические аспекты изменения формы и кривизны эпителия на примере выращенных в лабораторных условиях монослоев клеток эпителия почек африканских зеленых обезьян (COS) с плоской и сферической топологиями.

Выращивание клеток и получение изображений

Линия COS-клеток была получена впервые в 60-е гг. XX в. в лабораторных условиях путем воздействия на эпителий почек африканских зеленых обезьян вирусом SV40. Клетки COS (COS-1 (ATCC CRL-1650) – подарок от Института биотерапии (Монпелье, Франция)) высевали либо на стандартные чашки Петри (для выращивания плоских монослоев), либо на гидрофобные чашки Петри в особую питательную среду для получения сферических монослоев.

Далее клетки COS фиксировали и обрабатывали флуоресцентными красителями для получения контура клеток (метка TRITC фаллоидином) и ядер (метка DAPI). Образцы анализировали с помощью лазерного конфокального микроскопа Leica SPE (Montpellier RIO Imaging, Франция).

Анализ изображений

С помощью компьютерной программы на языке Python определялись геометрические центры ядер клеток (центры областей голубого цвета на изображении). Ближайшие друг к другу центры ядер соединялись линиями по методу триангуляции Делоне [14]. Также строилось разбиение Вороного и рассчитывались площади эпителиальных клеток (площади ячеек Вороного). Для проведения корректного статистического анализа отбрасывались ячейки, расположенные слишком близко к границе изображения, количество соседей для которых невозможно определить. Заметим, что даже если есть возможность построить замкнутую ячейку Вороного, необходимо проверить, может ли граница ячейки быть изменена дополнительными гипотетическими ядрами, лежащими непосредственно за границей изображения. Поэтому центр достоверно построенной ячейки Вороного должен располагаться как минимум в два раза дальше от границы изображения, чем любая из вершин этой ячейки.

Общие замечания о топологических особенностях плоских и сферических клеточных монослоев

Многие физические и биологические объекты, в том числе вирусные оболочки, сферические коллоидные кристаллы и сферический эпителий икринок асцидий, состоят из структурных единиц, образующих искривленные двумерные структуры с локальным гексагональным порядком. Во всех этих системах структурные элементы имеют примерно один размер и плотно упакованы относительно друг друга, образуя локально периодический порядок со сферической топологией. При этом гауссова кривизна сферических оболочек запрещает полностью бездефектное покрытие сферы периодическим порядком и порождает топологические дефекты – структурные элементы, число соседей которых $\neq 6$ (рис. 1).

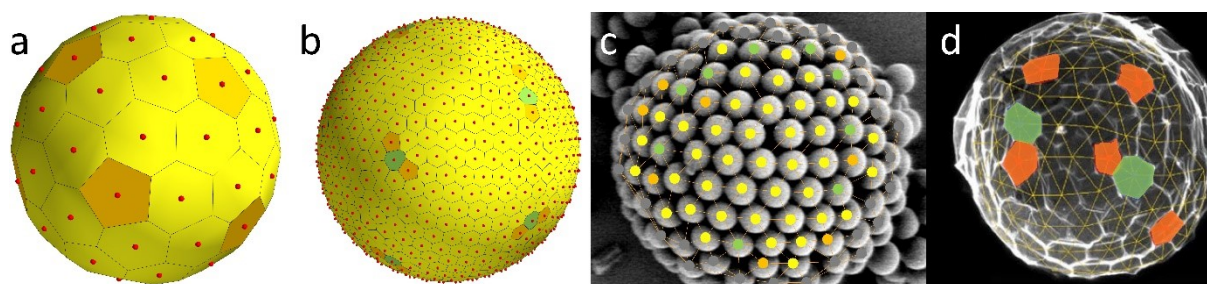


Рис. 1. Плотные упаковки на сфере. Структурные элементы с числом соседей, отличным от 6, выделены цветом: a, b – решение проблемы Томсона [15] для $N=72$ и 842 частиц; c – сферический коллоидный кристалл [10]; d – эпителий икринок асцидии [9] / Fig. 1. Dense packings on a sphere. Structural elements with a number of neighbors other than 6 are highlighted in color: a, b - solutions to the Thomson problem [15] for $N=72$, and 842 particles; c - spherical colloidal crystal [10]; d - ascidian egg epithelium [9]

Топологическим зарядом клетки с числом соседей i называется величина $q_i = 6 - i$ [11].

Если рассматривать каждый треугольник триангуляции Делоне, основанной на центрах ядер клеток сферического эпителия, как грань многогранника, то можно воспользоваться теоремой Эйлера, связывающей число ребер (P), граней (Γ) и вершин (B) многогранника: $B - P + \Gamma = 2$, и показать, что суммарный топологический заряд всех клеток на сфере равен 12. Так как для бесконечного плоского монослоя среднее число соседей у клетки равно 6, то суммарный топологический заряд бесконечного плоского эпителия равен 0. Топологическую дефектность плотной упаковки можно охарактеризовать классическим для биологии способом [5] с помощью гистограммы распределения клеток по числу их соседей (рис. 2е), где $P_i = N_i / \sum_j N_j$ – доля клеток с числом соседей i ; N_j – количество клеток с j соседями. Введем меру асимметрии данного распределения: $\Delta = \sum_i P_i q_i$.

В бесконечном плоском монослое (при общем числе частиц $N_{tot} \rightarrow \infty$), где гауссова кривизна равна нулю, имеет место равенство $\Delta=0$, а распределение клеток по числу их соседей сбалансировано (симметрично): количество n -валентных клеток с $n < 6$ уравнивает количество n -валентных с $n > 6$. В этом равновесии веса 5- и 7-валентных клеток равны $|q_5| = |q_7| = 1$ и т.д. Так как для любой триангулированной структуры со сферической геометрией суммарный топологический заряд равен 12, то $\Delta = 12/N_{tot}$, и поэтому в сферических монослоях будет наблюдаться большее количество 5-валентных клеток, чем 7-валентных.

Поскольку полный заряд всех дефектов (как положительных, так и отрицательных) всегда сохраняется, можно определить степень топологической дефектности монослоя как общий отрицательный заряд всех топологических дефектов Q_- , деленный на общее число клеток N_{tot} :

$$D = \frac{Q_-}{N_{tot}} = \frac{\sum_{i \geq 7} N_i q_i}{N_{tot}} = \sum_{i \geq 7} P_i q_i. \quad (1)$$

Результаты и обсуждение

Морфологическая характеристика монослоев COS (рис. 2) была проведена с использованием изображений 33 плоских и 26 сферических структур. Анализируемые области в плоских монослоях содержали от 73 до 758 клеток, в сферических – от 17 до 399 (на видимой области образца). Все процедуры усреднения (отдельно для сферических и плоских образцов), обсуждаемые ниже, проводились с весовым коэффициентом, представляющим собой количество клеток Вороного в образце.

На рис. 2а показан типичный плоский монослой клеток почек африканских обезьян со 129 четко видимыми ядрами. На монослой наложена триангуляция Делоне, узлами которой являются центры ядер. 68 ядер, далеких от границ изображения, окрашены в соответствии с числом их ближайших соседей. Для остальных ядер, отмеченных серыми кружками, достоверно определить количество соседей невозможно. На рис. 2б показано разбиение Вороного для того же монослоя. Разноцветными полигонами показаны 68 ячеек Вороного, центрами которых являются ядра с достоверно установленными валентностями. Топология типичного сферического монослоя (содержит 108 клеток COS в видимой области) представлена на рис. 2с, d. Окраска ядер на рис. 2с совпадает с цветом на рис. 2а. На рис. 2d показаны ячейки Вороного для 76 ядер монослоя, для которых достоверно определено число соседей.

Распределение клеток по числу их соседей для усредненных данных по плоским и сферическим монослоям клеток COS показано на рис. 2d. Это распределение типично для других пролиферативных (медленно делящихся) эпителиальных монослоев [5]. Действительно, для обоих типов монослоев значения P_6 , в основном определяющие распределение клеток по числу их соседей [5, 16], укладываются в общепринятый диапазон от 0,38 до 0,48. Усредненные значения топологической дефектности D , рассчитанной по формуле (1), равны соответственно 0,36 и 0,29 для плоских и сферических монослоев. Любопытно, что эти значения примерно в три раза выше, чем средняя топологическая дефектность эпителия асцидий, равная 0,11 [9]. Значения Δ , рассчитанные для гистограмм, показанных на рис. 1е, составляют соответственно 0,02 и 0,06 для плоского и сферического случаев. Поскольку Δ является линейной комбинацией вероятностей P_i и эта величина должна обращаться в нуль в бесконечном плоском монослое, ее отличие от нуля характеризует статистическую погрешность определения P_i для плоского случая. Разумно предположить, что ошибка для анализируемых плоских и сферических фрагментов монослоя близка.

Тогда трехкратное увеличение значения Δ для сферического случая можно объяснить только наличием гауссовой кривизны. Таким образом, анализ изображений локальных фрагментов сферических и плоских монослоев выявляет различие в величине Δ , что, в свою очередь, приводит к разнице распределений по числу ближайших соседей у клеток (рис. 2е).

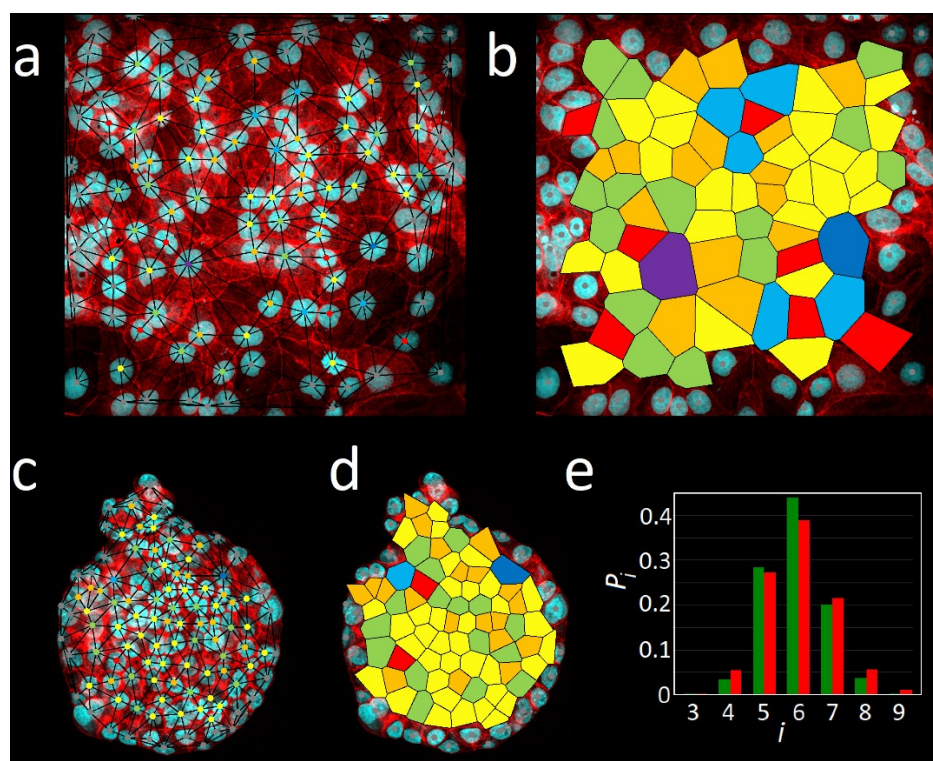


Рис. 2. Анализ микрофотографий монослоев, полученных из клеток эпителия почек африканской зеленой обезьяны. На верхних панелях представлено типичное изображение плоского монослоя клеток с наложенной триангуляцией Делоне (а) и разбиением Вороного (b). Аналогичный графический анализ для сферического эпителия представлен на панелях с и d. Красные, оранжевые, желтые, зеленые, голубые, синие и фиолетовые узлы триангуляции и ячейки Вороного соответствуют клеткам с соседями 4–10, e – распределение клеток по числу их соседей для плоских (правая гистограмма) и сферических монослоев (левая гистограмма) / Fig. 2. Analysis of African green monkey (COS) kidney epithelium. The upper panels of the figure show a typical image of a planar monolayer of cells with superimposed Delaunay triangulation (a) and Voronoi tessellation (b). A similar graphical analysis for spherical epithelium is presented in panels c and d. Red, orange, yellow, green, blue, dark blue and purple triangulation nodes and Voronoi cells correspond to cells with neighbors 4–10, e - distribution of cells by the number of their neighbors for flat (right histogram) and spherical monolayers (left histogram)

Заключение

В данной работе мы рассмотрели топологические аспекты изменения формы и кривизны эпителия на примере монослоев клеток эпителия почек африканских зеленых обезьян COS с плоской и сферической топологиями. А именно проанализировали распределение клеток по числу их соседей в десятках монослоев обеих форм и показали, как геометрия монослоя влияет на это распределение. В частности, гауссова кривизна монослоя приводит к тому, что доля 5-валентных клеток P_5 больше в сферическом случае, а доля клеток с семью соседями P_7 меньше в плоском эпителии. Более высокую долю клеток с шестью соседями в сферических образцах можно объяснить разностью условий выращивания сферического и плоского эпителия. Также отметим, что в отличие от более упорядоченных коллоидных кристаллов и эпителия икринок асцидий в монослоях COS-клеток невозможно выделить линейные топологические дефекты в виде рубцов или складов. Меньшая упорядоченность монослоев COS-клеток по сравнению с эпителием асцидий,

демонстрируемая сравнением доли 6-валентных клеток P_6 со средней топологической дефективностью D , видимо, объясняется пролиферативной природой исследованных монослоев.

Список источников

1. Watson J., Crick F. Molecular Structure of Nucleic Acids: A Structure for Deoxyribose Nucleic Acid // *Nature*. 1953. Vol. 171. P. 737–738.
2. Caspar D.L., Klug A. Physical principles in the construction of regular viruses // *Cold Spring Harbor Symp. Quant. Biol.* 1962. Vol. 27. P. 1–24.
3. Reinhardt D., Pesce E.-R., Stieger P., Mandel Th., Baltensperger K., Bennett M., Traas J., Friml J., Kuhlemeier C. Regulation of phyllotaxis by polar auxin transport // *Nature*. 2003. Vol. 426. P. 255–260.
4. Lewis F.T. The effect of cell division on the shape and size of hexagonal cells // *Anat. Rec.* 1926. Vol. 1. P. 331–355.
5. Gibson M.C., Patel A.B., Nagpal R., Perrimon N. The emergence of geometric order in proliferating metazoan epithelia // *Nature*. 2006. Vol. 442. P. 1038–1041.
6. Ross C., Boroviak T.E. Origin and function of the yolk sac in primate embryogenesis // *Nat. Commun.* 2020. Vol. 11. P. 1–14.
7. Andrew D.J., Ewald A.J. Morphogenesis of epithelial tubes: Insights into tube formation, elongation, and elaboration // *Dev. Biol.* 2010. Vol. 341. P. 34–55.
8. Trushko A., Di Meglio I., Merzouki A., Blanch-Mercader C., Abunattum Sh., Guck J., Alessandri K., Nassoy P., Kruse K., Chopard B., Roux A. Buckling of an epithelium growing under spherical confinement // *Dev. Cell.* 2020. Vol. 54. P. 655–668.
9. Roshal D.S., Azzag K., Le Goff E., Rochal S.B., Baghdiguian S. Crystal-like order and defects in metazoan epithelia with spherical geometry // *Sci. Rep.* 2020. Vol. 10. P. 7652.
10. Dinsmore A.D., Hsu M.F., Nikolaidis M.G., Marquez M., Bausch A.R., Weitz D.A. Colloidosomes: selectively permeable capsules composed of colloidal particles // *Science*. 2002. Vol. 298. P. 1006–1009.
11. Roshal D.S., Konevtsova O.V., Myasnikova A.E., Rochal S.B. Assembly of the most topologically regular two-dimensional micro and nanocrystals with spherical, conical, and tubular shapes // *Phys. Rev. E.* 2016. Vol. 94. P. 052605.
12. Saw T.B., Doostmohammadi A., Nier V., Kocgozlu L., Thampi S., Toyama Y., Marcq Ph., Lim Ch.T., Yeomans J.M., Ladoux B. Topological defects in epithelia govern cell death and extrusion // *Nature*. 2017. Vol. 544. P. 212–216.
13. Chaffer C.L., Thompson E.W., Williams E.D. Mesenchymal to epithelial transition in development and disease // *Cells. Tissues. Organs.* 2007. Vol. 185. P. 7–19.
14. Delaunay B. Sur la sphère vide: A la mémoire de Georges Voronoi // *Изв. Академии наук СССР. Отделение математических и естественных наук.* 1934. № 6. С. 793–800.
15. Wales D.J., Ulker S. Structure and dynamics of spherical crystals characterized for the Thomson problem // *Phys. Rev. B.* 2006. Vol. 74. P. 212101.
16. Roshal D.S., Martin M., Fedorenko K., Golushko I., Molle V., Baghdiguian S., Rochal S.B. Random nature of epithelial cancer cell monolayers // *J. R. Soc., Interface.* 2022. Vol. 19. P. 20220026.

References

1. Watson J., Crick F. Molecular Structure of Nucleic Acids: A Structure for Deoxyribose Nucleic Acid. *Nature*. 1953;171:737-738.
2. Caspar D.L., Klug A. Physical principles in the construction of regular viruses. *Cold Spring Harbor Symp. Quant. Biol.* 1962;27:1-24.
3. Reinhardt D., Pesce E.-R., Stieger P., Mandel Th., Baltensperger K., Bennett M., Traas J., Friml J., Kuhlemeier C. Regulation of phyllotaxis by polar auxin transport. *Nature*. 2003;426:255-260.
4. Lewis F.T. The effect of cell division on the shape and size of hexagonal cells. *Anat. Rec.* 1926;1:331-355.
5. Gibson M.C., Patel A.B., Nagpal R., Perrimon N. The emergence of geometric order in proliferating metazoan epithelia. *Nature*. 2006;442:1038-1041.
6. Ross C., Boroviak T.E. Origin and function of the yolk sac in primate embryogenesis. *Nat. Commun.* 2020;11:1-14.
7. Andrew D.J., Ewald A.J. Morphogenesis of epithelial tubes: Insights into tube formation, elongation, and elaboration. *Dev. Biol.* 2010;341:34-55.
8. Trushko A., Di Meglio I., Merzouki A., Blanch-Mercader C., Abunattum Sh., Guck J., Alessandri K., Nassoy P., Kruse K., Chopard B., Roux A. Buckling of an epithelium growing under spherical confinement. *Dev. Cell.* 2020;54:655-668.

9. Roshal D.S., Azzag K., Le Goff E., Rochal S.B., Baghdiguian S. Crystal-like order and defects in metazoan epithelia with spherical geometry. *Sci. Rep.* 2020;10:7652.

10. Dinsmore A.D., Hsu M.F., Nikolaidis M.G., Marquez M., Bausch A.R., Weitz D.A. Colloidosomes: selectively permeable capsules composed of colloidal particles. *Science.* 2002;298:1006-1009.

11. Roshal D.S., Konevtsova O.V., Myasnikova A.E., Rochal S.B. Assembly of the most topologically regular two-dimensional micro and nanocrystals with spherical, conical, and tubular shapes. *Phys. Rev. E.* 2016;94:052605.

12. Saw T.B., Doostmohammadi A., Nier V., Kocgozlu L., Thampi S., Toyama Y., Marcq Ph., Lim Ch.T., Yeomans J.M., Ladoux B. Topological defects in epithelia govern cell death and extrusion. *Nature.* 2017;544:212-216.

13. Chaffer C.L., Thompson E.W., Williams E.D. Mesenchymal to epithelial transition in development and disease. *Cells. Tissues. Organs.* 2007;185:7-19.

14. Delaunay B. Sur la sphère vide: A la mémoire de Georges Voronoi. *Izv. Akad. nauk SSSR. Otdelenie matematicheskikh i estestvennykh nauk = Proceedings of the USSR Academy of Sciences. Department of Mathematical and Natural Sciences.* 1934;(6):793-800.

15. Wales D.J., Ulker S. Structure and dynamics of spherical crystals characterized for the Thomson problem. *Phys. Rev. B.* 2006;74:212101.

16. Roshal D.S., Martin M., Fedorenko K., Golushko I., Molle V., Baghdiguian S., Rochal S.B. Random nature of epithelial cancer cell monolayers. *J. R. Soc., Interface.* 2022;19:20220026.

Информация об авторах

Дарья Сергеевна Рошаль – кандидат физико-математических наук, кафедра теоретической и вычислительной физики, физический факультет.

Карим Аззаг – доктор физико-математических наук, лаборатория Перлингейро, Институт сердца Лиллегей.

Кирилл Константинович Федоренко – магистрант, кафедра нанотехнологии, физический факультет.

Сергей Бернардович Рошаль – доктор физико-математических наук, профессор, кафедра нанотехнологии, физический факультет.

Стивен Багдигьян – профессор, Институт наук об эволюции, CNRS, Практическая школа высших исследований, Институт исследований в области развития.

Information about the authors

Daria S. Roshal - Candidate of Science (Physics and Mathematics), Department of Theoretical and Computational Physics, Physics Faculty.

Karim Azzag - Doctor of Science (Physics and Mathematics), Perlingeiro Lab, Lillehei Heart Institute.

Kirill K. Fedorenko - Master's Student, Department of Nanotechnology, Faculty of Physics.

Sergey B. Roshal - Doctor of Science (Physics and Mathematics), Professor, Department of Nanotechnology, Faculty of Physics.

Stephen Baghdiguian - Professor, Institut des Sciences de l'Evolution-Montpellier, CNRS, Ecole Pratique des Hautes Etudes, Institut de Recherche pour le Développement.

Статья поступила в редакцию 28.09.2022; одобрена после рецензирования 20.10.2022; принята к публикации 02.03.2023.
The article was submitted 28.09.2022; approved after reviewing 20.10.2022; accepted for publication 02.03.2023.

Научная статья
УДК 517.983.24
doi: 10.18522/1026-2237-2023-1-24-28

О СУММИРОВАНИИ $3j$ -СИМВОЛОВ ВИГНЕРА

Алексей Николаевич Хопёрский¹, Рустам Викторович Конеев²

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

¹hopersky_vm_1@rgups.ru

²koneev@gmail.com

Аннотация. В рамках теории неприводимых тензорных операторов с использованием известных общих аналитических результатов для двойных сумм $\left(\sum_j \sum_m \right)$ произведений двух $3j$ -символов Вигнера конструированы аналитические выражения для однократных сумм $\left(\sum_m \right)$ при значениях $j_1 = j_2 = 1$ и $j = 2$ параметров верхней строки $3j$ -символа Вигнера. Полученные выражения дополняют широко известные аналитические результаты теории углового момента и оказываются востребованными при решении, в частности, таких задач атомной физики, как построение нерелятивистской квантовой теории однократного и двойного тормозного излучения при неупругом рассеянии фотона атомом (атомный ион).

Ключевые слова: неприводимый тензорный оператор, теорема Вигнера – Эккарта, $3j$ -символ Вигнера, формулы суммирования

Для цитирования: Хопёрский А.Н., Конеев Р.В. О суммировании $3j$ -символов Вигнера // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. 2023. № 1. С. 24–28.

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

Original article

ON SUMMATION OF $3j$ -WIGNER SYMBOLS

Alexey N. Hopersky¹, Rustam V. Koneev²

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

¹hopersky_vm_1@rgups.ru

²koneev@gmail.com

Abstract. Within the framework of the theory of irreducible tensor operators, using well-known general analytical results for double sums $\left(\sum_j \sum_m \right)$ of products of two $3j$ -Wigner symbols, analytical expressions for single

© Хопёрский А.Н., Конеев Р.В., 2023

sums $\left(\sum_m \right)$ for the values $j_1 = j_2 = 1$ and $j = 2$ parameters of the upper row $3j$ Wigner symbol are specified.

The expressions obtained supplement the well-known analytical results of the theory of angular momentum and are in demand in solving, in particular, such problems of atomic physics as the construction of a nonrelativistic quantum theory of single and double bremsstrahlung when a photon is scattered by an atom (atomic ion).

Keywords: irreducible tensor operator, Wigner-Eckart theorem, $3j$ -Wigner symbol, summation formulas

For citation: Hopersky A.N., Koneev R.V. On Summation of $3j$ -Wigner Symbols. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2023;(1):24-28. (In Russ.).

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

Введение

Теория неприводимых тензорных операторов является неотъемлемой частью современного математического анализа [1, 2]. При реализации ее методов, например в рамках задач квантовой физики [3], возникают математические структуры, для которых в опубликованной литературе отсутствуют конкретизированные аналитические результаты. В числе таких широко востребованных структур оказываются формулы суммирования произведений $3j$ -символов Вигнера [4] с фиксированным полным моментом волновой функции состояния квантовой системы.

Формулы суммирования возникают при построении произведений парциальных амплитуд вероятности переходов между состояниями исследуемой квантовой системы. Аналитические структуры каждой из амплитуд вероятности (матричные элементы операторов радиационного и контактного переходов в представлении вторичного квантования как кратные интегралы по пространственным и угловым переменным) определяются теоремой Вигнера – Экарта [4, 5]:

$$\langle JM | T_q^{(k)} | J'M' \rangle = (-1)^{J-M} \cdot \left(J \parallel T^{(k)} \parallel J' \right) \cdot \begin{pmatrix} J & k & J' \\ -M & q & M' \end{pmatrix}. \quad (1)$$

В (1) $T_q^{(k)}$ – неприводимый тензорный оператор перехода между $|JM\rangle$ и $|J'M'\rangle$ – состояниями квантовой системы; k – ранг оператора перехода и его проекция $q = -k, -k+1, \dots, k$; $J(M)$ и $J'(M')$ – полные моменты (их проекции $M = -J, -J+1, \dots, J$) состояний; $\left(J \parallel T^{(k)} \parallel J' \right)$ – приведённый (редуцированный, не зависящий от проекций) матричный элемент. Согласно (1), зависимость амплитуды вероятности перехода от проекций M , q и M' определена фазовым множителем и $3j$ -символом Вигнера. При этом $3j$ -символ Вигнера отличен от нуля при выполнении требований для его строк: $J' = J + k, J + k - 1, \dots, |J - k|$ (условие треугольника) и $q + M' = M$.

В данной статье мы конкретизируем аналитические выражения для двух формул суммирования

$$\sum_m (-1)^m \begin{pmatrix} j_1 & j_2 & j \\ a & b & m \end{pmatrix} \begin{pmatrix} j_1 & j_2 & j \\ c & d & -m \end{pmatrix}, \quad (2)$$

$$\sum_m \begin{pmatrix} j_1 & j_2 & j \\ a & b & m \end{pmatrix} \begin{pmatrix} j_1 & j_2 & j \\ c & d & m \end{pmatrix} \quad (3)$$

в часто встречающемся случае $j_1 = j_2 = 1, j = 2$. В суммах (2), (3) и далее мы унифицировали обозначения для параметров $3j$ -символа Вигнера: $J \rightarrow j_1, k \rightarrow j_2, J' \rightarrow j, -M \rightarrow a, q \rightarrow b$ и $M' \rightarrow m$. Так, например, учёт дипольных ($k = 1, q = -1, 0, 1$) переходов с участием электронов сплошного спектра $p(J = 1)$ - и $d(J = 2)$ -симметрии промежуточных (виртуальных) и конечных (наблюдаемых) состояний неупругого рассеяния фотона квантовой системой сопровождается возникновением суммы (3) при расчёте амплитуды вероятности инициированного однократного

(переход между термами ${}^1P_1 \rightarrow {}^1D_2$) тормозного излучения [6, 7], тогда как сумма (2) возникает при расчёте амплитуды вероятности иницированного нелокального двойного (переход между термами ${}^1P_1 \rightarrow {}^1D_2 \rightarrow {}^1P_1$) тормозного излучения [8] при неупругом рассеянии фотона атомом (атомный ион).

Результаты

Утверждение 1. При $j_1 = j_2 = 1$ и $j = 2$ сумма (2) принимает вид

$$\sum_{m=-2}^2 (-1)^m \cdot \begin{pmatrix} 1 & 1 & 2 \\ a & b & m \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 2 \\ c & d & -m \end{pmatrix} = \frac{1}{5} (-1)^{d-a} \cdot \left[\delta_{b,-d} \cdot \delta_{c,-a} - \frac{1}{2} \left(a \cdot d + \frac{2}{3} \right) \delta_{b,-a} \cdot \delta_{c,-d} - A \right], \quad (4)$$

$$A = \frac{1}{4} (A_+ + A_-), \quad A_+ = \sqrt{(2+a)(1-a)(1+d)(2-d)} \cdot \delta_{b,-a+1} \cdot \delta_{c,-d+1},$$

$$A_- = \sqrt{(2-a)(1+a)(1-d)(2+d)} \cdot \delta_{b,-a-1} \cdot \delta_{c,-d-1}.$$

Доказательство. Рассмотрим известный общий аналитический результат (условие ортогональности $3j$ -символов Вигнера) [2]:

$$\sum_j \sum_m (-1)^{j-m} (2j+1) \begin{pmatrix} j_1 & j_2 & j \\ a & b & m \end{pmatrix} \begin{pmatrix} j_1 & j_2 & j \\ c & d & -m \end{pmatrix} = (-1)^{j_1+j_2-a-b} \cdot \delta_{a,-c} \cdot \delta_{b,-d}, \quad (5)$$

где $m = -j, -j+1, \dots, j$; $\delta_{\alpha,\beta}$ – символ Кронекера – Вейерштрасса. В нашем случае $j_1 = j_2 = 1$ и каждое из целых чисел a, b, c и d принимает значения $-1, 0, +1$. В силу требования равенства нулю суммы $a+b+m=0$ для нижней строки $3j$ -символа Вигнера результирующий полный момент ограничен значениями $j = 0, 1, 2$, и выражение (5) принимает вид

$$\begin{aligned} & \frac{1}{3} (-1)^{b+d} \cdot \delta_{a,-b} \cdot \delta_{c,-d} + 3 \cdot \sum_{m=-1}^1 (-1)^{l-m} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ a & b & m \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ c & d & -m \end{pmatrix} + \\ & + 5 \cdot \sum_{m=-2}^2 (-1)^m \cdot \begin{pmatrix} 1 & 1 & 2 \\ a & b & m \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 2 \\ c & d & -m \end{pmatrix} = (-1)^{a+b} \cdot \delta_{a,-c} \cdot \delta_{b,-d}. \end{aligned} \quad (6)$$

В (6) первое слагаемое в левой части равно произведению $3j$ -символов Вигнера с нулевым столбцом,

$$\begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 \\ a & b & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 \\ c & d & 0 \end{pmatrix}, \quad \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 \\ a & b & 0 \end{pmatrix} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot (-1)^{1+b} \cdot \delta_{a,-b},$$

и возникает интересующая нас сумма (2). Учтём известные результаты для $3j$ -символов Вигнера в первой сумме из (6) [9–11]:

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ a & b & -1 \end{pmatrix} &= \frac{1}{2\sqrt{3}} \cdot (-1)^{1+b} \cdot \sqrt{(1+b)(2-b)} \cdot \delta_{a,1-b}, \\ \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ a & b & 0 \end{pmatrix} &= \frac{1}{\sqrt{6}} \cdot (-1)^{1+b} \cdot b \cdot \delta_{a,-b}, \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ a & b & 1 \end{pmatrix} = \frac{1}{2\sqrt{3}} \cdot (-1)^b \cdot \sqrt{(1-b)(2+b)} \cdot \delta_{a,-1-b},$$

где символы Кронекера – Вейерштрасса воспроизводят требование $a+b+m=0$. С учётом (7) из (6) получаем сумму (4). Утверждение 1 доказано.

Утверждение 2. При $j_1 = j_2 = 1$ и $j = 2$ сумма (3) принимает вид

$$\sum_{m=-2}^2 \begin{pmatrix} 1 & 1 & 2 \\ a & b & m \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 2 \\ c & d & m \end{pmatrix} =$$

$$= \frac{1}{5} \cdot \delta_{a,c} \cdot \delta_{b,d} - \frac{1}{20} (-1)^{b+d} \cdot \left[\left(2bd + \frac{4}{3} \right) \cdot \delta_{a,-b} \cdot \delta_{c,-d} + B \right], \quad (8)$$

$$B = B_+ + B_-, \quad B_+ = \sqrt{(1+b)(2-b)(1+d)(2-d)} \cdot \delta_{a,1-b} \cdot \delta_{c,1-d},$$

$$B_- = \sqrt{(1-b)(2+b)(1-d)(2+d)} \cdot \delta_{a,-1-b} \cdot \delta_{c,-1-d}.$$

Доказательство. Рассмотрим известный общий аналитический результат (условие ортогональности $3j$ -символов Вигнера) [2]:

$$\sum_j \sum_m (2j+1) \begin{pmatrix} j_1 & j_2 & j \\ a & b & m \end{pmatrix} \begin{pmatrix} j_1 & j_2 & j \\ c & d & m \end{pmatrix} = \delta_{a,c} \cdot \delta_{b,d}. \quad (9)$$

Для $j_1 = j_2 = 1$ и $j = 0, 1, 2$ выражение (9) принимает вид

$$\begin{aligned} & \frac{1}{3} (-1)^{b+d} \cdot \delta_{a,-b} \cdot \delta_{c,-d} + 3 \cdot \sum_{m=1}^1 (-1)^{-m} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ a & b & m \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ c & d & m \end{pmatrix} + \\ & + 5 \cdot \sum_{m=-2}^2 \begin{pmatrix} 1 & 1 & 2 \\ a & b & m \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 2 \\ c & d & m \end{pmatrix} = \delta_{a,c} \cdot \delta_{b,d}, \end{aligned} \quad (10)$$

где возникает интересующая нас сумма (3). С учётом (7) из (10) получаем сумму (8). Утверждение 2 доказано.

Замечания

1. Реализация слагаемых A_+ , A_- , B_+ и B_- в суммах (4) и (8) требует обращения непосредственно к сферическим функциям (гармоники, $k = 1$, $q = -1, 0, 1$) [2]:

$$C_q^{(k)}(e_i) = \sqrt{\frac{4\pi}{2k+1}} Y_{kq}(e_i),$$

где определен e_i – единичный вектор поляризации i -фотона в сферических координатах. Это сопровождается необходимостью исходно фиксировать геометрию (конкретизировать аналитический вид гармоник) предполагаемого физического эксперимента и проводить достаточно громоздкие вычисления [6–8]. Однако сохранение лишь первых слагаемых в правых частях сумм (4) и (8) в качестве приближения недопустимо. В самом деле, например, приближение перехода от суммы (8) к выражению

$$\sum_{m=-2}^2 \begin{pmatrix} 1 & 1 & 2 \\ a & b & m \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 2 \\ c & d & m \end{pmatrix} \simeq \frac{1}{5} \cdot \delta_{a,c} \cdot \delta_{b,d}$$

приводит к учёту лишь значения проекции полного момента $m = 0$, тогда как информация о вкладе значений $m = -2, -1, +1, +2$ теряется. Этот эффект с физической точки зрения приводит к потере фундаментальной информации о поляризационных свойствах (зависимость от угла рассеяния как угла между волновыми векторами падающего и рассеянного фотонов) наблюдаемого в предполагаемом эксперименте дифференциального сечения исследуемого процесса.

2. Изложенный выше алгоритм построения конкретизированных сумм произведений $3j$ -символов Вигнера может быть реализован и для высших полных моментов $j \geq 3$. В частности, с физической точки зрения учёт рождения f -симметрии ($J' = 3$) электрона сплошного спектра при дипольном ($k = 1$, $q = -1, 0, 1$) переходе между термами $^1D_2 \rightarrow ^1F_3$ и $^1D_2 \rightarrow ^1F_3 \rightarrow ^1D_2$ требует построения формул суммирования

$$\sum_{m=-3}^3 \begin{pmatrix} 2 & 1 & 3 \\ a & b & m \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 2 & 1 & 3 \\ c & d & m \end{pmatrix}, \quad \sum_{m=-3}^3 (-1)^m \cdot \begin{pmatrix} 2 & 1 & 3 \\ a & b & m \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 2 & 1 & 3 \\ c & d & -m \end{pmatrix},$$

где целые числа $a = -2, -1, 0, +1, +2$, $b = -1, 0, +1$ и $m = -3, -2, -1, 0, +1, +2, +3$. Такие построения сопровождаются резким увеличением объёма вычислений и являются предметом будущих исследований.

Список источников

1. Юцис А.П., Савукина А.Ю. Математические основы теории атома. Вильнюс: Минтис, 1973. 480 с.
2. Варшалович Д.А., Москалев А.Н., Херсонский В.К. Квантовая теория углового момента. Л.: Наука, 1975. 439 с.
3. Biedenharn L.C., Louck J.D. Angular Momentum in Quantum Physics. Theory and Application. Addison; Wesley: Publishing Company Reading, 1981. 716 p.
4. Wigner E.P. Group Theory and its Application to the Quantum Mechanics of Atomic Spectra. New York: Academic Press Inc., 1959. 374 p.
5. Eckart C. The Application of Group Theory to the Quantum Dynamics of Monatomic Systems // *Reviews of Modern Physics*. 1930. Vol. 2, № 3. P. 305–380.
6. Хопёрский А.Н., Надолинский А.М., Петров И.Д. Эффект тормозного излучения при резонансном комптоновском рассеянии фотона многоэлектронным атомом // *Письма в ЖЭТФ*. 2020. Т. 111. С. 61–64.
7. Хопёрский А.Н., Надолинский А.М. Тормозное излучение при нерезонансном неупругом рассеянии фотона атомным ионом // *Письма в ЖЭТФ*. 2022. Т. 115. С. 469–473.
8. Хопёрский А.Н., Надолинский А.М., Конеев Р.В. Неупругое расщепление рентгеновского фотона атомным ионом // *ЖЭТФ*. 2022. Т. 162. С. 27–33.
9. Собельман И.И. Введение в теорию атомных спектров. М.: Наука, 1977. 320 с.
10. Edmonds A.R. Angular Momentum in Quantum Mechanics. Princeton: Princeton University Press, 1974. 146 p.
11. Юцис А.П., Бандзайтис А.А. Теория момента количества движения в квантовой механике. Вильнюс: Мокслас, 1977. 463 с.

References

1. Jucys A. P., Savukynas A. J. *Mathematical Foundations of the Atomic Theory*. Vilnius: Mintis Publ.; 1973. 480 p. (In Russ.).
2. Varshalovich D.A., Moskalev A.N., Khersonsky V.K. *Quantum theory of angular momentum*. Leningrad: Nauka Publ.; 1975. 439 p. (In Russ.).
3. Biedenharn L.C., Louck J.D. *Angular Momentum in Quantum Physics. Theory and Application*. Addison; Wesley: Publishing Company Reading; 1981. 716 p.
4. Wigner E.P. *Group Theory and its Application to the Quantum Mechanics of Atomic Spectra*. New York: Academic Press Inc.; 1959. 374 p.
5. Eckart C. The Application of Group Theory to the Quantum Dynamics of Monatomic Systems. *Reviews of Modern Physics*. 1930;2(3):305-380.
6. Hopersky A. N., Nadolinsky A. M., Petrov I. D. Bremsstrahlung Effect at Resonant Compton Scattering of a Photon by a Multielectron Atom. *JETP Letters*. 2020;111(2):72-75.
7. Hopersky A. N., Nadolinsky A. M. Bremsstrahlung at the Nonresonant Inelastic Scattering of a Photon by an Atomic Ion. *JETP Letters*. 2022;115(8):434-438.
8. Hopersky A. N., Nadolinsky A. M., Koneev R.V. Inelastic Splitting of an X-ray Photon by an Atomic Ion. *Journal of Experimental and Theoretical Physics*. 2022;135(1):20-25.
9. Sobel'man I. I. *Introduction to the theory of atomic spectra*. Moscow: Nauka Publ.; 1977. 320 p. (In Russ.).
10. Edmonds A.R. *Angular Momentum in Quantum Mechanics*. Princeton: Princeton University Press; 1974. 146 p.
11. Jucys A. P., Bandzaitis A. A. *Theory of Angular Momentum in Quantum Mechanics*. Vilnius: Mokslas Publ.; 1977. 463 p. (In Russ.).

Информация об авторах

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

Information about the authors

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

Статья поступила в редакцию 24.11.2022; одобрена после рецензирования 25.12.2022; принята к публикации 02.03.2023.
The article was submitted 24.11.2022; approved after reviewing 25.12.2022; accepted for publication 02.03.2023.

Научная статья

УДК 514.752

doi: 10.18522/1026-2237-2023-1-29-34

ТЕНЗОР КРИВИЗНЫ n -ПОВЕРХНОСТИ И ЕЕ СФЕРИЧЕСКОГО ОБРАЗА В E^{n+k}

Дмитрий Валентинович Шармин^{1✉}, Тамара Николаевна Шармина²,
Валентин Геннадьевич Шармин³

^{1,2,3} Тюменский государственный университет, Тюмень, Россия

¹ d.v.sharmin@utmn.ru✉

² t.n.sharmina@utmn.ru

³ v.g.sharmin@utmn.ru

Аннотация. Основной задачей классической многомерной дифференциальной геометрии является исследование свойств различных n -поверхностей. Часто в этих исследованиях используются коэффициенты кручения, которые определены для любой n -поверхности, имеющей коразмерность $k > 1$, в $(n + k)$ -мерном евклидовом пространстве. Для гиперповерхностей коэффициенты кручения не определяются.

Другим важным понятием, используемым для изучения свойств n -поверхностей, является сферическое отображение Гаусса. Отображение Гаусса, определенное на подмногообразиях евклидовых и псевдоевклидовых пространств, позволяет изучить внешние свойства подмногообразия, погруженного в евклидово или псевдоевклидово пространство. В ряде работ исследуются свойства отображения Гаусса, а также геометрические характеристики образов подмногообразий при сферическом отображении, которые являются подмногообразиями гиперсферы или грассманиана.

В настоящей статье исследуются локальные свойства сферического образа регулярной n -поверхности произвольной коразмерности. Сферическое отображение определено для n -поверхностей с $k > 1$ в евклидовом пространстве с помощью регулярного векторного поля. Каждый вектор этого поля в точке подмногообразия ортогонален касательному пространству подмногообразия в выбранной точке.

Используются методы дифференциальной и римановой геометрии, а также тензорного анализа для исследования n -поверхностей с $k > 1$. При некоторых дополнительных условиях установлена связь между тензорами кривизны заданной поверхности и ее сферического образа. При тех же дополнительных условиях изучены некоторые геометрические характеристики точек сферического образа исходной n -поверхности.

Ключевые слова: n -мерное евклидово пространство, n -поверхность, векторное поле, сферическое отображение, коразмерность, тензор кривизны, коэффициенты кручения, аксиальная точка

Для цитирования: Шармин Д.В., Шармина Т.Н., Шармин В.Г. Тензор кривизны n -поверхности и ее сферического образа в E^{n+k} // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. 2023. № 1. С. 29–34.

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

Original article

THE CURVATURE TENSOR OF THE n -SURFACE AND ITS SPHERICAL IMAGE IN E^{n+k}

Dmitrii V. Sharmin^{1✉}, Tamara N. Sharmina², Valentin G. Sharmin³

^{1, 2, 3} Tyumen State University, Tyumen, Russia

¹ d.v.sharmin@utmn.ru✉

² t.n.sharmina@utmn.ru

³ v.g.sharmin@utmn.ru

Abstract. The main task of classical multidimensional differential geometry is to study the properties of various n -surfaces. Often these studies use torsion coefficients that are defined for any n -surface with codimension $k > 1$ in $(n + k)$ -dimensional Euclidean space. For hypersurfaces, the torsion coefficients are not defined.

Another important concept used to study the properties of n -surfaces is the spherical Gaussian mapping. The Gaussian mapping defined on submanifolds of Euclidean and pseudo-Euclidean spaces allows one to study the external properties of a submanifold immersed in a Euclidean or pseudo-Euclidean space. In a number of papers, the properties of the Gaussian mapping are studied, as well as the geometric characteristics of the images of submanifolds under a spherical mapping, which are submanifolds of a hypersphere or a Grassmannian.

In this article, we study the local properties of the spherical image of a regular n -surface of arbitrary codimension. The spherical mapping is defined for n -surfaces with codimension greater than one in Euclidean space by means of a regular vector field. Each vector of this field at a point of the submanifold is orthogonal to the tangent space of the submanifold at the chosen point.

The article uses the methods of differential and Riemannian geometry, as well as tensor analysis to study n -surfaces with a codimension greater than one. Under some additional conditions, a connection is established between the curvature tensor of a given surface and the curvature tensor of its spherical image. Under the same additional conditions, some geometric characteristics of the points of the spherical image of the original n -surface are studied.

Keywords: n -dimensional Euclidean space, n -surface, vector field, spherical mapping, codimension, curvature tensor, torsion coefficients, axial point

For citation: Sharmin D.V., Sharmina T.N., Sharmin V.G. The Curvature Tensor of the n -Surface and Its Spherical Image in E^{n+k} . *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2023;(1):29-34. (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 работе [1] рассмотрена сферическая индикатриса произвольной пространственной кривой и изучены ее свойства. Одной из теорем, приведенных в [2], является теорема о выражении геодезической кривизны пространственной полосы через геодезическую кривизну ее сферического образа.

В целом ряде работ исследуются локальные и глобальные свойства образов подмногообразий в различных пространствах при отображении Гаусса.

В статье [3] рассматриваются свойства поверхностей вращения с поточечным 1-типа гауссовым отображением в E^4 , а в [4] приводится классификация гиперболических подмногообразий гиперболического пространства с гиперболическим отображением Гаусса 1-го типа.

В работе [5] рассматриваются поверхности без параболических точек в трехмерном псевдоевклидовом пространстве. При некоторых условиях, которым удовлетворяет их гауссово отображение, приводится классификация этих поверхностей.

В статье [6] строится полная классификация квазиминимальных поверхностей Лоренца с поточечным 1-типа гауссовым отображением в четырехмерном псевдоевклидовом пространстве.

Систематическое исследование образов полных минимальных поверхностей при отображении Гаусса в евклидовом четырехмерном пространстве проведено в работе [7].

В обзоре, выполненном в работе [8], показана роль отображения Гаусса для классификации или характеристики линейчатых подмногообразий в евклидовом пространстве или пространстве Минковского, связанных с оператором Лапласа и оператором Ченга – Яу.

Связь между гауссовыми кривизнами двумерной поверхности и ее сферического образа в E^4 исследована в [9].

В настоящей статье для n -поверхностей в E^{n+k} , $k \geq 1$, с помощью регулярного поля единичных нормальных векторов рассматриваемой n -поверхности определено сферическое отображение и изучены некоторые свойства ее сферического образа.

Результаты исследований

В $(n+k)$ -мерном евклидовом пространстве рассмотрим C^3 -регулярную n -поверхность F^n , заданную вектор-функцией

$$\mathbf{r} = \mathbf{r}(u_1, u_2, \dots, u_n). \quad (1)$$

В каждой точке F^n построим касательную n -плоскость и нормальную k -плоскость. В последней введем ортонормированный базис $(\mathbf{n}_1, \mathbf{n}_2, \dots, \mathbf{n}_k)$, принадлежащий классу C^2 . В результате на поверхности F^n возникает k векторных полей $(\mathbf{n}_1, \mathbf{n}_2, \dots, \mathbf{n}_k)$ класса C^2 .

Для векторов \mathbf{n}_s построим квадратичные формы $\varphi_s = (\mathbf{r}_{ij}, \mathbf{n}_s) du^i du^j = b_{ij,s} du^i du^j$ и определители второго порядка из коэффициентов этих форм $K_{iqkj,s} = \begin{vmatrix} b_{ik,s} & b_{ij,s} \\ b_{qk,s} & b_{qj,s} \end{vmatrix}$.

Легко доказать следующее утверждение.

Теорема 1. Величина $\sum_{s=1}^k K_{iqkj,s}$ не зависит от выбора базиса нормальной k -плоскости.

Деривационные формулы для n -поверхности (1) имеют вид

$$\mathbf{r}_{ij} = \Gamma_{ij}^h \mathbf{r}_h + \sum_{s=1}^k b_{ij,s} \mathbf{n}_s, \quad (2)$$

$$\frac{\partial \mathbf{n}_s}{\partial u^q} = -b_{q,s}^h \mathbf{r}_h + \alpha_{q,s}^p \mathbf{n}_p,$$

где $b_{q,s}^h = g^{hk} b_{kq,s}$ (g^{hk} – контравариантный метрический тензор n -поверхности F^n); $\alpha_{q,s}^p = (\frac{\partial \mathbf{n}_s}{\partial u^q}, \mathbf{n}_p)$ – коэффициенты кручения n -поверхности F^n в нормалях $(\mathbf{n}_1, \mathbf{n}_2, \dots, \mathbf{n}_k)$.

Можно доказать, что матрица $(\alpha_{q,s}^p)$ является кососимметричной по индексам s и p , при этом элементы главной диагонали равны нулю.

Теорема 2. Если все $\alpha_{q,s}^p = 0$, то $R_{iqjp} = \sum_{s=1}^k K_{iqjp,s}$.

Доказательство. Вычислим производные вектор-функции (2):

$$\begin{aligned} \mathbf{r}_{ij,p} &= \frac{\partial \Gamma_{ij}^h}{\partial u^p} \mathbf{r}_h + \Gamma_{ij}^h (\Gamma_{hp}^q \mathbf{r}_q + \sum_{s=1}^k b_{hp,s} \mathbf{n}_s) + \\ &+ \sum_{s=1}^k \frac{\partial b_{ij,s}}{\partial u^p} \mathbf{n}_s + \sum_{s=1}^k b_{ij,s} (-b_{p,s}^h \mathbf{r}_h), \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{r}_{ip,j} &= \frac{\partial \Gamma_{ip}^h}{\partial u^j} \mathbf{r}_h + \Gamma_{ip}^h (\Gamma_{hj}^q \mathbf{r}_q + \sum_{s=1}^k b_{hj,s} \mathbf{n}_s) + \\ &+ \sum_{s=1}^k \frac{\partial b_{ip,s}}{\partial u^j} \mathbf{n}_s + \sum_{s=1}^k b_{ip,s} (-b_{j,s}^h \mathbf{r}_h). \end{aligned} \quad (4)$$

Из равенства левых частей (3) и (4) следует равенство правых. Тогда коэффициенты в правых частях (3) и (4) при векторе \mathbf{r}_m равны, т.е.

$$\frac{\partial \Gamma_{ij}^m}{\partial u^p} + \Gamma_{ij}^h \Gamma_{hp}^m - \sum_{s=1}^k b_{ij,s} b_{p,s}^m = \frac{\partial \Gamma_{ip}^m}{\partial u^j} + \Gamma_{ip}^h \Gamma_{hj}^m - \sum_{s=1}^k b_{ip,s} b_{j,s}^m. \quad (5)$$

Преобразуем (5), получим

$$\frac{\partial \Gamma_{ij}^m}{\partial u^p} - \frac{\partial \Gamma_{ip}^m}{\partial u^j} + \Gamma_{ij}^h \Gamma_{hp}^m - \Gamma_{ip}^h \Gamma_{hj}^m = \sum_{s=1}^k b_{ij,s} b_{p,s}^m - \sum_{s=1}^k b_{ip,s} b_{j,s}^m. \quad (6)$$

Левая часть (6) есть тензор кривизны R_{ipj}^m n -поверхности (1).

В результате преобразования правой части (6) имеем

$$R_{ipj}^m = g^{ml} \sum_{s=1}^k (b_{ij,s} b_{lp,s} - b_{ip,s} b_{lj,s}). \quad (7)$$

При опускании верхнего индекса m в (7) получим

$$R_{qipj} = \sum_{s=1}^k (b_{ij,s} b_{qp,s} - b_{ip,s} b_{qj,s}) = \sum_{s=1}^k K_{iqjp,s}.$$

Из симметричности тензора кривизны следует утверждение теоремы.

На C^3 -регулярной n -поверхности F^n рассмотрим C^2 -регулярное единичное векторное поле $\mathbf{n}_1 = \mathbf{n}_1(u_1, u_2, \dots, u_n)$ такое, что вектор $\mathbf{n}_1 = \mathbf{n}_1(u_1, u_2, \dots, u_n)$ ортогонален касательной n -плоскости к F^n в точке с внутренними координатами (u_1, u_2, \dots, u_n) .

Определение 1. Сферическим отображением n -поверхности F^n в направлении векторного поля \mathbf{n}_1 назовем отображение

$$\mathbf{n}_1: F^n \rightarrow S^{n+k-1}, \tag{8}$$

которое каждой точке n -поверхности F^n ставит в соответствие конец единичного вектора \mathbf{n}_1 с началом в центре единичной гиперсферы $S^{n+k-1} \subset E^{n+k}$.

Замечание 1. Определенное выше отображение является сферическим отображением гиперповерхности.

Замечание 2. В дальнейшем вышеопределенное отображение будем называть сферическим.

Предположим, что \mathbf{n}_1 является первым вектором базиса $(\mathbf{n}_1, \mathbf{n}_2, \dots, \mathbf{n}_k)$ нормальных k -плоскостей n -поверхности F^n .

Пусть $\mathbf{n}_1(F^n)$ – образ n -поверхности F^n при определенном выше сферическом отображении. Так как заданное векторное поле $\mathbf{n}_1 = \mathbf{n}_1(u_1, u_2, \dots, u_n)$ является C^2 -регулярным, то n -поверхность $\mathbf{n}_1(F^n)$ будет C^2 -регулярной.

Поверхность $\mathbf{n}_1(F^n)$ задается вектор-функцией

$$\mathbf{n}_1 = \mathbf{n}_1(u_1, u_2, \dots, u_n). \tag{9}$$

Легко видеть, что если все коэффициенты кручения n -поверхности (1) в нормалях $(\mathbf{n}_1, \mathbf{n}_2, \dots, \mathbf{n}_k)$ равны нулю, то нормали $(\mathbf{n}_1, \mathbf{n}_2, \dots, \mathbf{n}_k)$ будут являться базисом нормальной k -плоскости n -поверхности $\mathbf{n}_1(F^n)$ и коэффициенты кручения последней в этих нормалях будут нулевыми.

Найдем тензор кривизны n -поверхности (9).

Учитывая результат теоремы 1, вычислим коэффициенты вторых квадратичных форм n -поверхности (9):

$$B_{ij,s} = -\left(\frac{\partial \mathbf{n}_1}{\partial u^i}, \frac{\partial \mathbf{n}_s}{\partial u^j}\right) = -g^{\alpha\beta} b_{\alpha i,1} b_{\beta j,s}. \tag{10}$$

Вычислим

$$\begin{aligned} \begin{vmatrix} B_{ik,s} & B_{ij,s} \\ B_{lk,s} & B_{lj,s} \end{vmatrix} &= \begin{vmatrix} g^{\gamma\beta} b_{\beta i,1} b_{\gamma k,s} & g^{\delta\epsilon} b_{\epsilon i,1} b_{\delta j,s} \\ g^{\gamma\beta} b_{\beta l,1} b_{\gamma k,s} & g^{\delta\epsilon} b_{\epsilon l,1} b_{\delta j,s} \end{vmatrix} = \\ &= g^{\gamma\beta} g^{\delta\epsilon} b_{\gamma k,s} b_{\delta j,s} \begin{vmatrix} b_{\beta i,1} & b_{\epsilon i,1} \\ b_{\beta l,1} & b_{\epsilon l,1} \end{vmatrix} = g^{\beta\gamma} g^{\epsilon\delta} K_{i\beta\epsilon,1} K_{\gamma\delta k j,s}. \end{aligned} \tag{11}$$

Теорема 3. Для n -поверхности F^n с нулевыми коэффициентами кручения в базисе $(\mathbf{n}_1, \mathbf{n}_2, \dots, \mathbf{n}_k)$ тензор кривизны \tilde{R}_{ilkj} ее сферического образа $\mathbf{n}_1(F^n)$ равен $\tilde{R}_{ilkj} = g^{\beta\gamma} g^{\epsilon\delta} K_{i\beta\epsilon,1} R_{\gamma\delta k j}$.

Доказательство. Опираясь на теорему 2 и формулу (11), найдем тензор кривизны n -поверхности $\mathbf{n}_1(F^n)$:

$$\begin{aligned} \tilde{R}_{ilkj} &= \sum_{s=1}^k \tilde{K}_{ilkj} = \sum_{s=1}^k \begin{vmatrix} B_{ik,s} & B_{ij,s} \\ B_{lk,s} & B_{lj,s} \end{vmatrix} = \\ &= g^{\beta\gamma} g^{\epsilon\delta} K_{i\beta\epsilon,1} \cdot \sum_{s=1}^k K_{\gamma\delta k j,s} = g^{\beta\gamma} g^{\epsilon\delta} K_{i\beta\epsilon,1} R_{\gamma\delta k j}. \end{aligned}$$

Следствие 1. Для двумерной поверхности F^2 с нулевыми коэффициентами кручения в $(n+2)$ -мерном евклидовом пространстве гауссова кривизна поверхности $\mathbf{n}_1(F^n)$ равна

$$\tilde{K} = \frac{K}{K_1} = \frac{K_1 + K_2 + \dots + K_n}{K_1},$$

где K – гауссова кривизна поверхности F^2 ; $K_i = \frac{b_{11,i} b_{22,i} - b_{12,i}^2}{g_{11} g_{22} - b_{12}^2}$.

Определение 2. Если размерность линейной оболочки векторов $\mathbf{b}_{ij}(b_{ij,1}, b_{ij,2}, \dots, b_{ij,k})$ в некоторой точке M n -поверхности F^n равна 1, то точка M называется аксиальной, если она равна двум – планарной, трем – спациональной [10].

Теорема 4. Ранги матриц $(b_{ij,s})$ и $(B_{ij,s})$ n -поверхностей F^n и $\mathbf{n}_1(F^n)$ с нулевыми коэффициентами кручения в нормалях $(\mathbf{n}_1, \mathbf{n}_2, \dots, \mathbf{n}_k)$ во всех точках равны.

Доказательство. Предположим, что ранг матрицы $(b_{ij,s})$ $r \leq \min(k, \frac{n(n+1)}{2})$. Без ограничения общности положим, что первые r столбцов матрицы $(b_{ij,s})$ линейно независимы, тогда

$$b_{ij,s} = \lambda_s^p b_{ij,p}, \quad (12)$$

где $p = 1, \dots, r, s > r$.

Подставив (12) в формулу (10), получим

$$B_{ij,s} = -g^{\alpha\beta} b_{\alpha i,1} b_{\beta j,s} = -g^{\alpha\beta} b_{\alpha i,1} \cdot \lambda_s^p b_{\beta j,p} = \lambda_s^p B_{ij,p}. \quad (13)$$

Из формулы (13) следует доказательство теоремы.

Следствие 2. Для того чтобы точка M n -поверхности F^n с нулевыми коэффициентами кручения в нормалях $(\mathbf{n}_1, \mathbf{n}_2, \dots, \mathbf{n}_k)$ являлась аксиальной (планарной, спациальной), необходимо и достаточно, чтобы точка $M' = \mathbf{n}_1(M)$ n -поверхности $\mathbf{n}_1(F^n)$ при сферическом отображении (8) являлась аксиальной (планарной, спациальной).

Примером n -поверхности F^n , удовлетворяющей условиям теорем 2–4, является четырехмерная поверхность $\mathbf{r} = \mathbf{r}(\cos u_1, \sin u_1, \cos u_2, \sin u_2, \cos u_3, \sin u_3, \cos u_4, \sin u_4)$ в восьмимерном евклидовом пространстве. Такую 4-поверхность можно рассматривать как топологическое произведение $S^1 \times S^1 \times S^1 \times S^1$ или топологическое произведение двух плоских двумерных торов Клиффорда

Заключение

В статье введено некоторое обобщение понятия сферического отображения для n -поверхности евклидова пространства, имеющей произвольную коразмерность. При выборе произвольного базиса и ограничениях, наложенных на коэффициенты кручения в выбранном базисе, исследованы вопросы о связи геометрических свойств заданной n -поверхности и ее сферического образа, в том числе о связи их тензоров кривизны.

Проблема, вытекающая из проведенного исследования, связана с вопросом канонизации базиса. В статье речь идет о произвольном базисе нормальной плоскости. Для двумерных поверхностей в E^4 вопрос о канонизации базиса решен в работах [11, 12]. Канонический базис позволяет получить некоторые новые внешние свойства поверхности, которые не могут быть получены для произвольного базиса нормального пространства.

В дальнейших исследованиях предполагается также отказаться от ограничений на коэффициенты кручения или рассмотреть изученные вопросы в псевдоевклидовом пространстве.

Список источников

1. Выгодский М.Я. Дифференциальная геометрия. М.; Л.: ГИТТЛ, 1949. 512 с.
2. Бакельман И.Я., Вернер А.Л., Кантор Б.Е. Введение в дифференциальную геометрию в целом. М.: Наука, 1973. 440 с.
3. Dursun U., Arsan G.G. Surfaces in the Euclidean space E^4 with pointwise 1-type Gauss map // Hacettepe J. of Mathematics and Statistics. 2011. Vol. 40, № 5. P. 617–625.
4. Dursun U., Yeğin R. Hyperbolic submanifolds with finite type hyperbolic Gauss map // International J. of Mathematics. 2015. Vol. 26, № 2. P. 1–18.
5. Baba-Hamed C., Bekkar M. On the Gauss map of surfaces of revolution in the three-dimensional Minkowski space // Tsukuba J. of Mathematics. 2012. Vol. 36, № 2. P. 193–215.
6. Milousheva V., Turgay N.C. Quasi-minimal Lorentz surfaces with pointwise 1-type Gauss map in pseudo-Euclidean 4-space // J. of Geometry and Physics. 2016. Vol. 106. P. 171–183.
7. Reiko A., Kazuo A., Satoru I., Yu K. Remarks on the Gauss images of complete minimal surfaces in Euclidean four-space // Annali di Matematica Pura ed Applicata. 2017. Vol. 196, № 5. P. 1863–1875.
8. Ho K.Y. Submanifolds related to Gauss map and some differential operators // Recent Advances in the Geometry of Submanifolds Dedicated to the Memory of Franki Dillen (1963–2013). American Mathematical Society. 2016. P. 89–97.
9. Шармин В.Г., Шармина Т.Н. Кривизна сферического образа двумерной поверхности с ненулевым кручением в E^4 // Вестн. Бурятского ун-та. Математика, информатика. 2016. № 2. С. 17–24.

10. Схоутен И.А., Стройк Д.Я. Введение в новые методы дифференциальной геометрии. М.: ГИИЛ, 1948. Т. 2. 348 с.
11. Фирсов А.И. Канонические нормали поверхности большой коразмерности // Вестн. МГУ. Механика. Математика. 1976. № 2. С. 37–42.
12. Рамазанова К.Ш. Теория кривизны X_2 в E^4 // Изв. вузов. Математика. 1966. № 6. С. 137–143.

References

1. Vygodskii M.Ya. *Differential geometry*. Moscow; Leningrad: State Publishing House of Technical and Theoretical Literature; 1949. 512 p. (In Russ.).
2. Bakel'man I.Ya., Verner A.L., Kantor B.E. *Introduction to differential geometry in the large*. Moscow: Nauka Publ.; 1973. 440 p. (In Russ.).
3. Dursun U., Arsan G.G. Surfaces in the Euclidean space E^4 with pointwise 1-type Gauss map. *Hacettepe Journal of Mathematics and Statistics*. 2011;40(5):617-625.
4. Dursun U., Yeğin R. Hyperbolic submanifolds with finite type hyperbolic Gauss map. *International Journal of Mathematics*. 2015;26(2):1-18.
5. Baba-Hamed C., Bekkar M. On the Gauss map of surfaces of revolution in the three-dimensional Minkowski space. *Tsukuba Journal of Mathematics*. 2012;36(2):193-215.
6. Milousheva V., Turgay N.C. Quasi-minimal Lorentz surfaces with pointwise 1-type Gauss map in pseudo-Euclidean 4-space. *Journal of Geometry and Physics*. 2016;106:171-183.
7. Reiko A., Kazuo A., Satoru I., Yu K. Remarks on the Gauss images of complete minimal surfaces in Euclidean four-space. *Annali di Matematica Pura ed Applicata*. 2017;196(5):1863-1875.
8. Ho K.Y. Submanifolds related to Gauss map and some differential operators. *Recent Advances in the Geometry of Submanifolds Dedicated to the Memory of Franki Dillen (1963-2013)*. American Mathematical Society. 2016:89-97.
9. Sharmin V.G., Sharmina T.N. The curvature of the spherical image of the two-dimensional surface with non-zero torsion in E^4 . *Vestn. Buryatskogo un-ta. Matematika, informatika = BSU bulletin. Mathematics, Informatics*. 2016;(2):17-24. (In Russ.).
10. Schouten I.A., Stroyk D.Ya. *Introduction to new methods of differential geometry*. Moscow: GIIL Press; 1948;2. 348 p. (In Russ.).
11. Firsov A.I. Canonical surface normals of large codimension. *Vestn. MGU. Mekhanika. Matematika = MSU Bulletin. Mechanics. Mathematics*. 1976;(2):37-42. (In Russ.).
12. Ramazanova K.Sh. Curvature theory X_2 in E^4 . *Izvestiya vuzov. Matematika = Russian Mathematics*. 1966;(6):137-143. (In Russ.).

Информация об авторах

Д.В. Шармин – кандидат педагогических наук, доцент, доцент кафедры алгебры и математической логики.

Т.Н. Шармина – кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры программной и системной инженерии.

В.Г. Шармин – кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры алгебры и математической логики.

Information about the authors

D.V. Sharmin - Candidate of Science (Pedagogics), Associate Professor, Associate Professor of Department of Algebra and Mathematical Logic.

T.N. Sharmina - Candidate of Science (Physics and Mathematics), Associate Professor, Associate Professor of Department of Software and Systems Engineering.

V.G. Sharmin - Candidate of Science (Physics and Mathematics), Associate Professor, Associate Professor of Department of Algebra and Mathematical Logic.

Статья поступила в редакцию 20.09.2022; одобрена после рецензирования 24.10.2022; принята к публикации 02.03.2023.
The article was submitted 20.09.2022; approved after reviewing 24.10.2022; accepted for publication 02.03.2023.

НАУКИ О ЗЕМЛЕ SCIENCES OF EARTH

Научная статья
УДК 551.46+574.51
doi: 10.18522/1026-2237-2023-1-35-42

ИЗУЧЕНИЕ УРОВНЯ ЭВТРОФИКАЦИИ ПРИБРЕЖНЫХ ВОД ГДАНЬСКОГО ЗАЛИВА БАЛТИЙСКОГО МОРЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДАНЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

Ольга Олеговна Бабич^{1✉}, Артем Олегович Рада², Юлия Владимировна Куликова³,
Станислав Алексеевич Сухих⁴

^{1, 2, 3, 4} Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта, Калининград, Россия

² Кемеровский государственный университет, Кемерово, Россия

¹ olich.43@mail.ru✉

² radaartem@mail.ru

³ kulikova.pnpu@gmail.com

⁴ stas-asp@mail.ru

Аннотация. Представлен анализ уровня эвтрофикации Балтийского моря на основании анализа космоснимков по уровню нормализованного разностного вегетационного индекса. Исследования проводились в Гданьском заливе Балтийского моря в Калининградской области на основании фондовых данных за период с мая по сентябрь 2013–2021 гг. Установлено, что в исследуемом регионе наблюдался пик уровня эвтрофикации в 2017–2019 гг. с постепенным спадом в 2019–2021 гг., связанным со стагнацией части производственных процессов, приносящих биогенные элементы в воды Балтийского моря. Отмечено общее повышенное значение уровня нормализованного разностного вегетационного индекса для прибрежных вод Балтийского моря по сравнению с фоновыми значениями.

Ключевые слова: эвтрофикация, Балтийское море, микроводоросли, дистанционное зондирование, спутниковые снимки, сине-зеленые бактерии

Благодарности: исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, номер проекта FZWM-2023-0003.

Для цитирования: Бабич О.О., Рада А.О., Куликова Ю.В., Сухих С.А. Изучение уровня эвтрофикации прибрежных вод Гданьского залива Балтийского моря с использованием данных дистанционного зондирования Земли // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. 2023. № 1. С. 35–42.

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

Original article

STUDY OF COASTAL WATERS EUTROPHICATION LEVEL OF GDANSK BAY (BALTIC SEA) USING EARTH REMOTE SENSING DATA

Olga O. Babich^{1✉}, Artem O. Rada², Yuliya V. Kulikova³, Stanislav A. Sukhikh⁴

^{1, 2, 3, 4} Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad, Russia

² Kemerovo State University, Kemerovo, Russia

¹ olich.43@mail.ru✉

² radaartem@mail.ru

³ kulikova.pnpu@gmail.com

⁴ stas-asp@mail.ru

© Бабич О.О., Рада А.О., Куликова Ю.В., Сухих С.А., 2023

Abstract. Paper presents an analysis of eutrophication level of Baltic Sea based on the satellite images analysis. Methodologically, the analysis was based on level of the normalized difference vegetation index estimation. Studies was conducted in Gdansk Bay of the Baltic Sea in the Kaliningrad region, based on deposit data for the period from May to September, 2013-2021. It has been established that in the region under study there is a peak in the level of eutrophication in 2017-2019, with a gradual decline in 2019-2021, associated with the stagnation of production processes that introduce nutrients into the waters of the Baltic Sea. A general increased value of normalized difference vegetation index for the coastal waters of the Baltic Sea was noted in comparison with background level.

Keywords: eutrophication, Baltic Sea, microalgae, remote sensing, satellite imagery, cyanobacteria

Acknowledgments: the research was carried out within the state assignment of Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (theme FZWM-2023-0003).

For citation: Babich O.O., Rada A.O., Kulikova Yu.V., Sukhikh S.A. Study of Coastal Waters Eutrophication Level of Gdansk Bay (Baltic Sea) Using Earth Remote Sensing Data. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2023;(1):35-42. (In Russ.).

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

Введение

Балтийское море является одним из крупнейших солоноватоводных водоемов на Земле [1, 2]. Узкий выход в Северное море, наличие значительного притока множества рек, высокий уровень урбанизации и промышленного развития (на водосборной территории в настоящий момент проживает около 80 млн) приводят к его высокому антропогенному загрязнению и экологической уязвимости [3–6].

Увеличение поступления питательных веществ в Балтийское море изменяет биологическую структуру и экологические процессы как в прибрежных, так и в открытых морских районах и повышает эвтрофикацию. Ее высокий уровень может привести к таким негативным последствиям, как потеря природных свойств воды, изменение ее состава, замор (гибель) гидробионтов, потеря рыбохозяйственного и рекреационного потенциала водоема и, в худшем случае, его исчезновение. Для предотвращения критических ситуаций становится важным своевременно проводить мониторинг уровня эвтрофикации водных ресурсов [7].

Площадь акватории Гданьского залива Балтийского моря составляет 22 тыс. км². Полевой отбор проб для оценки уровня эвтрофикации в этом случае становится трудоемким, затратным, сложным в обработке и интерпретации результатов. При этом инновационные дистанционные методы оценки уровня эвтрофикации с помощью спутниковых снимков позволяют на высоком уровне дополнить или заменить выездные работы в короткие сроки и с минимальными издержками.

Современные приборы дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) способствуют оперативному осуществлению полномасштабной съемки объемной территории с довольно высокой степенью детализации снимков, в результате чего становится возможным выполнять постоянный мониторинг без полевых исследований. Наряду с этим с помощью архивных данных космической съемки возможна ретроспективная оценка уровня эвтрофикации, что способствует определению экологических тенденций для качественной оценки текущей и моделирования будущей ситуаций.

С целью оценки потенциального экологического воздействия на развитие микроводорослей были проведены исследования в акватории Гданьского и Калининградского заливов Балтийского моря, а также дана общая оценка уровня эвтрофикации с помощью дистанционных методов (на основании космоснимков).

Материалы и методы

Описание объекта исследования. Балтийское море – внутриматериковое море Атлантического океана. Его площадь составляет 419 тыс. км², объем воды – 21,5 тыс. км³, береговая линия – 8 тыс. км, средняя глубина – 51 м, максимальная – 470 [8].

Район проведенных исследований по изучению уровня эвтрофикации прибрежных вод обозначен в пределах Гданьского и Калининградского заливов, расположенных в юго-восточной части Балтийского моря. Координаты: 54.221389 с.ш 19.361066 в.д., 54.681633 с.ш. 20.410762 в.д., 54.961138 с.ш. 19.985625 в.д., 54.634473 с.ш. 18.819775 в.д. Границы залива довольно четкие и охватывают побережья Польши (юг), Российской Федерации (Калининградская область) и Литвы (восток). Средняя глубина залива составляет 70 м, площадь акватории – 22 тыс. км² [9, 10]. На рис. 1 представлена схема границ объекта исследования.

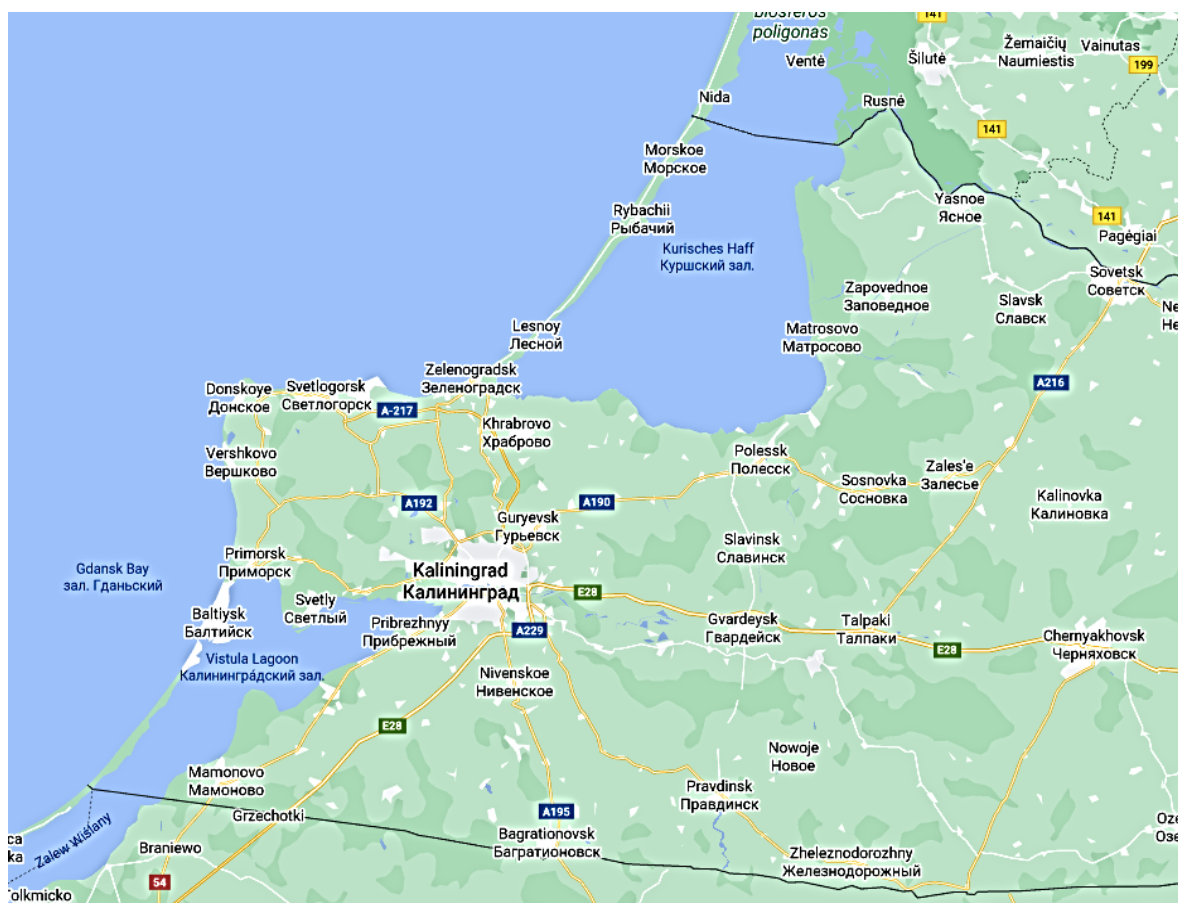


Рис. 1. Схема границ прибрежной и береговой зон Гданьского залива Балтийского моря
/ Fig. 1. Scheme of the boundaries of the coastal and coastal zone of the Gdansk Bay in the Baltic Sea

Акватория Гданьского бассейна, включая Калининградский залив, является одним из наиболее эвтрофированных районов Балтийского моря. Данный факт обусловлен не только природными условиями (ограниченный водообмен, соленостный и температурный барьеры между поверхностными и придонными водами [10]), но и антропогенными факторами. На территории расположен гидротехнический объект – морской порт (г. Балтийск). В пределах 20 км от Калининградского залива развивается горнодобывающая промышленность (добыча янтара).

Методика проведения исследований

При выборе методики и подходов оценки уровня эвтрофикации вод было учтено, что массовое развитие фитопланктона, водорослей и высших водных растений хорошо видно на снимках с высоким разрешением с натуральной цветопередачей (RGB) и синтезированной (на основе NDVI).

Для исследования динамики значений NDVI был выбран запущенный в 2013 г. спутник Landsat 8. Индекс NDVI рассчитан за счет использования каналов: 4 – красный (Red); 5 – ближний инфракрасный (NIR). Пространственное разрешение для них составляет 30 м/пикс.

Прилагаемые снимки с RGB получены за счет комбинации каналов: 2 – синий (Blue); 3 – зелёный (Green); 4 – красный (Red). Пространственное разрешение – 30 м/пикс.

Сопоставление полученных пар снимков допустимо, поскольку каналы, используемые при формировании пар снимков NDVI и RGB, имеют одинаковое пространственное разрешение, а также дату и время съемки.

Всего было обработано и проанализировано 39 спутниковых изображений. Далее проводили подсчет площади микроводорослей и сине-зелёных бактерий на каждом снимке. На рис. 2 представлен пример спутникового RGB-снимка части района исследования, на котором присутствует сине-зеленое свечение, характерное для сине-зеленых бактерий и микроводорослей.



Рис. 2. Акватория Калининградского залива (снимок RGB от 08.2019) /
Fig. 2. Water area of the Kaliningrad Bay (Image RGB dated 08.2019)

Эффективным показателем для анализа состояния и площади зеленой растительности на поверхности водного объекта считается индекс NDVI, по-другому – вегетационный индекс, успешно применяемый в работах [11–15].

Нормализованный относительный индекс растительности – количественный показатель распространенности фотосинтетически активной биомассы. Он использует контраст характеристик двух каналов из набора мультиспектральных растровых данных – поглощение пигментом хлорофилла в красном канале и высокую отражательную способность растительности в инфракрасном канале. И рассчитывается по формуле

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED},$$

где NIR – отражение в ближней инфракрасной области спектра; RED – отражение в красной области спектра.

Итак, в качестве оптимальных показателей для оценки уровня эвтрофикации Гданьского и Калининградского заливов Балтийского моря по мультиспектральным спутниковым снимкам (рис. 3) в данном исследовании приняты среднее значение NDVI и площадь положительного NDVI. Указанные показатели рассчитаны по каждому полученному снимку с использованием специализированного программного обеспечения QGIS.

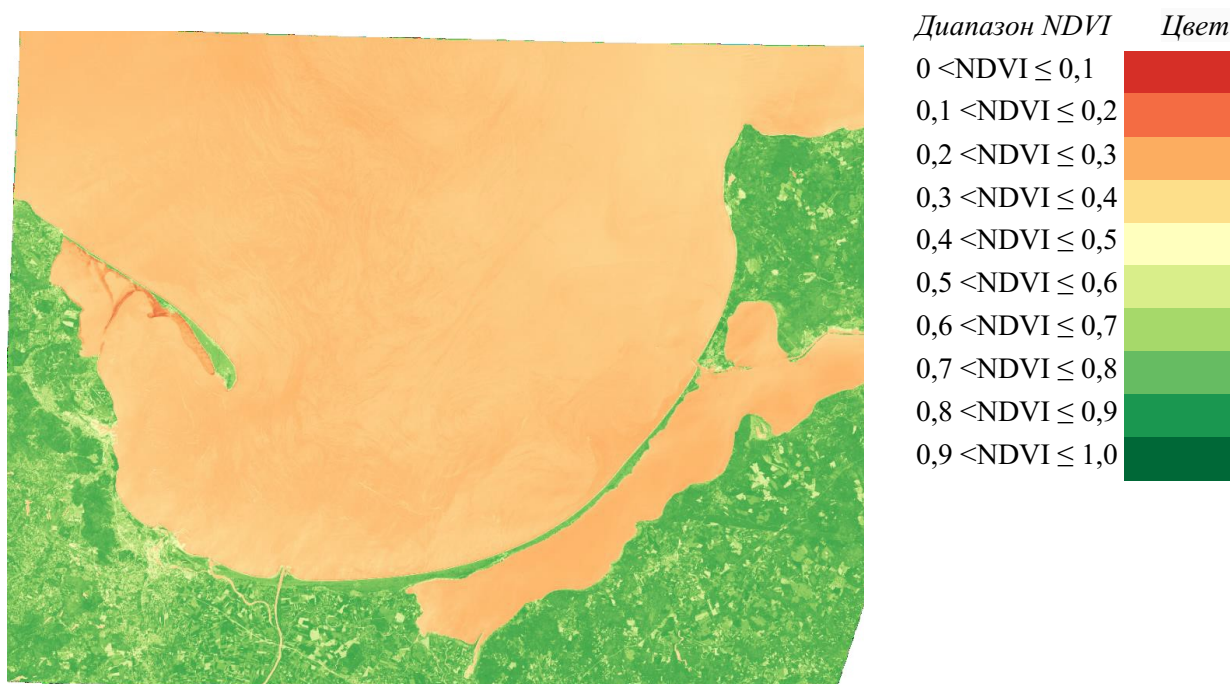


Рис. 3. Мультиспектральный спутниковый снимок (на основе NDVI) (среднее значение NDVI 0,27, дата снимка 06.2017) / Fig. 3. Multispectral satellite image (based on NDVI) (average NDVI 0.27, image date 06.2017)

Результаты исследований

На первом этапе проводилась простая оценка среднего значения NDVI и площади положительного NDVI. Результаты расчетов представлены в таблице. Значения индекса NDVI варьируются от $-1,00$ до $1,00$ в зависимости от типа объекта. Так, для камней, снега, песка, воды и т.п. индекс принимает значения от $-1,00$ до 0 ; для участков растительности NDVI колеблется в диапазоне от 0 до $1,00$ (чем больше зеленая масса, тем значение ближе к $1,00$). Следовательно, можно утверждать, что присутствие в гидросфере положительного значения NDVI свидетельствует о наличии процессов эвтрофикации.

Значимость гипотезы возрастает при совмещении снимков RGB и NDVI. На рис. 3 представлен участок Калининградского залива (снимки от 06.2017), на котором видно, что зеленому свечению на RGB-снимке соответствует значение $0,2 < NDVI \leq 0,3$ (согласно цветовой легенде), что означает наличие эвтрофикации.

Показатели уровня эвтрофикации / Indicators of the level of eutrophication

Дата снимка	Среднее значение NDVI	Площадь положительного NDVI, тыс. м ²	Дата снимка	Среднее значение NDVI	Площадь положительного NDVI, тыс. м ²
05.2013	0,16	397,8	08.2013	0,30	8055,9
06.2013	0,33	16695,9	09.2013	0,27	5468,4
07.2013	0,27	2800,8			
05.2014	0,21	1492,2	08.2014	0,35	2631,6
07.2014	0,26	6501,6	09.2014	0,26	1837,8
05.2015	0,15	666	08.2015	0,26	8990,1
06.2015	0,24	1395,9			
05.2016	0,13	20628,9	08.2016	0,17	2814,3
06.2016	0,26	1299,6	09.2016	0,22	6489,9
07.2016	0,24	5292,9			
05.2017	0,18	145,8	07.2017	0,23	6440,4

Окончание таблицы

Дата снимка	Среднее значение NDVI	Площадь положительного NDVI, тыс. м ²	Дата снимка	Среднее значение NDVI	Площадь положительного NDVI, тыс. м ²
06.2017	0,27	1020,6	08.2017	0,29	4238,1
05.2018	0,29	3388,5	08.2018	0,34	3141,9
06.2018	0,30	10161	09.2018	0,26	2876,4
07.2018	0,29	5249,7			
05.2019	0,29	1617,3	08.2019	0,28	30511,8
06.2019	0,31	3049,2	09.2019	0,14	2565,9
07.2019	0,30	2784,6			
05.2020	0,16	403,2	08.2020	0,26	2248,2
07.2020	0,25	2555,1	09.2020	0,19	936
05.2021	0,15	294,3	08.2021	0,19	2244,6
06.2021	0,21	1575,9	09.2021	0,14	3402

Обсуждение результатов исследования

Рассчитанные показатели уровня эвтрофикации позволяют провести сравнительный анализ развития зеленой растительности в период май – сентябрь 2013–2021 гг. в границах прибрежной и береговой зон Гданьского залива Балтийского моря.

На рис. 4 представлена динамика среднего значения NDVI по годам в зависимости от месяца. По графику видно, что наиболее высокие значения были в августе (2014, 2018 гг.), наиболее низкие – в мае (2013–2017, 2020 гг.). Годовые периоды: самые высокие показатели прослеживаются в 2014 г., низкие – в 2021 г. Можно заметить, что возрастание значения NDVI в период 2017–2018 гг. сменилось снижением в 2019–2021 гг.

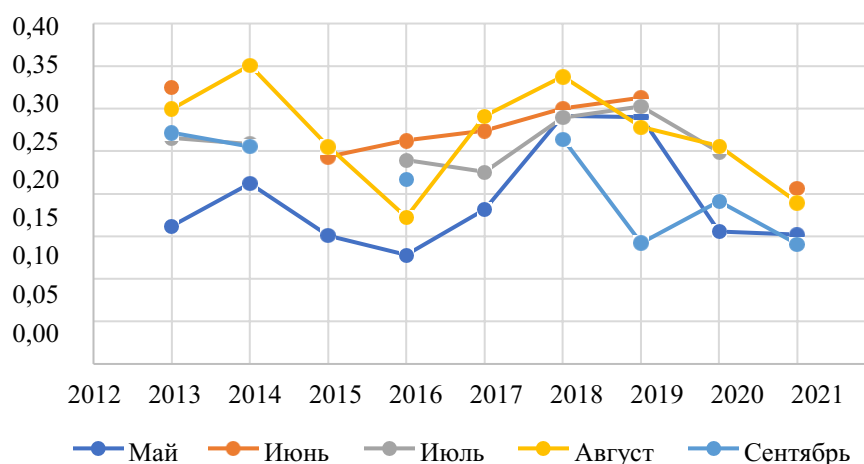


Рис. 4. Динамика среднего значения NDVI / Fig. 4. Dynamics of the average value of NDVI

Следует отметить скачкообразный характер площади NDVI (рис. 5) в августе 2015 г., в мае 2016 г., в июне 2018 г. и в августе 2019 г. (пиковое значение). При этом каждой точке экстремума свойствен резкий спад в следующем году.

Рассматривая динамику среднего значения NDVI и площадь положительного NDVI в годовом разрезе, можно сделать вывод, что площадь положительного NDVI не влияет на его среднее значение, которое в изучаемом периоде всегда находится в пределе 0,13–0,35, а площадь меняется более интенсивно: от 145,8 до 30 600 тыс. м².

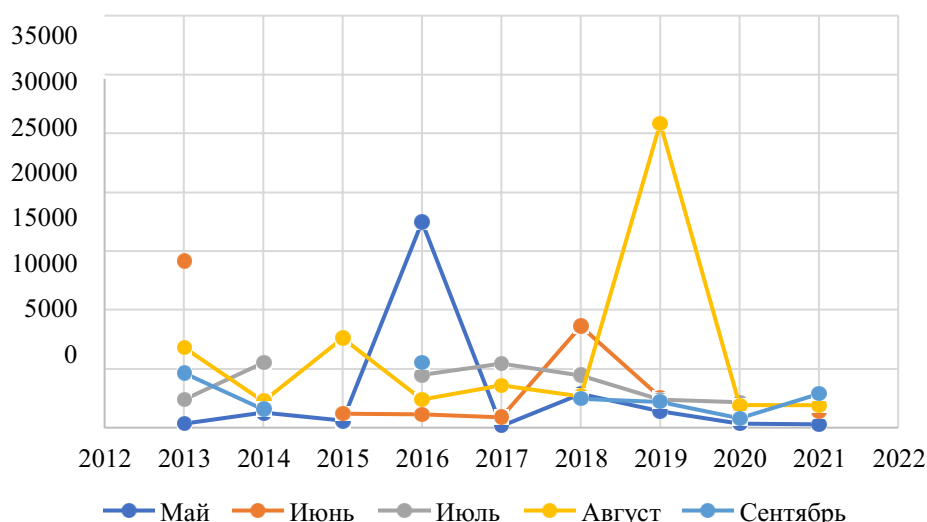


Рис. 5. Динамика площади NDVI / Fig. 5. Dynamics of the NDVI area

Таким образом, согласно результатам исследования по методике оценки площади зеленой растительности (мультиспектральные снимки на основе NDVI), полученным посредством ДЗЗ, стоит говорить о существовании проблемы эвтрофикации на изучаемом объекте. Среднее значение NDVI с мая по сентябрь 2013–2021 гг. всегда является положительным и сосредоточено в пределах 0,13–0,35; площадь положительного NDVI достигает 30,6 тыс. м². В целях выявления факторов, влияющих на интенсивный рост и резкое снижение площади зеленой растительности, необходимо проведение дополнительных исследований по определению причинно-следственных связей данных фактов.

Список источников

1. *Bonsdorff E., Rönnberg C., Aarnio K.* Some ecological properties in relation to eutrophication in the Baltic Sea // *Nutrients and Eutrophication in Estuaries and Coastal Waters*. Dordrecht: Springer, 2002. P. 371–377.
2. *Bonsdorff E.* Zoobenthic diversity-gradients in the Baltic Sea: continuous post-glacial succession in a stressed ecosystem // *J. of Experimental Marine Biology and Ecology*. 2006. Vol. 330 (1). P. 383–391.
3. *Lundberg C.* Conceptualizing the Baltic Sea ecosystem: an interdisciplinary tool for environmental decision making // *AMBIO: J. of the Human Environment*. 2005. Vol. 34 (6). P. 433–439.
4. *Kukk H., Martin G., Kotta I.* Species composition of the benthic littoral communities of Naissaar Island // *EMI Report*. 1997. Vol. 8. P. 11–17.
5. *Bonsdorff E., Pearson T.H.* Variation in the sublittoral macrozoobenthos of the Baltic Sea along environmental gradients: functional-group approach // *Australian J. of Ecology*. 1999. Vol. 24 (4). P. 312–326.
6. *Skei J., Larsson P., Rosenberg R., Jonsson P., Olsson M., Broman D.* Eutrophication and contaminants in aquatic ecosystems // *AMBIO: A J. of the Human Environment*. 2000. Vol. 29 (4). P. 184–194.
7. *Gladyshev M.I., Gubelit Y.I.* Green tides: new consequences of the eutrophication of natural waters (invited review) // *Contemporary Problems of Ecology*. 2019. Vol. 12 (2). P. 109–125.
8. *Лебедев С.А.* Климатические изменения температуры поверхности и уровня Балтийского моря по данным дистанционного зондирования // *Янтарный мост*. 2014. № 1. С. 78–95.
9. *Назирова К.Р., Краюшкин Е.В.* Мониторинг распространения вод Калининградского залива в акватории Гданьского залива (Юго-Восточная Балтика) // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2021. Т. 18, № 2. С. 271–284.
10. *Кудрявцева Е.А., Саввичев А.С., Александров С.В., Канапацкий Т.А., Пименов Н.В.* Бактериопланктон Гданьского бассейна Балтийского моря // *Микробиология*. 2012. Т. 81. С. 377–388.
11. *Jaskuła J., Sojka M.* Assessing Spectral Indices for Detecting Vegetative Overgrowth of Reservoirs // *Pol. J. Environ. Stud*. 2019. Vol. 28 (6). P. 4199–4211. <https://doi.org/10.15244/pjoes/98994>.
12. *Viso-Vázquez M., Acuña-Alonso C., Rodríguez J.L., Álvarez X.* Remote Detection of Cyanobacterial Blooms and Chlorophyll-a Analysis in a Eutrophic Reservoir Using Sentinel-2 // *Sustainability*. 2021. Vol. 13. P. 8570. <https://doi.org/10.3390/su13158570>.
13. *Labus M.P., Nielsen G.A., Lawrence R.L., Engel R., Long D.S.* Wheat yield estimates using multi-temporal NDVI satellite imagery // *International J. of Remote Sensing*. 2002. Vol. 23, № 20. P. 4169–4180. <https://doi.org/10.1080/01431160110107653>.

14. Jang S.Y., Xiong Q.X., Zhu J.Q. Evaluation of Lake Eutrophication Based on the HJ-1 Satellite Multispectral Data // *Applied Mechanics and Materials*. 2014. Vol. 519. P. 1182–1185. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.519-520.1182>.

15. Zhang Y., Li M., Dong J., Yang H., Van Zwieten L., Lu H., Alshameri A., Zhan Z., Chen X., Jiang X., Xu W., Bao Y., Wang H.A. Critical Review of Methods for Analyzing Freshwater Eutrophication // *Water*. 2021. Vol. 13. P. 225. <https://doi.org/10.3390/w13020225>.

References

1. Bonsdorff E., Ronnberg C., Aarnio K. Some ecological properties in relation to eutrophication in the Baltic Sea. *Nutrients and Eutrophication in Estuaries and Coastal Waters*. Dordrecht: Springer Publ.; 2002:371-377.

2. Bonsdorff E. Zoobenthic diversity-gradients in the Baltic Sea: continuous post-glacial succession in a stressed ecosystem. *J. of Experimental Marine Biology and Ecology*. 2006;330(1):383-391.

3. Lundberg C. Conceptualizing the Baltic Sea ecosystem: an interdisciplinary tool for environmental decision making. *AMBIO: A J. of the Human Environment*. 2005;34(6):433-439.

4. Kukk H., Martin G., Kotta I. Species composition of the benthic littoral communities of Naissaar Island. *EMI Report*. 1997;8:11-17.

5. Bonsdorff E., Pearson T.H. Variation in the sublittoral macrozoobenthos of the Baltic Sea along environmental gradients: A functional-group approach. *Australian J. of Ecology*. 1999;24(4):312-326.

6. Skei J., Larsson P., Rosenberg R., Jonsson P., Olsson M., Broman D. Eutrophication and contaminants in aquatic ecosystems. *AMBIO: A J. of the Human Environment*. 2000;29(4):184-194.

7. Gladyshev M.I., Gubelit Y.I. Green tides: new consequences of the eutrophication of natural waters (invited review). *Contemporary Problems of Ecology*. 2019;12(2):109-125.

8. Lebedev S.A. Climatic changes in the surface temperature and level of the Baltic Sea according to remote sensing data. *Yantarnyi most = Amber Bridge*. 2014;(1):78-95. (In Russ.).

9. Nazirova K.R., Krayushkin E.V. Monitoring of distribution of waters of the Kaliningrad Bay in the water area of the Gdansk Bay (South-East Baltic). *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa = Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space*. 2021;18(2):271-284. (In Russ.).

10. Kudryavtseva E. A., Savvichev A. S., Aleksandrov S. V., Kanapatsky T. A., Pimenov N. V. Bacterioplankton of the Gdansk Basin of the Baltic Sea. *Mikrobiologiya = Microbiology*. 2012;81:377-388. (In Russ.).

11. Jaskuła J., Sojka M. Assessing Spectral Indices for Detecting Vegetative Overgrowth of Reservoirs. *Pol. J. Environ. Stud*. 2019;28(6):4199-4211, <https://doi.org/10.15244/pjoes/98994>.

12. Viso-Vázquez M., Acuña-Alonso C., Rodríguez J.L., Álvarez X. Remote Detection of Cyanobacterial Blooms and Chlorophyll-a Analysis in a Eutrophic Reservoir Using Sentinel-2. *Sustainability*. 2021;13:8570, <https://doi.org/10.3390/su13158570>.

13. Labus M. P., Nielsen G. A., Lawrence R. L., Engel R., Long D. S. Wheat yield estimates using multi-temporal NDVI satellite imagery. *International J. of Remote Sensing*. 2002;23(20):4169-4180, <https://doi.org/10.1080/01431160110107653>.

14. Jang S.Y., Xiong Q.X., Zhu J.Q. Evaluation of Lake Eutrophication Based on the HJ-1 Satellite Multispectral Data. *Applied Mechanics and Materials*. 2014;519:1182-1185, <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.519-520.1182>.

15. Zhang Y., Li M., Dong J., Yang H., Van Zwieten L., Lu H., Alshameri A., Zhan Z., Chen X., Jiang X., Xu W., Bao Y., Wang H. A Critical Review of Methods for Analyzing Freshwater Eutrophication. *Water*. 2021;13:225, <https://doi.org/10.3390/w13020225>.

Информация об авторах

О.О. Бабич – доктор технических наук, профессор, директор, НОЦ «Прикладные биотехнологии».

А.О. Рада – кандидат технических наук, директор, Центр компьютерного инжиниринга.

Ю.В. Куликова – кандидат технических наук, научный сотрудник, Школа живых систем.

С.А. Сухих – доктор технических наук, заведующий лабораторией микробиологии и биотехнологии, Школа живых систем.

Information about the authors

O.O. Babich - Doctor of Science (Technical Science), Professor, Director, NEC "Applied Biotechnology".

A.O. Rada - Candidate of Science (Technical Science), Director, Center for Computer Engineering.

Yu.V. Kulikova - Candidate of Science (Technical Science), Researcher, School of Living Systems.

S.A. Sukhikh - Doctor of Science (Technical Science), Head of the Laboratory of Microbiology and Biotechnology, School of Living Systems.

Статья поступила в редакцию 06.06.2022; одобрена после рецензирования 15.07.2022; принята к публикации 02.03.2023.
The article was submitted 06.06.2022; approved after reviewing 15.07.2022; accepted for publication 02.03.2023.

Научная статья

УДК 631.425

doi: 10.18522/1026-2237-2023-1-43-48

АГРОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И СТЕПЕНЬ ГУМУСИРОВАННОСТИ АЛЛЮВИАЛЬНОЙ СЕРОГУМУСОВОЙ ПОЧВЫ (ПРИМОРСКИЙ КРАЙ)

**Максим Леонидович Бурдуковский^{1✉}, Полина Александровна Перепелкина²,
Ирина Владимировна Киселева³**

^{1, 2, 3} Федеральный научный центр биоразнообразия наземной биоты Восточной Азии ДВО РАН,
Владивосток, Россия

¹ mburdukovskii@gmail.com ✉

² polly2004@list.ru

³ kiseleva-iv@inbox.ru

Аннотация. Структурные характеристики почвы, её плотность и показатели гумусного состояния являются ключевыми индикаторами качества и плодородия. Цель данной работы состоит в исследовании агрофизических свойств и степени гумусированности аллювиальной серогумусовой почвы юга Приморского края. Структурно-агрегатный анализ почв проводили методом сухого просеивания, в результате которого агрегаты были разделены на семь фракций: >10, 10–5, 5–2, 2–1, 1–0,5, 0,5–0,25 и <0,25 мм. Рассчитаны средневзвешенный диаметр агрегатов, коэффициент структурности, доля агрономически ценных агрегатов. Плотность почвы определяли методом режущего цилиндра, содержание гумуса – по Тюрину. Исследуемые участки, находящиеся в залежном состоянии более 60 лет, характеризовались благоприятными агрофизическими свойствами. Величина плотности в верхней толще не выходит за пределы оптимальных значений. Количество агрономически ценных агрегатов указывает на отличное агрегатное состояние, коэффициент структурности высокий. По степени гумусированности пахотного горизонта почвы относятся к среднегумусированному виду.

Ключевые слова: почвы залежей, физические свойства почвы, структура почвы, агрегатный состав, плотность почвы, гумус, аллювиальная серогумусовая почва, Приморский край

Для цитирования: Бурдуковский М.Л., Перепелкина П.А., Киселева И.В. Агрофизические свойства и степень гумусированности аллювиальной серогумусовой почвы (Приморский край) // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. 2023. № 1. С. 43–48.

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

Original article

AGROPHYSICAL PROPERTIES AND DEGREE OF HUMIFICATION OF ALLUVIAL GRAY HUMUS SOILS (PRIMORSKY REGION)

Maksim L. Burdukovskii^{1✉}, Polina A. Perepelkina², Irina V. Kiseleva³

^{1, 2, 3} Federal Scientific Center of the East Asia Terrestrial Biodiversity, Far Eastern Branch, Russian Academy of Science, Vladivostok, Russia

¹ mburdukovskii@gmail.com ✉

² polly2004@list.ru

³ kiseleva-iv@inbox.ru

Abstract. The structural characteristics of the soil, soil density and humus status indicators are key indicators of quality and fertility. The aim of this work is to study the agrophysical properties and degree of humification of alluvial gray humus soils in Primorsky region of Russia. Studies were conducted on abandoned agricultural fields

© Бурдуковский М.Л., Перепелкина П.А., Киселева И.В., 2023

(60 years after abandonment). Soil macroaggregates were separated with the sieve (dry sieve) to seven aggregate size fractions, i.e. >10, 10–5, 5–2, 2–1, 1–0.5, 0.5–0.25 and <0.25 mm. The content of agronomically valuable aggregates, the mean weighted diameter and the structure coefficient were calculated. The bulk density of the soil was determined by the gravimetric method, the humus content with Tyurin method. The studied fallow lands were characterized by favorable agrophysical properties. The bulk density of the soil in the upper horizons does not go beyond the optimal values. The content of agronomically valuable aggregates indicates an excellent aggregate state of soils. The structure coefficient is also assessed as high. The studied alluvial gray humus soils belong to the class of medium humus.

Keywords: fallow soils, physical properties of soil, soil structure, aggregate structure, bulk density, humus, alluvial gray soils, Primorsky region

For citation: Burdukovskii M.L., Perepelkina P.A., Kiseleva I.V. Agrophysical Properties and Degree of Humification of Alluvial Gray Humus Soils (Primorsky Region). *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2023;(1):43–48. (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

Характеристики структуры почвы, плотность сложения, степень ее гумусированности – важнейшие показатели роста и развития растений [1–3]. В условиях современного землепользования, когда развитие сельскохозяйственной отрасли находится на этапе активного роста, необходимо тщательный контроль за изменением свойств почв, определяющих ее ценность.

Изучение аллювиальных серогумусовых почв является важным направлением в рамках хозяйственной деятельности человека. Почвы пойм рек, являясь плодородными [4], благоприятны для выращивания различных сельскохозяйственных культур, для формирования сенокосов и пастбищ.

На юге Дальнего Востока, в частности в Приморском крае, растениеводство является ведущей отраслью в структуре сельского хозяйства. В последние годы активно распахиваются залежные участки, выведенные в 90-е гг. прошлого столетия из сельскохозяйственного оборота. Увеличивается экспорт продукции в близлежащие страны. В связи с ценностью аллювиальных почв встает вопрос о расширении их использования для выращивания высококачественной сельскохозяйственной продукции. Агрофизические свойства аллювиальных почв региона изучены недостаточно, несмотря на их значительную роль в земледелии.

Цель работы – исследовать агрофизические свойства и степень гумусированности аллювиальной серогумусовой почвы юга Приморского края.

Материалы и методы

Изучение почв проводили в Уссурийском городском округе Приморского края в августе 2018 г. Исследуемые почвы классифицируются как аллювиальные серогумусовые [5]. Объектами служили почвы полей, которые в залежном состоянии находились более 60 лет. В прошлом поля использовались под полевые и овощные севообороты.

В Приморском крае аллювиальные серогумусовые почвы занимают низкие в геоморфологическом отношении уровни, хорошо дренированы. В связи с сокращением пахотных площадей в постперестроечный период большинство почв, используемых в земледелии края, были переведены в залежь [6].

Аллювиальные серогумусовые почвы расположены на первой террасе р. Раздольной под вейниково-осоковой растительностью. Почву с залежных участков отбирали послойно по всему профилю заложённых разрезов с глубины 0–20, 20–50, 50–90 см и прикопок (по три на каждом поле). Образцы отбирались с трех залежных полей (координаты: 1) P1–18: 43.762385 N 131.955457 E; 2) P2–18: 43.766321 N 131.937904 E; 3) P3–18: 43.754438 N 131.903690 E). В качестве контроля использовали смешанный образец почвы (трехкратная повторность) с пашни в районе села Синельниково-1 (координаты: 43.935137 N, 131.599576 E). Почву отбирали с глубины пахотного слоя. Выращиваемая культура – соя.

Структурно-агрегатный анализ почв проводили методом сухого просеивания на грохоте Retsch AS 200 basic (Германия). Исходя из данных структурного анализа, рассчитывали средне-взвешенный диаметр агрегатов (СВД) для каждого слоя в соответствии с формулой

$$СВД = \sum_{i=0}^n \bar{X}_i M_i,$$

где n – количество фракций; M_i – весовой % фракции агрегатов со средним диаметром X_i .

Коэффициент структурности (K_s) оценивали как отношение массы агрегатов диаметром 0,25–10 мм к массе агрегатов диаметром >10 и <0,25 мм. Долю агрономически ценных агрегатов рассчитывали как отношение массы агрегатов размером 0,25–10 мм к сумме масс всех фракций [2]. Плотность (объемную массу) определяли методом режущего цилиндра [7], гранулометрический состав почв – по Качинскому [8], полевую влажность – согласно ГОСТ 28268-89. Определение гумуса проводили по методу И.В. Тюрина в модификации В.Н. Симакова (индикатор – фенилантраниловая кислота) [9]. При обработке данных применяли общепринятые статистические методы с использованием программы Statistica v.13.

Исследование образцов проводили в специализированной лаборатории, а также с использованием технической базы Центра коллективного пользования биотехнологии и генетической инженерии (ФНЦ биоразнообразия ДВО РАН).

Результаты

В результате проведенных исследований выявлено, что величина плотности сложения в верхнем горизонте аллювиальных серогумусовых почв составила 0,64–0,79 г/см³ (табл. 1). С глубиной плотность увеличивается, однако в разрезе Р3–18 на глубине 50–100 см наблюдается снижение данной величины, что, вероятно, связано с физической неоднородностью аллювиальных наносов, сформировавших исследуемый профиль.

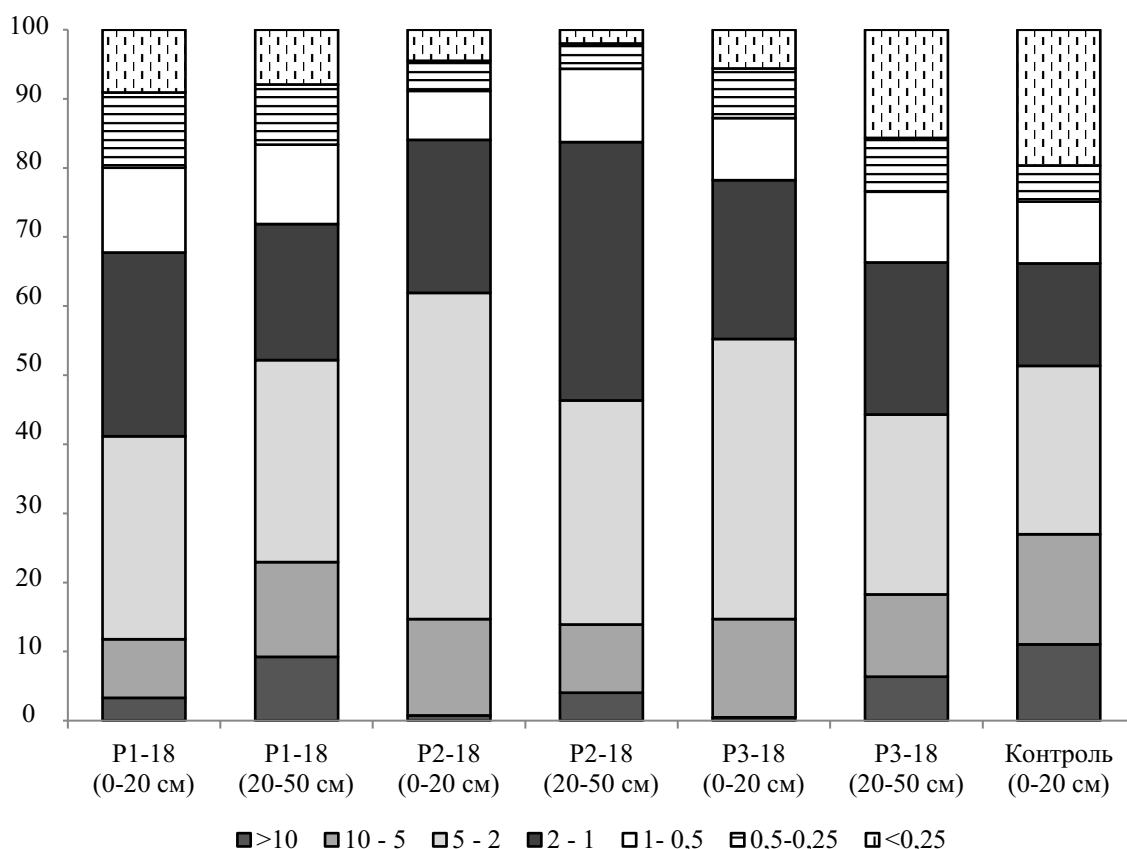
Структура почвы считается хорошей, если $K_s = 0,67$ –1,50, неблагоприятной – при $K_s < 0,67$. В структурном состоянии почв наиболее важную роль играют фракции агрегатов размером от 0,25 до 10 мм. Глыбистая (>10 мм) и пылеватая (<0,25 мм) фракции относятся к нежелательным и неблагоприятно влияют на агрофизические свойства почвы [2]. В ходе исследования установлено, что в агрегатном состоянии в верхней толще (до 50 см) аллювиальных серогумусовых почв преобладает совокупность фракций 2–5 мм (рисунок). Количество агрономически ценных агрегатов в пахотном горизонте составляет от 87,99 до 94,78 %.

Таблица 1 / Table 1

Плотность сложения, агрономически ценные агрегаты, СВД агрегатов и K_s в аллювиальных серогумусовых почвах / Bulk density, agronomically valuable aggregates, mean weight diameter and structure coefficient in alluvial gray soils

Показатель	Глубина, см	Залежь			Контроль
		Р1–18	Р2–18	Р3–18	
Плотность, г/см ³	0–20	0,79±0,01	0,64±0,01	0,68±0,01	0,98±0,01
	20–50	1,12±0,01	1,04±0,02	1,15±0,01	–
	50–100	1,15±0,02	1,13±0,01	1,08±0,01	–
Влажность, %	0–20	44,62±0,19	40,96±0,26	41,85±0,18	43,18±0,11
	20–50	37,99±0,11	34,01±0,13	43,35±0,21	–
	50–100	32,31±0,24	30,64±0,17	31,27±0,13	–
Агрономически ценные агрегаты, %	0–20	87,66±0,23	94,78±0,18	93,90±0,24	69,31±0,17
	20–50	82,84±0,16	93,98±0,20	78,01±0,13	–
	50–100	82,16±0,20	82,97±0,17	87,19±0,21	–
СВД агрегатов, мм	0–20	2,57±0,07	3,19±0,05	2,99±0,03	3,60±0,06
	20–50	3,49±0,05	2,98±0,03	2,96±0,05	–
	50–100	2,61±0,05	4,39±0,05	3,17±0,07	–
K_s	0–20	7,10±0,09	18,16±0,23	15,40±0,13	2,26±0,08
	20–50	4,83±0,05	15,62±0,11	3,55±0,02	–
	50–100	4,61±0,07	10,39±0,19	8,87±0,06	–

Размер структурных отдельностей, а именно СВД совокупности агрегатов, в аллювиальных серогумусовых почвах составляет от 2,57 до 2,99 мм в верхних горизонтах и от 2,96 до 3,49 мм – в нижележащих.



Распределение почвенных агрегатов по фракциям в аллювиальных серогумусовых почвах, % /
 Soil aggregate size fractions distribution in alluvial gray soils, %

Среди аллювиальных серогумусовых почв Приморского края встречаются почвы как с очень низким содержанием гумуса (1,25 %), так и с высоким (10,2 %) [10]. В пахотном слое исследуемых аллювиальных серогумусовых почв содержание гумуса составило от 3 до 5 %, в контрольном варианте – 1,4 % (табл. 2).

Таблица 2 / Table 2

Содержание гумуса в аллювиальных серогумусовых почвах, % /
 Humus content in alluvial gray soils, %

Слой, см	Залежь			Контроль
	P1-18	P2-18	P3-18	
0-20	5,05±0,08	3,84±0,04	4,99±0,09	1,4±0,01
20-50	2,78±0,02	2,52±0,02	1,83±0,01	1,4±0,01
50-100	1,93±0,02	1,96±0,01	3,63±0,02	0,3±0,02

Обсуждение

Для основной массы возделываемых в нашей стране продовольственных, сырьевых и кормовых культур оптимальная плотность глинистых и суглинистых почв (а таковых в стране большинство) – 1,00–1,35 г/см³. Примерно в этих же пределах находится оптимальный интервал плотности пахотных почв, необходимый для нормального роста и развития основных выращиваемых в РФ культур (1,1–1,2 г/см³) [2, 8]. Согласно литературным источникам, объемная плотность

пахотного слоя аллювиальных серогумусовых почв Приморского края, используемых в сельском хозяйстве, составляет 1,06–1,21 г/см³ [10]. В верхнем слое 0–20 см всех исследуемых образцов плотность почвы менее 1,0 г/см³, однако максимальное значение (0,98 г/см³) отмечено в контрольном варианте, используемом под посев сельскохозяйственных культур. Естественное развитие травостоя после вывода земель из севооборота при полном отсутствии сельскохозяйственной нагрузки способствовало некоторому снижению плотности сложения верхнего горизонта исследуемых почв (табл. 1). А высокая влажность почвы (40–44 %) в период отбора образцов обусловила получение заниженных результатов плотности сложения по всему профилю.

Структура почвы является важным признаком, имеющим большое значение при определении агропроизводственной характеристики почв. Оптимальное структурное состояние в почвах суглинистого и глинистого гранулометрического состава складывается при содержании агрономически ценных агрегатов 70–80 % [10]. В исследуемых залежных почвах их более 80 %, что говорит об отличном агрегатном состоянии. К_s во всех образцах высокий. Разница значений СВД агрегатов, которая прослеживается от профиля к профилю, может объясняться некоторой изначальной пестротой почвенного покрова изучаемых территорий, неоднородностью наносов и особенностями механизма агрегирования.

В пахотном слое контрольного варианта количество глыбистой и пылевой фракций выше по сравнению с постагрогенными почвами (11 и 19 % соответственно). Это могло отразиться на несколько увеличенном СВД агрегатов контрольных образцов.

Согласно литературным данным, развитие постагрогенных сукцессий чаще всего сопровождается увеличением содержания и запасов гумуса в почве. Связано это с зарастанием территории травяной и кустарниковой растительностью и, как следствие, задерновыванием, увеличением количества надземной и подземной биомассы, поступлением отмерших частей растений в верхние горизонты, улучшением биологических свойств почвы [2, 3, 11]. Однако бывают случаи, когда запасы гумуса после вывода полей из сельскохозяйственного оборота меняются незначительно или даже снижаются [1, 12].

Согласно региональной агропроизводственной группировке [13], в пахотном слое исследуемых аллювиальных серогумусовых почв содержание гумуса среднее, в контрольном варианте – низкое. Повышенное содержание гумуса в исследуемых залежах относительно их пахотного аналога объясняется прекращением выноса органического материала с урожаем и накоплением его в пределах почвенного профиля.

Заключение

По степени гумусированности аллювиальная серогумусовая почва относится к среднегумусированному виду. В пахотном слое содержание гумуса составило 3,84–5,05 %, в подпахотном – 1,83–2,78. Исследуемые почвы хорошо оструктурены: количество агрономически ценных агрегатов превышает 70 %, при этом СВД агрегатов составил 2,57–2,99 мм в пахотном слое и 2,96–3,49 мм – в горизонтах нижележащих. Полициклический тип строения, свидетельствующий о неоднородности аллювиальных наносов, обуславливает колебание К_s от профиля к профилю. Высокая степень микроагрегированности и оструктуренности, повышенная влажность почвы, и, вероятно, большое количество корней травянистых растений отразились на плотности почвы, величина которой в пахотном слое составила 0,64–0,79 г/см³, увеличиваясь последовательно вниз по профилю. Полученные данные могут служить основой для эффективного использования аллювиальной серогумусовой почвы в системе сельскохозяйственной отрасли.

Список источников

1. Lebedeva I.I., Cheverdin Yu.I., Titova T.V., Grebennikov A.M., Markina L.G. Structural state of migrational-mycelial (typical) agrochernozeams of the Kamennaya Steppe on plowed fields of different ages // Eurasian Soil Sci. 2017. Vol. 50. P. 227–238.
2. Шейн Е.В. Курс физики почв. М.: МГУ, 2005. 432 с.
3. Lipiec Y., Hatan R. Quantification of compaction effects on soil physical properties and crop growth // Geoderma. 2003. Vol. 116. P. 107–136.
4. Добровольский Г.В. Почвы речных пойм центра Русской равнины. М.: МГУ, 2005. 294 с.

5. Шишов Л.Л., Тонконогов В.Д., Лебедева И.И., Герасимова М.И. Классификация и диагностика почв России. Смоленск: Ойкумена, 2004. 342 с.
6. Костенков Н.М., Оздобихин В.И. Почвы и почвенные ресурсы юга Дальнего Востока и их оценка // Почвоведение. 2006. № 5. С. 517–526.
7. Соколов А.В., Аскинаев Д.И., Сердобольский И.П. Агрохимические методы исследования почв. М.: Наука, 1975. 656 с.
8. Качинский Н.А. Физика почв. М.: Высшая школа. 1965. Т. 1. 320 с.
9. Орлов Д.С., Гришина Л.А. Практикум по химии гумуса. М.: МГУ, 1981. 272 с.
10. Слабко Ю.И., Синельников Э.П., Оздобихин В.И. Характеристика агроземов Приморья. Уссурийск: ДВО РАН, 2002. 172 с.
11. Телеснина В.М., Курганова И.Н., Лопес де Гереню В.О., Овсепян Л.А., Личко В.И., Ермолаев А.М., Мирин Д.М. Динамика свойств почв и состава растительности в ходе постагрогенного развития в разных биоклиматических зонах // Почвоведение. 2017. № 12. С. 1514–1534.
12. Guo L.B., Gifford R.M. Soil carbon stock and land use change: a meta analysis // Global Change Biol. 2002. Vol. 8 (4). P. 345–360.
13. Оздобихин В.И., Синельников Э.П., Рыбачук Н.А. Классификация и агропроизводственные группировки почв Приморского края. Владивосток: ДВО РАН, 1994. 94 с.

References

1. Lebedeva I.I., Cheverdin Yu.I., Titova T.V., Grebennikov A.M., Markina L.G. Structural state of migrational-mycelial (typical) agrochernozems of the Kamennaya Steppe on plowed fields of different ages. *Eurasian Soil Sci.* 2017;(50):227-238.
2. Shein E.V. *Lecturers on Soil Physics*. Moscow: Moscow State University Press; 2005. 432 p. (In Russ.).
3. Lipiec Y., Hatano R. Quantification of compaction effects on soil physical properties and crop growth. *Geoderma*. 2003;(116):107-136.
4. Dobrovolskiy G.V. *Soils of floodplains of the center of the Russian Plain*. Moscow: Moscow State University Press; 2005. 294 p. (In Russ.).
5. Shishov L.L., Tonkonogov V.D., Lebedeva I.I., Gerasimova M.I. *Classification and diagnosis of soils of Russia*. Smolensk: Oikumena Publ.; 2004. 342 p. (In Russ.).
6. Kostenkov N.M., Oznobikhin V.I. Soils and soil resources in the southern Far East and their assessment. *Eurasian Soil Sci.* 2006;(39):461-469.
7. Sokolov A.V., Askinaev D.I., Serdobolskiy I.P. *Agrochemical analysis of soils*. Moscow: Nauka Publ.; 1975. 656 p. (In Russ.).
8. Kachinskii N.A. *Soil physics. Vol. 1*. Moscow: Vysshaya shkola Publ.; 1965. 320 p. (In Russ.).
9. Orlov D.S., Grishina L.A. *Practicum on humus chemistry*. Moscow: Moscow State University Press; 1981. 272 p. (In Russ.).
10. Slabko U.I., Sinelnikov A.P., Oznobikhin V.I. *Characteristic of agrozeims of Primorye*. Ussuriysk: DVO DOP RAN Press; 2002. 172 p. (In Russ.).
11. Telesnina V.M., Kurganova I.N., Lopes de Gerenyu V.O., Ovsepyan L.A., Lichko V.I., Ermolaev A.M., Mirin D.M. Dynamics of soil properties and plant composition during postagrogenic evolution in different bioclimatic zones. *Eurasian Soil Sci.* 2017;(50):1515-1534.
12. Guo L.B., Gifford R.M. Soil carbon stock and land use change: a meta analysis. *Global Change Biol.* 2002;8(4):345-360.
13. Oznobikhin V.I., Sinelnikov A.P., Rybachuk N.A. *Classification and agricultural grouping of soils of the Primorsky Krai*. Vladivostok: DVO RAN Press; 1994. 94 p. (In Russ.).

Информация об авторах

М.Л. Бурдуковский – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории почвоведения и экологии почв.

П.А. Перепелкина – младший научный сотрудник сектора геоботаники.

И.В. Киселева – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории почвоведения и экологии почв.

Information about the authors

M.L. Burdukovskii - Candidate of Science (Biology), Senior Researcher of Soil Science and Soil Ecology Laboratory.

P.A. Perepelkina - Junior Researcher of Geobotanics Sector.

I.V. Kiseleva - Candidate of Science (Biology), Senior Researcher of Soil Science and Soil Ecology Laboratory.

Статья поступила в редакцию 02.09.2022; одобрена после рецензирования 25.09.2022; принята к публикации 02.03.2023.
The article was submitted 02.09.2022; approved after reviewing 25.09.2022; accepted for publication 02.03.2023.

Научная статья
УДК 631.416.9
doi: 10.18522/1026-2237-2023-1-49-60

ОСОБЕННОСТИ ТРАНСФОРМАЦИИ МИКРОЭЛЕМЕНТНОГО СОСТАВА ПОЧВ ГОРОДА СТАВРОПОЛЯ ПОД ВЛИЯНИЕМ УРБОГЕНЕЗА

Татьяна Васильевна Дегтярева

Северо-Кавказский федеральный университет, Ставрополь, Россия
dtb.70@mail.ru

Аннотация. В статье рассматриваются особенности изменения микроэлементного состава городских почв Ставропольской агломерации под влиянием урбогенеза. Урбогенез как совокупность техногенеза и ландшафтогенеза на территории городской застройки затрагивает многие стороны функционирования почв. Меняются их физические свойства, химический состав, строение и взаиморасположение генетических горизонтов. Особую актуальность приобретает установление специфики трансформации микроэлементного состава городских почв в связи с экологической опасностью значительного количества микроэлементов, относимых к тяжелым металлам.

Для города Ставрополя характерным является сложный тип застройки, сочетающий в себе одно- и многоэтажные строения, промышленную инфраструктуру, коммунально-бытовые объекты. Это приводит к формированию разнонаправленных потоков загрязняющих веществ, большая часть которых поступает в почвы или замещающие их почвогрунты. Наличие четко выраженного склонового рельефа в центральной части города обуславливает перераспределение пылеватых фракций с водными и воздушными потоками в восточном направлении. При этом различия в характере почвообразующих пород для разных частей города во многом изменяют картину дифференциации микроэлементов в почвах города, связанную с особенностями их закрепления в составе почвенных соединений. Для северо-западного и центрального районов города, где наблюдаются выходы к поверхности сарматских известняков-ракушечников, определяющую роль в связывании микроэлементов в почвах играют карбонаты кальция. В почвах юго-западного и южного районов города, сформированных на лессовидных суглинках, большое значение в закреплении микроэлементов имеют органоминеральные комплексы гуминовых кислот. В днищах речных долин и балок, образованных продуктами размыва сарматских глин, микроэлементы в почвах находятся в составе илстых фракций. Под лесопарковыми массивами города формируется несколько главенствующих фаз – носителей микроэлементов в почвах, в зависимости от преобладания того или иного типа почвообразующих отложений в разных частях лесного массива. В целом особенности закрепления микроэлементов в почвах городской агломерации Ставрополя определяются как природными характеристиками территории, так и спецификой антропогенного воздействия на почвенный покров потоков загрязняющих веществ.

Ключевые слова: городские почвы, микроэлементы, загрязнение, тяжелые металлы, функциональные зоны

Для цитирования: Дегтярева Т.В. Особенности трансформации микроэлементного состава почв города Ставрополя под влиянием урбогенеза // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. 2023. № 1. С. 49–60.

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

© Дегтярева Т.В., 2023

Original article

FEATURES OF TRANSFORMATION OF THE MICROELEMENT COMPOSITION OF SOILS IN THE CITY OF STAVROPOL UNDER THE INFLUENCE OF URBOGENESIS

Tatyana V. Degtyareva

*North Caucasus Federal University, Stavropol, Russia
dtb.70@mail.ru*

Abstract. *The article discusses the features of changes in the microelement composition of urban soils of the Stavropol agglomeration under the influence of urban genesis. Urban genesis, as a combination of technogenesis and landscape genesis on the territory of urban development, affects many aspects of soil functioning. Their physical properties, chemical composition, structure and mutual arrangement of genetic horizons change. Of particular relevance is the establishment of the specifics of the transformation of the microelement composition of urban soils in connection with the environmental hazard of a significant amount of trace elements classified as heavy metals.*

The city of Stavropol is characterized by a complex type of development, which combines one-story and multi-story buildings, industrial infrastructure, and household facilities. This leads to the formation of multidirectional flows of pollutants, most of which enters the soil or subsoils. The presence of a clearly defined slope relief in the central part of the city causes the redistribution of silty fractions with water and air flows in an easterly direction. At the same time, differences in the nature of soil-forming rocks for different parts of the city largely change the pattern of differentiation of microelements in the soils of the city, associated with the peculiarities of their fixation in the composition of soil compounds. For the northwestern and central regions of the city, where Sarmatian limestone-shell rocks are exposed to the surface, calcium carbonates play a decisive role in the binding of trace elements in soils. In the soils of the southwestern and southern districts of the city, formed on loess-like loams, organomineral complexes of humic acids are of great importance in fixing microelements. In the bottoms of river valleys and gullies, formed by erosion products of Sarmatian clays, microelements in soils are present in silty fractions. Under the forest parks of the city, several dominant phases - carriers of microelements in soils are formed, depending on the predominance of one or another type of soil-forming deposits in different parts of the forest. In general, the features of the fixation of microelements in the soils of the Stavropol urban agglomeration are determined both by the natural characteristics of the territory and the specifics of the anthropogenic impact on the soil cover of pollutant flows.

Keywords: *urban soils, microelements, pollution, heavy metals, functional zones*

For citation: *Degtyareva T.V. Features of Transformation of the Microelement Composition of Soils in the City of Stavropol Under the Influence of Urbogenesis. Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science. 2023;(1):49-60. (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

Город Ставрополь располагается в лесостепной провинции ландшафтов Ставропольского края, на территории Верхнегорлыкского лесостепного ландшафта, выделенного В.А. Шальневым [1]. Его формирование как городского поселения имеет более чем двухсотлетнюю историю. Особенно интенсивно расширение городской территории произошло за последние 20 лет, когда были построены многочисленные многоэтажные кварталы на землях, примыкающих к старому городу с юга и юго-запада. Это привело к увеличению площади антропогенного воздействия на почвенный покров, его интенсивности в трансформировании свойств и характеристик почв новых микрорайонов города. В связи с этим актуальным является определение степени антропогенного загрязнения почвенного покрова города тяжелыми металлами, многие из которых являются микроэлементами, играющими важную роль в функционировании экосистем [2].

Цель исследования – на основании собственных полевых изысканий и материалов анализа литературных источников по теме исследования дать характеристику специфики загрязнения почвенного покрова городской агломерации Ставрополя тяжелыми металлами, определить основные особенности закрепления микроэлементов в почвах города. Данное исследование позволяет

наметить главные закономерности, свойственные трансформации микроэлементного состава почв в условиях городов.

Материалы и методы исследования

В основу работы положены собственные полевые исследования на территории различных функциональных зон города Ставрополя за период с 1999 по 2020 г. Проводился отбор почвенных проб (ГОСТ 28168-89), их анализ на содержание валовых и подвижных форм четырех микроэлементов (Pb, Cu, Zn и Cd) методами атомно-абсорбционной и рентген-флуоресцентной спектрометрии. Помимо этого, в почвенных образцах определяли некоторые физико-химические характеристики: содержание гумуса – методом мокрого озоления по И.В. Тюрину (ГОСТ 26213-91), pH водной вытяжки – методом потенциометрии (ГОСТ 26423-85), гранулометрический состав – методом Н.А. Качинского. Определение подвижных (обменных) форм микроэлементов осуществляли с помощью экстракции ацетатно-аммонийным буферным раствором (pH 4,8) при соотношении почва:раствор 1:5 [3] и последующей оценкой содержания микроэлементов на атомно-абсорбционном спектрометре «Квант». Все анализы проводили в аккредитованных лабораториях в трехкратной повторности. Статистическая обработка результатов исследования соответствовала установленным нормам и выполнена в программе Excel.

Определение коэффициентов концентрации (K_c) проводилось согласно [4], как отношение содержания элемента в исследуемом объекте (C_i) к среднему фоновому его содержанию (C_f). Суммарный показатель загрязнения (Z_c) рассчитывался по формуле $Z_c = \sum K_c - (n-1)$, где n – количество аномальных химических элементов, у которых $K_c > 1,5$.

В связи с тем, что в исследовании определялось небольшое количество химических элементов (всего четыре – Cu, Zn, Cd, Pb), нами предложен новый метод определения суммарного загрязнения небольшим количеством загрязнителей путем расчета суммарного комплексного коэффициента загрязнения $\sum K_{kz}$, равного отношению сумм фоновых содержаний элементов (C_f) к результату сложения фоновых содержаний элементов (C_f) с содержаниями элементов в исследуемом объекте (C_i):

$$\sum K_{kz} = \frac{C_{f1} + C_{f2} + C_{f3} + \dots}{C_{f1} + C_{f2} + C_{f3} + \dots + C_{i1} + C_{i2} + C_{i3} \dots}$$

Физический смысл суммарного комплексного коэффициента $\sum K_{kz}$ состоит в определении степени превышения концентраций небольшой группы химических элементов над фоновым уровнем для данной территории и градации по антропогенной преобразованности микроэлементного состава почв. На основании значений $\sum K_{kz}$ предлагается следующая шкала антропогенной трансформации микроэлементного состава почв (табл. 1).

Таблица 1 / Table 1

Шкала антропогенной трансформации микроэлементного состава почв / Scale of anthropogenic transformation of microelement composition of soils

Суммарный комплексный коэффициент загрязнения $\sum K_{kz}$	Степень антропогенной трансформации микроэлементного состава почв
<0,5–0,3	Умеренная (слабая)
0,3–0,2	Сильная
<0,2	Очень сильная

Полученные результаты и их обсуждение

Город Ставрополь относится к категории крупных городов по числу жителей – около 458 тыс. человек. Их сосредоточение на территории города достаточно равномерное, в то же время сложившаяся транспортная сеть привела к очень неравномерному перераспределению транспортной нагрузки на улицы города. Определённые районы города испытывают значительное воздействие транспорта в часы пик, но есть улицы, где это воздействие минимально. Увеличение в по-

следние годы (10–15 лет) числа автомобилистов вызвало превращение автомобилей и автотранспорта в главный фактор загрязнения почвенного покрова города продуктами их деятельности (выхлопные газы, частицы шин, тормозных колодок и т.д.), при осаждении которых в почву попадают загрязняющие вещества, в том числе и тяжелые металлы [5]. Роль промышленного производства в загрязнении почвенного покрова тяжелыми металлами несколько снизилась по сравнению с предшествующим периодом в связи с внедрением предприятиями более совершенных технологических решений по очистке своих отходов и предотвращению их попадания в окружающую среду. Свою роль в этом сыграла деятельность надзорных органов, обеспечивающих контроль за соблюдением экологических нормативов на предприятиях города. В то же время загрязнение городских почв отходами автотранспорта не поддается регулированию, несмотря на строительство целого ряда объездных магистралей в черте города. Неравномерное распределение транспортной нагрузки привело к тому, что почвы в местах сосредоточения автотранспорта в часы пик испытывают самое сильное поступление загрязняющих веществ из атмосферы. Разгрузка центральной части города от автотранспорта вызвала возникновение новых зон концентрации машин и общественного транспорта, а также зон интенсивного загрязнения почв тяжелыми металлами.

Для дачных районов города и территорий с одно-, двухэтажной частной застройкой основными источниками загрязнения почвенного покрова служат неутраченные бытовые отходы, такие как лакокрасочные материалы, строительные добавки, различные удобрения и применяемые населением средства защиты растений от вредителей. Несмотря на то что в самих удобрениях концентрация тяжелых металлов обычно незначительна, их постоянное внесение вызывает изменение щелочно-кислотного баланса в почве и способствует усилению процессов внутрипочвенной трансформации микроэлементного состава.

Лесопарковые массивы города Ставрополя отличаются расположением внутри городской застройки (Гаманская и Мамайская лесные дачи, парк Победы, Члинский лес) либо непосредственным примыканием к ней (Русский лес, Татарский лес). Наибольшее антропогенное воздействие на почвенный покров под лесопарковыми массивами производится в первом случае и выражается в поступлении загрязняющих веществ (в том числе и тяжелых металлов) с близлежащих автомобильных дорог, захлавлении бытовым мусором, утаптывании (при отсутствии оборудованных тропинок). Наличие древесной растительности служит значительным буферным фактором, снижающим концентрации загрязнителей в почвенном покрове лесопарковых массивов города.

Важным элементом формирования картины распределения тяжелых металлов в почвах города является рельеф, который отличается наличием как выположенных поверхностей (платообразные районы города на северо-западе и юге, юго-западе), так и склоновых (районы Ташлы, Мамайки, частично центра). Наличие местами крутых склонов обуславливает перемещение почвенных масс вниз по склонам и накопление материала гумусовых горизонтов в днищах речных долин и балок. При этом происходит и перераспределение микроэлементов, аккумулированных в верхних горизонтах почв.

Другим существенным фактором, определяющим общие особенности распределения тяжелых металлов в почвах города, является климат, в частности количество осадков, их характер выпадения, интенсивность. Для Ставрополя годовое количество осадков составляет 663 мм [6]. Выпадают они преимущественно в весенне-летний период в виде ливней (60 %). В осенне-зимний период преобладают осадки обложного характера в виде дождей с ветром или снега. Интенсивный ливневый характер поступления осадков на поверхность почвы приводит к образованию большого количества сточных вод, которые смывают верхние горизонты, оголяют корневую систему растений, выносят почвенные массы по системе ливневых стоков в городские речки. Все это вызывает обеднение почв по содержанию микроэлементов, особенно на склонах.

Почвы города Ставрополя отличаются достаточно большим разнообразием. На платообразных поверхностях на продуктах разрушения сарматских известняков и песчаников развиты черноземы типичные остаточного-карбонатные. Для них характерны средняя мощность почвенных горизонтов (76–80 см), среднесуглинистый гранулометрический состав (содержание физической глины – 39,77 %), слабощелочная среда в гумусовом горизонте (рН 7,7±0,11). Сумма поглощенных оснований составляет 25,4–27,8 мг-экв/100 г, содержание гумуса – 4,68±0,2 %. На лессовидных суглинках, широко представленных на платообразных поверхностях юго-западного и юж-

ного районов города, развиты черноземы типичные глубоковскипающие мощные тяжелосуглинистого гранулометрического состава. Их отличают более глубокое залегание карбонатов (ниже 60 см), более высокая сумма поглощенных оснований (32–35 мг-экв/100 г), значительное содержание гумуса (6,44±0,3 %). Содержание физической глины в гумусовом горизонте – 57,24 %.

В средней (центральной) части города почвы формируются на выходах сарматских песков, известняков-ракушечников, песчаников. Склоновый характер рельефа этой части города приводит к постоянному сносу материала гумусовых горизонтов преимущественно в восточном направлении. Почвам присущи среднесуглинистый гранулометрический состав, невысокое содержание гумуса (2,64±0,2 %), слабощелочная реакция среды гумусового горизонта (рН 7,28±0,1). Их отличает также высокая степень преобразованности, связанная с длительным (более 200 лет) антропогенным воздействием на почвенный покров в этой части города.

Восточные районы города представляют собой территории речных долин и балок, сложенных делювиальными и аллювиальными отложениями тяжелого гранулометрического состава (в поймах рек Мамайка, Желобовка, Ташла, Мутнянка). Здесь обнажаются нижне- и среднесарматские глины, которые часто содержат большое количество легкорастворимых солей. На них формируются черноземы типичные слабосолонцеватые различной степени засоления. В поймах рек развиты аллювиальные и лугово-черноземные почвы.

В лесопарковых массивах города почвенный покров развивается на различных типах отложений. В верхней части города – на продуктах разрушения холоднородниковских известняков и песчаников, в средней части города – на выходах форштатских песков, песчаников, продуктах разрушения карабинских известняков, мергелей, глин. Преимущественно под лесопарковыми массивами города сформированы темно-серые лесные почвы, но местами встречаются черноземы деградированные (на месте искусственных древесных насаждений по окраинам лесных массивов), бурые лесные слабоподзоленные (на месте оставшихся буковых участков леса) [6]. Большая часть лесопарковых массивов приурочена к склонам и днищам речных долин (рек Ташла, Мамайка, Мутнянка, Чла), и поэтому их почвенный покров часто подвержен водной эрозии различной степени, в зависимости от положения местного базиса эрозии.

Естественные почвы в черте города сохранились в местах отсутствия капитальных строений, асфальтированного покрытия, различного типа тротуаров, дорожек, подземных коммуникаций и т.д. Наличие всех этих объектов способствовало превращению почв в урбаноземы, индустриземы, экраноземы и другие разновидности городских почв, в разной степени преобразованных антропогенной деятельностью. Их выделение в черте города Ставрополя основывается на современных подходах к их классификации [7]. В процентном соотношении на территории города Ставрополя преобладают урбаноземы и экраноземы в местах интенсивной застройки. Культуроземы и поверхностно преобразованные почвы занимают периферию городской территории вместе с сохранившимися участками естественных почв.

Изучение распределения микроэлементов в почвенном покрове города показало неравномерный характер накопления химических элементов (табл. 2).

Таблица 2 / Table 2

Особенности распределения микроэлементов в почвах г. Ставрополя в различных функциональных зонах / Features of the distribution of trace elements in the soils of Stavropol in various functional zones

Функциональная зона	Среднее валовое содержание в гумусовом горизонте± погрешность, мг/кг			
	Cu	Zn	Cd	Pb
Промышленная	76,3±7,6	167,6±16,1	2,26±0,2	173,1±16,9
Селитебная многоэтажная	69,4±6,9	155,9±7,9	1,81±0,1	130,6±13,0
Селитебная одно-, двухэтажная	71,0±7,0	142,6±19,9	1,50±0,1	124,3±11,9
Лесопарковая	47,9±4,7	93,0±9,3	1,12±0,1	57,4±5,7
Дачная	45,9±4,5	84,1±8,3	0,99±0,09	58,9±5,8
Фоновая территория (музей-заповедник «Татарское городище»)	32,6±3,2	68,4±6,8	0,57±0,05	37,8±3,7

Максимальное содержание микроэлементов установлено на территории промышленных зон (Cu – 76,3 мг/кг, Zn – 167,6 мг/кг, Pb – 173,1 мг/кг, Cd – 2,26 мг/кг). Это свидетельствует о значительном накопительном эффекте, свойственном промышленному типу антропогенного воздействия на почвенный покров города. В то же время для дачной и лесопарковой функциональных зон отмечены минимальные содержания микроэлементов, что указывает на более низкую интенсивность поступления тяжелых металлов в почвы этих зон. Помимо этого, выявляются различия в антропогенном воздействии на почвенный покров селитебных зон с различным типом застройки. В условиях многоэтажной застройки воздействие на почвенный покров более сильное в связи со значительным преобразованием строения почвенного профиля, заменой гумусовых горизонтов различными почвогрунтами, прокладкой коммуникаций, отчуждением растительной массы при уборке газонов от листвы. Все это приводит к нарушению протекания естественных почвенных процессов и к тому, что разрушаются свойственные природным почвам миграционные потоки химических элементов. Запечатанность больших поверхностей в черте селитебной многоэтажной зоны сказывается на температурном, водном, солевом режимах экранированных почв, на развитии в них биогеохимических процессов [7]. Поступление тяжелых металлов в поверхностные горизонты почв открытых газонов или придомовых территорий происходит главным образом от автотранспорта либо с пылью, попадающей с запечатанных асфальтобетонным покрытием поверхностей. Это вызывает увеличение концентраций тяжелых металлов в поверхностных горизонтах открытых (незапечатанных) почв и почвогрунтов за счет их высокой депонирующей способности по сравнению с асфальтобетонными покрытиями.

В селитебной зоне одно-, двухэтажной частной застройки процент запечатанности почвенного покрова несколько ниже и поступление тяжелых металлов происходит на большую поверхность открытых почв. Это дает снижение концентраций микроэлементов, приходящихся на единицу площади открытой почвенной поверхности.

В целом распределение микроэлементов в почвенном покрове города Ставрополя подчиняется нескольким закономерностям:

1. Максимальные концентрации химических элементов приурочены к территориям с интенсивной многолетней транспортной и промышленной нагрузкой.

2. Минимальные содержания микроэлементов обнаруживаются в относительно геохимически устойчивых к антропогенному воздействию и обладающих буферной способностью лесопарковых массивах, в удаленных от крупных предприятий и транспортных сетей районах дачной застройки.

3. Относительно средние уровни содержания микроэлементов приходятся на районы селитебной застройки. При этом в почвах с одно-, двухэтажной частной застройкой содержание микроэлементов имеет более равномерный характер распределения, а в почвах с многоэтажной застройкой отмечаются резкие колебания в распределении микроэлементов.

4. В связи с тем, что большая часть почв в центральной части города находится в запечатанном состоянии под асфальтобетонным или плиточным покрытием, эти почвы выпадают из единой системы миграционных потоков тяжелых металлов, связывающей городскую территорию и определяющей картину латерального распределения микроэлементов.

Особенности загрязнения городских почв тяжелыми металлами. Важной составляющей общего экологического состояния городской территории является степень загрязнения почвенного покрова наиболее приоритетными поллютантами – тяжелыми металлами [2]. Их опасность для окружающей среды и здоровья человека подтверждена многочисленными исследованиями [4, 5] и традиционно в нашей стране определяется по суммарному показателю загрязнения Zc Ю.Е. Саета [4]. Использование Zc для выявления степени загрязнения почв города Ставрополя тяжелыми металлами показало относительно невысокий уровень накопления суммарного загрязнения в почвенном покрове различных функциональных зон (табл. 3).

Такие показатели Zc в почвах городской территории Ставрополя свидетельствуют о невысокой степени накопления рассмотренной группы тяжелых металлов – на уровне низкого загрязнения. Это может быть связано либо с действительно невысоким загрязнением городских почв тяжелыми металлами, либо с использованием ограниченного количества химических элементов (только четырех – Cu, Zn, Cd, Pb) для определения показателя Zc. Для сопостав-

ления результатов нами проведен расчет предложенного выше суммарного комплексного коэффициента загрязнения $\Sigma K_{кз}$, который позволяет провести градацию степени трансформации микроэлементного состава почв при небольшом количестве рассматриваемых химических элементов. Полученные значения $\Sigma K_{кз}$ для почв функциональных зон Ставрополя приведены в табл. 4.

Таблица 3 / Table 3

**Значения показателей загрязнения тяжелыми металлами в почвенном покрове г. Ставрополя
/ Values of indicators of pollution by heavy metals in the soil cover of the city of Stavropol**

Функциональная зона	Kc				Zc
	Cu	Zn	Cd	Pb	
Промышленная	2,34	2,45	3,96	4,58	10,33
Селитебная многоэтажная	2,13	2,28	3,18	3,44	8,03
Селитебная одно-, двухэтажная	2,18	2,08	2,64	3,29	7,19
Лесопарковая	1,47	1,36	1,96	1,52	2,48
Дачная	1,41	1,23	1,74	1,56	2,30

Таблица 4 / Table 4

**Значения суммарного комплексного коэффициента загрязнения ($\Sigma K_{кз}$) тяжелыми металлами почв
г. Ставрополя / The values of the total complex coefficient of pollution ($\Sigma K_{кз}$) with heavy metals
of soils in the city of Stavropol**

Функциональная зона	$\Sigma K_{кз}$	Степень антропогенной трансформации микроэлементного состава почв
Промышленная	0,25	Сильная
Селитебная многоэтажная	0,28	Сильная
Селитебная одно-, двухэтажная	0,29	Сильная
Лесопарковая	0,41	Слабая
Дачная	0,42	Слабая

Исходя из полученных данных, достаточно высокая степень антропогенной трансформации микроэлементного состава почв (на уровне «сильная») характерна для почв промышленной зоны, районов с многоэтажной и одно-, двухэтажной застройкой. Умеренная («слабая») степень антропогенной трансформации микроэлементного состава почв ($\Sigma K_{кз}=0,41-0,42$) выявлена для территорий лесопарковых массивов и дачных поселков.

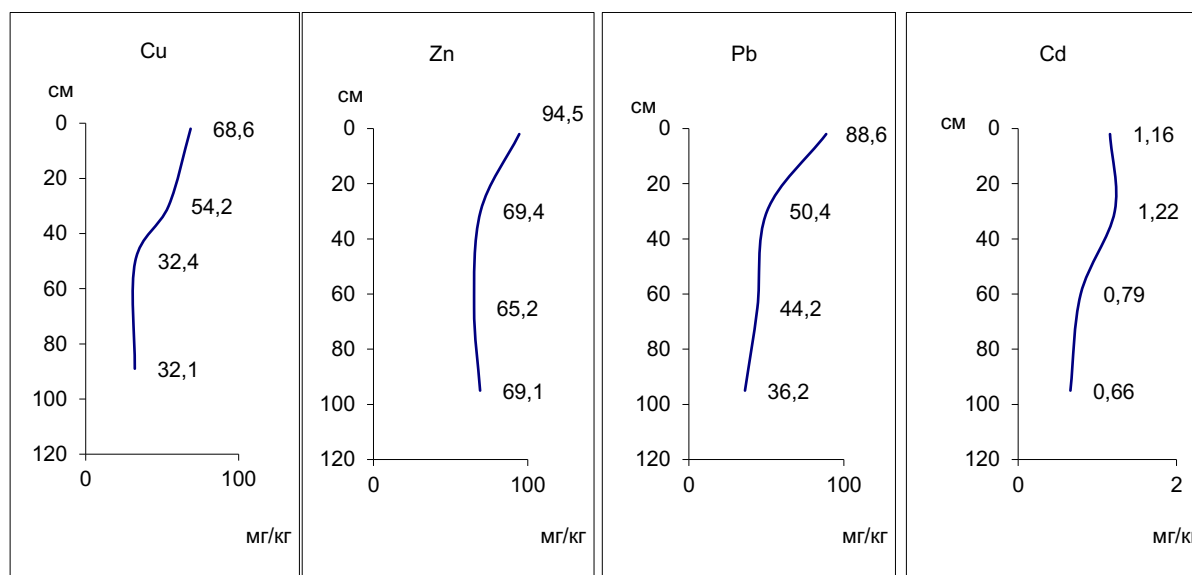
Таким образом, использование предложенного суммарного комплексного коэффициента загрязнения $\Sigma K_{кз}$ показало более высокую степень загрязнения тяжелыми металлами почвенного покрова города Ставрополя по сравнению со значениями суммарного показателя загрязнения Z_c . На наш взгляд, расчет $\Sigma K_{кз}$ позволяет обойти методические трудности, возникающие при определении значений Z_c при небольшом количестве исследуемых химических элементов.

Особенности закрепления микроэлементов в почвах г. Ставрополя. Анализ работ в области химии почв позволяет предположить общие особенности закрепления микроэлементов, характерные для разных районов г. Ставрополя. В большей степени эти особенности определяются спецификой почвообразующих пород и свойственных им преобладающих фаз – носителей микроэлементов, поступающих или формирующихся в почве при их непосредственном участии. Также оказывает влияние характер протекающих почвенных процессов, приводящих к накоплению в городских почвах определенных фаз – носителей микроэлементов в различных частях почвенного профиля. Важным фактором развития системы почвенных соединений микроэлементов в условиях города выступает антропогенная нагрузка, обладающая специфическим воздействием на свойства почв.

На территории города Ставрополя почвенный покров развивается на нескольких почвообразующих комплексах отложений, определяющих в большой степени формирование в почвах преобладающих соединений микроэлементов с другими составляющими. В местах близкого расположения к поверхности холоднородниковских и карабинских известняков (северо-западный район, частично центральная часть города) сформированные на них почвы содержат большое количество карбонатов и закрепление микроэлементов происходит преимущественно в составе бикарбонатов. Эти соединения малоподвижны в почвенном профиле в силу их комплексного характера [8, с. 96]. Закрепление в составе карбонатов находит косвенное подтверждение в установленных для почв северо-западного района города значимых корреляционных связях ($p < 0,05$) между содержанием Pb, Cd и pH ($r = 0,68$ и $r = 0,77$ соответственно). Преимущественный тип внутрипрофильного распределения Pb – аккумулятивное в гумусовом горизонте, Cd – равномерный.

В местах залегания достаточно мощных толщ лессовидных суглинков (юго-западный район города, частично его южная часть) развиваются почвы с большим содержанием органоминеральных комплексов гуминовых кислот. Известно, что микроэлементы связываются в их составе различными способами: как адсорбцией, так и окклюдированием, либо путем замещения других химических элементов [9, 10]. Подвижность органоминеральных комплексов и связанных с ними микроэлементов не очень высокая и происходит в пределах гумусового слоя (горизонты A+B), не выходя за его границы [11].

Для сформированных на лессовидных суглинках почвах Ставрополя характерно накопление Cu, Zn и Pb в гумусовом горизонте (рисунок). Закрепление микроэлементов в составе органоминеральных комплексов частично подтверждается наличием значимых положительных корреляционных связей ($p < 0,05$) между содержанием Cu, Zn, Pb и содержанием гумуса ($r = 0,88–0,91$). Аналогичный тип внутрипрофильного распределения Zn и Pb установлен в почвах Ростовской агломерации [12].



Распределение микроэлементов по профилю почв юго-западного района г. Ставрополя / Distribution of microelements along the soil profile of the southwestern region of the city of Stavropol

С содержанием гумуса и его составом связана сорбционная функция гумусовых горизонтов почв крупных городов [13]. Уборка листьев может быть причиной сокращения содержания органического вещества в городских почвах [14]. В результате запечатывания, как показали исследования городских почв Ростова-на-Дону, прекращается привнос в почву свежего органического вещества, что приводит к затуханию современных процессов гумификации, отсутствию обновления гумусовых веществ, уменьшению гумусированности [15]. С.Н. Горбов указывает [16], что при разложении бурых гуминовых кислот и связанных с ними фульвокислот в запечатанных и

погребенных почвах идет как полная их минерализация, так и образование промежуточных продуктов распада. Вероятно, это приводит и к постепенному снижению количества органоминеральных комплексов гуминовых кислот. Микроэлементы при этом могут переходить из состава органоминеральных комплексов в другие фазы-носители, прежде всего карбонаты, которые под запечатанными поверхностями мобилизуются в условиях низкой влажности почв.

Другим существенным фактором, влияющим на трансформацию микроэлементного состава городских почв, является поступление значительных объемов строительных материалов в виде пыли, песка, щебня на поверхность почв. Большой частью эти строительные материалы высококарбонатны, и их использование приводит к увеличению содержания карбонатов в верхних гумусовых горизонтах почв. Окарбоначивание, как известно, свойственно для большинства крупных городов [8, 12, 17, 19]. По отношению к микроэлементному составу почв окарбоначивание приводит к связыванию микроэлементов в составе труднорастворимых бикарбонатов [9]. В силу этого в гумусовом горизонте городских почв может происходить накопление микроэлементов в антропогенном карбонатном геохимическом барьере, локализованном в верхней части почвенного профиля.

Изменение гранулометрического состава городских почв, происходящее в результате поступления большого количества песка при строительстве и в качестве средства от оледенения дорог и тротуаров, установлено для многих городов России [18, 19]. Почвы, насыщенные песчаными фракциями, облегаются по своему гранулометрическому составу вплоть до супесей в гумусовом горизонте. Илистых фракций, содержащих в адсорбированном состоянии микроэлементы, в таких почвах становится меньше. Так, исследования показали, что в почвах Ростов-на-Дону увеличение в два раза содержания физического песка в гранулометрическом составе почв придорожных зон города обуславливает снижение сорбционной емкости почв, уменьшение способности связывать в малоподвижные формы и накапливать тяжелые металлы [17].

В условиях города Ставрополя интенсивные ливневые осадки в весенне-летний период способствуют значительному вымыванию илистых частиц из верхних горизонтов почв, примыкающих к тротуарам и к проезжей части. Особенно это характерно для склоновых территорий с интенсивным стоком поверхностных вод. Выносимые илистые частицы в большом количестве оседают в днищах речных долин и балок, в качестве донных отложений городских рек. Тем самым с ливневым стоком переносятся значительные объемы микроэлементов, адсорбированных на илистой фракции верхних гумусовых горизонтов почв.

Весьма весомым фактором, вносящим изменения в структуру микроэлементного состава городских почв, выступает рельеф. В случае его выположенного характера происходит преимущественно вертикальная внутрипочвенная миграция подвижных форм микроэлементов или же фаз – носителей их с труднорастворимыми и малоподвижными соединениями микроэлементов. Это приводит к вертикальному перераспределению микроэлементов в почвенном профиле, при котором осуществляется их мобилизация на внутрипочвенных геохимических барьерах. В случае наличия склонового рельефа преобладает другой тип миграции микроэлементов – с поверхностными водами, выносящими химические элементы вниз по склонам в составе илистых фракций. Внутрипочвенные геохимические барьеры по отношению к микроэлементам в этом случае менее контрастны. Склоновый характер рельефа приводит к формированию более контрастных латеральных градиентов в распределении микроэлементов на территории города. При этом в нижних частях склонов, в днищах речных долин и балок почвы содержат микроэлементы преимущественно в составе илистых фракций различного химического состава. В то же время почвы выположенных платообразных поверхностей территории города Ставрополя отличаются более дифференцированным составом фаз – носителей микроэлементов, который определяется преимущественно спецификой почвообразующих пород.

Установленные особенности формирования микроэлементного состава городских почв носят общий характер для аналогичных крупных городов, в которых складывается разноплановый тип антропогенного воздействия на почвенный покров. Как показали многочисленные исследования [9], в загрязненных почвах (по сравнению с естественными) происходит увеличение степени подвижности микроэлементов. Для Ставрополя также определен больший процент подвижных форм микроэлементов по сравнению с фоновыми почвами (табл. 5). На наш взгляд, это свиде-

тельствует о существенной трансформации условий миграции химических элементов в городских почвах (прежде всего, щелочно-кислотных, ионно-обменных), приводящей к образованию большего количества слабосвязанных соединений.

Таблица 5 / Table 5

**Особенности распределения подвижных форм микроэлементов в почвах г. Ставрополя
/ Features of the distribution of mobile forms of microelements in the soils of Stavropol**

Функциональная зона	Среднее содержание в гумусовом горизонте, мг/кг			
	Cu	Zn	Cd	Pb
Промышленная	2,37±0,20	4,34±0,4	<0,05	2,95±0,20
Селитебная многоэтажная	1,73±0,10	4,64±0,4	<0,05	3,54±0,30
Селитебная одно-, двухэтажная	2,03±0,20	2,57±0,2	<0,05	2,19±0,20
Лесопарковая	0,95±0,09	3,16±0,3	<0,05	1,34±0,10
Дачная	0,80±0,08	3,57±0,3	<0,05	1,12±0,10
Фоновая территория (музей-заповедник «Татарское городище»)	0,87±0,08	2,05±0,2	<0,05	0,81±0,08

Заключение

Трансформация микроэлементного состава почв Ставрополя, подвергающихся антропогенному воздействию городского типа, имеет несколько особенностей, обусловленных спецификой как природных условий, так и потоков загрязняющих веществ. В первую очередь на распределение валовых форм микроэлементов влияет их содержание в почвообразующих породах, которые являются природным источником химических элементов для почв. Соединения микроэлементов, поступающие в почвы из почвообразующих пород, изменяются в результате почвообразовательных процессов, свойственных определенному типу почв. Во вторую очередь на распределение микроэлементов в городских условиях влияют уровень и степень антропогенной нагрузки, по-разному проявляющейся от различных источников. Наиболее значимым уровнем поступления тяжелых металлов отличается транспортная инфраструктура города, включающая в себя разнообразные виды транспорта и обеспечивающие их передвижение дороги. Воздействие других источников попадания тяжелых металлов в почвенный покров городской территории носит более регулируемый характер последние десятилетия на фоне усиления деятельности надзорных органов по контролю состояния окружающей среды города.

Запечатанность городских почв оказывает сильное воздействие на распределение техногенно обусловленных масс тяжелых металлов в городских почвах. В первую очередь запечатанность почв предохраняет их от загрязнения тяжёлыми металлами, а во вторую – она способствует поступлению более высоких концентраций загрязнителей в открытые, свободные от различного рода покрытий почвы. Запечатанность почв может влиять на деградацию системы почвенных соединений микроэлементов, связанную с органическим веществом.

Установленные особенности развития системы почвенных соединений микроэлементов на территории города Ставрополя имеют значение для понимания общей картины развития антропогенной трансформации почв в пределах крупных городов. Их изучение дает возможность осуществлять комплекс мероприятий по устранению негативного воздействия различного рода антропогенной деятельности на почвенный покров. При этом знание специфики образования системы почвенных соединений микроэлементов в городских почвах дает научное обоснование таким мероприятиям.

Список источников

1. Шальнев В.А. Эволюция ландшафтов Северного Кавказа. Ставрополь: Изд-во СГУ, 2007. 310 с.
2. Водяницкий Ю.Н. Загрязнение почв тяжелыми металлами и металлоидами и их экологическая опасность (аналитический обзор) // Почвоведение. 2013. № 7. С. 872–881.

3. Садовникова Л.К. Использование почвенных вытяжек при изучении соединений тяжелых металлов // *Химия в сельском хозяйстве*. 1997. № 2. С. 37–40.
4. Сает Ю.Е. [и др.]. *Геохимия окружающей среды*. М.: Недра, 1990. 335 с.
5. Limbeck A., Puls C. Particulate emissions from on-road vehicles // *Urban airborne particulate matter: origin, chemistry, fate and health impacts*. Ed. by F. Zereini, C.L.S. Wiseman. Heidelberg: Springer-Verlag Berlin, 2011. P. 63–79.
6. Савельева В.В. *Природа города Ставрополя*. Ставрополь: Ставропольсервисшкола, 2002. 192 с.
7. Почва. Город. Экология / под ред. Г.В. Добровольского. М.: Фонд «За экономическую грамотность», 1997. 320 с.
8. Касимов Н.С., Власов Д.В., Кошелева Н.Е., Никифорова Е.М. *Геохимия ландшафтов Восточной Москвы*. М.: АПР, 2016. 276 с.
9. Минкина Т.М., Мотузова Г.В., Назаренко О.Г. *Состав соединений тяжелых металлов в почвах*. Ростов н/Д.: Эверест, 2009. 208 с.
10. Путилина В.С., Галицкая И.В., Юганова Т.И. *Адсорбция тяжелых металлов почвами и горными породами. Характеристики сорбента, условия, параметры и механизмы адсорбции: аналит. обзор*. Новосибирск: ГПНТБ СО РАН, 2009. 155 с.
11. Ладонин Д.В., Марголина С.Е. *Взаимодействие тяжелых металлов с гуминовыми кислотами* // *Почвоведение*. 1997. № 7. С. 806–811.
12. Сальник Н.В., Горбов С.Н., Безуглова О.С. *Закономерности накопления тяжелых металлов в почвах Ростовской агломерации* // *Проблемы трансформации естественных ландшафтов в результате антропогенной деятельности и пути их решения: сб. науч. тр. по материалам Междунар. науч. экол. конф., посвященной Году науки и технологий*. Краснодар, 2021. С. 448–451.
13. Sytonova Iu.V. *Urban soils' sorption function* // *Urbanization: a challenge and an opportunity for soil functions and ecosystem services: Abstract book of 9th international congress "Soils of Urban Industrial Traffic Mining and Military Areas (SUITMA 9)"*. Moscow, 2017. P. 59–61.
14. Водяницкий Ю.Н. *Органическое вещество в городских почвах (обзор литературы)* // *Почвоведение*. 2015. № 8. С. 921–931.
15. Горбов С.Н., Безуглова О.С. *Специфика органического вещества почв Ростова-на-Дону* // *Почвоведение*. 2014. № 8. С. 953–962.
16. Горбов С.Н. *Генезис, классификация и экологическая роль городских почв европейской части Юга России (на примере Ростовской агломерации)* : дис. ... д-ра биол. наук. М., 2018. 448 с.
17. *Экогеохимия городских ландшафтов* / под ред. Н.С. Касимова. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1995. 336 с.
18. Безуглова О.С., Горбов С.Н., Сальник Н.В., Тагивердиев С.С. *Гранулометрический состав и закономерности накопления тяжелых металлов в почвах Ростова-на-Дону* // *Фундаментальные концепции физики почв: развитие, современные приложения и перспективы: сб. науч. тр. Междунар. науч. конф., посвященной 90-летию со дня рождения А.Д. Воронина*. М.: Изд. дом КДУ, 2019. С. 109–113.
19. Апарин Б.Ф., Сухачева Е.Ю., Бульшиева А.М., Лазарева М.А. *Гумусовые горизонты почв урбозкостем* // *Почвоведение*. 2018. № 9. С. 1071–1084.

References

1. Shalnev V.A. *Evolution of the landscapes of the North Caucasus*. Stavropol: SSU Press; 2007. 310 p. (In Russ.).
2. Vodyanitsky Yu.N. *Pollution of soils with heavy metals and metalloids and their environmental hazard (analytical review)*. *Pochvovedenie = Eurasian Soil Sci.* 2013;(7):872-881. (In Russ.).
3. Sadovnikova L.K. *The use of soil extracts in the study of compounds of heavy metals*. *Khimiya v sel'skom khozyaistve = Chemistry in Agriculture*. 1997;(2):37-40. (In Russ.).
4. Saet Yu.E. et al. *Geochemistry of the environment*. Moscow: Nedra Publ.; 1990. 335 p. (In Russ.).
5. Limbeck A., Puls C. *Particulate emissions from on-road vehicles. Urban airborne particulate matter: origin, chemistry, fate and health impacts*. F. Zereini, C.L.S. Wiseman, eds. Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Publ.; 2011:63-79.
6. Savelyeva V.V. *Nature of the city of Stavropol*. Stavropol: Stavropolservisshkola Publ.; 2002. 192 p. (In Russ.).
7. Dobrovolsky G.V., ed. *Soil. City. Ecology*. Moscow: Foundation for Economic Literacy Press; 1997. 320 p. (In Russ.).
8. Kasimov N.S., Vlasov D.V., Kosheleva N.E., Nikiforova E.M. *Geochemistry of landscapes of Eastern Moscow*. Moscow: APR Publ.; 2016. 276 p. (In Russ.).
9. Minkina T.M., Motuzova G.V., Nazarenko O.G. *Composition of heavy metal compounds in soils*. Rostov-on-Don: Everest Publ.; 2009. 208 p. (In Russ.).

10. Putilina V.S., Galitskaya I.V., Yuganova T.I. *Adsorption of heavy metals by soils and rocks. Characteristics of the sorbent, conditions, parameters and mechanisms of adsorption: an analytical review*. Novosibirsk: GPNTB SO RAN Press; 2009. 155 p. (In Russ.).
11. Ladonin D.V., Margolina S.E. Interaction of heavy metals with humic acids. *Pochvovedenie = Eurasian Soil Science*. 1997;(7):806-811. (In Russ.).
12. Salnik N.V., Gorbov S.N., Bezuglova O.S. Patterns of accumulation of heavy metals in the soils of the Rostov agglomeration. *Problems of transformation of natural landscapes as a result of anthropogenic activity and ways to solve them*. Collection of scientific papers based on the materials of the International Scientific Ecological Conference dedicated to the Year of Science and Technology. Krasnodar, 2021 :448-451. (In Russ.).
13. Symonova Iu.V. Urban soils' sorption function. *Urbanization: a challenge and an opportunity for soil functions and ecosystem services*. Abstract book of 9th international congress Soils of Urban Industrial Traffic Mining and Military Areas (SUITMA 9). Moscow, 2017:59-61.
14. Vodyanitsky Yu.N. Organic matter in urban soils (literature review). *Pochvovedenie = Eurasian Soil Sci*. 2015;(8):921-931. (In Russ.).
15. Gorbov S.N., Bezuglova O.S. Specificity of organic matter in the soils of Rostov-on-Don. *Pochvovedenie = Eurasian Soil Sci*. 2014;(8):953-962. (In Russ.).
16. Gorbov S.N. *Genesis, classification and ecological role of urban soils in the European part of the South of Russia (on the example of the Rostov agglomeration)*. Dissertation. Moscow, 2018. 448 p. (In Russ.).
17. Kasimov N.S., ed. *Ecogeochemistry of urban landscape*. Moscow: Moscow State University Press; 1995. 336 p. (In Russ.).
18. Bezuglova O.S., Gorbov S.N., Salnik N.V., Tagiverdiev S.S. Granulometric composition and patterns of accumulation of heavy metals in the soils of Rostov-on-Don. *Fundamental concepts of soil physics: development, modern applications and prospects*. Collection of scientific papers of the International Scientific Conference dedicated to the 90th anniversary of the birth of A.D. Voronin. Moscow: KDU Publ.; 2019:109-113. (In Russ.).
19. Aparin B.F., Sukhacheva E.Yu., Bulysheva A.M., Lazareva M.A. Humus horizons in soils of urban ecosystems. *Pochvovedenie = Eurasian Soil Sci*. 2018;(9):1071-1084. (In Russ.).

Информация об авторе

Т.В. Дегтярева – кандидат географических наук, доцент кафедры физической географии и кадастров.

Information about the author

T.V. Degtyareva - Candidate of Science (Geography), Associate Professor of the Department of Physical Geography and Cadastre.

*Статья поступила в редакцию 26.08.2022; одобрена после рецензирования 05.09.2022; принята к публикации 02.03.2023.
The article was submitted 26.08.2022; approved after reviewing 05.09.2022; accepted for publication 02.03.2023.*

Научная статья

УДК 631.4(477.75)

doi: 10.18522/1026-2237-2023-1-61-69

ПОЧВЕННОЕ РАЗНООБРАЗИЕ ТЕРРИТОРИИ КРЫМСКОГО ПОЛУОСТРОВА

**Елена Ивановна Ергина^{1✉}, Роман Вячеславович Горбунов²,
Владимир Александрович Табуничик³, Екатерина Александровна Петлюкова⁴**

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

^{2,3} Институт биологии южных морей имени А.О. Ковалевского РАН, Севастополь, Россия

⁴ Русское географическое общество, Москва, Россия

¹ergina65@mail.ru ✉

²karadag_station@mail.ru

³tabunshchik@ya.ru

⁴petlukova@mail.ru

Аннотация. В работе с использованием геоинформационных методов исследования проанализированы основные показатели, характеризующие почвенное разнообразие Крымского полуострова. Всего на почвенной карте выделено 273 почвенных ареала и комплекса, состоящих из 2363 контуров, которые были использованы в анализе. Рассчитанные значения индексов почвенного разнообразия территории Крымского полуострова превышают значения индексов его частей, однако эти превышения незначительны. Наибольшим почвенным разнообразием характеризуется территория Предгорно-Крымской области. Среди физико-географических областей Крымского степного края наивысшими показателями почвенного разнообразия характеризуется Керченская холмисто-балочная область, наиболее низкими – Тарханкутская возвышенная область. При оценке почвенного разнообразия на территории Крыма рекомендуется использовать индексы разнообразия Шеннона, Джини – Симпсона и видового богатства Менжиника, так как они отличаются наиболее высокой степенью корреляции по отношению друг к другу.

Ключевые слова: Крымский полуостров, почвы, почвенное разнообразие, индексы почвенного разнообразия

Благодарности: работа выполнена по теме государственного задания ФИЦ ИнБЮМ, регистрационный номер 121040100327-3, и при поддержке Программы стратегического академического лидерства Крымского федерального университета им. В.И. Вернадского («Приоритет 2030»).

Для цитирования: Ергина Е.И., Горбунов Р.В., Табуничик В.А., Петлюкова Е.А. Почвенное разнообразие территории Крымского полуострова // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. 2023. № 1. С. 61–70.

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

Original article

SOIL DIVERSITY OF THE CRIMEAN PENINSULA

Elena I. Ergina^{1✉}, Roman V. Gorbunov², Vladimir A. Tabunshchik³, Ekaterina A. Petlyukova⁴

¹ V.I. Vernadsky Crimean Federal University, Simferopol, Republic of Crimea, Russia

^{2,3} A.O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS, Sevastopol, Russia

⁴ Russian Geographical Society, Moscow, Russia

¹ergina65@mail.ru ✉

²karadag_station@mail.ru

³tabunshchik@ya.ru

⁴petlukova@mail.ru

© Ергина Е.И., Горбунов Р.В., Табуничик В.А., Петлюкова Е.А., 2023

Abstract. In this work, using geoinformation research methods and soil maps, the main indicators characterizing the soil diversity of the Crimean Peninsula are analyzed. In total, 273 soil areas and soil complexes were identified on the soil map, consisting of 2363 contours, which were used in the analysis. The calculated values of the indices of soil diversity in the territory of the Crimean Peninsula exceed the values of the indices calculated for its parts, however, these excesses are insignificant. The territory of the Crimean Foothill region is characterized by the greatest soil diversity. Among the physiographic regions of the Crimean Steppe region, the Kerch region is characterized by the highest indicators of soil diversity, and the Tarkhankut region is characterized by the lowest. When assessing soil diversity in Crimea, it is recommended to use the Shannon diversity index, the Gini-Simpson index, and the Menhinik species richness index, since they differ in the highest degree of correlation with respect to each other.

Key words: Crimean Peninsula, soils, soil diversity, soil diversity indices

Acknowledgments: the work was carried out within the state assignment of the Federal Research Centre Institute of Biology of the South seas of Russian Academy of Sciences (theme No 121040100327-3) and with the support of the Strategic Academic Leadership Program of the V.I. Vernadsky Crimean Federal University. ("Priority 2030").

For citation: Ergina E.I., Gorbunov R.V., Tabunschik V.A., Petlyukova E.A. Soil Diversity of the Crimean Peninsula. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2023;(1):61-69. (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

Многообразие факторов почвообразования и особенности эволюции обуславливают формирование на территории Крымского полуострова значительного почвенного разнообразия. Ранее на основе почвенно-картографических исследований сельскохозяйственных земель крымскими почвоведомы выделялось свыше 440 видов и разновидностей почв [1], что, с одной стороны, создает прекрасную информационную и картографическую основу, но в то же время свидетельствует о необходимости корректировки данных сведений и проведения работ по оценке почвенного разнообразия (педоразнообразия) современными методами.

Под почвенным разнообразием в контексте данной работы будем понимать количественную характеристику структуры почвенного покрова территории Крымского полуострова [2, 3]. В качестве основных методик его оценки принимаются расчеты различных показателей и индексов, которые характеризуют исследуемую территорию в целом и разнообразие почв внутри выделенных физико-географических областей.

Крымский полуостров расположен на юге Восточно-Европейской равнины, в центре Причерноморья. Омывается водами Черного и Азовского морей. На востоке Керченский пролив шириной 4–15 км отделяет Крым от Кавказа, а узкая и длинная песчано-глинистая коса Арабатской стрелки – мелководный залив Сиваш от Азовского моря [3, 4].

По рельефу Крымский полуостров разделяют на три неравные части: равнинный Крым, Керченский полуостров со своеобразной грядово-волнисто-равнинной поверхностью и горный Крым. Равнинный Крым расположен в пределах Скифской платформы, образованной сильно смятыми в складки палеозойскими горными породами. На территории Керченского полуострова вертикальные и горизонтальные движения, грязевой вулканизм, разломообразование и сопутствующие им перестройки речной сети, формирование ареалов интенсивных коллювиальных процессов, сейсмодислокаций и прочих геодинамических процессов связаны с проявлением новейшей тектонической активности. Горный Крым располагается в пределах единой крупной тектонической структуры – Крымского мегантиклинория, представляющего собой складчатое образование, объединяющее группу антиклинориев низшего порядка [3, 4].

Климат Крымского полуострова характеризуется значительным числом часов солнечного сияния, относительно мягкой зимой и жарким летом при дефиците практически на всей территории атмосферной влаги. Годовое изменение температуры воздуха почти совпадает с изменением притока солнечной радиации. Закономерно, что в соответствии с географическим положением

Крыма средняя месячная температура воздуха в основном изменяется с севера на юг, за исключением Южного берега Крыма (ЮБК), где изменение происходит к востоку и западу. Термический режим ЮБК характеризуется положительной температурой воздуха в течение всего года. Осадки распределяются крайне неравномерно, что обусловлено сложным строением рельефа и особенностями циркуляции атмосферы. Количество осадков за год изменяется от 250–300 мм в степных районах до 1000 и более в горах, где создаются специфические условия увлажнения. Большинство районов полуострова относится к зоне недостаточного увлажнения, особенно западное и восточное морское побережье, где осадков выпадает на 100–150 мм меньше, чем в центральных районах степного Крыма [4].

Равнинный Крым занимают холмистые степи, по большей части распаханые в настоящий момент и утратившие естественный облик. В предгорье (до высоты 350 м над уровнем моря) степи сменяются лесостепью. К югу лесостепь постепенно переходит в пояс дубовых лесов высотой 350–700 м, занимающих 60 % всех лесов Крыма. С набором высоты (700–1300 м) дубовые леса сменяются буковыми и грабовыми. Растительность яйл представляет собой луговые и степные сообщества. На ЮБК пояс сосновых лесов сменяет приморский шибляковый, состоящий из дуба пушистого, грабинника, держидерева, можжевельника древовидного, фисташки, земляничника мелкоплодного, иглицы понтийской, других засухоустойчивых растений [4].

В современных условиях происходят процессы эволюции и формирования почв в новых условиях среды, обусловленных антропогенным воздействием, современными климатическими изменениями, а на значительных территориях равнинного Крыма – трансформацией вещественно-энергетических потоков. Поэтому для теоретических и практических аспектов почвоведения важно определить почвообразующий потенциал природных факторов, при сочетании которых происходят эти процессы [5]. Ранее нами предпринята попытка оценки этого показателя с использованием биоэнергетического подхода [6, 7]. Общий пространственный фон почвообразующего потенциала природных факторов создается биоклиматическими условиями: увлажнением, термическим режимом, интенсивностью биологического круговорота. Структура почвенного покрова формируется при наборе большего количества факторов (почвообразующие породы, экспозиция и морфология склонов, микрорельеф, использование территории и т.д.), которые определяют разнообразие структуры почвенного покрова – почвенное разнообразие.

Материалы и методы исследований

Целью работы является определение количественных характеристик почвенного разнообразия территории Крымского полуострова для проведения сравнительного почвенно-географического анализа различных единиц физико-географического районирования полуострова.

Основными методами в работе выступают литературно-аналитический, картографический, картометрический и геоинформационный.

Для территории Крымского полуострова почвенное разнообразие рассчитывается впервые. Основными показателями, используемыми для изучения биологического, ландшафтного и в перспективе почвенного разнообразия, являются [2, 8–10]: среднее, максимальное и минимальное значения площади (P_i) и периметра контуров; количество (N) и процентное соотношение ареалов почвенных контуров и их число (k); индекс дробности $ID = \frac{k}{\sum_{i=1}^k P_i}$; индекс разнообразия

Шеннона $SHDI = -\sum_{i=1}^n p_i \cdot \ln p_i$, где p_i – часть исследуемого участка, занятая почвенной группой i и выраженная в долях от единицы; n – количество почвенных групп на исследуемой территории;

нормированный индекс Шеннона $SHDI = \frac{-\sum_{i=1}^n p_i \cdot \ln p_i}{\ln n}$; индекс Джини – Симпсона $G = 1 - \sum_{i=1}^n p_i^2$;

индекс видового богатства Маргалефа $D_{Mg} = \frac{S-1}{\ln S}$, где S – число выявленных групп почв на

исследуемой территории; N – общее число ареалов всех групп почв S на исследуемой территории; индекс видового богатства Менхиника $D_{Mn} = \frac{S}{\sqrt{N}}$.

Основой исследования послужили листы почвенных карт масштабом 1:200 000 [11], которые покрывают всю территорию Крымского полуострова, оцифрованные и переведённые в векторный формат. Однако на данных картах информационная обеспеченность значительно варьирует – отсутствуют данные по почвенному покрову под населёнными пунктами и лесным фондом в пределах территории Крымских гор, что снижает площадь исследования до 84,6 % от общей площади полуострова. Названия почв приведены согласно [12].

Полученные результаты и их обсуждение

Согласно уточненной схеме физико-географического районирования, территория равнинного Крыма входит в Крымский степной край южностепной (сухостепной) подзоны степной зоны [13]. В его составе выделяются четыре области – Присивашско-Крымская низменная, Тархангутская возвышенная, Центрально-Крымская возвышенная и Керченская холмисто-грядовая (рисунок).



Схема физико-географического районирования Крымского полуострова [13] /
 Scheme of the physical and geographical zoning of the Crimean Peninsula [13]

В составе физико-географической страны (Крымские горы) выделяется Крымский горный край, состоящий из трех областей: Предгорно-Крымской, Горно-Крымской и Южнобережно-Крымской.

Для расчетов показателей почвенного разнообразия были подсчитаны площади, занимаемые почвенными ареалами и почвенными комплексами (ПК), согласно общепринятым определениям [14]. Всего на почвенной карте выделено 273 почвенных ареала и ПК, состоящих из 2363 контуров. Максимальная площадь контура составляет 1107,6 км² (расположен в северо-восточной ча-

сти Крымского полуострова и относится к темно-каштановым слабо- и среднесолонцеватым почвам), минимальная – 0,1 км² (расположен к югу от Сакского озера и относится к солонцам и солончаковому илу). Средняя площадь контура составляет 10,1 км².

Учитывая тот факт, что в пределах Крымских гор отсутствуют данные о почвенном покрове для земель лесного фонда, степень информационной обеспеченности почвенной карты (масштаб 1:200 000) для территории Крымского степного края [13] составляет 94,6 % от общей площади края, а Крымских гор – 58,9. Одновременно в пределах физико-географических областей Крымского степного края она достигает более 90 % (табл. 1), в то же время только в пределах Предгорно-Крымской области показатель изученности составляет 82,5 %, а в Горно-Крымской и Южнобережно-Крымской областях – менее 50 % (27,9 и 42,5 % соответственно). Таким образом, в дальнейшем проведем оценку почвенного разнообразия, за исключением Горно-Крымской, Южнобережно-Крымской областей и Крымских гор.

В пределах Крымского степного края преобладают (табл. 1) черноземы южные слабогумусные мицеллярно-карбонатные, которые занимают 2520,3 км² (14,0 % от площади края), черноземы преимущественно карбонатные щелчеватые и галечниковые на элювии плотных галечниковых карбонатных и окарбонированных пород – 2144,9 км² (12,0 % от площади края) и темно-каштановые слабо- и среднесолонцеватые почвы – 1762,6 км² (9,8 % от площади края). Наименьшую площадь занимают ПК (черноземы предгорные карбонатные на элювии и делювии плотных карбонатных пород в комплексе с черноземами предгорными солонцеватыми преимущественно на плотных засоленных глинах – 0,26 км²).

В пределах Предгорно-Крымской области преобладают черноземы предгорные карбонатные на элювии и делювии плотных карбонатных пород, которые занимают 599,86 км² (14,6 % от площади области), ПК (дерновые карбонатные почвы на элювии плотных карбонатных пород в комплексе с выходами пород – 463,22 (11,3 % от площади области) и темно-каштановые слабо- и среднесолонцеватые почвы – 240,04 (5,8 % от площади области)) (табл. 2).

Наименьшую площадь в пределах Предгорно-Крымской области занимают ПК (черноземы предгорные карбонатные на элювии и делювии плотных карбонатных пород в комплексе с луговыми карбонатными почвами – 0,003 км² – и черноземы солонцеватые на плотных засоленных глинах в комплексе с луговыми глубоко-, средне- и сильносолонцеватыми почвами – 0,05 км²).

Рассчитанные значения индексов почвенного разнообразия (табл. 3) территории Крымского полуострова превышают значения индексов его частей, однако для некоторых индексов эти превышения незначительны. SHDI для территории Крымского полуострова составляет 3,65. Для Крымского степного края этот показатель составляет 3,15, а для областей, входящих в его состав, колеблется от 2,04 до 2,86. Таким образом, значение индекса для целого не сводится к среднему его частей. Эту же закономерность можно наблюдать и при анализе других рассчитанных индексов. Учитывая тот факт, что площадь Крымского степного края в 5 раз больше Предгорно-Крымской области, нельзя согласиться с мнением, изложенным в ряде работ [15], что SHDI напрямую зависит от размеров исследуемой территории.

В то же время SHDI для Предгорно-Крымской области оказался выше, чем у всего Крымского степного края (3,39 против 3,15). Значение SHEI для Предгорно-Крымской области также больше (0,70 против 0,65), равно как и других индексов (табл. 3). Факторами, обуславливающими значительное почвенное разнообразие на территории Предгорного Крыма, необходимо считать сложное геологическое и геоморфологическое строение, что формирует разнообразие экспозиции и морфологии склонов, почвообразующих пород.

Это благоприятствует процессам перераспределения энергетических потоков (тепло и влага), участвующих в процессе почвообразования, а также провоцирует развитие экзогенных процессов различного генезиса, в том числе способствующих естественной эволюции и развитию механической и физико-механической антропогенной деградации почв, среди которых преобладают оползни, сели, обвалы и, конечно же, эрозия. Немаловажным фактором, способствующим повышению педоразнообразия в горном Крыму, необходимо считать и длительность процессов почвообразования. Доказано, что чем больше возраст территории, на которой формируются почвы, тем выше значение индекса Шеннона [16]. Очевидно, что абсолютный возраст значительной части территории равнинного Крыма меньше, чем горного [4, 17, 18]. Территория Присивашья и некоторые участки Арабатской стрелки поднялись со дна моря относительно недавно [4].

Таблица 1 / Table 1

**Основные почвы и ПК Крымского степного края (составлена авторами с использованием [11–13])
/ Basic soils and soil complexes of the Crimean Steppe region (compiled by the authors using [11–13])**

Почвы и ПК	Площадь	
	км ²	%
Черноземы южные слабогумусные мицеллярно-карбонатные	2520,3	14,0
Черноземы карбонатные	2144,9	12,0
Темно-каштановые слабо- и среднесолонцеватые почвы	1762,6	9,8
ПК (лугово-каштановые солонцеватые и солонцы лугово-степные)	1416,8	7,9
Черноземы южные слабогумусные	1098,1	6,1
Черноземы на плотных глинах	1090,4	6,1
Черноземы солонцеватые	769,8	4,3
ПК (дерновые карбонатные почвы в комплексе с выходами пород)	628,2	3,5
Черноземы южные слабо- и среднесолонцеватые	571,2	3,2
Лугово-черноземные карбонатные почвы	518,9	2,9
ПК (темно-каштановые солонцеватые почвы и солонцы)	372,9	2,1
Дерновые карбонатные почвы	371,4	2,1
ПК (темно-каштановые солонцеватые почвы и солонцы)	333,9	1,9
Черноземы южные слабогумусные мицеллярно-высококарбонатные	303,8	1,7
ПК (солонцы луговые и солонцы с солончаковым илом)	269,6	1,5
ПК (черноземы солонцеватые и солонцы)	182,1	1,0
ПК (солонцы луговые и луговые солонцеватые осолоделые почвы)	173,8	1,0
Прочие почвенные ареалы и почвенные комплексы	2451,7	14,6
Под населенными пунктами, водными объектами, лесным фондом и пр.	965,9	5,4

Таблица 2 / Table 2

**Почвы и ПК Предгорно-Крымской области (составлена авторами с использованием [11–13]) / Soils
and soil complexes of the Crimean Foothill region (compiled by the authors using [11–13])**

Почвы и ПК	Площадь	
	км ²	%
Черноземы предгорные карбонатные	599,86	14,6
ПК (дерновые карбонатные почвы в комплексе с выходами пород)	463,22	11,3
Черноземы карбонатные	240,04	5,8
Черноземы на плотных глинах	199,90	4,9
Коричневые почвы	157,58	3,8
ПК (коричневые почвы в комплексе с выходами пород)	142,50	3,5
Луговые карбонатные почвы	125,81	3,1
Черноземы предгорные выщелоченные	111,84	2,7
Черноземы южные	111,44	2,7
Дерновые карбонатные почвы	110,46	2,7
Лугово-черноземные карбонатные почвы	77,67	1,9
Прочие почвенные ареалы и почвенные комплексы	1052,28	25,6
Под населенными пунктами, водными объектами, лесным фондом и пр.	717,6	17,5

Рассчитанный коэффициент парной корреляции между площадью исследуемой территории и SHDI составляет 0,6, между площадью исследуемой территории и SHEI – 0,1. Коэффициент парной корреляции между количеством почвенных ареалов и ПК на исследуемой территории и SHDI составляет 0,9, между количеством почвенных ареалов и ПК на исследуемой территории и SHEI – 0,4. Рассчитанные коэффициенты парной корреляции указывают на то, что при расчетах SHDI и SHEI больше зависят от количества почвенных ареалов и ПК на исследуемой территории, чем от ее площади.

Индекс G для Крымского степного края составляет 0,93. Для областей, входящих в Крымский степной край, он колеблется от 0,80 до 0,89. Для Крымского полуострова этот показатель составляет 0,95. Коэффициент корреляции индекса G и количества почвенных ареалов и ПК составляет 0,8, индекс G и площади территории – 0,6.

Таблица 3 / Table 3

**Индексы почвенного разнообразия на территории Крымского полуострова /
Soil diversity indices in the Crimean Peninsula**

Единица физико-географического районирования	Площадь, км ²	SHDI	SHEI	G	D _{Mg}	D _{Mn}	ID
Крымский полуостров	21561,0	3,65	0,65	0,95	35,0	5,62	0,091
Крымский степной край	16980,2	3,15	0,65	0,93	16,48	2,97	0,097
Присивашско-Крымская низменная область	5511,4	2,45	0,59	0,82	9,81	2,77	0,085
Тарханкутская возвышенная область	4459,5	2,04	0,56	0,80	5,94	1,59	0,131
Центрально-Крымская возвышенная область	4255,7	2,36	0,60	0,85	8,48	2,68	0,081
Керченская холмисто-грядовая область	2753,6	2,86	0,70	0,89	9,98	3,02	0,137
Предгорно-Крымская область	3392,6	3,39	0,70	0,93	20,2	5,59	0,126

Для территории Крымского полуострова значение индекса D_{Mg}, рассчитанное по почвенной карте масштаба 1:200 000, составляет 35,0; индекса D_{Mn} – 5,62. Эти индексы сильно зависят от количества почвенных ареалов и ПК на исследуемой территории. Коэффициенты корреляции – 0,99 и 0,82 соответственно.

Высокое почвенное разнообразие, подтвержденное рассчитанными количественными показателями, еще раз подчеркивает уникальность почвенного покрова Крымского полуострова. На полуострове существует полный спектр выделяемых в Красной книге почв России категорий, рекомендуемых для охраны, – это зональные и азональные эталоны, редкие и уникальные почвы. Но значительная антропогенная трансформация почв и земельных ресурсов полуострова неминуемо приведет к упрощению структуры почвенного покрова, снижению почвенного плодородия, утери некоторыми почвами своих свойств. Кроме того, на больших территориях наблюдается развитие вторичных деградационных процессов, таких как дефляция, водная эрозия, дегумификация, загрязнение балластными компонентами удобрений, остаточными количествами ядохимикатов и прочее. Особенно широкое распространение получили водная эрозия и дефляция. В Крыму эрозионные процессы наиболее активно развиваются в агроландшафтах горных и предгорных районов. В них эродируемые земли составляют более 70 % от общей площади всех сельскохозяйственных угодий. Дефляционные процессы охватывают 48,7 % пахотных земель республики (в том числе слабо- и среднедефлированные почвы составляют соответственно 31,3 и 17,3 %) [6, 19, 20]. Некоторые неизменные целинные эталонные почвы, особенно в равнинном Крыму, сохранились лишь на незначительных участках в пределах ООПТ.

Поэтому в настоящее время так актуальны мероприятия по разработке и принятию Красной книги почв Республики Крым. Их цель – охрана и рациональное использование почв, сохранение педоразнообразия. Основные методические и научно-практические разработки по отдельным регионам уже существуют [21, 22], но необходима комплексная системная научно-исследовательская работа для территории всего полуострова.

Выводы

Расчетно-картографический анализ почвенного покрова Крымского полуострова подтвердил его высокое почвенное разнообразие. Наибольшим почвенным разнообразием характеризуется территория Предгорно-Крымской области. Среди рассматриваемых физико-географических областей Крымского степного края высокие показатели в Керченской холмисто-балочной области, самые низкие – в Тарханкутской возвышенной области.

При оценке почвенного разнообразия на территории Крыма рекомендуется использовать индексы SHDI, SHEI, G, D_{Mn}, так как они отличаются наиболее высокой степенью корреляции по отношению друг к другу.

При современной актуализации почвенной карты Крымского полуострова мы прогнозируем снижение разнообразия структуры почвенного покрова, особенно в равнинном Крыму, по причине уменьшения количества и площадей почвенных контуров вследствие процессов антропогенной трансформации и эволюции почвенного покрова.

Список источников

1. Драган Н.А. Почвенные ресурсы Крыма. Симферополь: Доля, 2004. 208 с.
2. Красильников П.В., Герасимова М.И., Голованов Д.Л., Конюшкова М.В., Сидорова В.А., Сорокин А.С. Почвенное разнообразие и его значение в контексте современной географии почв // Почвоведение. 2018. № 1. С. 3–16. Doi: 10.7868/S0032180X1801001X.
3. Атлас: Автономная Республика Крым / под ред. Н.В. Багрова, Н.Г. Руденко. Симферополь: ТНУ им. В.И. Вернадского, Крымский науч. центр НАН и МОН Украины, Ин-т географии НАН Украины, 2003. 78 с.
4. Современные ландшафты Крыма и сопредельных территорий / под науч. ред. Е.А. Позаченюк. Симферополь: Бизнес-Информ, 2009. 672 с.
5. Шоба С.А., Герасимова М.И., Таргульян В.О., Урусевская И.С., Алябина И.О., Макеев А.О. Почвообразующий потенциал природных факторов // Генезис, география и экология почв: сб. науч. тр. Междунар. конф. Львов, 1999. С. 90–92.
6. Ергина Е.И. Пространственно-временные закономерности процессов современного почвообразования на Крымском полуострове. Симферополь: Ариал, 2017. 224 с.
7. Ергина Е.И., Горбунов Р.В. Моделирование мощности гумусового горизонта почв равнинного Крыма для целей выделения почвенных эталонов // Современные научные исследования и инновации. 2016. № 11 (67). С. 702–708.
8. Алябина О.И. Количественная оценка разнообразия почв ЕТР // Проект создания экологической сети на европейской части России: лесной аспект. М.: ПАИМС, 1996. С. 37–42, 96–103.
9. Смирнова М.А., Геннадиев А.Н. Количественная оценка почвенного разнообразия: теория и методы исследования // Вест. Московского ун-та. Серия 5: География. 2017. № 4. С. 3–11.
10. Ibanez J.J., Bockhei J.G. Pedodiversity state of the art and future challenges // Pedodiversity. London: CRCpress, 2013. 250 p.
11. Карта ґрунтів Української ССР. Укрземпроект: Міністерство сільського господарства УРСР, 1967. Л. 136–137, 144–147, 151–156.
12. Егоров В.В., Фридланд В.М., Иванова Е.Н., Розов Н.Н., Носин В.А., Фриев Т.А. Классификация и диагностика почв СССР. М.: Колос, 1977. 223 с.
13. Маринич О.М., Пархоменко Г.О., Петренко О.М., Шищенко П.Г. Удосконалена схема фізико-географічного районування України // Український географ. журн. 2003. № 1. С. 16–20.
14. Толковый словарь по почвоведению / отв. ред. А.А. Роде. М.: Наука, 1975. 286 с.
15. Minasny B., McBratney A.B., Hartemink A.E. Global pedodiversity, taxonomic distance, and the World Reference Base // Geoderma. 2010. Vol. 155, № 3–4. P. 132–139.
16. Toomanian N., Esfandiarpour I. Challenges of pedodiversity in soil science // Eurasian Soil Science. 2010. Vol. 43, № 13. P. 1486–1502.
17. Геология СССР. Т. VIII: Крым, ч. 1: Геологическое описание. М.: Недра, 1969. 576 с.
18. Ергина Е.И., Горбунов Р.В., Щербина А.Д. Почвенные эталоны и редкие почвы равнинного Крыма. Симферополь: Ариал, 2018. 168 с.
19. Ергина Е.И., Горбунов Р.В., Щербина А.Д. Географический анализ допустимых норм эрозии почв в агроландшафтах Крымского полуострова. Симферополь: Ариал, 2018. 180 с.
20. Ергина Е.И., Жук В.О. Влияние современных тенденций климата на состояние эрозионно опасных агроландшафтов и оценка почвообразующего потенциала природных факторов Крыма // Изв. Оренбургского гос. аграрного ун-та. 2017. № 3 (65). С. 175–178.
21. Ергина Е.И., Горбунов Р.В., Тронза Г.Е., Лебедев Я.О., Хижняк Ю.С. Изучение и идентификация почвенных эталонов и редких почв с целью мониторинга и охраны почвенных ресурсов в равнинном Крыму. Симферополь: Ариал, 2017. 140 с.
22. Костенко И.В., Дунаевская Е.В. Выбор эталонных объектов для Красной книги почв в пределах Главной гряды Крымских гор // Красная книга почв и её значение для охраны почвенного покрова: материалы Всерос. науч. конф. Никитский ботанический сад – Национальный научный центр, 20–23 октября 2015 г. Симферополь: Ариал, 2015. С. 104–110.

References

1. Dragan N.A. *Soil resources of the Crimea*. Simferopol: Dolya Publ.; 2004. 208 p. (In Russ.).
2. Krasilnikov P.V., Gerasimova M.I., Golovanov D.L., Konyushkova M.V., Sidorova V.A., Sorokin A.S. Soil diversity and its significance in the context of modern soil geography. *Pochvovedenie = Soil Science*. 2018;(1):3-16, doi: 10.7868/S0032180X1801001X. (In Russ.).
3. Bagrov N.V., Rudenko N.G., eds. *Atlas: Autonomous Republic of Crimea*. Simferopol: V.I. Vernadsky TNU, Crimean Scientific Center of NAS and MES of Ukraine, Institute of Geography of the National Academy of Sciences of Ukraine Press; 2003. 78 p. (In Russ.).
4. Pozachenyuk E.A., ed. *Modern landscapes of the Crimea and adjacent territories*. Simferopol: Business-Inform Publ.; 2009. 672 p. (In Russ.).

5. Shoba S.A., Gerasimova M.I., Targulyan V.O., Urusevskaya I.S., Alyabina I.O., Makeev A.O. Soil-forming potential of natural factors. *Genesis, geography and ecology of soils*. Collection of Scientific Papers of the International Conference. Lviv, 1999:90-92. (In Russ.).
6. Ergina E.I. *Spatial and temporal patterns of the processes of modern soil formation on the Crimean peninsula*. Simferopol: Arial Publ.; 2017. 224 p. (In Russ.).
7. Ergina E.I., Gorbunov R.V. Modeling of the humus horizon of the soils of the plain Crimea for the purposes of the allocation of soil standards. *Sovremennye nauchnye issledovaniya i innovatsii = Modern Scientific Researches and Innovations*. 2016;(11):702-708. (In Russ.).
8. Alyabina O.I. Quantitative assessment of the diversity of soils of the ETR. *The project of creating an ecological network in the European part of Russia: forest aspect*. Moscow: PAIMS Publ.; 1996:37-42, 96-103. (In Russ.).
9. Smirnova M.A., Gennadiev A.N. Quantitative assessment of soil diversity: theory and research methods. *Vest. Moskovskogo un-ta. Seriya 5: Geografiya = Lomonosov Geography J.* 2017;(4):3-11. (In Russ.).
10. Ibanez J.J., Bockhei J.G. Pedodiversity state of the art and future challenges. *Pedodiversity*. London: CRCpress; 2013. 250 p.
11. *Soil map of the Ukrainian SSR*. Ukrzemproekt: Ministry of Agriculture of the Ukrainian SSR Press; 1967:136-137, 144-147, 151-156. (In Ukr.).
12. Egorov V. V., Friedland V. M., Ivanova E. N., Rozov N. N., Nosin V. A., Frieve T. A. *Classification and diagnostics of soils of the USSR*. Moscow: Kolos Publ., 1977. 223 p. (In Russ.).
13. Marinich O. M., Parkhomenko G. O., Petrenko O. M., Shishchenko P. G. Improved scheme of physical and geographical zoning of Ukraine. *Ukraïns'kii geograf. zhurn. = Ukrainian Geographical Journal*. 2003;(1):16-20. (In Ukr.).
14. Rode A. A., ed. *Explanatory dictionary of soil science*. Moscow: Nauka Publ.; 1975. 286 p. (In Russ.).
15. Minasny B., McBratney A.B., Hartemink A.E. Global pedodiversity, taxonomic distance, and the World Reference Base. *Geoderma*. 2010;155(3-4):132-139.
16. Toomanian N., Esfandiarpour I. Challenges of pedodiversity in soil science. *Eurasian Soil Science*. 2010;43(13):1486-1502.
17. *Geology of the USSR. Vol. VIII: Crimea, ch. 1: Geological description*. Moscow: Nedra Publ.; 1969. 576 p. (In Russ.).
18. Ergina E.I., Gorbunov R.V., Shcherbina A.D. *Soil standards and rare soils of the plain Crimea*. Simferopol: Arial Publ.; 2018. 168 p. (In Russ.).
19. Ergina 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.).
20. Ergina E.I., Zhuk V.O. Influence of modern climate trends on the state of erosively hazardous agricultural landscapes and assessment of the soil-forming potential of natural factors of the Crimea. *Izv. Orenburgskogo gos. agrarnogo un-ta = Proceedings of the Orenburg State Agrarian University*. 2017;(3):175-178. (In Russ.).
21. Ergina E.I., Gorbunov R.V., Tronza G.E., Lebedev Ya.O., Khizhnyak Yu.S. *Study and identification of soil standards and rare soils for the purpose of monitoring and protection of soil resources in the plain Crimea*. Simferopol: Arial Publ.; 2017. 140 p. (In Russ.).
22. Kostenko I.V., Dunaevskaya E.V. The choice of reference objects for the Red Book of soils within the Main ridge of the Crimean Mountains. *The Red Book of soils and its significance for the protection of soil cover: materials of the All-Russian Scientific Conference*. Nikitsky Botanical Garden - National Scientific Center, October 20-23, 2015. Simferopol: Arial Publ.; 2015:104-110. (In Russ.).

Информация об авторах

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

Р.В. Горбунов – доктор географических наук, директор.

В.А. Табушник – младший научный сотрудник, Научно-исследовательский центр геоматики.

Е.А. Петлюкова – сотрудник исполнительной дирекции, куратор молодежных клубов Северо-Кавказского федерального округа и Краснодарского края.

Information about the authors

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

R.V. Gorbunov - Doctor of Science (Geography), Director.

V.A. Tabunshchik - Junior Researcher, Research Center for Geomatics.

E.A. Petlyukova - Employee of the Executive Directorate, Curator of youth clubs of the North Caucasus Federal District and Krasnodar Krai.

*Статья поступила в редакцию 25.07.2022; одобрена после рецензирования 25.08.2022; принята к публикации 02.03.2022.
The article was submitted 25.07.2022; approved after reviewing 25.08.2022; accepted for publication 02.03.2022.*

Научная статья

УДК 911.3:33 + 911.3:314 (571.53/.55 + 517.3)

doi: 10.18522/1026-2237-2023-1-70-78

ПРОСТРАНСТВЕННАЯ ДИНАМИКА ЧИСЛЕННОСТИ НАСЕЛЕНИЯ МАЛЫХ ГОРОДОВ СИБИРСКИХ РЕГИОНОВ

Нина Александровна Ипполитова

Институт географии им. В.Б. Сочавы Сибирского отделения РАН, Иркутск, Россия

Nina-ip@list.ru

Аннотация. Рассмотрены основные результаты динамики численности населения малых городов в регионах Восточной Сибири за более чем 30-летний период. На основе анализа статистических данных выделены основные группы малых городов по изменению численности населения, а также по ведущей экономической функции. При анализе выделено четыре группы по динамике изменения численности населения.

Проведенное исследование подтверждает, что в последние годы отмечается снижение численности населения в малых городах, приводящее к «вымыванию» некоторых малых городов из системы расселения. Также отмечается рост в структуре малых городов «сверх малых» (до 10 тыс. чел.), что свидетельствует об истончении каркаса городского расселения Восточной Сибири.

Ключевые слова: малые города, регионы Сибири, функции городов, динамика численности населения

Благодарности: исследование выполнено за счет средств государственного задания (№ госрегистрации темы: АААА-А21-121012190019-9) и при финансовой поддержке РЦНИ в рамках научного проекта № 20-55-44023 Монг_а.

Для цитирования: Ипполитова Н.А. Пространственная динамика численности населения малых городов сибирских регионов // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. 2023. № 1. С. 70–78.

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

Original article

SPATIAL DYNAMICS OF THE POPULATION OF SMALL TOWNS IN THE SIBERIAN REGIONS

Nina A. Ippolitova

V.B. Sochava Institute of Geography, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia

Nina-ip@list.ru

Abstract. The article considers the main results of the dynamics of the population of small towns in the regions of Eastern Siberia for more than 30 years. Based on the analysis of statistical data, the main groups of small towns were identified by population change, as well as by the leading economic function. When analyzing the dynamics of the population of small towns, four groups were identified according to the dynamics of population change.

© Ипполитова Н.А., 2023

The study confirms that in recent years there has been a decrease in the population in small towns, which leads to the “washout” of some small towns from the settlement system. There is also an increase in the structure of small towns “super small” (up to 10 thousand people), which indicates the thinning of the framework of urban settlement in Eastern Siberia

Keywords: *small towns, regions of Siberia, city functions, population dynamics*

Acknowledgments: *the study was carried out at the expense of the state task (state registration number of the topic: AAAA-A21-121012190019-9) and with the financial support of the Russian Center for Research and Development within the framework of the scientific project No. 20-55-44023 Mong_a.*

For citation: Ippolitova N.A. Spatial Dynamics of the Population of Small Towns in the Siberian Regions. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2023;(1):70-78. (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 и постановка проблемы

В России по состоянию на 2020 г. числится около 800 малых городов, они составляют 3/4 всех российских городов, или 1/4 всех городских поселений, включая поселки городского типа. Малый город – это населенный пункт с численностью населения до 50 тыс. чел. Малые города образуют «низовую» сеть территориальной структуры хозяйства России, выполняя промежуточную роль между сельскими поселениями и крупными городами, обеспечивая экономическую и социокультурную взаимосвязь. Вследствие этого они занимают особое место в экономике страны, что определяет важность и необходимость исследования, наиболее актуальное в границах рассматриваемой территории, так как малые города являются скрепляющим остовом громадных, слабозаселенных пространств Восточной Сибири. Кроме этого, малые города являются наиболее уязвимой частью городского расселения, так как в числе первых испытали последствия демографического кризиса 1990-х гг. и продолжающийся миграционный отток.

Исследованием малых городов с географической точки зрения занимались С.А. Ковалев, О.А. Константинов, Е.Г. Анимца, В.В. Воробьев [1–4], изучению занятости в малых городах посвящены работы Ю.В. Флоринской, Ю.М. Плюснина и др. [5, 6], функциональный анализ малых городов рассмотрен в работах Г.М. Лаппо [7, 8]. Оценка современных факторов развития городов и урбанизированных изменений рассмотрена в работах ученых Института географии СО РАН [9–12].

В исследовании малые города рассматриваются в границах Восточной Сибири, в которую входят Забайкальский и Красноярский края, республики Бурятия, Тыва, Хакасия, Якутия (Саха) и Иркутская область.

Методы исследования

Большая часть малых городов рассматриваемых регионов образовалась в дореволюционный период – 68 % (42 города), в советский период – 32 % (20 городов). Самые первые городские поселения строились как остановочные пункты. Они, как правило, имели выгодное экономико-географическое положение. В дальнейшем, по мере продвижения на восток и с развитием торгово-экономических связей и промышленности, отмечается бурный рост городских поселений во всей Восточной Сибири. Вторая волна роста числа малых городов связана с индустриализацией. В небывало короткие сроки с использованием всех ресурсов страны создавались новые крупные предприятия, вокруг них – рабочие поселки, затем перерастающие в малые города. В большинстве новообразованные (в том числе на необжитых ранее местах) города стали типичными городами-заводами, а в прежних городах профиль становился также преимущественно промышленным. Несмотря на то что новых городов в советский период было основано меньше, чем в дореволюционный, в общем, произошло увеличение их числа за счет присвоения статуса города поселкам.

Очень часто малые города выполняют значительные и разнообразные функции в экономике. В них расположены предприятия по переработке сельскохозяйственной продукции, горнодобывающие предприятия, предприятия тяжелой промышленности, машиностроения. Часто малые города являются дополнением экономической базы более крупных городов, формируясь и развиваясь как транспортно-распределительные центры, центры науки, в этих городах располагаются отделения и филиалы крупных предприятий. Экономические трудности 1990-х гг. привели к значительным социально-экономическим преобразованиям, чаще всего негативного характера, так как проводились без учета специфики этих населенных пунктов. Многие малые города с трудом адаптировались, а некоторые до сих пор не могут решить множество возникших экономических, социальных проблем. В свою очередь, все это негативно сказывается на демографических процессах. В связи с этим важное место в исследовании вопросов пространственной динамики численности населения малых городов занимают демографические процессы, позволяющие выявить наиболее болевые точки и определить меры, которые бы способствовали оздоровлению демографической ситуации.

Цель исследования – качественный и количественный пространственный анализ малых городов Восточной Сибири, а именно динамики численности их населения с 1989 по 2021 г. и причин, обусловивших ее подобную динамику.

В качестве основных приемов исследования в работе использовались методы сравнительного анализа, обобщения, синтеза, а также картографический метод. Информационную основу работы составили статистические материалы Федеральной службы государственной статистики.

Результаты и обсуждение

Сибирский регион занимает срединное место среди других субъектов по количеству малых городов, лидером по количеству малых городов является Центральная Россия (более 200), меньше всего их на Северном Кавказе (около 40).

В Восточной Сибири 74 % приходится на малые города, которые по регионам размещены крайне неравномерно (табл. 1), но именно они формируют каркас городского расселения всего региона. Малые города занимают самый большой процент, из общего числа – 62 (74 %), поэтому именно им принадлежит особое место в ряду сибирских городов (табл. 1). Лидерами по количеству городов, в том числе и малых, являются Красноярский край, Иркутская область и Республика Саха (Якутия), минимальное количество городских поселений – в республиках Тыва и Хакасия.

Таблица 1 / Table 1

Количество городов в Восточной Сибири / Number of cities in Eastern Siberia

Субъект Федерации	Количество городов	Количество малых городов	Соотношение к остальным, % малых городов
Забайкальский край	10	8	80
Иркутская область	22	16	73
Красноярский край	23	15	65
Республика Бурятия	6	5	83
Республика Саха (Якутия)	13	11	85
Республика Тыва	5	4	80
Республика Хакасия	5	3	60
Всего	84	62	74

В настоящее время малые города являются основой территориально-поселенческой системы в большинстве регионов России, во многом формируя низовую сеть территориальной структуры хозяйства страны, что подтверждается анализом статистических данных.

Распределение городского населения соответствует экономико-географическим особенностям развития территории Восточной Сибири. Почти все важнейшие города и поселки городского типа расположены в местах развития промышленности, на основных транспортных магистралях. В значительной степени они тяготеют к Транссибирской железной дороге и ее ответвлениям.

Малые города составляют наибольший процент среди городов Восточной Сибири, но большая часть жителей проживает в крупных и средних городах (с населением 50–100 тыс. чел.), что свидетельствует о крайне неравномерной плотности населения в данном регионе.

Кроме этого, следует отметить, что 90 % малых городов Восточной Сибири расположены на расстоянии свыше 95 км от административных центров, в том числе 19 % – свыше 200, а 35 % удалены на более чем 500 км и только 10 % находятся в границах 100-километровой зоны (всего 6 городов).

В разные исторические периоды значение и функции малых городов менялись, шел процесс их дальнейшего развития или застоя. Конечно, в дореволюционный период малые города играли большую роль в развитии территории, так как являлись центрами административной, экономической и культурной жизни района, фабрично-заводской и кустарной промышленности. Именно в это время было образовано наибольшее количество малых городов Восточной Сибири (табл. 2).

Таблица 2 / Table 2

**Время образования городов в регионах Восточной Сибири
/ Time of formation of cities in the regions of Eastern Siberia**

Субъект Федерации	Количество городов, образовавшееся в дореволюционный период (до 1917 г.)	Количество городов, образовавшееся в советский период времени	Всего
Забайкальский край	8	0	8
Иркутская область	11	5	16
Красноярский край	10	5	15
Республика Бурятия	2	3	5
Республика Саха (Якутия)	6	5	11
Республика Тыва	3	1	4
Республика Хакасия	2	1	3
Всего	42	20	62

Такой бурный рост городских поселений Восточной Сибири, начиная с первой половины XVII в., объясняется изучением и освоением нового присоединенного региона, налаживанием торгово-экономических связей, развитием промышленности. Большое количество малых городов в Восточной Сибири появилось благодаря строительству Транссибирской железнодорожной магистрали, до её строительства появление населенных пунктов было связано с освоением новых месторождений полезных ископаемых. В результате этого в конце XIX – начале XX в. большая часть городов Восточной Сибири включилась в уже практически сложившуюся систему российского капитализма, что нашло отражение в росте промышленного производства.

В советский период, особенно послевоенный, индустриализация способствовала образованию новых малых городов, которые размещались, или, вернее сказать, строились, вокруг промышленных предприятий. Больше всего таких городов появилось в Красноярском крае, Иркутской области и Республике Саха – 75 % от всех малых городов, образовавшихся в советский период времени. Ведущая функция – промышленная, связанная с добычей и последующей переработкой сырья.

Переломный момент для развития малых городов начался после 1990-х гг. После распада СССР в России государственная власть уделяла мало внимания проблеме комплексного развития малых городов не только Восточной Сибири, но и всей России. Постепенно начинается трансформация структуры экономики малых городов, что приводит к изменению их градообразующих функций и, как следствие, упрощению хозяйственного комплекса. Проведенный функциональный анализ малых городов Восточной Сибири позволил выделить группы городов с разной экономической функцией (табл. 3). Обычно малый город в отличие от средних,

крупных и др. имеет одну или две преобладающие экономические функции: административную, промышленную, транспортную, агропромышленную, рекреационную, функцию обслуживания крупных городов.

Среди рассматриваемых 62 малых городов были выделены следующие ведущие экономические функции: промышленный центр (ПЦ), центр добывающей промышленности (ЦДП), административный центр (АЦ), транспортный узел (ТУ) и моногород (МГ) (табл. 3). Следует отметить, что поскольку многие города обладают сразу несколькими функциями, то учитывалась одна, являющаяся ведущей в экономике города.

Таблица 3 / Table 3

Классификация малых городов Восточной Сибири по экономической функции
/ Classification of small towns in Eastern Siberia by economic function

Показатель	Экономическая специализация				
	ПЦ	ЦДП	АЦ	ТУ	МГ
Количество малых городов	9	7	14	18	14
Рост населения	5	0	2	0	1

В Восточной Сибири 18 малых городов являются транспортными узлами, как правило, расположенными вблизи железной дороги. Они значительно удалены от административных центров (Усть-Кут удален от Иркутска на 961 км; Дудинка – на 1989 км от Красноярска; Ленск – на 840 км от Якутска). Во многих городах транспортная функция стала ведущей после потери промышленной в конце 1990-х гг. Смена или утрата промышленной функции привела к значительному расширению группы малых городов, где ведущей функцией стала административная (22 %). Отдельную группу составят города, сохранившие свою промышленную специализацию, и города – центры добывающей промышленности – 26 %. Последние, как правило, специализируются на добыче золота, алмазов, угля, железной руды, поваренной соли. В последнее десятилетие добавились еще добыча нефти или газа и их транспортировка. В промышленных центрах развиты цветная металлургия (производство алюминия и изделий из него), деревоперерабатывающая промышленность.

Восточная Сибирь – район, богатый различными ресурсами, что в свое время послужило причиной для образования городов – специализированных центров. В связи с добычей полезных ископаемых в Восточной Сибири некоторые города сформировались рядом с местами добычи. Это так называемые малые центры – моногорода, которые ориентированы на какую-либо одну отрасль экономики. К данной категории относится ¼ часть городов Восточной Сибири (Железногорск-Илимский, Саянск, Закаменск, Мирный, Саяногорск и др.).

С начала 90-х гг. XX в. малые города активно теряют население. На этот процесс оказывают влияние многие факторы – это общие экономические показатели развития региона, географическое положение, имеющаяся социальная и экономическая инфраструктура, человеческий капитал, а также административные полномочия территории. Под влиянием совокупности факторов в настоящее время во всех рассматриваемых городах разных субъектов отмечаются схожие демографические процессы.

Как уже говорилось ранее, малые города имеются в каждом экономическом районе и субъекте Российской Федерации, а в Восточной Сибири они составляют большую часть, хотя по численности проживающего городского населения уступают крупным. При анализе пространственной динамики малых городов рассматриваемых регионов в 1989 и 2021 гг. отмечается снижение численности населения при сохранении основного каркаса расселения (рис. 1). Однако при сохраняющейся демографической ситуации отмечается начавшийся процесс его «размывания», т.е. концентрация малых городов в непосредственной близости от административных центров, крупных городов при значительном уменьшении численности населения в отдаленных малых городах (северные территории). Некоторые населенные пункты имеют статус города, но в действительности не соответствуют основным критериям города. В них практически не представлена промышленная функция, а основной критерий – численность населения – не соответствует даже поселкам городского типа (Артемовск – 1492 чел., Игарка – 4089 чел., низкий уровень благоустройства жилья).

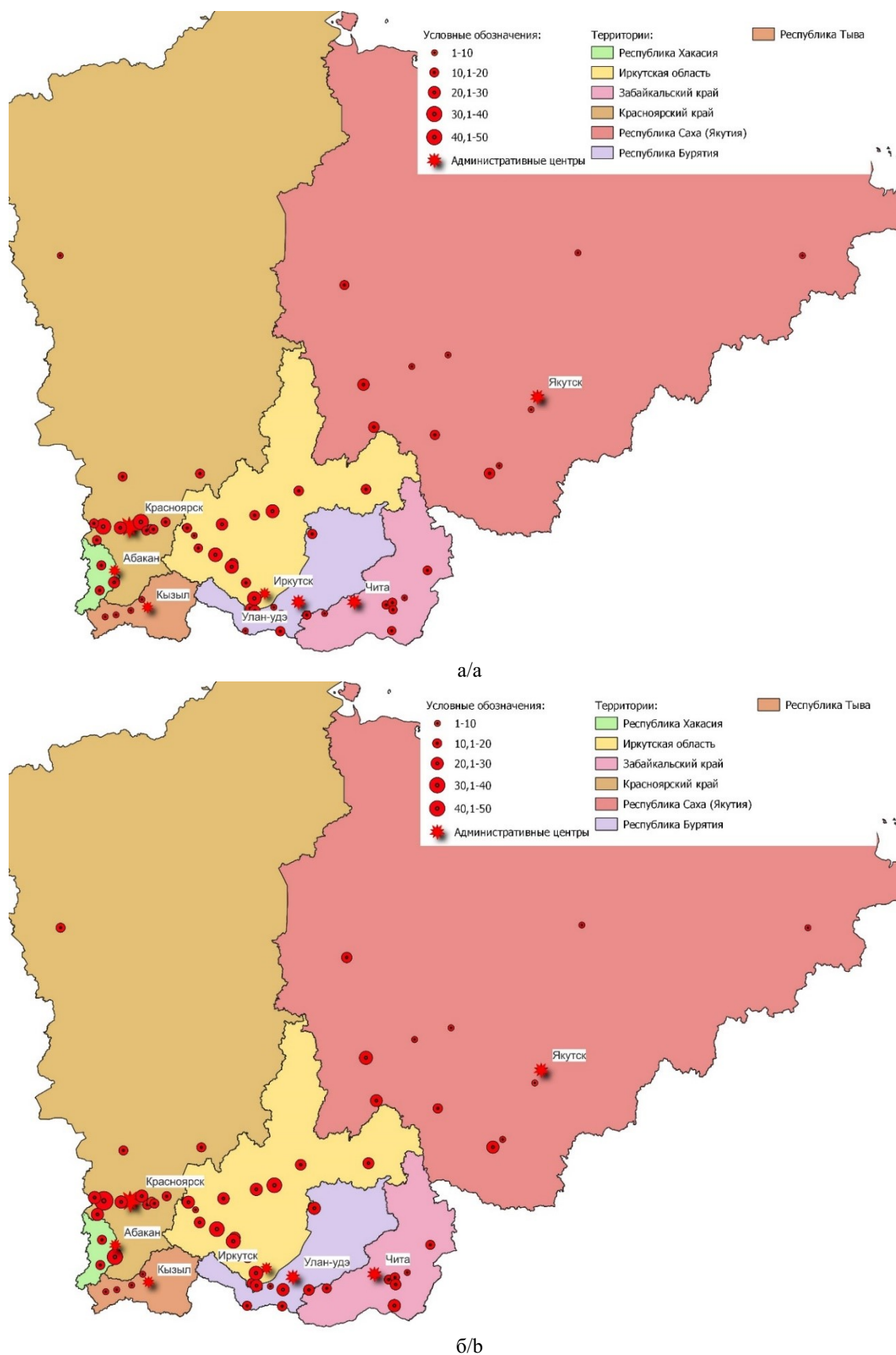


Рис. 1. Размещение малых городов на территории Восточной Сибири в 1989 (а) и 2021 (б) гг., тыс. чел.
/ Fig. 1. Location of small towns in Eastern Siberia in 1989 (a) and 2021 (b), thousand people

Анализ динамики численности населения малых городов в относительных величинах (рис. 2) позволил выделить четыре группы городов (табл. 4) с разной скоростью снижения численности населения.

Таблица 4 / Table 4

Группировка малых городов Восточной Сибири по изменению численности населения (1989–2021 гг.) / Grouping of small towns in Eastern Siberia by population change (1989-2021)

Группа городов	Рост / уменьшение численности населения, %	Количество городов, %	Количество городов по регионам
1. Группа городов, где отмечается рост численности населения		8 (12)	Республика Тыва – 2; Республика Саха – 2; Республика Бурятия – 1; Красноярский край – 2; Иркутская область – 1
2. Группа городов с незначительным снижением численности населения	От 0 до 10	6 (10)	Республика Хакасия – 1; Республика Саха – 1; Красноярский край – 2; Иркутская область – 2
3. Группа городов со значительным снижением численности населения	От 10,1 до 30	30 (48)	Республика Хакасия – 2; Республика Тыва – 2; Республика Саха – 6; Республика Бурятия – 3; Красноярский край – 6; Забайкальский край – 4; Иркутская область – 7
4. Группа городов, где отмечается стремительное снижение численности населения	Более 30	18 (29)	Республика Саха – 2; Республика Бурятия – 1; Красноярский край – 5; Забайкальский край – 4; Иркутская область – 6

Самой многочисленной является группа городов со значительным сокращением численности населения, к ней относятся 48 % (30 городов) всех малых городов рассматриваемого региона. Лидерами в этой группе являются Красноярский край и Иркутская область. На эти регионы в совокупности приходится 40 %. В группе, где отмечается стремительное снижение численности населения, лидерами также являются Иркутская область и Красноярский край (6 и 5 городов соответственно). Максимальное снижение численности населения отмечается в двух городах Красноярского края – Артемовске (в 3 раза) и Игарке (в 4,4 раза). Причины такого процесса различны. В Артемовске затухание города связано с остановкой работы золотодобывающего предприятия, в Игарке к проблемам, связанным с транспортной удаленностью, суровостью климата, сокращением промышленного производства, добавились еще и результаты проведенных административных реформ в 2005 г. До 2005 г. Игарка была городом краевого подчинения (Красноярского края), а затем вошла в состав Туруханского района Красноярского края. В результате реформы последовал вывод из подчинения у Игарской городской администрации бюджетных учреждений (образование, культура, полиция и др.) как результат усиление оттока населения. В Иркутской области это также северные города (Усть-Кут, Киренск, Бодайбо) или те, которые потеряли свою промышленную функцию (Алзамай, Бирюсинск и др.).

Таким образом, у 78 % малых городов Восточной Сибири отмечается снижение численности населения (рис. 3), и только у 13 – незначительный прирост. Первая группа, куда вошли города, где отмечается увеличение численности населения, – это населенные пункты, имеющие хорошо развитую промышленность, как правило, экспортно ориентированную (Шелехов, Вилюйск), выгодное географическое положение (Кяхта) или близость к городу-миллионеру (Сосновоборск).

Самая малочисленная группа городов, где отмечается значительное снижение численности населения, представлена 6 малыми городами (10 %): это моногорода (Саянск, Мирный, Саяногорск) или относительно крупные транспортные узлы (Слюдянка).

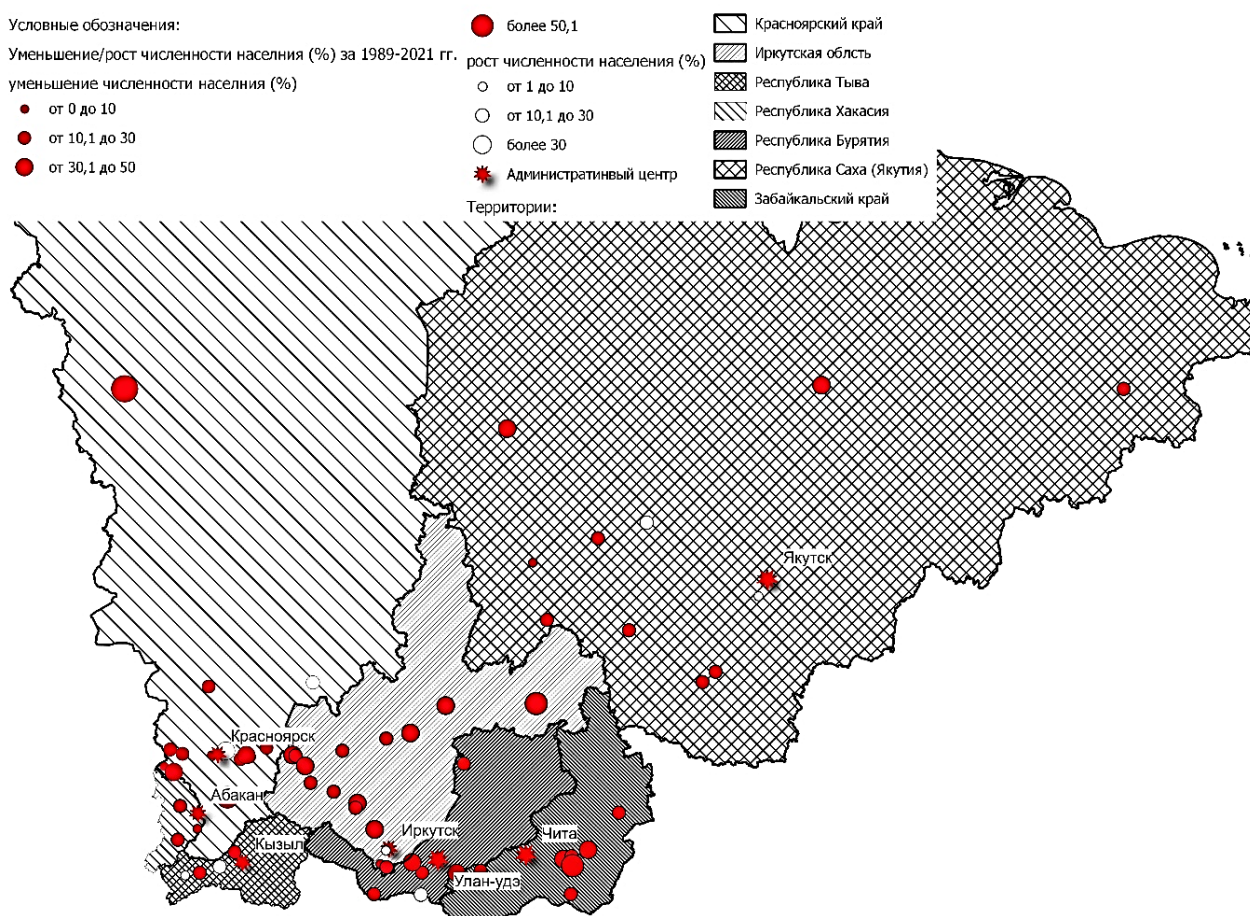


Рис. 2. Изменение численности населения малых городов Восточной Сибири за 1989–2021 гг., %
 / Fig. 2. Change in the population of small towns in Eastern Siberia for 1989–2021, %

Заключение

подавляющее большинство малых городов Восточной Сибири потеряло и продолжает терять население как по причине естественной убыли (превышение смертности над рождаемостью), так и в силу миграционных факторов. Происходит процесс оттока трудоспособного населения из малых городов в более крупные населенные пункты, что приводит к изменению квалификационной структуры рабочей силы. Наиболее динамично процессы снижения численности населения начались в период изменения экономической системы в 1990-е гг. под влиянием тенденций глобальной экономики. Последствия проводимых реформ наиболее сильно ощутили на себе именно малые города.

Проведенное исследование подтверждает, что в последние годы отмечается снижение численности населения в малых городах при их относительно стабильном количестве. Такая ситуация ведет к «вымыванию» некоторых малых городов из системы расселения Восточной Сибири. Также отмечается рост в структуре малых городов «сверх малых» (до 10 тыс. чел.), что также свидетельствует об истончении каркаса городского расселения рассматриваемого региона.

Список источников

1. Ковалев С.А. Типы поселений – районных центров СССР // Вопросы географии. 1962. Сб. 56. С. 54–72.
2. Анимица Е.Г., Медведева И.А., Сухих В.А. Малые и средние города: научно-теоретические аспекты исследования. Екатеринбург: Урал. гос. эконом. ун-т, 2003. 105 с.

3. Константинов О.А. О классификации городов в экономической географии // Вопросы географии. 1957. Сб. 41. С. 65–92.
4. Воробьев В.В. Города южной части Восточной Сибири (историко-географические очерки). Иркутск: Кн. изд-во, 1959. 147 с.
5. Флоринская Ю.В. Трудовая миграция из малых российских городов как способ выживания // Соц. исследования. 2006. № 6. С. 79–86.
6. Плюснин Ю.М., Заусаева Я.Д., Жидкевич Н.Н., Позаненко А.А. Отходники. М.: Новый хронограф, 2013. 264 с.
7. Ланно Г.М. География городов. М.: ВЛАДОС, 1997. 480 с.
8. Ланно Г.М. Города России: взгляд географа. М.: Новый хронограф, 2012. 504 с.
9. Оценка современных факторов развития городов и урбанизационных изменений в Сибири / Л.А. Безруков [и др.]; отв. ред.: Л. М. Коротыный, Н. В. Воробьев; Рос. акад. наук, Сиб. отд-ние, Ин-т географии им. В.Б. Сочавы. Новосибирск: Гео, 2011. 231 с.
10. Рыков П.В. Социально-демографическая трансформация городов Приангарья в условиях переходного периода. Иркутск: Изд-во Ин-та географии СО РАН, 2010. 113 с.
11. Воробьев Н.В. Миграция населения Сибири: постсоветские тенденции // География и природные ресурсы. 2019. № S5 (159). С. 172-177.
12. Воробьев Н.В., Воробьев А.Н., Ипполитова Н.А. Байкало-Монгольский транспортный коридор: взаимосвязь производства и населения // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2021. № 3 (211). С. 42–50.

References

1. Kovalev S.A. Types of settlements – district centers of the USSR. *Voprosy geografii = Questions of Geography*. 1962;(56):54-72. (In Russ.).
2. Animitsa E.G., Medvedeva I.A., Sukhikh V.A. *Small and medium-sized cities: scientific and theoretical aspects of research*. Yekaterinburg: Ural State University of Economics Press; 2003. 105 p. (In Russ.).
3. Konstantinov O.A. On the classification of cities in economic geography. *Voprosy geografii = Questions of Geography*. 1957;(41):65-92. (In Russ.).
4. Vorobyov V.V. *Cities of the southern part of Eastern Siberia (historical and geographical essays)*. Irkutsk: Book Publishing House; 1959. 147 p. (In Russ.).
5. Florinskaya Yu.V. Labor migration from small Russian cities as a way of survival. *Sots. issledovaniya = Sociological Studies*. 2006;(6):79-86. (In Russ.).
6. Plyusnin Yu.M., Zausaeva Ya.D., Zhidkevich N.N., Pozanenko A.A. *Seasonal workers*. Moscow: Novyi khronograf Publ.; 2013. 264 p. (In Russ.).
7. Lappo G.M. *Geography of cities*. Moscow: VLADOS Publ.; 1997. 480 p. (In Russ.).
8. Lappo G.M. *Cities of Russia: a geographer's view*. Moscow: Novyi khronograf Publ.; 2012. 504 p. (In Russ.).
9. Bezrukov L.A. [et al.]. *Assessment of modern factors of urban development and urbanization changes in Siberia*. Eds.: L. M. Korytny, N. V. Vorobyov; Russian Academy of Sciences, Siberian Branch, Institute of Geography named after V.B. Sochava. Novosibirsk: Geo Publ.; 2011. 231 p. (In Russ.).
10. Rykov P.V. *Socio-demographic transformation of the cities of the Angara region in the conditions of the transition period*. Irkutsk: Institute of Geography SB RAS Press; 2010. 113 p. (In Russ.).
11. Vorobyov N.V. Migration of the population of Siberia: post-Soviet trends. *Geography and natural resources*. 2021; (S5):172-177. (In Russ.).
12. Vorobyov N.V., Vorobyov A.N., Ippolitova N.A. Baikal-Mongolian transport corridor: the relationship between production and population // *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural science*. 2021;(3):42-50. (In Russ.).

Информация об авторе

Н.А. Ипполитова – кандидат географических наук, доцент, старший научный сотрудник лаборатории экономического и социальной географии.

Information about the author

N.A. Ippolitova - Candidate of Science (Geography), Associate Professor, Senior Researcher of Laboratory of Economic and Social Geography.

Статья поступила в редакцию 01.08.2022; одобрена после рецензирования 05.10.2022; принята к публикации 02.03.2023.
The article was submitted 01.08.2022; approved after reviewing 05.10.2022; accepted for publication 02.03.2023.

Научная статья
УДК 631.72.033
doi: 10.18522/1026-2237-2023-1-79-86

МОНИТОРИНГ СОСТОЯНИЯ ЗЕМЕЛЬ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ РОСТОВСКОЙ ОБЛАСТИ И ЭФФЕКТИВНОСТИ ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ

*Александр Александрович Калинин¹, Наталья Васильевна Пономаренко²,
Жанна Владимировна Матвейкина³*

^{1, 2, 3} Азово-Черноморский инженерный институт – филиал Донского государственного аграрного университета, Зерноград, Ростовская область, Россия

¹kalinin747@mail.ru

²ponomar.nata@mail.ru

³janna-matveikina@yandex.ru

Аннотация. Южный федеральный округ является важнейшим геополитическим, стратегическим, экономическим и аграрным регионом России. Юг нашей страны – центр производства сельскохозяйственной продукции. Именно здесь сосредоточены самые большие пригодные для возделывания и самые плодородные земли, на которых получают до четверти урожая зерновых культур и сахарной свеклы по стране, более 50 % подсолнечника и практически 100 % винограда. Выполнен анализ земельных ресурсов Ростовской области, рассмотрены особенности природно-сельскохозяйственного зонирования. Выявлены как позитивные, так и негативные тенденции в эффективности использования земельных ресурсов области.

Ключевые слова: мониторинг земель, сельскохозяйственные угодья, земельные ресурсы, зонирование, деградация земель, эффективное использование

Для цитирования: Калинин А.А., Пономаренко Н.В., Матвейкина Ж.В. Мониторинг состояния земель сельскохозяйственного назначения Ростовской области и эффективности их использования // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. 2023. № 1. С. 79–86.

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

Original article

MONITORING OF THE STATE OF AGRICULTURAL LANDS OF THE ROSTOV REGION AND THE EFFECTIVENESS OF THEIR USE

Alexander A. Kalinin¹, Natalia V. Ponomarenko², Zhanna V. Matveikina³

^{1, 2, 3} Azov-Black Sea Engineering Institute - Branch of the Don State Agrarian University, Zernograd, Rostov Region, Russia

¹kalinin747@mail.ru

²ponomar.nata@mail.ru

³janna-matveikina@yandex.ru

© Калинин А.А., Пономаренко Н.В., Матвейкина Ж.В., 2023

Abstract. The Southern Federal District is the most important geopolitical, strategic, economic and agricultural region of Russia. The south of our country is the center of agricultural production. It is here that the largest suitable for cultivation and the most fertile lands are concentrated, on which up to a quarter of the harvest of grain crops and sugar beet in the country, more than 50 % of sunflower and almost 100 % of grapes are obtained. The article analyzes the land resources of the Rostov region, considers the features of natural and agricultural zoning. Both positive and negative trends in the efficiency of the use of land resources of the region have been identified.

Keywords: land monitoring, agricultural lands, land resources, zoning, land degradation, efficient use

For citation: Kalinin A.A., Ponomarenko N.V., Matveikina Z.V. Monitoring of the State of Agricultural Lands of the Rostov Region and the Effectiveness of Their Use. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2023;(1):79-86. (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 2000 г. было создано семь федеральных округов Российской Федерации, которые представляют собой административно-территориальные единицы нового типа.

Ростовская область является частью Южного федерального округа вместе с Астраханской и Волгоградской областями, республиками Адыгея, Калмыкия и Крым, Краснодарским краем и городом федерального значения Севастополь [1, 2].

Основной задачей данного исследования является мониторинг состояния земель сельскохозяйственного назначения Ростовской области и эффективности их использования, а также определение позитивных и негативных тенденций в эффективности использования земельных ресурсов области.

Объекты и методы исследования

Ростовская область занимает вторую по величине площадь среди областей ЮФО (на первом месте – Волгоградская область). По показателям сельскохозяйственной освоенности и распаханности земель область занимает лидирующую позицию (табл. 1) [1, 3].

Таблица 1 / Table 1

Обеспеченность земельными ресурсами АПК России ЮФО по состоянию на 1 января 2022 г.*
/ Availability of land resources of the agro-industrial complex of Russia
in the Southern Federal District as of January 1, 2022

Регион РФ	Площадь пашни, млн га	Сельскохозяйственная освоенность территорий, %	Распаханность территорий, %	Распаханность сельскохозяйственных угодий, %	Приходится на одного жителя, га			
					с/х угодий	пашни	сенокосов	пастбищ
Российская Федерация	122,69	13,0	7,2	55,3	1,52	0,84	0,16	0,47
Южный ФО	18,52	75,3	41,4	54,9	2,05	1,13	0,05	0,85
Республика Адыгея	0,26	46,2	33,3	72,2	0,77	0,56	0,10	0,18
Республика Калмыкия	0,83	84,5	11,1	13,2	23,59	3,10	0,38	20,05
Краснодарский край	3,98	62,3	52,8	84,7	0,83	0,7	0,01	0,09
Астраханская область	0,35	61,5	6,7	10,8	3,29	0,36	0,41	2,50
Волгоградская область	5,86	77,6	51,9	66,8	3,57	2,39	0,08	1,08
Ростовская область	5,95	84,2	60,0	70,0	2,04	1,13	0,02	0,58
Республика Крым	1,27	68,8	48,8	70,9	0,68	0,49	0,0007	0,17
г. Севастополь	0,12	30,3	13,3	43,9	0,05	0,2	0,0009	0,008

* – по данным Росреестра и Росстата.

Анализируя данные, представленные в табл. 1, можно сделать вывод, что по сравнению с другими регионами в Ростовской области наблюдается высокая обеспеченность населения земельными ресурсами. Так, на каждого жителя в области приходится: сельскохозяйственных угодий 2,04 га, в том числе пашни – 1,13 га, пастбищ – 0,58 га, сенокосов – 0,02 га. Благодаря этим неоспоримым преимуществам перед другими регионами на первом месте в стране по производству зерновых в 2020 г. оказалась Ростовская область с урожаем более 12,6 млн т, что на 3 % больше, чем в 2019 г. Кроме того, область собрала на 354 тыс. т больше зерна, чем Краснодарский край [3–5].

По природно-сельскохозяйственному районированию земельного фонда России Ростовская область расположена в умеренном природно-сельскохозяйственном поясе в двух зонах:

- засушливой степной зоне Предкавказской и Южнорусской провинций с преобладанием обыкновенных и южных чернозёмов;
- засушливой сухостепной Манычско-Донской провинции с преобладанием темно-каштановых и каштановых почв.

Территория Ростовской области поделена на шесть сельскохозяйственных зон (табл. 2). Раздел производился с учетом физико-географического положения, почвенно-климатических условий, направленности и степени интенсивности сельскохозяйственного производства (рис. 1) [3–6].

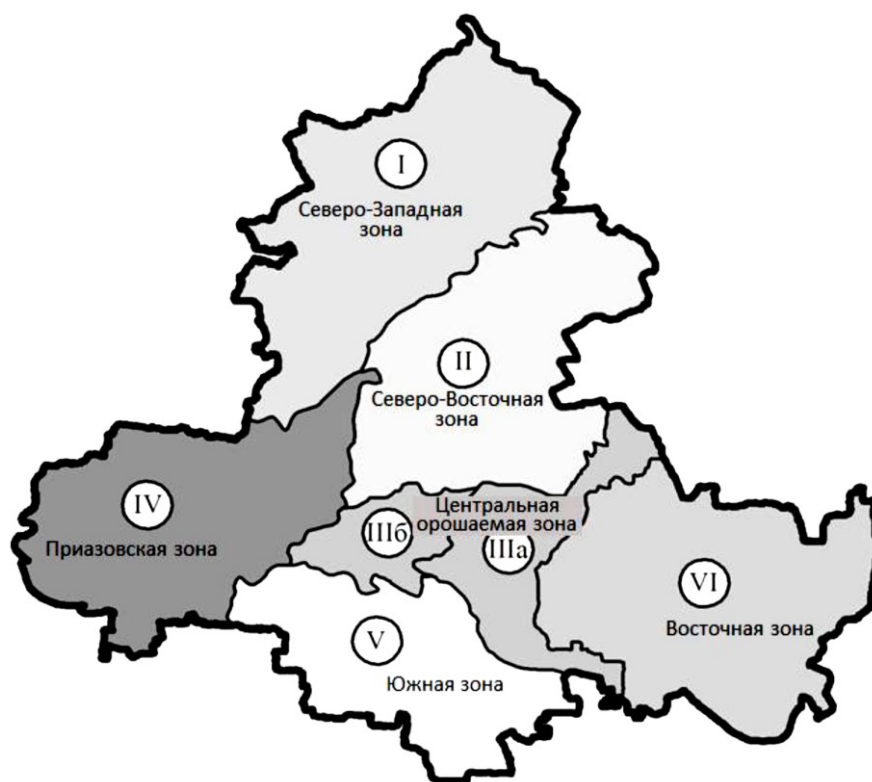


Рис. 1. Схема расположения природно-сельскохозяйственных зон Ростовской области
/ Fig. 1. Layout of natural and agricultural zones Rostov region

Агроклиматическое районирование Ростовской области проводится с целью ознакомления специалистов сельского хозяйства с особенностями среднемноголетних данных по основным климатическим показателям: суммы среднесуточной температуры, условия увлажнения территории, которые необходимы при подборе сортов и гибридов сельскохозяйственных культур, разработке севооборотов, планировании сроков обработки почвы, посева и уборки, других мероприятий.

Таблица 2 / Table 2

Сельскохозяйственные зоны Ростовской области / Agricultural zones of the Rostov region

Сельско-хозяйственная зона	Районы области
Северо-Западная	Верхнедонской, Шолоховский, Боковский, Чертковский, Миллеровский, Ка-шарский, Тарасовский, Каменский, Красносулинский
Северо-Восточная	Морозовский, Милютинский, Обливский, Тацинский, Константиновский, Белокалитвинский, Советский, Цимлянский, Усть-Донецкий
Центральная	Мартыновский, Пролетарский, Семикаракорский, Багаевский, Волгодонской и Весёловский
Приазовская	Матвеево-Курганский, Куйбышевский, Родионово-Несветайский, Неклинов-ский, Мясниковский, Октябрьский, Азовский, Аксайский
Южная	Кагальницкий, Зерноградский, Егорлыкский, Целинский, Сальский, Песчано-копский
Восточная	Орловский, Зимовниковский, Ремонтненский, Дубовский, Заветинский

Характеристика климатических условий по природно-сельскохозяйственным зонам Ростовской области приведена в табл. 3 [3, 7–9].

Таблица 3 / Table 3

Краткая характеристика климатических условий по природно-сельскохозяйственным зонам Ростовской области / Brief description of climatic conditions for natural and agricultural zones of the Rostov region

Показатель	Природно-сельскохозяйственная зона					
	Северо-Западная	Северо-Восточная	Центральная орошаемая	Приазов-ская	Южная	Восточная
Среднегодовая температура воздуха, °С	7,3–7,7	7,8	8,0–8,5	8,5	8,9	8,4–9,2
Сумма активных температур воздуха, °С	3100–3300	3187	3200–3400	3252	3304	3200–3400
Продолжительность безморозного периода, сут	160–175	165–180	160–180	175–180	185–200	175–185
Сумма осадков, мм: среднегодовая за вегетационный период	438	394	412	441	474	423
	273	246	251	270–300	290–300	180–235
Слой стока 10%-й обеспеченности, мм: в период снеготаяния в летний период	80–100	60	40	60	40	40
	6	6,2	5	7,5	5	–
Испаряемость за год, мм	820	790	960	840	912	976
Радиационный баланс, МДж /м ² в год	2682	2679	2654	2693	2685	2807

Плодородие земли может достигаться двумя способами: естественными природными процессами и искусственно при непосредственном участии человека. Хозяйственная деятельность человека оказывает на эти процессы непосредственное влияние. Необходимо знать, что естественное природное плодородие почв – это длительный процесс, что зачастую не устраивает современный уровень сельскохозяйственного производства. В настоящее время сельхозпроизводители владеют всеми необходимыми средствами и навыками по «ускорению» восстановления почвенного плодородия.

Для Ростовской области характерен высокий уровень плодородия почв, наиболее высокий балл бонитета наблюдается в южной (62) и приазовской (67) природно-сельскохозяйственных зонах (табл. 4) [3–5].

Таблица 4 / Table 4

**Почвенно-экологические параметры природно-сельскохозяйственных зон Ростовской области /
Soil and ecological parameters of natural and agricultural zones of the Rostov region**

Природно-сельскохозяйственная зона	Преобладающий тип почвы, индексы	К _у	БКП	ПЭИ	КЭСЛ	Б	Цб
Северо-Западная	Ч _ю	0,52	3,16	43,6	0,58	54	48,7
Северо-Восточная	Ч _ю , К _з	0,49	3,24	40,5	0,53	49	54,7
Приазовская	Ч _о ^к	0,52	3,46	49,7	0,38	62	59,3
Центральная орошаемая	Ч _ю , Ч _о	0,43	3,12	41,0	0,68	53	64,3
Южная	Ч _о ^к	0,42	3,57	55,2	0,20	67	61,2
Восточная	К ₂ , К ₁ , С _н	0,39	2,96	29,5	0,82	32	76,8

Примечание. К_у – годовой коэффициент увлажнения; БКП – биоклиматический потенциал территории; ПЭИ – почвенно-экологический индекс; КЭСЛ – коэффициент экологической стабильности ландшафта; Б – бонитет почвы; Цб – цена балла бонитета, кг; Ч_ю – черноземы южные; Ч_о – черноземы обыкновенные; Ч_о^к – черноземы обыкновенные карбонатные; К_з – темно-каштановые почвы; К₂ – каштановые; К₁ – светло-каштановые почвы; С_н – солонцы.

Результаты и их обсуждение

После распада СССР сельское хозяйство Российской Федерации претерпело ряд изменений, вызванных сменой системы управления, а именно переходом от плановой к рыночной экономике. В результате проведенных реформ в структуре земельного фонда Ростовской области, как и во многих других регионах страны, произошли изменения. В начале 90-х гг. XX столетия огромные посевные площади были попросту брошены, что привело к ухудшению их почвенного покрова и снижению плодородия. В табл. 4 представлена информация об изменениях в структуре земель сельскохозяйственного назначения в период 2010–2020 гг.

За последние десять лет (2010–2020 гг.) наблюдается увеличение площади земель сельскохозяйственного назначения на 47,1 тыс. га. Значительно увеличилась площадь пашни, так за десять лет прирост составил 94,2 тыс. га. Заметно уменьшились пастбища – на 47,6 тыс. га. Наблюдается незначительный рост лесных насаждений (2,5 тыс. га) и уменьшение площади восстанавливаемых земель на 3,6 тыс. га [6–9] (табл. 5).

Таблица 5 / Table 5

Динамика изменения структуры земель сельскохозяйственного назначения за период 2010–2020 гг., тыс. га / Dynamics of changes in the structure of agricultural land for the period 2010-2020, thousand hectares

Угодья	Год			Изменения за отчетный период
	2010	2015	2020	
Общая площадь земель сельскохозяйственного назначения	8816,0	8833,9	8863,1	+47,1
Сельскохозяйственные угодья	8163,7	8178,4	8208,9	+45,2
пашня	5726,4	5740,2	5820,6	+94,2
многолетние насаждения	33,9	34,4	34,0	+0,1
сенокосы	76,8	76,5	75,3	–1,5
пастбища	2326,6	2327,3	2279,0	–47,6
В стадии мелиоративного строительства (сельхозугодья) и восстановления плодородия	19,2	17,1	15,6	–3,6
Лесные площади	17,0	16,7	16,8	–0,2
Лесные насаждения, не входящие в лесной фонд	238,2	240,1	240,7	+2,5
Под водой	106,7	107,7	107,7	+1,0
Земли застройки	47,0	46,8	46,4	–0,6
Под дорогами	105,6	106,6	106,5	–0,1
Болота	32,1	33,1	33,1	0,0
Нарушенные земли	1,1	1,1	1,1	0,0
Прочие земли	85,4	86,3	86,3	+0,9

На увеличение урожая с сохранением текущего плодородия почв в значительной степени влияет правильный севооборот. В табл. 6 представлены статистические данные о структуре посевных площадей Ростовской области за период с 2010 по 2020 г. [8, 9].

Таблица 6 / Table 6

**Динамика структуры посевных площадей Ростовской области
/ Dynamics of the structure of sown areas of the Rostov region**

Сельскохозяйственные культуры	2009	В среднем за один год		2020
		2010–2014	2015–2019	
Посевные площади в хозяйствах всех категорий, тыс. га				
Вся посевная площадь	4499,4	4462,9	4574,1	4748,0
Зерновые и зернобобовые культуры	2925,4	3014,6	3413,0	3639,5
в т.ч. озимые	2137,3	2089,2	2542,2	2955,2
Технические культуры	1220,5	998,3	899,2	884,6
в т.ч. подсолнечник	1146,0	721,5	659,3	760,3
соя	7,2	17,2	8,3	6,7
Картофель	36,9	35,4	20,4	16,7
Овощи	37,3	36,7	27,9	24,5
Кормовые культуры	264,8	245,3	205,8	177,6
Структура посевных площадей в хозяйствах всех категорий, %				
Вся посевная площадь	100,0	100,0	100,0	100,0
Зерновые и зернобобовые культуры	65,0	67,5	74,6	76,7
в т.ч. озимые	47,5	46,8	55,5	62,2
Технические культуры	27,1	22,4	19,6	18,6
в т.ч. подсолнечник	25,5	16,2	14,4	16,0
соя	0,1	0,4	0,1	0,1
Картофель	0,8	0,8	0,4	0,4
Овощи	0,8	0,8	0,6	0,5
Кормовые культуры	5,9	5,5	4,4	3,7

Реформы, проводимые в сфере сельского хозяйства, оказали влияние на изменение структуры посевных площадей. За десять лет произошло увеличение посевных площадей на 249 тыс. га. Площади посева зерновых культур также увеличились с 2925,4 тыс. га в 2009 г. до 3639,5 тыс. га в 2020 г., а их доля в структуре посевных площадей области достигла 76,7 %. Произошло снижение площади посева технических культур на 27,5 %. Наблюдается снижение площади посева картофеля на 30,2 тыс. га, овощей – на 12,5 тыс. га и кормовых культур – с 264,8 а до 177,6 тыс. га [3, 8, 9].

За последние 10 лет региональным сельскохозяйственным товаропроизводителям удалось существенно повысить урожайность основных видов сельскохозяйственных культур, выращиваемых в области (рис. 2).

Согласно официальным данным Ростовстата, за последние десять лет удалось поднять урожайность зерновых культур на 40 %, подсолнечника – на 90, картофеля – в 2,5 раза, а овощей – на 67,5 %.

Рекордным для области по сбору зерновых культур стал 2020 г. Донскими сельскими тружениками намолочено 12,6 млн т зерновых культур, что превышает показатели предыдущего года на 3 %. Основной зерновой культурой, выращиваемой в области, является пшеница. Доля её составляет 84,5 % от общего вала зерновых культур, или 10,7 млн т, что на 5,6 % больше, чем в 2019 г.

По итогам 2020 г. Ростовстат в статистическом ежегоднике приводит основные цифры по урожаю. Так, урожайность зерновых культур составила 34,5 ц/га, что на 1,2 % выше прошлогоднего результата, а пшеницы в целом по области составила 36,5 ц/га [8].

Низкие запасы влаги весной и осенью, а также высокая температура воздуха в период цветения стали причиной низкой урожайности технических культур, так, урожайность подсолнечника снизилась по сравнению с 2019 г. на 23,6 % и составила 18,8 ц/га. От засушливого лета 2020 г. пострадал урожай овощных культур и картофеля: хозяйствами всех категорий за 2020 г в целом по региону собрано 549,4 тыс. т овощей открытого и закрытого грунта, или на 4,4 % меньше, чем в 2019 г.

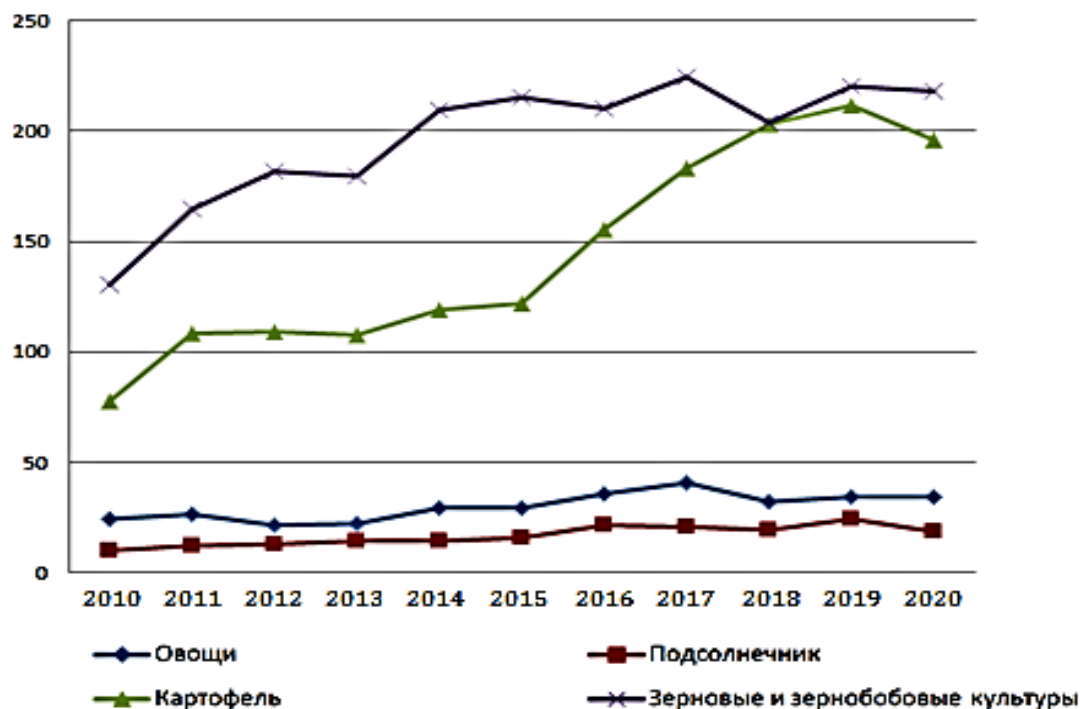


Рис. 2. Урожайность основных видов сельскохозяйственных культур в хозяйствах всех категорий Ростовской области, ц/га / Fig. 2. Yield of the main types of agricultural crops in farms of all categories of the Rostov region, kg/ha

Выводы

Анализ земель сельскохозяйственного назначения Ростовской области позволил определить позитивные и негативные тенденции в эффективности использования земельных ресурсов.

Позитивные:

- 1) повышение уровня урожайности сельскохозяйственных культур за счет использования районированных сортов зерновых культур, гибридных сортов масличных культур, применения современных пестицидов и гербицидов для защиты растений от вредителей и болезней, повышения дозы вносимых удобрений, использования современных технологий возделывания земли;
- 2) снижение уровня деградированных земель, увеличение интенсивности их использования наряду с ненарушенными землями;
- 3) повышение эффективности использования сельскохозяйственных земель и др.

Негативные:

- 1) в связи с возросшими требованиями к объему получаемой сельскохозяйственной продукции неизбежен рост техногенной и антропогенной нагрузки на землю;
- 2) некоторые землепользователи не желают использовать современные способы обработки земли, соблюдать правильный севооборот и др.

Список источников

1. Географическое положение Ростовской области: характеристика и особенности. URL: <https://fb.ru/article/256916/geograficheskoe-polojenie-rostovskoy-oblasti-harakteristika-i-osobennosti> (дата обращения: 25.08.2022).
2. Конституция Российской Федерации (принята всенародным голосованием 12.12.1993) (с учетом поправок, внесенных Законами РФ о поправках к Конституции РФ от 30.12.2008 № 6-ФКЗ, от 30.12.2008 № 7-ФКЗ, от 05.02.2014 № 2-ФКЗ, от 21.07.2014 № 11-ФКЗ) // СПС «КонсультантПлюс». URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_28399/ (дата обращения: 20.07.2022).
3. Зональные системы земледелия Ростовской области (на период 2013–2020 гг.): в 3 ч. Ч. 1 / Министерство сельского хозяйства и продовольствия Ростовской области. 2012. Ростов н/Д., 2012. URL:

http://don-agro.ru/FILES/2020/ZONSYSEM/Sistema_zemled_do_2020_1.docx (дата обращения: 23.08.2022).

4. Доклад о состоянии и использовании земель в Ростовской области в 2020 году. Ростов н/Д., 2021. 54 с.
5. Доклад о состоянии и использовании земель в Ростовской области в 2011 году. Ростов н/Д., 2012. 72 с.
6. Калинин А.А., Пономаренко Н.В. Анализ состояния и использование земельного фонда Ростовской области // Астраханский вестн. экол. образования. 2022. № 4. С. 89–97.
7. Калинин А.А. Состояние и использование земельного фонда Республики Калмыкия // Землеустройство, кадастр и мониторинг земель. 2022. № 3. С. 203–208.
8. Ростовская область в цифрах 2020: стат. сб. / Ростовстат. Ростов н/Д., 2020. 729 с.
9. Ростовская область в цифрах 2016: стат. сб. / Ростовстат. Ростов н/Д., 2017. 760 с.

References

1. *Geographical location of the Rostov region: characteristics and features*. Available from: <https://fb.ru/article/256916/geograficheskoe-polojenie-rostovskoy-oblasti-harakteristika-i-osobennosti> [Accessed 25th August 2022]. (In Russ.).
2. Constitution of the Russian Federation (adopted by popular vote on 12.12.1993) (subject to amendments made by the Laws of the Russian Federation on Amendments to the Constitution of the Russian Federation from December 30, 2008 No. 6-FKZ, from December 30, 2008 No. 7-FKZ, from February 5, 2014 No. 2-FKZ, from July 21, 2014 No. 11-FKZ). *SPS ConsultantPlus*. Available from: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_28399/ [Accessed 20th July 2022]. (In Russ.).
3. *Zonal systems of agriculture of the Rostov region (for the period 2013-2020)*: in 3 parts. Part 1. Ministry of Agriculture and Food of the Rostov region. 2012. Rostov-on-Don, 2012. Available from: http://don-agro.ru/FILES/2020/ZONSYSEM/Sistema_zemled_do_2020_1.docx [Accessed 23rd August 2022]. (In Russ.).
4. *Report on the state and use of land in the Rostov region in 2020*. Rostov-on-Don, 2021. 54 p. (In Russ.).
5. *Report on the state and use of land in the Rostov region in 2011*. Rostov-on-Don, 2012. 72 p. (In Russ.).
6. Kalinin A. A., Ponomarenko N.V. Analysis of the state and use of the land fund of the Rostov region. *Astrakhanskii vestn. ekol. obrazovaniya = Astrakhan Bulletin of Ecological Education*. 2022;(4):89-97. (In Russ.).
7. Kalinin A.A. State and use of the land fund of the Republic of Kalmykia. *Zemleustroistvo, kadastr i monitoring zemel' = Land Management, Monitoring and Cadastre*. 2022;(3):203-208. (In Russ.).
8. *Rostov region in figures 2020*: statistical collection. Rostovstat. Rostov-on-Don, 2020. 729 p. (In Russ.).
9. *Rostov region in numbers 2016*: statistical collection. Rostovstat. Rostov-on-Don, 2017. 760 p. (In Russ.).

Информация об авторах

А.А. Калинин – кандидат технических наук, доцент.
Н.В. Пономаренко – кандидат технических наук, доцент.
Ж.В. Матвейкина – кандидат технических наук, доцент.

Information about the authors

A.A. Kalinin - Candidate of Science (Technical Science), Associate Professor.
N.V. Ponomarenko - Candidate of Science (Technical Science), Associate Professor.
Zh.V. Matveikina - Candidate of Science (Technical Science), Associate Professor.

Статья поступила в редакцию 06.09.2022; одобрена после рецензирования 05.10.2022; принята к публикации 02.03.2023.
The article was submitted 06.09.2022; approved after reviewing 05.10.2022; accepted for publication 02.03.2023.

Научная статья

УДК 502.58

doi: 10.18522/1026-2237-2023-1-87-100

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ МАГНИТНЫХ И ГРАВИТАЦИОННЫХ АНОМАЛИЙ НА ФОРМИРОВАНИЕ ГРОЗОВЫХ ПОЖАРОВ НА ТЕРРИТОРИИ РЕСПУБЛИКИ АЛТАЙ

Андрей Владимирович Каранин^{1✉}, Марина Юрьевна Беликова²

^{1, 2}Горно-Алтайский государственный университет, Горно-Алтайск, Республика Алтай, Россия

¹vedmedk@bk.ru✉

²belikovamy@yandex.ru

Аннотация. Цель работы – оценка связи между молниевыми разрядами и пожарами от гроз с интенсивностью гравитационных и магнитных аномалий на территории Республики Алтай. Информационной базой исследования послужили данные о молниевых разрядах и грозовых пожарах, зарегистрированных в 2016–2020 гг.

Обнаружена положительная корреляционная связь между плотностью молниевых разрядов и значениями магнитных аномалий ($r_s = 0,62$, $p < 0,01$). Выявлено, что основной диапазон грозовых пожаров (98 %) располагается в интервале от $-191,5$ до $243,5$ нТл, однако достоверной корреляционной связи пожаров со значениями магнитного поля не отмечено.

Установлено, что риск возникновения грозового пожара, определяемый как количество молниевых разрядов на один пожар (где большее количество разрядов на пожар соответствует меньшему риску), возрастает при увеличении значений магнитных аномалий, что подтверждается отрицательной корреляционной связью ($r_s = -0,72$, $p < 0,01$).

По гравитационным аномалиям получены значимые отрицательные коэффициенты корреляции в отношении плотностей молниевых разрядов ($r_s = -0,57$, $p < 0,02$) и пожаров от гроз ($r_s = -0,72$, $p < 0,01$). Таким образом, для рассматриваемой территории можно говорить о тяготении гроз и природных пожаров к отрицательным гравитационным аномалиям.

Работа выполнялась на основе данных регистрации молниевой активности WWLLN и данных о пожарах, представленных Министерством природных ресурсов, экологии и туризма Республики Алтай и Алтайским государственным природным биосферным заповедником.

Ключевые слова: природный пожар, молния, магнитные аномалии, гравитационные аномалии, WWLLN, Республика Алтай, плотность молниевых разрядов, плотность грозовых пожаров

Благодарности: авторы работы признательны Министерству природных ресурсов, экологии и туризма Республики Алтай и сотрудникам Алтайского государственного природного биосферного заповедника за предоставленные сведения и сотрудничество.

Кроме того, авторы благодарны коллаборации Всемирной сети регистрации молниевых разрядов (World Wide Lightning Location Network (<http://wwlln.net>)) за предоставление данных, использованных в работе.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Республики Алтай в рамках научного проекта № 20-45-040012.

Для цитирования: Каранин А.В., Беликова М.Ю. Оценка влияния магнитных и гравитационных аномалий на формирование грозовых пожаров на территории Республики Алтай // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. 2023. № 1. С. 88–101.

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

Original article

ASSESSMENT OF THE MAGNETIC AND GRAVITATIONAL ANOMALIES INFLUENCE ON THUNDERSTORM FIRES FORMATION ON THE ALTAI REPUBLIC TERRITORY

Andrey V. Karanin^{1✉}, **Marina Yu. Belikova**²

^{1, 2}Gorno-Altai State University, Gorno-Altai, Altai Republic, Russia

¹vedmedk@bk.ru✉

²belikovamy@yandex.ru

Abstract. The purpose of this paper is to assess the influence of gravitational and magnetic anomalies on density of lightning discharges and thunderstorm fires on the territory of the Altai Republic. The information base was represented by data on lightning discharges and thunderstorm fires registered in 2016-2020.

A positive correlation between the density of lightning discharges and the values of magnetic anomalies was revealed ($r_s = 0.62$, $p < 0.01$). The main range of thunderstorm fires (98 %) is in the interval from -191.5 to 243.5 nanotesla, however, there was no significant correlation between fires and magnetic field values.

It was found that the risk of a thunderstorm fire, defined as the ratio of the lightning discharges number per fire (where a greater number of discharges per fire corresponds to a lower risk), shows an increase in the values of magnetic anomalies, which is confirmed by a negative correlation ($r_s = -0.72$, $p < 0.01$).

Significant negative correlation coefficients were obtained for the lightning discharges densities and gravitational anomalies ($r_s = -0.57$, $p < 0.02$), the thunderstorm fires densities and gravitational anomalies ($r_s = -0.72$, $p < 0.01$). Thus, for the Altai Republic territory, thunderstorms and natural fires tend towards negative gravity anomalies.

The work was performed on the basis of WWLLN lightning activity registration data and fire data provided by the Ministry of Natural Resources, Ecology and Tourism of the Altai Republic and the Altai State Natural Biosphere Reserve.

Keywords: natural fire, lightning, magnetic anomalies, gravitational anomalies, WWLLN, Altai Republic, density of lightning discharges, density of thunderstorm fires

Acknowledgments: the authors are grateful to the Ministry of Natural Resources, Ecology and Tourism of the Republic of Altai and the staff of the Altai State Natural Biosphere Reserve for the provided information and cooperation.

In addition, the authors are grateful to the World Wide Lightning Location Network (<http://wwlln.net>) collaboration for providing the data used in the work.

The study was financially supported by the Russian Foundation for Basic Research and the Republic of Altai within the framework of scientific project No. 20-45-040012.

For citation: Karanin A.V., Belikova M.Yu. Assessment of the Magnetic and Gravitational Anomalies Influence on Thunderstorm Fires Formation on the Altai Republic Territory. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2023;(1):88-101. (In Russ.).

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

Введение

Одной из существенных угроз для лесных, лесостепных и степных природных комплексов являются пожары. Воздействие этих катастрофических явлений на биосферу не ограничивается пирогенной деградацией растительности в пределах ареалов гарей. Во время горения происходит выброс существенного количества углекислого газа [1], в атмосферу поступают токсичные газы и аэрозоли [2]. Дым, состоящий из множества мелких частиц, влияет на поглощение солнечной радиации, что приводит к изменению локального температурно-влажностного

режима [3]. Особенно опасными в плане последствий являются природные пожары, которые происходят в труднодоступной местности. Вследствие своей удаленности они не всегда могут быть вовремя локализованы и нередко охватывают значительные площади.

Основными природными инициаторами возгорания растительности являются грозы. Пространственное распределение гроз носит неоднородный характер и зависит от множества факторов: конвективных явлений в атмосфере, наличия аэрозолей, условий увлажнения, иных особенностей подстилающей поверхности и воздуха. Отдельный интерес среди этого многообразия факторов представляют геофизические (гравитационные и магнитные аномалии), которые могут выступать аттракторами наземных молниевых разрядов и способствовать формированию участков повышенной пожарной опасности.

Влияние гравитационных характеристик территории на динамику атмосферы и образование гроз изучалось в работах [4–6]. Очаги молниевых разрядов тяготеют к областям с отрицательными гравитационными аномалиями. Как исключение отмечен грозовой очаг в районе Индонезии и Филиппин, располагающийся над положительной аномалией [6]. Причина подобной закономерности – повышенная конвекция воздуха над отрицательными гравитационными аномалиями, что способствует образованию грозовых облаков [7].

Помимо прочего, такие аномалии могут являться индикатором содержания почвенной влаги. Их отрицательные значения указывают на недостаточное содержание влаги и повышенную вероятность водяного стресса растений [8]. Понижение транспирации в результате водяного стресса влечёт за собой снижение количества водяного пара в атмосфере, возрастает аридность, риск пожаров увеличивается [9].

Удары молний могут воздействовать на намагниченность некоторых видов горных пород [10–12], в то же время повышенная намагниченность может способствовать притяжению молниевых разрядов [13]. Некоторые авторы [14, 15] отмечают активизацию гроз у магнитных аномалий и в зонах геологических разломов, наряду с этим имеются свидетельства отсутствия такой связи над отдельными аномалиями [16].

Рядом исследователей [17–19] установлена связь между магнитными аномалиями и частотой повторяемости пожаров. При этом указывается, что основной причиной возгораний является повышенная плотность молниевых разрядов, которые тяготеют к зонам высоких градиентов геомагнитного поля и месторождениям железных руд.

В работе [20] установлено, что число лесных пожаров на единицу площади возрастает с увеличением интенсивности магнитных аномалий.

Таким образом, несмотря на существование общих закономерностей, специфика воздействия геофизических факторов на формирование гроз и природных пожаров определяется особенностями конкретной территории. Отдельный интерес представляют горные регионы, отличающиеся относительно резкими вариациями гравитационных и магнитных аномалий. Республика Алтай является одним из таких регионов. Она характеризуется пересеченным рельефом и мозаичностью природных условий. Особенную актуальность проведению исследования в этом районе придаёт высокая доля пожаров от гроз в общем числе пожаров, что объясняется низкой плотностью населения и слабой хозяйственной освоённостью региона. Для территории республики исследование проводится впервые.

Материалы и методы исследования

Основной целью исследования является оценка связи между молниевыми разрядами и пожарами от гроз и интенсивностью гравитационных и магнитных аномалий на территории Республики Алтай.

Для достижения цели выполнены следующие задачи: подготовка и обработка данных о распределении молниевых разрядов, пожаров, гравитационных и магнитных аномалий на территории исследования; оценка приуроченности молниевых разрядов и пожаров к гравитационным и магнитным аномалиям; оценка риска возникновения лесного пожара от молнии в зависимости от геофизических условий.

Временной интервал выборки данных о пожарах и молниевых разрядах составил пять лет – с 2016 по 2020 г. включительно, в период с мая по октябрь.

Республика Алтай расположена в центре Евразии, на юге Западной Сибири, граничит с Китаем, Монголией и Казахстаном. Рельеф республики меняется от низкогорного на севере до высокогорного на юге и отличается высокой пересеченностью. Существенные перепады высот и изолированность отдельных участков создают условия для дифференциации погодного режима, высотной поясности и формирования мозаичных природных комплексов.

В южной части региона существует несколько межгорных котловин, характеризующихся ландшафтами степного и полупустынного типа. Отдельные реки выработали узкие долины, ограниченные по краям горными хребтами. Залесенная местность составляет около 44 % от общей площади республики [21] и постепенно снижается от севера к югу.

Регион отличается низкой плотностью населения (2,4 человека на 1 км²) и слабой хозяйственной освоенностью. Основными отраслями экономики являются сельское хозяйство и туристско-рекреационный сектор.

В качестве модели аномалий гравитационного потенциала использовалась глобальная модель квазигеоида EIGEN-6C4 [22], рассчитанная на основе альтиметрических, наземных (в том числе морских и атмосферных) и космических измерений (спутники: Goco, Grace, Lageos). Указанная модель является одной из наиболее детальных на текущий момент времени. EIGEN-6C4 представлена на сайте Немецкого научно-исследовательского центра наук о Земле (ICGEM; http://icgem.gfz-potsdam.de/tom_longtime) в виде гармонических коэффициентов геопотенциала. Ресурс позволяет произвести расчет грида гравитационных аномалий в формате географических данных (.gdf). Нами использовался грид разрешением 0,1 углового градуса.

Магнитные аномалии учитывались на основе грид-данных EMAG2. Этот блок данных представляет собой глобальную карту магнитных аномалий, составленную на основе компиляции наземных измерений, магнитометрических съемок с летательных аппаратов (воздушные и космические) и кораблей [23]. Пространственное разрешение грида составляет 2 угловые минуты. EMAG2 получен с сайта Национального центра экологической информации США (https://data.noaa.gov/metaview/page?xml=NOAA/NESDIS/NGDC/MGG/Geophysical_Models/iso/xml/EMAG2.xml&view=getDataView&header=none#Documentation). Подготовленные к обработке данные по магнитным и гравитационным аномалиям представлены на рис. 1.

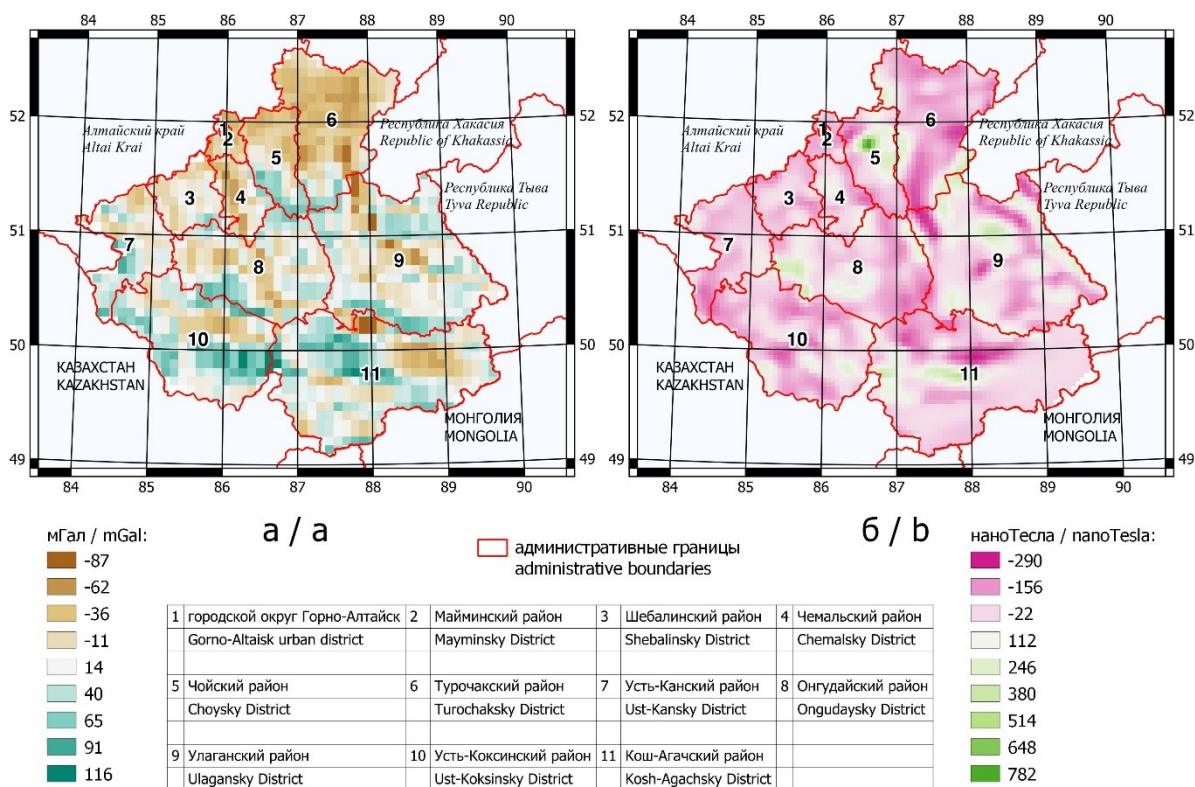


Рис. 1. Гравитационные (а) и магнитные (б) аномалии на территории Республики Алтай / Fig. 1. Gravitational (a) and magnetic (b) anomalies on the Altai Republic territory

Источником информации о молниевых разрядах послужили сведения, предоставленные Всемирной сетью локализации молниевых разрядов (World Wide Lightning Location Network), коллаборацией, состоящей из нескольких десятков учреждений, расположенных в разных странах мира [24]. WWLLN фиксирует около 15 % молний от их общего числа, при этом эффективность регистрации существенно увеличивается для разрядов с высокой силой тока [25]. Несмотря на относительно небольшую долю учитываемых вспышек, их количество велико и составляет на территорию Республики Алтай свыше 10 000 в год. Суммарно с 2016 по 2020 г., в период с мая по октябрь, зафиксировано 84 272 разряда, основное число которых (62 891) приходится на первые два летних месяца. Отметим, что информация о молниевых разрядах, регистрируемая WWLLN, является единственным источником инструментальных данных о молниевой активности для территории Республики Алтай.

Данные о пожарах предоставлены Министерством природных ресурсов, экологии и туризма Республики Алтай, а также Алтайским государственным природным биосферным заповедником. Используемый для исследования размер выборки составил 102 грозовых пожара, случившихся с 2016 по 2020 г., в период с мая по октябрь.

Среднегодовая плотность молниевых разрядов за исследуемый период и локации пожаров представлены на рис. 2.

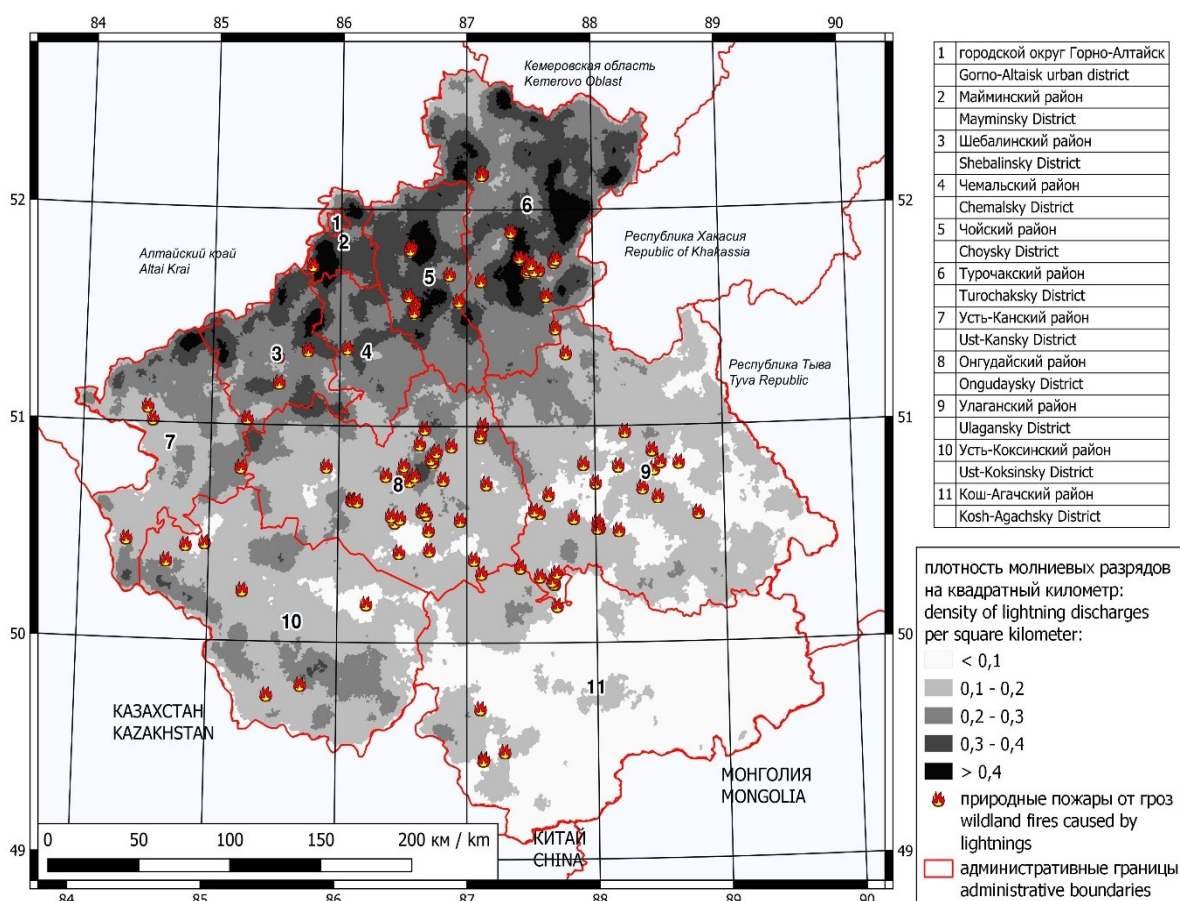


Рис. 2. Среднегодовая плотность молниевых разрядов с 2016 по 2020 г. и природные пожары от гроз на территории Республики Алтай / Fig. 2. Altai Republic flash density map average for five-year period from 2016 to 2020 and wildland fires caused by lightnings

Выбор данных о молниевых разрядах, гравитационных и магнитных аномалиях выполнялся в QGIS [26] по маске изучаемого региона. Сбор информации о величинах геофизических характеристик в локациях пожаров и молниевых разрядов осуществлялся оверлеем соответствующих слоев с построением запроса к значениям исследуемых категорий посредством модуля r.what (<https://grass.osgeo.org/grass78/manuals/r.what.html>) геоинформационной системы GRASS [27].

Для сопоставления значений данные по геофизическим аномалиям были сгруппированы в 20 интервалов. Группировка проводилась на основе разбиения промежутка между минимальными и максимальными значениями аномалий по территории республики на равные интервалы.

Оценка приуроченности молниевых разрядов и пожаров к геофизическим аномалиям местности производилась на основе ранговых коэффициентов корреляции Спирмена [28]. Для статистических вычислений использовался пакет R Commander, разработанный J. Fox [29] для среды вычислений R [30].

Полученные результаты и их обсуждение

В целом на территории Республики Алтай отклонения магнитных полей составляют от $-290,2$ до $781,7$ нТл, гравитационных полей – от $-87,3 \cdot 10^{-5}$ до $116,1 \cdot 10^{-5}$ м/с², при этом медианные значения составляют $-37,3$ нТл и $10,8 \cdot 10^{-5}$ м/с² соответственно (табл. 1).

Таблица 1/Table 1

Значения гравитационных и магнитных аномалий /
 Values of gravity and magnetic anomalies

Молниевые разряды и пожары от гроз	Минимум	Максимум	Медиана
Магнитные аномалии, нТл			
Вся республика	$-290,2$	$781,7$	$-37,3$
Молниевые разряды	$-290,2$	$781,7$	$-48,3$
Пожары от гроз	$-191,5$	$636,6$	$-28,7$
Гравитационные аномалии, 10^{-5} м/с ²			
Вся республика	$-87,3$	$116,1$	$10,8$
Молниевые разряды	$-87,3$	$116,1$	$4,5$
Пожары от гроз	$-78,5$	$59,8$	$-14,1$

Поскольку молниевые разряды в период с 2016 по 2020 г. регистрировались почти на всей исследуемой территории, минимумы и максимумы величин геофизических аномалий для них совпадают с общереспубликанскими, однако медианные значения ниже. С пожарами ситуация иная, интервал величин аномалий более узкий, что объясняется небольшим количеством гарей, которые не покрывают целиком всю территорию региона. Кроме того, можно отметить отрицательную медиану по гравитационным аномалиям и отрицательную же, но более высокую по сравнению с общереспубликанским показателем медиану по магнитным аномалиям.

Почти все пожары (98 %) отмечены в магнитном диапазоне от $-191,5$ до $243,5$ нТл. В диапазоне свыше $243,5$ нТл зарегистрировано всего два пожара (оба неподалеку друг от друга, в Чойском районе), что заставляет предположить нетипичный характер указанных явлений, обусловленный преобладающим влиянием сторонних факторов или редким стечением обстоятельств. В дальнейшем эти два пожара были исключены из выборки, так как по своим показателям резко отличались от остальных.

Плотность распределения геофизических аномалий по площади республики (рис. 3), согласно тесту Шапиро – Франчия [31], не соответствует нормальному закону распределения. Исходя из этого, основным способом исследования был выбран непараметрический метод ранговых коэффициентов корреляции Спирмена.

Распределение геофизических аномалий по территории Республики Алтай асимметрично, доля площадей, занимаемых отрицательными магнитными аномалиями (58 %), выше, чем положительными (42 %), а по гравитационным – отрицательных меньше (43 %), чем положительных (57 %).

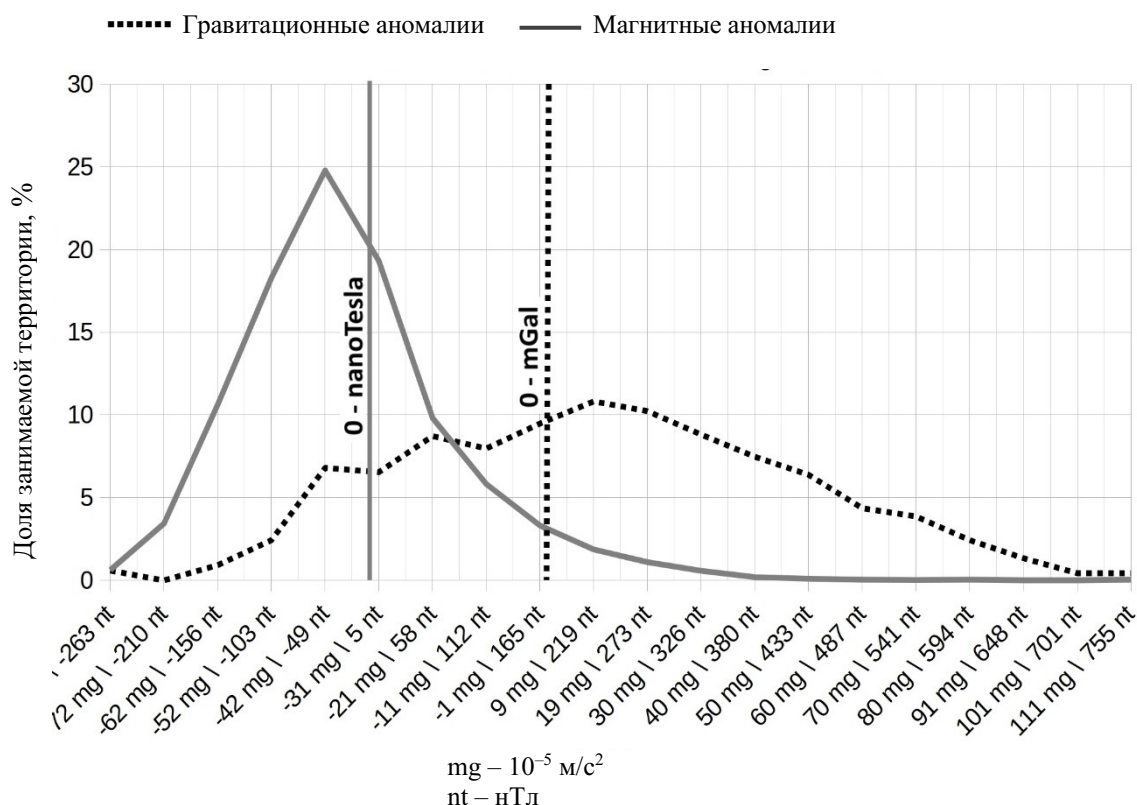


Рис. 3. Плотность распределения гравитационных и магнитных аномалий по территории Республики Алтай (по оси X указаны значения середины интервалов) / Fig. 3. Gravitational and magnetic anomalies distribution density over the territory of the Altai Republic (along the X axis the intervals midpoints values are indicated)

Базовые статистики, представленные в табл. 1, дают общую информацию о распределении молниевых разрядов и пожаров относительно геофизических условий, но не учитывают интенсивность этих явлений на единицу площади. С целью устранения данного недостатка ряды данных по геофизическим аномалиям были разбиты на 20 интервалов, диапазон которых определялся по следующим формулам:

$$\text{Max_Int}_n = \min + \frac{\max - \min}{20} \cdot n, \quad \text{Min_Int}_n = \text{Max_int}_n - \frac{\max - \min}{20},$$

где Max_Int_n – верхняя граница интервала n ; Min_Int_n – нижняя граница; n – номер интервала (от 1 до 20 в порядке возрастания от минимальных значений к максимальным); \max – максимальные значения магнитного или гравитационного поля по территории республики (в зависимости от того, какие интервалы рассчитывались – по магнитным или гравитационным характеристикам); \min – минимальные значения магнитного или гравитационного поля по территории республики.

Следующим шагом была вычислена плотность молниевых разрядов и пожаров от гроз на 1 км^2 , свойственная каждому интервалу геофизических условий. Калькуляция плотности молний и пожаров осуществлялась без нормирования к среднегодовым значениям, учет велся по суммарным накопленным показателям с 2016 по 2020 г. Результат представлен на рис. 4.

Для магнитных аномалий наибольшая плотность молниевых разрядов отмечена для интервала 567–621 нТл, здесь она составила 3,65 разряда на 1 км^2 , наименьшая плотность свойственна интервалу –22–31 нТл (0,79 разряд на 1 км^2).

Плотность пожаров выше всего в интервале 192–246 нТл (0,0017 пожара на 1 км^2), наименьшая ненулевая плотность наблюдается в интервале –237...–183 нТл (0,0003 пожара на 1 км^2).

Для гравитационных аномалий самая высокая плотность молниевых разрядов зарегистрирована для интервала –56,8...–46,6 $\cdot 10^{-5} \text{ м/с}^2$ (1,6 разряда на 1 км^2), самая низкая – для интервала 95,7–105,9 $\cdot 10^{-5} \text{ м/с}^2$ (0,58 разряда на 1 км^2). Наибольшая плотность пожаров отмечается в интервале –56,8...–46,6 $\cdot 10^{-5} \text{ м/с}^2$ (0,0045 пожара на 1 км^2), наименьшая ненулевая – в интервале 24,6–34,7 $\cdot 10^{-5} \text{ м/с}^2$ (0,0003 пожара на 1 км^2).

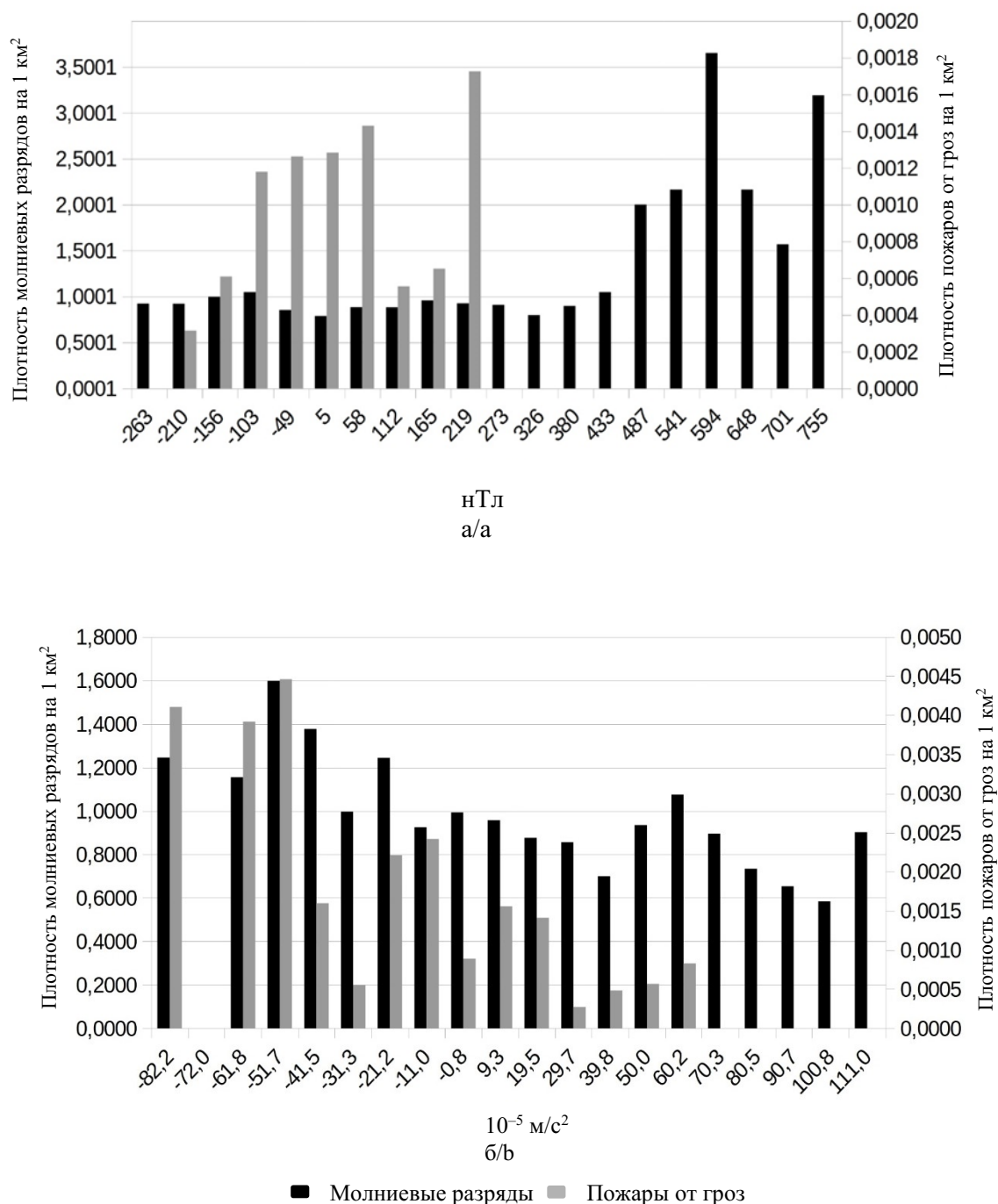


Рис. 4. Плотность молниевых разрядов и пожаров от гроз на 1 км² магнитных (а) и гравитационных (б) аномалий с 2016 по 2020 г. (по оси X указаны значения середины интервалов) / Fig. 4. Density of lightning discharges and thunderstorm fires per square kilometer of magnetic (a) and gravitational (b) anomalies from 2016 to 2020 (along the X axis the intervals midpoints values are indicated)

В целях оценки связи между плотностью исследуемых событий и интенсивностью магнитных и гравитационных аномалий были выполнены расчеты ранговых коэффициентов корреляции Спирмена, результаты которых приведены в табл. 2.

Обнаружена положительная корреляционная связь между плотностью молниевых разрядов и интенсивностью магнитных аномалий. При увеличении интенсивности магнитного поля возрастает количество молниевых разрядов, достигая наивысших значений в верхнем для республики диапазоне – более 1,5 разряда на 1 км² для всех интервалов свыше 460 нТл. Ниже этой

границы плотность колеблется в пределах 0,79–1,05 разряда на 1 км². В целом этот результат согласуется с рядом исследований по другим регионам, активизация гроз у магнитных аномалий отмечается в работах [14–16].

Таблица 2/ Table 2

Ранговые коэффициенты корреляции Спирмена между плотностью молниевых разрядов и пожаров от гроз с интенсивностью магнитных (числитель) и гравитационных (знаменатель) аномалий / Spearman's rank correlation coefficients between the density of lightning discharges and thunderstorm fires with the intensity of magnetic and gravitational anomalies

Ранговый коэффициент корреляции Спирмена	Молниевые разряды	Пожары от гроз
r_s	0,62/–0,57	–0,61*/–0,72
p	<0,01/<0,02	<0,01*/<0,01

* – нельзя считать достоверным из-за большого количества пустых интервалов. Подробное пояснение в тексте ниже.

Плотность пожаров от гроз характеризуется значимым отрицательным коэффициентом корреляции с величинами магнитного поля, однако полученные результаты требуют отдельного внимания. Десять интервалов выше 245 нТл являются пустыми, пожаров в этом диапазоне не отмечено, кроме двух нетипичных, которые были исключены из выборки. Если же брать основной диапазон пожаров (от –191,5 до 243,5 нТл), то в его пределах значимой связи с интенсивностью магнитного поля нет ($r_s = 0,55$, $p = 0,12$), тем не менее сам факт положительной корреляции согласуется с работой [20]. Таким образом, на основе полученных результатов можно говорить о тяготении пожаров от гроз к определенной дистанции значений аномалий, но нельзя утверждать, что их отрицательная или положительная связь с геомагнитными характеристиками является достоверной.

Возможно, для более подробной оценки данные EMAG2 должны быть уточнены с использованием других общедоступных глобальных моделей аномального магнитного поля, например [32, 33].

По гравитационным аномалиям получены значимые отрицательные коэффициенты корреляции в отношении плотностей молниевых разрядов и пожаров от гроз. Следует отметить, что в шести интервалах гравитационного поля из двадцати пожары не зафиксированы, но даже если исключить пустые значения и провести оценку связи только по интервалам с плотностью выше нуля, то отрицательная зависимость подтверждается ($r_s = -0,77$, $p < 0,01$).

Таким образом, для рассматриваемой территории можно говорить о приуроченности молниевых разрядов и лесных пожаров к отрицательным гравитационным аномалиям. Этот результат согласуется с выводами ряда работ [4, 5, 7–9].

Интересным представляется вопрос о геофизических условиях, при которых складывается наибольший риск возникновения лесного пожара от молнии. В рамках данного исследования мы предлагаем определять такой риск как соотношение числа ударов молний на пожар. На рис. 5 представлены данные, показывающие количество разрядов, приходящихся на один пожар в разных интервалах гравитационного и магнитного поля. Чем ближе значения к нулю (но при этом не являются нулевыми, нуль – это отсутствие возгораний), тем риск возгорания выше.

Наименьший риск наблюдается в отрицательных диапазонах магнитного поля (менее 130 нТл), где он составляет 1600–3000 ударов молний на гарь, а также в положительном интервале 85–192 нТл (1400–1600 к1). Наибольший риск прослеживается в околонулевых диапазонах, где он доходит до 500–700 ударов на одно возгорание. Ранговый коэффициент корреляции Спирмена подтверждает существование обратной связи между количеством разрядов на пожар и интенсивностью магнитного поля в пределах от –191,5 до 243,5 нТл ($r_s = -0,72$, $p < 0,01$). Следовательно, при увеличении значений магнитного поля риск возгорания при прохождении грозы растет.

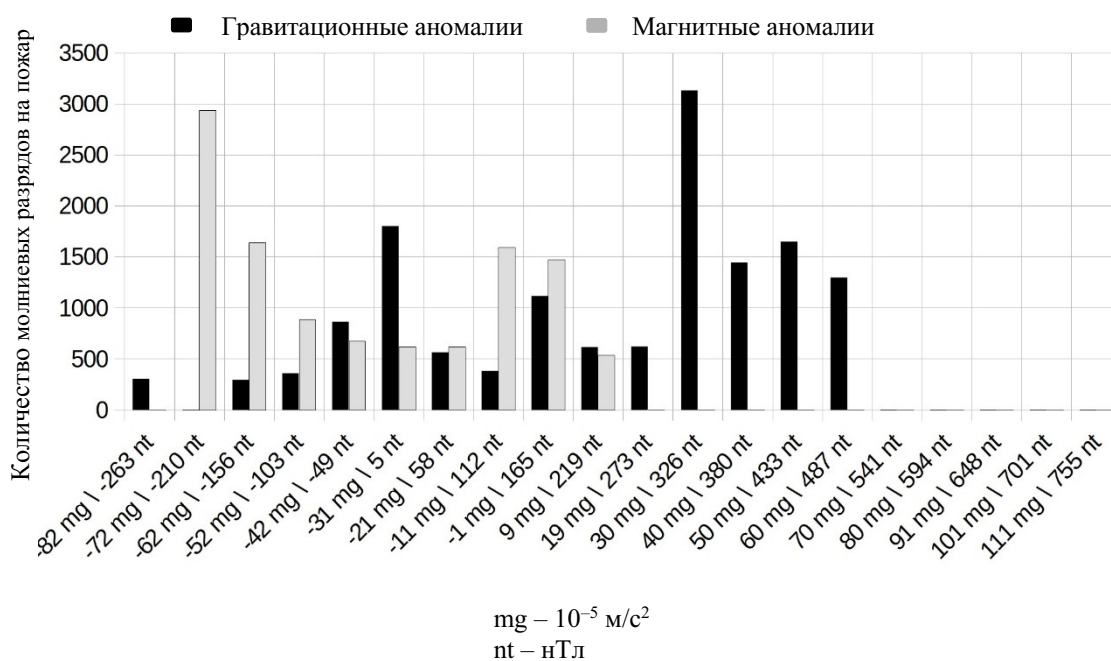


Рис. 5. Количество молниевых разрядов на пожар в различных интервалах магнитных и гравитационных аномалий с 2016 по 2020 г. (по оси X указаны значения середины интервалов) / Fig. 5. The number of lightning discharges per fire in various intervals of magnetic and gravitational anomalies from 2016 to 2020 (along the X axis the intervals midpoints values are indicated)

По гравитационным аномалиям наименьший риск наблюдается в диапазонах $25\text{--}65 \cdot 10^{-5}$ м/с² (1300–3100 ударов молний на пожар), но почти такие же значения отмечаются и для диапазонов $-6\text{...}-4 \cdot 10^{-5}$ м/с² (1100 к1) и $-36\text{...}-26 \cdot 10^{-5}$ м/с² (1800 к1). Наивысший риск свойствен отрицательному интервалу $-87\text{...}-47 \cdot 10^{-5}$ м/с² (300–360 ударов молний на пожар), а также интервалу $-16\text{...}-6 \cdot 10^{-5}$ м/с² (380 к1). Подобный разброс значений на дистанции всей выборки не позволяет получить значимую оценку корреляционной связи.

Выводы

Обнаружена положительная корреляционная связь между плотностью молниевых разрядов и значениями магнитных аномалий ($r_s = 0,62$, $p < 0,01$). При увеличении интенсивности магнитного поля возрастает молниевая активность, достигая наивысших значений в верхнем для республики диапазоне – более 1,5 разряда на 1 км² для всех интервалов свыше 460 нТл. Ниже этой границы плотность колеблется в пределах 0,79–1,05 разряда на 1 км².

Выявлено, что основной диапазон пожаров (98 %) располагается в пределах от –191,5 до 243,5 нТл. Достоверной корреляционной связи со значениями магнитного поля в этом интервале не отмечено.

Установлено, что риск возникновения грозового пожара, определяемый как соотношение числа молниевых разрядов на один пожар (где большее количество разрядов на пожар соответствует меньшему риску), возрастает при увеличении значений магнитных аномалий, что подтверждается отрицательной корреляционной связью ($r_s = -0,72$, $p < 0,01$).

По гравитационным аномалиям получены значимые отрицательные коэффициенты корреляции в отношении плотности молниевых разрядов ($r_s = -0,57$, $p < 0,02$) и пожаров от гроз ($r_s = -0,72$, $p < 0,01$). Таким образом, для рассматриваемой территории можно говорить о тяготении гроз и природных пожаров к отрицательным гравитационным аномалиям.

Выполнить оценку приуроченности риска возникновения грозового пожара к гравитационным аномалиям на текущем наборе данных не удалось из-за сильного разброса значений.

Исходя из результатов исследования, авторы считают, что между геофизическими условиями и факторами возникновения грозового пожара существуют определенные закономерности. Осо-

бенную роль гравитационные и магнитные аномалии могут сыграть при предкритических состояниях природной среды, когда вероятность зарождения и развития пожара возрастает. С этой стороны представляется интересным изучение вариаций геофизических условий на некотором отрезке времени перед прохождением грозы и возникновением возгорания от удара молнии.

Список источников

1. *Van der Werf G.R., Morton D.C., DeFries R.S., Giglio L., Randerson J.T., Collatz G.J., Kasibhatla P.S.* Estimates of fire emissions from an active deforestation region in the southern Amazon based on satellite data and biogeochemical modelling // *Biogeosciences*. 2009. Vol. 6, № 2. P. 235–249. URL: <https://bg.copernicus.org/articles/6/235/2009/> (дата обращения: 30.07.2022).
2. *Кухар И.В., Бердникова Л.Н., Орловский С.Н., Мартыновская С.Н., Коршун В.Н., Карнаухов А.И.* Влияние вредных и опасных факторов лесных пожаров на окружающую среду // *Хвойные бореальной зоны*. 2019. № 5. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-vrednyh-i-opasnyh-faktorov-lesnyh-pozharov-na-okruzhayuschuyu-sredu> (дата обращения: 30.07.2022).
3. *Гришин А.М.* О влиянии негативных экологических последствий лесных пожаров // *Экологические системы и приборы*. 2003. № 4. С. 40–43.
4. *Горбатенко В.П., Дульзон А.А., Гиндуллин Ф.А., Ершова Т.В., Инполитов И.И., Кабанов М.В., Логинов С.В.* Анализ структуры грозовых рядов и факторов, влияющих на пространственную неоднородность грозовой активности // *Проектирование и технология электронных средств*. 2004. № S1. С. 61–65.
5. *Leybourne B., Smoot C., Gregori G.P., Paparo G., Bhat I.* Tectonic Spiral Structures of the Tethyan Vortex Street: GRACE Geoid Interpretations and African Lightning Teleconnections // *33rd IGC, Oslo NCGT Symposium*. Oslo, Norway, 2008.
6. *Ершова Т.В.* Пространственная неоднородность грозовой активности и гравитационные аномалии Земли // *Вестн. Томского гос. пед. ун-та (Tomsk State Pedagogical University Bulletin)*. 2015. Вып. 11. С. 169–173.
7. *Борисенков Е.П.* Роль аномалий гравитационного поля Земли в формировании конвективных движений как стимулятора грозовой активности // *Труды Пятой Рос. конф. по атмосферному электричеству*. Владимир, 2003. Т. 2. С. 42–44.
8. *Gloor E., Wilson C., Chipperfield M.P., Chevallier F., Buermann W., Boesch H., Parker R., Somkuti P., Gatti L.V., Correia C., Domingues L.G., Peters W., Miller J., Deeter M.N., Sullivan M.J.* Tropical land carbon cycle responses to 2015/16 El Niño as recorded by atmospheric greenhouse gas and remote sensing data // *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*. 2018. Vol. 373, № 1760. P. 20170302.
9. *Chen Y., Velicogna I., Famiglietti J.S., Randerson J.T.* Satellite observations of terrestrial water storage provide early warning information about drought and fire season severity in the Amazon // *J. of Geophysical Research: Biogeosciences*. 2013. Vol. 118, № 2. P. 495–504.
10. *Hanna W.F., Hassemer J.H., Elliott J.E., Wallace C.A., Snyder S.L.* Maps Showing Gravity and Aeromagnetic Anomalies in the Butte 1° X 2° Quadrangle. Montana: US Geological Survey, 1994. 35 p.
11. *Ponce D.A., Langenheim V.E.* Gravity, magnetic, and physical property data of the Deep Creek Range and vicinity, eastern Nevada and Western Utah. US Geological Survey, 1993. 15 p.
12. *Воинов В.Н.* Использование молниенных магнитных аномалий для решения геологических задач // *Топорковские чтения*. Рудный, 1992. Вып. 1. С. 154–162.
13. *Кузовков Г.Н.* «Бабочка» озера большое Карасье на Первомайском массиве ультрамафитов, средний Урал // *Уральский геол. журн*. 2003. № 1. С. 31–34.
14. *Хайруллин К.Ш., Яковлев Б.А.* Антропогенные и мезоклиматические влияния на грозы и град // *Тез. докл. IV Всесоюз. симп. по атмосферному электричеству*. Нальчик, 1990. С. 102–103.
15. *Люшвин П.В.* Геофизические и био явления в радиационных и магнитных аномалиях // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: материалы 17-й Всерос. открытой конф.* М.: ИКИ РАН, 2019. С. 389.
16. *Ершова Т.В.* Аномалии гравитационного и магнитного полей Земли и грозовая активность // *Глобальная электрическая цепь: материалы второй Всерос. конф.* Борок, 5–9 октября 2015 г. Ярославль, 2015. С. 49–50.
17. Авт. св. № 902763. Кл. А 62. С 3/02. Способ выявления пожароопасных областей на местности / *Новгородов В.Д., Смольникова Л.Г., Захаров А.И.* Бюл. изобр, 1982. № 5.
18. *Иванов В.А., Коршунов Н.А., Матвеев П.М.* Пожары от молний в лесах Красноярского Приангарья. Красноярск: СибГТУ, 2004. 132 с.
19. *Санников С.Н., Захаров А.И., Смольникова Л.Г., Санникова Н.С.* Лесные грозовые пожары как индикатор связей между атмосферой, литосферой и биосферой // *Экология*. 2010. № 1. С. 3–8.
20. *Иванов В.А.* Методологические основы классификации лесов Средней Сибири по степени пожарной опасности от гроз: автореф. дис. ... д-ра с.-х. наук. Красноярск: СибГТУ, 2002. 42 с.

21. Лесной план Республики Алтай: руководящий документ. Горно-Алтайск, 2008. 572 с.
22. Forste C., Bruinsma S.L., Abrikosov O., Lemoine J.-M., Marty J.C., Flechtner F., Balmino G., Barthelmes F., Biancale R. EIGEN-6C4 The latest combined global gravity field model including GOCE data up to degree and order 2190 of GFZ Potsdam and GRGS Toulouse. GFZ Data Services, 2014. <http://doi.org/10.5880/icgem.2015.1>.
23. Meyer B., Salties R., Chulliat A. EMAG2v3: Earth Magnetic Anomaly Grid (2-arc-minute resolution). Version 3. NOAA National Centers for Environmental Information, 2017. <https://doi.org/10.7289/V5H70CVX>.
24. Всемирная сеть локализации молниевых разрядов (WWLLN). URL: <http://wwlln.net> (дата обращения: 30.07.2022).
25. Hutchins M.L., Holzworth R.H., Virts K.S., Wallace J.M., Heckman S. Radiated VLF energy differences of land and oceanic lightning // *Geophysical Research Letters*. 2013. Vol. 40 (10). P. 2390–2394. <https://doi.org/10.1002/grl.50406>.
26. QGIS.org. QGIS Geographic Information System. QGIS Association, 2022. URL: <http://www.qgis.org> (дата обращения: 30.07.2022).
27. GRASS Development Team. Geographic Resources Analysis Support System (GRASS) Software, Version 7.8. Open Source Geospatial Foundation, 2020. URL: <https://grass.osgeo.org> (дата обращения: 30.07.2022).
28. Spearman Rank Correlation Coefficient // *The Concise Encyclopedia of Statistics*. New York: Springer, 2008. https://doi.org/10.1007/978-0-387-32833-1_379.
29. Fox J. The R Commander: A Basic-Statistics Graphical User Interface to R // *J. of Statistical Software*. 2005. Vol. 14 (9). P. 1–42. <https://doi.org/10.18637/jss.v014.i09>.
30. R Core Team. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, 2005. URL: <https://www.R-project.org/> (дата обращения: 30.07.2022).
31. Shapiro S.S., Francia R.S. An Approximate Analysis of Variance Test for Normality // *J. of the American Statistical Association*. American Statistical Association, 1972. Vol. 67 (337). P. 215–216. <https://doi.org/10.2307/2284728>.
32. Муравьев Л.А., Федорова Н.В. Подбор аномального магнитного поля Полярного Урала на нескольких высотах системой намагниченных отрезков // *Уральский геофиз. вестн.* 2020. № 1. С. 23–33.
33. Абрамова Л.М., Абрамова Д.Ю., Варенцов И.М., Филиппов С.В. Роль спутниковых литосферных магнитных аномалий при анализе геолого-геофизических данных в Центрально-Азиатской коллизийной зоне // *Проблемы геодинамики и геоэкологии внутриконтинентальных орогенов: материалы VI междунар. симп.* Бишкек: ИС РАН, 2015. С. 45–54.

References

1. Van der Werf G. R., Morton D. C., DeFries R. S., Giglio L., Randerson J. T., Collatz G. J., Kasibhatla P. S. Estimates of fire emissions from an active deforestation region in the southern Amazon based on satellite data and biogeochemical modelling. *Biogeosciences*. 2009;6(2):235-249. Available from: <https://bg.copernicus.org/articles/6/235/2009/> [Accessed 30th July 2022].
2. Kukhar I.V., Berdnikova L.N., Orlovskiy S.N., Martynovskaia S.N., Korshun V.N., Karnauhov A.I. Impact of harmful and dangerous factors of forest fires on the environment. *Khvoynye boreal'noi zony = Conifers of the Boreal Area*. 2019;(5). Available from: <https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-vrednyh-i-opasnyh-faktorov-lesnyh-pozharov-na-okruzhayuschuyu-sredu> [Accessed 30th July 2022]. (In Russ.).
3. Grishin A.M. On the impact of negative environmental consequences of forest fires. *Ekologicheskie sistemy i pribory = Ecological Systems and Devices*. 2003;(4):40-43. (In Russ.).
4. Gorbatenko V.P., Dul'zon A.A., Gindullin F.A., Ershova T.V., Ippolitov I.I., Kabanov M.V., Loginov S.V. Analysis of the structure of thunderstorm series and the factors affecting the spatial inhomogeneity of thunderstorm activity. *Proektirovanie i tekhnologiya elektronnykh sredstv = Design and Technology of Electronic Means*. 2004;(S1):61-65. (In Russ.).
5. Leybourne B., Smoot C., Gregori G.P., Paparo G., Bhat I. Tectonic Spiral Structures of the Tethyan Vortex Street: GRACE Geoid Interpretations and African Lightning Teleconnections. *33rd IGC, Oslo NCGT Symposium*. Oslo, Norway, 2008.
6. Ershova T.V. Spatial inhomogeneity of thunderstorm activity and gravitational anomalies of the Earth. *Tomsk State Pedagogical University Bulletin*. 2015;(11):169-173. (In Russ.).
7. Borisenkov E.P. The role of the anomalies of the gravitational field of the Earth in the formation of convective motions as a stimulator of thunderstorm activity. *Proceedings of the V Russian Conference on Atmospheric Electricity*. Vladimir, 2003;2:42-44. (In Russ.).
8. Gloor E., Wilson C., Chipperfield M.P., Chevallier F., Buermann W., Boesch H., Parker R., Somkuti P., Gatti L.V., Correia C., Domingues L.G., Peters W., Miller J., Deeter M.N., Sullivan M.J. Tropical land carbon

cycle responses to 2015/16 El Niño as recorded by atmospheric greenhouse gas and remote sensing data. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*. 2018;373(1760):20170302.

9. Chen Y., Velicogna I., Famiglietti J.S., Randerson J.T. Satellite observations of terrestrial water storage provide early warning information about drought and fire season severity in the Amazon. *J. of Geophysical Research: Biogeosciences*. 2013;118(2):495-504.

10. Hanna W.F., Hassemer J.H., Elliott J.E., Wallace C.A., Snyder S.L. *Maps Showing Gravity and Aeromagnetic Anomalies in the Butte 1° X 2° Quadrangle*. Montana: US Geological Survey; 1994. 35 p.

11. Ponce D. A., Langenheim V. E. *Gravity, magnetic, and physical property data of the Deep Creek Range and vicinity, eastern Nevada and Western Utah*. US Geological Survey, 1993.

12. Voinov V.N. Use of lightning magnetic anomalies for solving geological problems. *Toporkov readings*. Rudny, 1992;(1):154-162. (In Russ.).

13. Kuzovkov G.N. "Butterfly" of Bolshoe Karasye lake at the pervomaiskoe ultramafic massif, Middle Urals. *Ural'skii geol. zhurn. = Uralian Geological Journal*. 2003;(1):31-34. (In Russ.).

14. Khairullin K.Sh., Yakovlev B.A. Anthropogenic and mesoclimatic influences on thunderstorms and hail. *Abstracts of the IV All-Soviet Union Symposium on Atmospheric Electricity*. Nalchik, 1990:102-103. (In Russ.).

15. Lushvin P.V. Geophysical and bio phenomena in radiation and magnetic anomalies. *Proceedings of the 17th All-Russian Open Conference*. Moscow: Space Research Institute Press; 2019:389. (In Russ.).

16. Ershova T.V. Anomalies of the Earth's gravitational and magnetic fields and thunderstorm activity. *Proceedings of the Second All-Russian Conference*. Borok, October 5-9, 2015. Yaroslavl, 2015:49-50. (In Russ.).

17. Novgorodov V.D., Smol'nikova L.G., Zakharov A.I. *Method for identifying fire hazardous areas on the ground*. Certificate No. 902763. Cl. A 62. C 3/02. Bulletin of inventions. 1982;(5). (In Russ.).

18. Ivanov V.A., Korshunov N.A., Matveev P.M. *Fires from lightning in the forests of the Krasnoyarsk Angara*. Krasnoyarsk: SibSAU Press; 2004. 132 p. (In Russ.).

19. Sannikov S.N., Zakharov A.I., Smol'nikova L.G., Sannikova N.S. Forest fires caused by lightning as an indicator of connections between atmosphere, lithosphere, and biosphere. *Russian Journal of Ecology*. 2010;41(1):1-6.

20. Ivanov V.A. *Methodological bases of the forests classification in Central Siberia according to the degree of fire danger from thunderstorms*. Dissertation Thesis. Krasnoyarsk: SibSAU Press; 42 p. (In Russ.).

21. *Forest Plan of the Republic of Altai: guidance document*. Gorno-Altai, 2008. 572 p. (In Russ.).

22. Forste C., Bruinsma S.L., Abrikosov O., Lemoine J.-M., Marty J.C., Flechtner F., Balmino G., Barthelmes F., Biancale R. *EIGEN-6C4 The latest combined global gravity field model including GOCE data up to degree and order 2190 of GFZ Potsdam and GRGS Toulouse*. GFZ Data Services. 2014, <http://doi.org/10.5880/icgem.2015.1>.

23. Meyer B., Saltus R., Chulliat A. *EMAG2v3: Earth Magnetic Anomaly Grid (2-arc-minute resolution). Version 3*. NOAA National Centers for Environmental Information. 2017, <https://doi.org/10.7289/V5H70CVX>.

24. *World Wide Lightning Location Network (WWLLN)*. Available from: <http://wwlln.net> [Accessed 30th July 2022]. (In Russ.).

25. Hutchins M.L., Holzworth R.H., Virts K.S., Wallace J.M., Heckman S. Radiated VLF energy differences of land and oceanic lightning. *Geophysical Research Letters*. 2013;40(10):2390-2394, <https://doi.org/10.1002/grl.50406>.

26. *QGIS Geographic Information System*. QGIS Association, 2022. Available from: <http://www.qgis.org> [Accessed 30th July 2022].

27. *GRASS Development Team*. Geographic Resources Analysis Support System (GRASS) Software, Version 7.8. Open Source Geospatial Foundation. 2020. Available from: <https://grass.osgeo.org> [Accessed 30th July 2022].

28. Spearman Rank Correlation Coefficient. *The Concise Encyclopedia of Statistics*. New York: Springer Publ.; 2008, https://doi.org/10.1007/978-0-387-32833-1_379.

29. Fox J. The R Commander: A Basic-Statistics Graphical User Interface to R. *J. of Statistical Software*. 2005;14(9):1-42, <https://doi.org/10.18637/jss.v014.i09>.

30. *R Core Team*. *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing. Vienna, Austria, 2020. Available from: <https://www.R-project.org/> [Accessed 30th July 2022].

31. Shapiro S.S., Francia R.S. An Approximate Analysis of Variance Test for Normality. *J. of the American Statistical Association*. 1972;67:215-216, <https://doi.org/10.2307/2284728>.

32. Muraviev L.A., Fedorova N.V. Selection of anomalous magnetic field of Polar Urals at several heights by system of magnetized rods. *Ural'skii geofiz. vestn. = Ural Geophysical Messenger*. 2020;(1):23-33. (In Russ.).

33. Abramova L.M., Abramova D.Yu., Varentsov I.M., Philippov S.V. The role of satellite lithospheric magnetic anomalies in the analysis of geological and geophysical data in the Central Asian collision zone. *Problems of geodynamics and geoecology of intracontinental orogens*. Materials of the VI International Symposium. Bishkek: NS RAS Press; 2015:45-54. (In Russ.).

Информация об авторах

А.В. Каранин – кандидат географических наук, доцент, кафедры географии и природопользования.

М.Ю. Беликова – старший преподаватель, кафедры математики, физики и информатики.

Information about the authors

A.V. Karanin - Candidate of Science (Geography), Associate Professor, Department of Geography and Environmental Management.

M.Yu. Belikova - Senior Lecturer, Department of Mathematics, Physics and Informatics.

Статья поступила в редакцию 04.08.2022; одобрена после рецензирования 25.09.2022; принята к публикации 02.03.2023.
The article was submitted 04.08.2022; approved after reviewing 25.09.2022; accepted for publication 02.03.2023.

Научная статья
УДК 551.583; 631.559
doi: 10.18522/1026-2237-2023-1-101-111

ДИНАМИКА УРОЖАЙНОСТИ ЗЕРНОВЫХ КУЛЬТУР АЛТАЙСКОГО КРАЯ В УСЛОВИЯХ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА

Татьяна Геннадьевна Плуталова^{1✉}, Евгения Олеговна Чернова²

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

¹plutalova.tg@gmail.com✉

²garms123@mail.ru

Аннотация. Для установления зависимости урожайности зерновых культур от режима увлажнения в условиях изменения климата использованы данные за период 1966–2018 гг. Отмечена незначительная аридизация климата – уменьшение в последние десятилетия индекса гидротермического коэффициента Г.Т. Селянинова (ГТК). Впервые рассчитаны нормы ГТК и урожайности, их отклонения. Выявленные пики и спады урожайности подтверждают, что главными факторами являются гидротермические характеристики переходных сезонов. Наиболее благоприятные агроклиматические условия для возделывания основных видов зерновых и зернобобовых культур отмечены на территории лесостепной зональной ландшафтной области, для наиболее ценных твердых сортов пшеницы – степной.

Ключевые слова: Кулундинская провинция, Алтайский край, урожайность, изменение климата, метеостанции, ГТК, сельское хозяйство

Благодарности: работа выполнена в рамках государственного задания № 1021051302358-7.

Для цитирования: Плуталова Т.Г., Чернова Е.О. Динамика урожайности зерновых культур Алтайского края в условиях изменения климата // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. 2023. № 1. С. 101–111.

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

Original article

YIELD DYNAMICS OF GRAIN CROPS UNDER CLIMATE CHANGE IN ALTAI KRAI

Tatiana G. Plutalova^{1✉}, Evgenia O. Chernova²

^{1, 2}Institute of Water and Environmental Problems, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Barnaul, Russia

¹plutalova.tg@gmail.com✉

²garms123@mail.ru

Abstract. In order to find dependencies between yield of grain crops and moisture regime under conditions of climate change, data was studied for the period 1966-2018. Small climate aridization (hydrothermal coefficient

© Плуталова Т.Г., Чернова Е.О., 2023

index of G.T. Selyaninov (HTC) was decreasing during last decades) was found. For the first time, the norms of the HTC and productivity, and their deviations were calculated. The revealed peaks and declines in productivity confirm that the main factors are the hydrothermal characteristics of the transitional seasons. The most favorable agro-climatic conditions for the cultivation of the main types of grain and leguminous crops were noted on the territory of the forest-steppe zonal landscape area, and on the territory of the steppe zonal landscape area for the most valuable durum wheat varieties.

Keywords: *Kulunda province, Altai Krai, crop yield, climate change, meteorological stations, hydrothermal coefficient (HTC), agriculture*

Acknowledgements: *this study was carried out as a part of state task No. 1021051302358-7.*

For citation: *Plutalova T.G., Chernova E.O. Yield Dynamics of Grain Crops Under Climate Change in Altai Krai. Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science. 2023;(1):101-111. (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 последние годы для многих регионов характерны изменения как природной, так и социально-экономической сред под воздействием естественных и антропогенных факторов. Основными драйверами среди этих факторов выступают изменение климата и трансформация систем землепользования. В связи с этим оценка происходящих изменений и прогнозы их возможных будущих состояний при определенных сценариях являются важной задачей обеспечения устойчивого развития регионов [1–6]. В научных публикациях освещаются исследования по адаптивной способности природных и антропогенных систем, в том числе сельскохозяйственных [2, 7, 8]. Анализируются политические действия по адаптации к изменениям климата [9]. Во всем мире рассчитываются глобальные и локальные прогнозы [3, 10].

Алтайский край занимает лидирующую позицию среди регионов Сибирского федерального округа по производству продукции сельского хозяйства. Он является традиционным производителем зерна, молока, мяса, сахарной свеклы, подсолнечника, льна масличного и долгунца, хмеля, рапса и сои, и мониторинг состояния сельскохозяйственных посевов для него имеет стратегическое значение.

Целью статьи является анализ изменения климатических параметров за последнее пятидесятилетие, исследование режима увлажнения в вегетационный период, его изменчивости и влияния на урожайность зерновых культур в Алтайском крае.

Материалы и методы

Прослежена динамика изменения количества осадков, температуры и урожайности за период 1966–2018 гг. для муниципальных образований (МО) Алтайского края (Бийский, Каменский, Ребрихинский и Рубцовский районы, Славгород), на территории которых функционируют метеостанции (МС) (рис. 1). Выбор обоснован разнообразием природно-климатических условий территорий МО (расположены в пяти ландшафтных провинциях) и развитым аграрным сектором экономики.

Климатические изменения изучались на основе использования многолетней метеорологической информации (53-летний период) портала «Специализированные массивы для климатических исследований»: раздел базы данных – сутки, источник данных – ТТТР. Выборка данных обеспечивается Web-технологией «Аисори – Удаленный доступ к ЯОД-архивам» [11].

Для анализа динамики среднесуточной урожайности зерновых и зернобобовых культур МО использованы данные служб государственной статистики [12, 13].

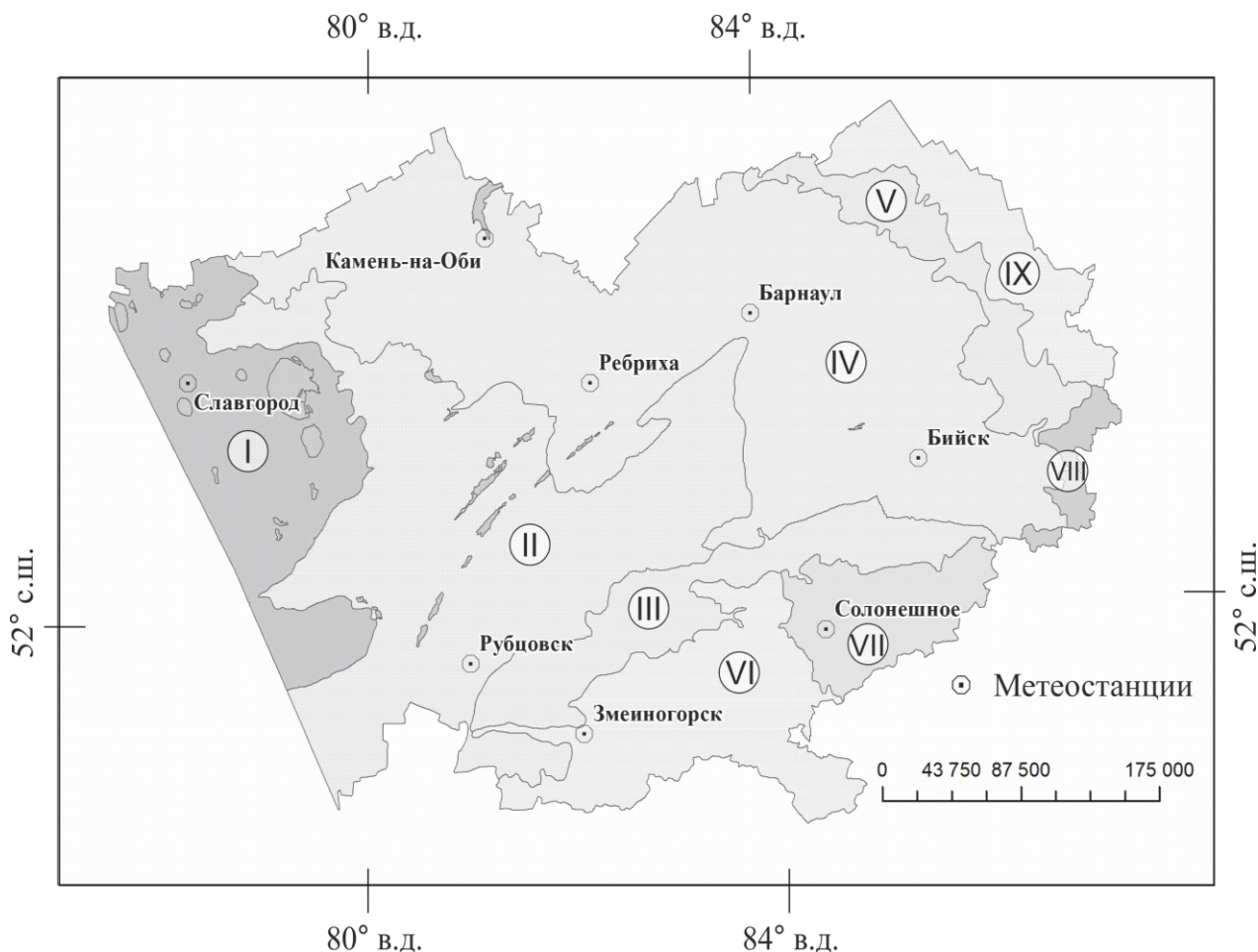


Рис. 1. МС Алтайского края [14]. Степная зональная область: I – Кулундинская; II – Южно-Приалейская; III – Предальтайская провинции; лесостепная зональная область: IV – Верхне-Обская; V – Предсалайрская провинции; алтайская горная область: VI – Северо-Западная Алтайская; VII – Северо-Алтайская; VIII – Северо-Восточная Алтайская провинции; Салаиро-Кузнецко-Алатауская горная область: IX – Салайрская провинция / Fig. 1. Meteorological stations of the Altai Krai (Landscape map, 2016).
Steppe zonal landscape area. Landscape provinces: I - Kulunda; II - South Prialeiskaya; III - Pre-Altai; Forest-steppe zonal landscape area. Landscape provinces: IV - Upper Ob; V - Pre-Salair; Altai mountain region. Landscape provinces; VI - Northwest Altai; VII – North Altai; VIII - North-Eastern Altai; Salair-Kuznetsk-Alatau mountain region. Landscape provinces; IX - Salair

Результаты и их обсуждение

На всех без исключения МС Алтайского края отмечается повышение среднегодовой температуры воздуха. Максимальное повышение зафиксировано на МС лесостепной (Барнаул, Бийск) и степной (Славгород, Рубцовск, Камень-на-Оби) зональных областей. Меняется средняя температура воздуха и по сезонам года, особенно «теплеют» зима и весна.

Вместе с тем, согласно линейным трендам, сумма осадков увеличивается только на МС Барнаула и Солонешного, незначительно – на МС Камня-на-Оби. В основном наблюдается уменьшение годовой суммы осадков, что на фоне повышения температуры говорит об аридизации климата. По сезонам года количество осадков особенно изменчиво зимой и летом. Осенью на семи из восьми МС средняя сумма осадков остается неизменной (табл. 1).

Подробнее рассмотрены тенденции для пяти МС, на основе которых проведен анализ взаимосвязи климатических показателей с урожайностью зерновых и зернобобовых в МО.

Таблица 1/ Table 1

**Изменение климатических параметров МС Алтайского края за период 1966–2018 гг.
/ Change of climatic parameters of meteorological stations in Altai Krai for the period 1966-2018**

МС	Температура					Количество осадков				
	Средне-годовая	Зима	Весна	Лето	Осень	Средне-годовая	Зима	Весна	Лето	Осень
Барнаул	↑↑	↑2,0	↑2,4	↑0,8	↑1,3	↑↑	↑15	↑7	↑25	↔
Бийск	↑↑	↑2,4	↑2,4	↑1,0	↑0,9	↓	↓30	↑10	↓17	↔
Славгород	↑↑	↑3,0	↑2,0	↑1,0	↑1,2	↓	↓14	↓8	↓11	↔
Рубцовск	↑↑	↑3,1	↑1,9	↑0,8	↑1,0	↔	↓22	↔	↑20	↔
Ребриха	↑	↑2,0	↑1,7	↑0,2	↑0,6	↓	↓50	↔	↑24	↔
Солонешное	↑	↑2,4	↑1,7	↑0,8	↔	↑↑	↑15	↑↑45	↑32	↔
Камень-на-Оби	↑↑	↑2,0	↑2,2	↑1,0	↑1,0	↑	↑10	↑10	↑5	↑14
Змеиногорск	↑	↑2,3	↑1,0	↑1,0	↑1,0	↔	↔	↓11	↑8	↔

Примечание. Периоды сезонов приняты следующим образом: пять зимних месяцев (ноябрь, декабрь, январь, февраль, март), два весенних (апрель, май), три летних (июнь, июль, август) и два осенних (сентябрь, октябрь); ↔ изменения статистически незначимы или их нет; ↓ – уменьшение; ↑ – увеличение; ↑↑ – увеличение температуры более чем на 1,5 °С или количества осадков – более чем на 40 мм, цифра рядом – насколько именно.

МС Славгорода. Согласно линейному тренду, годовое количество осадков за 53-летний период уменьшилось на 32 мм. За счёт лета (на 11 мм) и зимы (на 14 мм). Количество осадков за весенний период уменьшилось на 8 мм, а осенью увеличилось на 2 мм, однако данное значение статистически незначимо. В вегетационный период наибольший вклад в сумму осадков происходит в июле и июне. За период 1966–2018 гг. наблюдается рост доли майских осадков и снижение доли осадков августа в среднегодовой сумме.

Среднегодовая температура воздуха для МС Славгорода за период 1966–2018 гг. увеличилась на 1,9 °С. Самое значительное потепление наблюдается в зимний период – на 3,0 °С, весенний – 2,0 °С, летний – 1,0 °С, осенний – 1,2 °С.

МС Рубцовска. Проведенные расчеты годовой температуры воздуха в календарных рамках позволили установить значительный положительный линейный тренд. Величина повышения среднегодовой температуры воздуха на основе линейных трендов (1966–2018 гг.) составила 1,7 °С. Но гораздо показательнее цифры по сезонам: средняя температура зимы увеличилась на 3,1 °С, лета – на 0,8 °С.

Анализ изменения годового количества осадков в этот период показал значительную межгодовую изменчивость: от 185 мм в 2008 г. до 527 мм в 2016 г. Но в целом годовое количество осадков значительно не изменилось. При рассмотрении сезонной специфики на основе линейных трендов выявились некоторые отличия. Так, величина повышения сумм осадков за теплый период составила 17 мм, за холодный уменьшилась на 25 мм.

Тренды изменения температуры воздуха и осадков на МС Рубцовска показали устойчивую тенденцию к потеплению и аридизации.

МС Ребрихи. Согласно линейному тренду, среднегодовое количество осадков за 53-летний период уменьшилось на 28 мм. В основном за счёт зимы – сокращение на 50 мм. Летом количество осадков увеличилось на 24 мм. За весенний и осенний период изменения статистически незначимы.

Среднегодовая температура воздуха увеличилась на 1,4 °С. Самое значительное потепление наблюдается в зимний период – на 2,0 °С, весенний – 1,7 °С.

МС Камня-на-Оби. Согласно линейному тренду, годовое количество осадков с 1966 по 2018 г. увеличилось на 40 мм в основном за счёт осени (14 мм), весны и зимы (по 10 мм).

Среднегодовая температура воздуха увеличилась на 1,7 °С. Самое значительное потепление наблюдается в зимний и весенний периоды – на 2,2 и 2,0 °С соответственно, летний и осенний – на 1,0 °С.

МС Бийска. Согласно линейному тренду, годовое количество осадков за 53-летний период уменьшилось на 40 мм. В основном за счёт зимы (30 мм) и лета (17 мм). Количество осадков за весенний период увеличилось на 10 мм. Среднегодовая температура воздуха увеличилась на 1,9 °С. Самое значительное потепление наблюдается в зимний и весенний периоды – на 3,0 и 2,0 °С соответственно.

Статистики показателей отдельно температуры и отдельно количества осадков недостаточно для анализа взаимосвязи погодных условий и урожайности. Для сельского хозяйства важно сочетание температуры воздуха и наличия осадков. Для оценки гидротермических условий за каждый месяц вегетационного периода был использован гидротермический коэффициент (ГТК) Г.Т. Селянинова. Обеспеченность растений влагой определяется в зависимости от значений ГТК: <0,4 – сухая зона; 0,41–0,7 – очень засушливая; 0,71–1,0 – засушливая; 1,1–1,3 – слабозасушливая; 1,31–1,6 – влажная зона; >1,6 – избыточно влажная зона [15].

Наиболее распаханными ландшафтами в Алтайском крае являются территории степной и лесостепной зональных областей – более 60 % территории составляют земли сельскохозяйственного назначения, а доля пашни в них может достигать 80 %, как, например, в границах Кулундинского и Табунского МО [16–19]. Рассматриваемые ландшафтные области являются важными территориями в производстве сельскохозяйственной продукции и при этом уязвимыми. Значения ГТК МС Славгорода и Камня-на-Оби соответствуют очень засушливым территориям – 0,6, а МС Ребрихи и Рубцовска – засушливым – 0,73 и 0,8 соответственно.

Так как в сельском хозяйстве каждый месяц вегетационного периода имеет свое значение и особенности, были построены графики отклонений величины ГТК от среднего многолетнего значения (100 %) по месяцам. Для определения периода нормы в распределении ряда было использовано стандартное отклонение.

Наибольшие отклонения от среднеемноголетнего ГТК для всех МС наблюдаются в период май – июль, при этом есть годы как значительного увеличения (в июле 2009 г. ГТК МС Славгорода составил 2,6 при норме 0,6–1,0), так и снижения (в мае 1999 г. для МС Рубцовска ГТК – 0,1 при норме 0,4–1,0). Стоит отметить, что для МС Рубцовска и Ребрихи отклонения от норм ГТК наблюдаются весь вегетационный период.

В контексте зависимости урожайности от тенденций ГТК важно рассматривать его динамику по месяцам, а не только по среднегодовым значениям. Так, для МС Славгорода за исследуемый период 1966–2018 гг. ГТК вегетационного периода практически не меняется (0,6). Однако если подробнее рассмотреть период с 1991 г. (он считается периодом наиболее интенсивных социальных и экономических изменений), то заметно снижение значений ГТК. Не меняется он в июне и июле, в мае наблюдается рост, в августе и сентябре – снижение. Как раз такие колебания в течение вегетационного периода и определяют будущую урожайность (табл. 2).

Таблица 2/ Table 2

Изменение ГТК на МС Алтайского края /
The change of the hydrothermal coefficient at meteorological stations of the Altai Krai

МС	Среднее многолетнее значение ГТК 1966–2018	Изменение среднего годового значения ГТК 1966–218	Изменение ГТК по месяцам 1991–2018 ¹				
			Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь
Барнаул	0,8	↔	↑0,4	↓0,5	↑0,5	↓0,3	↑1,2
Бийск	1,0	↔	↔	↓0,4	↑0,4	↓0,4	↓0,9
Славгород	0,6	↔	↑0,15	↔	↔	↓0,3	↓0,4
Рубцовск	0,7	↔	↑0,2	↔	↔	↑0,1	↓0,7
Ребриха	0,8	↔	↓0,2	↑0,5	↑0,4	↓0,3	↓0,1
Солонешное	1,5	↑	↑↑1,6	↓0,3	↑0,7	↔	↑0,4
Камень-на-Оби	0,6	↔	↑0,2	↔	↑0,1	↓0,1	↓0,7
Змеиногорск	1,3	↑	↑0,5	↑0,1	↑0,1	↓0,8	↓0,9

Примечание. ↔ изменения статистически незначимы или их нет; ↓ – уменьшение; ↓ – увеличение; цифра рядом – насколько именно.

Рассчитанные нами суммы осадков за период активной вегетации и за каждый месяц для исследуемых станций показали, что максимум осадков приходится на июль и июнь, а минимум – на сентябрь (рис. 2).

Важное значение для формирования урожая имеют не только среднесезонные и месячные показатели ГТК, но и его экстремальные значения. Для исследуемой территории неблагоприятными атмосферными явлениями являются засухи. На основании градации значений ГТК выделяют следующие виды засухи: очень сильная – $\leq 0,3$; сильная – $0,31-0,6$; средняя – $0,61-0,8$; слабая – $\geq 0,81$ [20–22]. Для исследуемой территории выявлена повторяемость очень сильных и сильных засух. Наибольшее число отмечено на МС в степной зональной области: Камень-на-Оби и Славгород – 49,1 % – с сильными засухами и 3,8 % – с очень сильными. Для МС Ребрихи и Рубцовска за исследуемый период очень сильных засух не отмечено, сильных – 28,3 и 35,8 % соответственно.

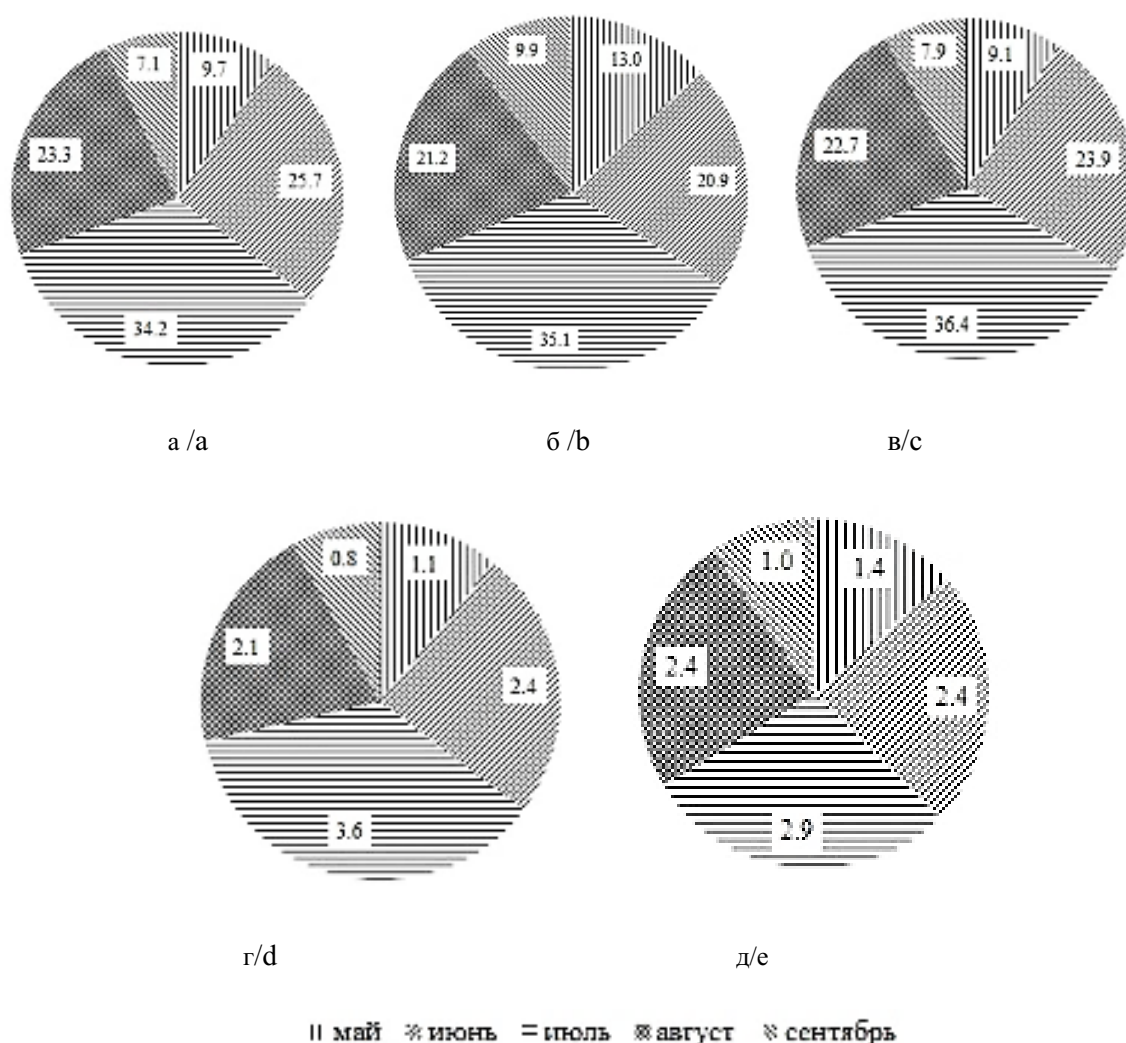
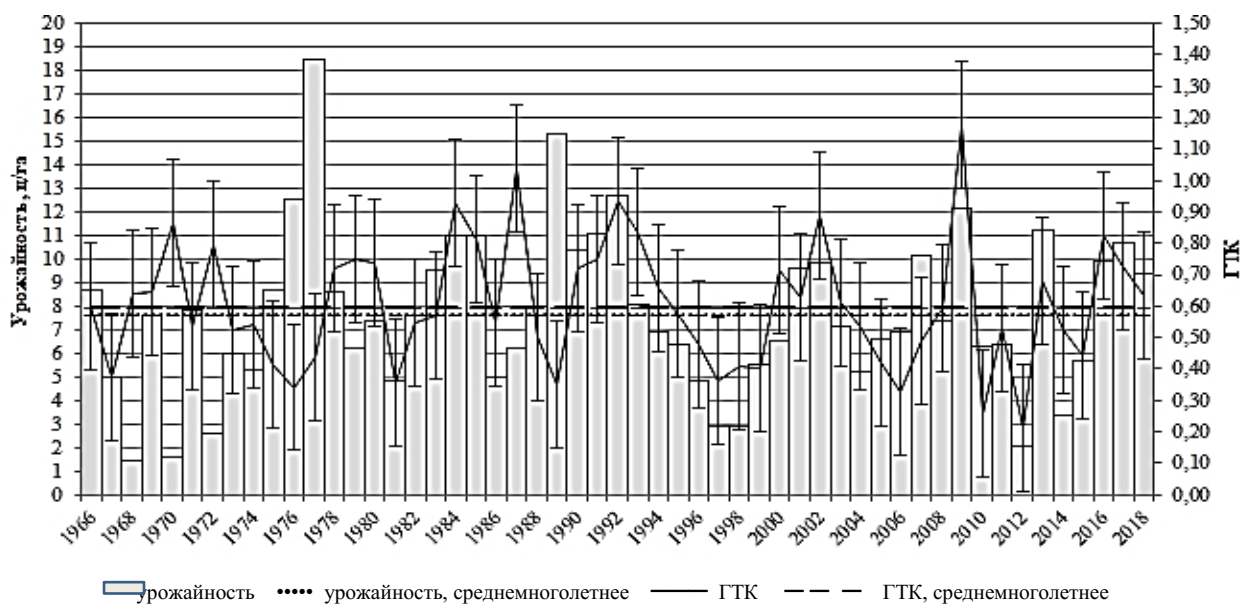
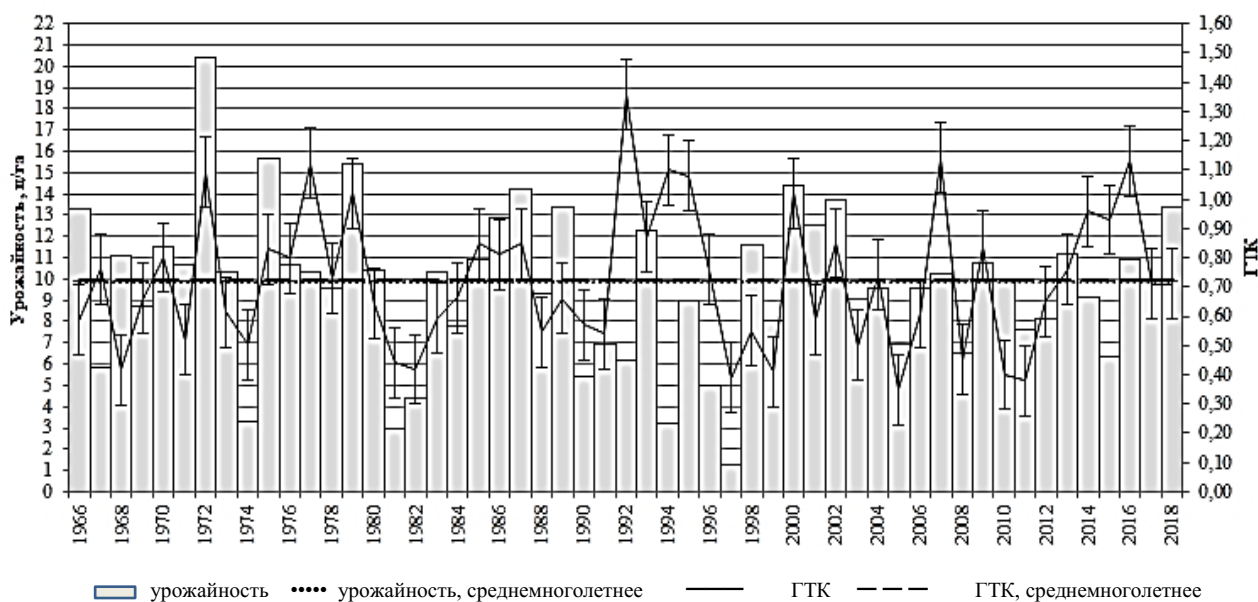


Рис. 2. Вклад каждого месяца в сумму осадков вегетационного периода, %: МС Славгорода (а), Рубцовска (б), Камня-на-Оби (в), Ребрихи (г) и Бийска (д) / Fig. 2. Contribution of each month to the amount of precipitation of the growing season, %: metrological stations in Slavgorod (a), Rubtsovsk (b), Kamen-na-Obi (c), Rebriha (d), Biisk (e)

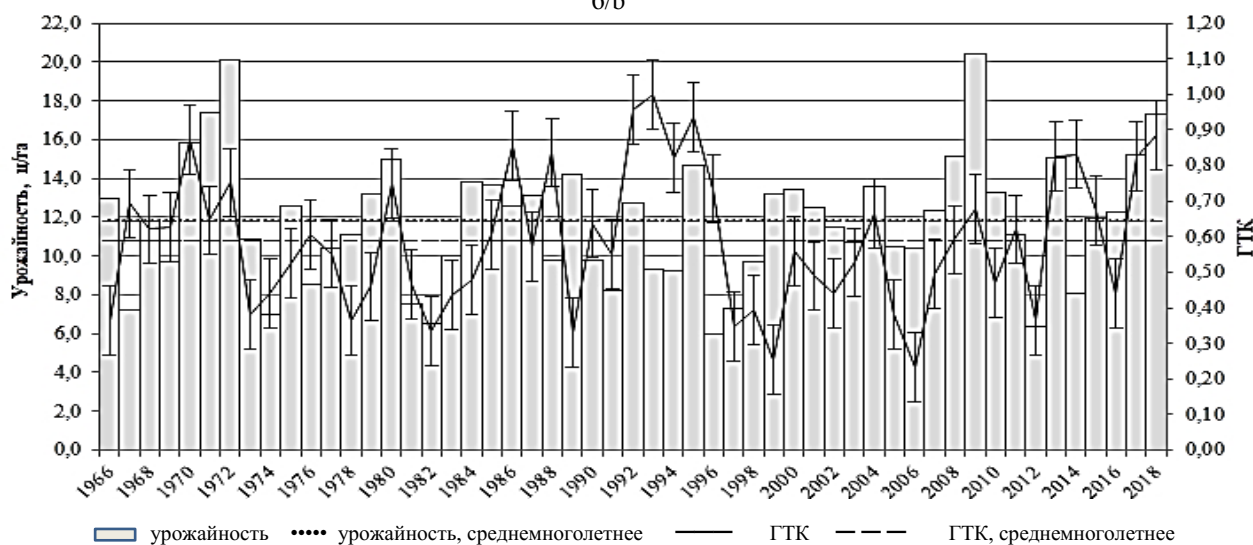
Урожайность. По рассчитанным значениям ГТК проводился анализ зависимости урожайности зерновых культур МО Алтайского края от режима увлажнения [12, 13]. На рис. 3 представлен временной ход коэффициента ГТК за вегетационный период и урожайности зерновых культур за 1966–2018 гг.



а/а



б/б



в/в

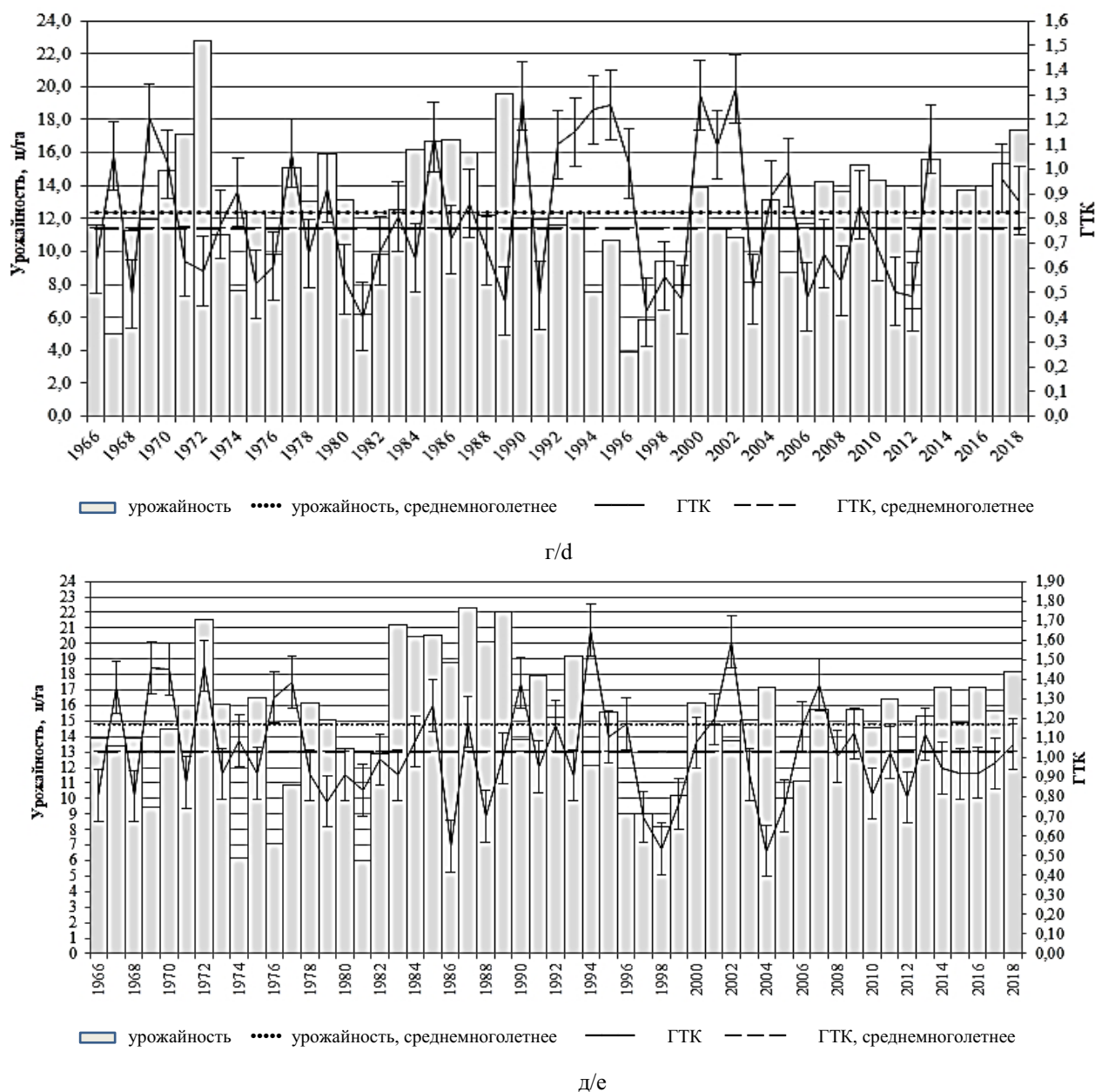


Рис. 3. Динамика коэффициента ГТК с погрешностями на МС Славгорода (а), Рубцовска (б), Камня-на-Оби (в), Ребрихи (г), Бийска (д) и урожайности зерновых культур МО Алтайского края / Fig. 3. HTC coefficient at metrological stations in Slavgorod (a), Rubtsovsk (b), Kamen-na-Obi (c), Rebriha (d), Biisk (e) and the yield of grain crops in the regions of the Altai Krai

Согласно проведенным расчетам, графики изменений значений ГТК согласуются с динамикой урожайности зерновых культур Алтайского края. Урожайность в среднем для всех исследуемых МО составляет 12 ц/га, за исключением Славгорода – 7 ц/га, что характерно в большинстве случаев для значений ГТК > 0,7 и соответствует засушливым условиям увлажнения. Максимальных значений урожайность достигает при значениях ГТК, находящихся в режиме незначительно выше нормы. Для Славгорода и Каменского района максимальная урожайность (12 и 20 ц/га при ГТК 1,2 и 1,0 соответственно) была в 2009 г. В этом же году отмечен один из самых высоких показателей урожайности в Ребрихинском районе – 15 ц/га, максимальный – 17 ц/га в 2018 г. при значениях ГТК 1,0. В Рубцовском районе максимальная урожайность была в 2000 г. – 14 ц/га при ГТК, равном 1,0. В годы с наибольшими значениями урожайности среднемесячный максимум ГТК отмечен в мае и июле, с наименьшей урожайностью – среднемесячный минимум ГТК наблюдается в мае-июне, а максимум – в августе.

Выводы

В условиях современных климатических изменений на территории Алтайского края главными природными факторами, определяющими урожайность, являются гидротермические характеристики переходных сезонов, а также распределение влаги в период активной вегетации растений. В отношении влагообеспеченности отмечается незначительная аридизация климата, в основном за счет уменьшения в последние десятилетия индекса ГТК.

За исследуемый период динамика урожайности неодинакова для МО, расположенных в разных природных условиях. Для Верхне-Обской ландшафтной провинции урожайность остается стабильной (Ребрихинский район) или растет (Бийский и Каменский районы – на 1 ц/га). На территории Кулундинской ландшафтной провинции также отмечен небольшой рост – на 0,6 ц/га (Славгород). Для Южно-Приалейской ландшафтной провинции наблюдается обратная ситуация – значительное сокращение – 1,4 ц/га (Рубцовский район).

Выявленные нормы ГТК и урожайности и их отклонения подтверждают, что одним из ведущих факторов является гидротермическая характеристика переходных сезонов. Для минимальных значений урожайности зерновых культур Алтайского края (от 1,5–2,0 ц/га в Рубцовском до 6 ц/га в Каменском районах) величина ГТК равна 0,2–0,4 (май – июнь 1996–1997 и 2012 гг.). Максимальные значения урожайности зерновых от 12 ц/га в Славгороде до 20 ц/га в Каменском районе отмечены при ГТК 1,2 и 1,0 в мае и июле 2009 г.

В целом благоприятные агроклиматические условия для возделывания большинства зерновых и зернобобовых культур создаются на территории лесостепной зональной ландшафтной области со значением ГТК, равным 1,0 (Бийский район), для наиболее ценных твердых сортов пшеницы – степной со значением ГТК 0,6–0,7 (Каменский, Ребрихинский и Рубцовский районы, Славгород).

Список источников

1. *Lipka O.N.* Methodological approaches to climate change vulnerability assessment of protected areas // Nature Conservation Research. 2017. Vol. 2 (3). P. 68-79. Doi: 10.24189/ncr.2017.036.
2. *Qasim Jan M., Khazima M., Arshad A.* Global warming, climate change and its threats to sustainable agriculture // Regional problems. 2018. № 3-1. P. 36–39. Doi: 10.31433/1605-220X-2018-21-3(1)-37-40.
3. *Bondar V.S., Fursa A.V., Gumentyk M.Ya., Svystunova I.V.* Climate Change: Apocalyptic Prognosis and Reality // Ukrainian J. of Ecology. 2020. № 2. P. 273–278. Doi: 10.15421/2020_96.
4. *Грингоф И.Г., Пасечнюк А.Д.* Агрометеорология и агрометеорологические наблюдения. СПб.: Гидрометеиздат, 2005. 552 с.
5. *Носырева О.В.* Климатические показатели термического режима теплого периода и их современные тенденции для юга Западной Сибири: дис. ... канд. географ. наук. Томск: Томский гос. ун-т, 2012. 176 с.
6. Опустынивание засушливых земель России: новые аспекты анализа, первые результаты, проблемы / А.В. Дроздов, А.Н. Золотокрылин, А.Ф. Мандыч [и др.]. М.: Товарищество научных изданий КМК, 2009. 298 с.
7. *Salampessy Yudi L.A., Lubis Djuara P., Amien Le Istiqlal, Suharjito Didik.* Analyzing the adaptive capacity to climate change of the rice farmers: a case study of pasuruan Regency, East Java, Indonesia // Russian J. of Agricultural and Socio-Economic Sciences. 2018. № 3 (75). P. 155–161. Doi: 10.18551/rjoas.2018-03.17.
8. *Žutinić Đ., Sušac M.Z.* Perception of climate change a survey among agricultural advisors // Экономика польпривреде. 2021. № 2. P. 307–320. Doi: 10.5937/ekoPolj2102307Z.
9. *Nguyen Chien Thang, Ha Huy Ngoc, Tran Thi Tuyet.* Climate change adaptation policies of Vietnam in the Mekong Delta // Russian J. of Vietnamese Studies. Series 2. 2020. № 3. P. 36–45. Doi: 10.24411/2618-9453-2020-10023.
10. *Heij G.J.* Recent information on the impacts of climate change // Вычислительные технологии. 2006. Т. 11, ч. 2. С. 123–134.
11. Специализированные массивы для климатических исследований. URL: <http://aisori-m.meteo.ru/waisori/> (дата обращения: 20.08.2021).
12. Федеральная служба государственной статистики. База данных показателей муниципальных образований. Алтайский край. URL: <https://gks.ru/dbscripts/munst/munst01/DBInet.cgi> (дата обращения: 15.06.2021).
13. *Красноярова Б.А.* Географические основы устойчивого развития аграрного природопользования в сибирских регионах: автореф. дис. ... д-ра геогр. наук. Барнаул, 2005. 50 с.
14. Ландшафтная карта Алтайского края. Масштаб 1:500 000 / науч. рук. Ю.И. Винокуров. Барнаул: ИВЭП СО РАН, 2016.
15. *Чирков Ю.И.* Агрометеорология. Л.: Гидрометиздат, 1979. 320 с.

16. Агропромышленный комплекс Алтайского края. 2004–2008: стат. сб. / Территориальный орган Федеральной службы государственной статистики по Алтайскому краю. Барнаул, 2009. 60 с.
17. Посевные площади сельскохозяйственных культур под урожай 2015 г. в Алтайском крае: стат. бюл. / Территориальный орган Федеральной службы государственной статистики по Алтайскому краю. Барнаул, 2016. 60 с.
18. Рыгалова Н.В., Быков Н.И., Плуталова Т.Г. Ретроспективное изучение динамики урожайности сельскохозяйственных культур в Алтайском крае методом дендрохронологии // Вестн. Алтайского гос. аграр. ун-та. 2014. № 10. С. 43–49.
19. Стратегическое управление устойчивым развитием аграрного природопользования в Алтайском крае / под ред. Ю.И. Винокурова. Барнаул, 2010. 163 с.
20. Доклад о климатических рисках на территории Российской Федерации. СПб., 2017. 106 с.
21. Дроздов О.А. Засухи и динамика увлажнения. Л.: Гидрометеиздат, 1980. 93 с.
22. IPCC. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / T.F. Stocker, D.Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P. M. Midgley, eds. Cambridge; New York: Cambridge University Press, 2013. 1535 p. Doi: 10.1017/CBO9781107415324.

References

1. Lipka O.N. Methodological approaches to climate change vulnerability assessment of protected areas. *Nature Conservation Research*. 2017;2(3):68-79, doi: 10.24189/ncr.2017.036.
2. Qasim Jan M., Khazima M., Arshad A. Global warming, climate change and its threats to sustainable agriculture. *Regional Problems*. 2018;(3-1):36-39, doi: 10.31433/1605-220X-2018-21-3(1)-37-40.
3. Bondar V.S., Fursa A.V., Gumentyk M.Ya., Svystunova I.V. Climate Change: Apocalyptic Prognosis and Reality. *Ukrainian Journal of Ecology*. 2020;(2):273-278, doi: 10.15421/2020_96.
4. Gringof I.G., Pasechnyuk A.D. *Agrometeorology and agrometeorological observations*. St. Petersburg: Gidrometeoizdat Publ.; 2005. 552 p. (In Russ.).
5. Nosyreva O.V. *Climatic indicators of the thermal regime of the warm period and their current trends for the south of Western Siberia*. Dissertation. Tomsk: Tomsk State University Press; 2012. 176 p. (In Russ.).
6. Drozdov A.V., Zolotokrylin A.N., Mandych A.F. et al. *Desertification of the arid lands of Russia: new aspects of analysis, first results, problems*. Moscow: Association of Scientific Publications of the KMK; 2009. 298 p. (In Russ.).
7. Salampessy Yudi L.A., Lubis Djuara P., Amien Le Istiqlal, Suhartjito Didik. Analyzing the adaptive capacity to climate change of the rice farmers: a case study of pasuruan Regency, East Java, Indonesia. *Russian J. of Agricultural and Socio-Economic Sciences*. 2018;(3):155-161, doi: 10.18551/rjoas.2018-03.17.
8. Žutinić Đ., Sušac M.Z. Perception of climate change a survey among agricultural advisors. *Economics of Agriculture*. 2021;(2):307-320, doi: 10.5937/ekoPolj2102307Z.
9. Nguyen Chien Thang, Ha Huy Ngoc, Tran Thi Tuyet. Climate change adaptation policies of Vietnam in the Mekong Delta. *Russian J. of Vietnamese Studies. Series 2*. 2020;(3):36-45, doi: 10.24411/2618-9453-2020-10023.
10. Heij G.J. Recent information on the impacts of climate change. *Computational Technologies*. 2006;11(2):123-134.
11. *Specialized arrays for climate research*. Available from: <http://aisori-m.meteo.ru/waisori> [Accessed 20th August 2021]. (In Russ.).
12. *Federal State Statistics Service. Database of indicators of municipalities. Altai Territory*. Available from: <https://gks.ru/dbscripts/munst/munst01/DBInet.cgi> [Accessed 15th June 2021]. (In Russ.).
13. Krasnoyarova B.A. *Geographical foundations of sustainable development of agricultural nature management in Siberian regions*. Dissertation Thesis. Barnaul, 2005. 50 p. (In Russ.).
14. Vinokurov Yu.I., scientific supervisor. *Landscape map of the Altai Territory. Scale 1:500 000*. Barnaul: IVEP SB RAS Press; 2016. (In Russ.).
15. Chirkov Yu.I. *Agrometeorology*. Leningrad: Gidrometizdat Publ.; 1979. 320 p. (In Russ.).
16. *Agro-industrial complex of the Altai Territory. 2004-2008: statistical collection*. Territorial body of the Federal State Statistics Service for the Altai Territory. Barnaul, 2009. 60 p. (In Russ.).
17. *Sown areas of agricultural crops for the 2015 harvest in the Altai Territory: stat. byul.* Territorial body of the Federal State Statistics Service for the Altai Territory. Barnaul, 2016. 60 p. (In Russ.).
18. Rygalova N.V., Bykov N.I., Plutalova T.G. Retrospective study of crop yield dynamics in the Altai Territory by dendrochronology method. *Vestn. Altaiskogo gos. agrar. un-ta = Bulletin of Altai State Agricultural University*. 2014;(10):43-49. (In Russ.).
19. Vinokurov Yu.I., ed. *Strategic management of sustainable development of agrarian nature management in the Altai Territory*. Barnaul, 2010. 163 p. (In Russ.).
20. *Report on climate risks in the territory of the Russian Federation*. St. Petersburg, 2017. 106 p. (In Russ.).

21. Drozdov O.A. *Droughts and moisture dynamics*. Leningrad: Gidrometizdat Publ.; 1980. 93 p. (In Russ.).

22. Stocker T.F., Qin D., Plattner G.-K., Tignor M., Allen S. K., Boschung J., Nauels A., Xia Y., Bex V., Midgley P. M., eds. *IPCC. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge; New York: Cambridge University Press; 2013. 1535 p., doi: 10.1017/CBO9781107415324.

Информация об авторах

Т.Г. Плуталова – научный сотрудник лаборатории ландшафтно-водноэкологических исследований и природопользования.

Е.О. Чернова – научный сотрудник лаборатории ландшафтно-водноэкологических исследований и природопользования.

Information about the authors

T.G. Plutalova - Researcher of Laboratory of Landscape and Water-Ecological Research.

E.O. Chernova - Researcher of Laboratory of Landscape and Water-Ecological Research.

Статья поступила в редакцию 26.07.2022; одобрена после рецензирования 26.08.2022; принята к публикации 02.03.2023.
The article was submitted 26.07.2022; approved after reviewing 26.08.2022; accepted for publication 02.03.2023.

Научная статья

УДК 551.510.5

doi: 10.18522/1026-2237-2023-1-112-119

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАВНОВЕСИЯ СТОЛБА СЖИМАЕМОЙ АТМОСФЕРЫ. ЧАСТЬ 3: НЕСТАЦИОНАРНЫЕ РЕШЕНИЯ

Анатолий Анатольевич Радионов

Южный математический институт Владикавказского научного центра РАН, Владикавказ,
Республика Северная Осетия – Алания, Россия
aar200772@mail.ru

Аннотация. В рамках упрощенной одномерной аэродинамической модели описываются периодические осцилляции температуры во времени для неограниченного сверху столба сжимаемой атмосферы. При получении модели используются два условия равновесия столба воздуха: классическое гидростатики и второе – отсутствие движения вследствие изменений плотности атмосферы во времени. Полученные аналитические и численные решения удовлетворяют двум граничным условиям: значениям давления, плотности или температуры и соответствующего градиента вблизи твердой поверхности. Для адиабатической температуры, давления и плотности получены нестационарные пульсирующие решения. Обсуждается физическая интерпретация этих решений и сопоставляется с данными палеоклиматических исследований. Результаты исследования улучшают понимание протекающих периодических процессов и пульсаций в атмосфере и могут быть использованы в научных и образовательных целях.

Ключевые слова: аналитическая модель, столб сжимаемой атмосферы, равновесие столба атмосферы, квазинелинейные дифференциальные уравнения, климатическая модель, осцилляция температуры

Для цитирования: Радионов А.А. Математическая модель равновесия столба сжимаемой атмосферы. Часть 3: Нестационарные решения // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. 2023. № 1. С. 112–119.

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

Original article

MATHEMATICAL STUDY OF EQUILIBRIUM OF THE COLUMN OF COMPRESSIBLE ATMOSPHERIC AIR. PART 3: NON-STATIONARY SOLUTIONS

Anatoly A. Radionoff

Southern Mathematical Institute - the Affiliate of Vladikavkaz Scientific Center, Russian Academy of Sciences,
Vladikavkaz, Republic of North Ossetia - Alania, Russia
aar200772@mail.ru

Abstract. Within the simplified one-dimensional aerodynamic model, periodic temperature oscillations are described for a column of compressible atmosphere unlimited from above. When obtaining the model, two conditions for the equilibrium of the air column are used: the classical condition of hydrostatics and the second - the

absence of movement due to changes in the density of the atmosphere over time. The obtained analytical and numerical solutions satisfy two boundary conditions near a solid surface: the value of a quantity (pressure, density, or temperature) and its gradient. Solutions for adiabatic temperature, pressure, and density show a non-stationary pulsating solution, in which the column temperature periodically increases indefinitely at the moment of pulsation and then decreases. The physical interpretation of these solutions is discussed and compared with the data of paleoclimatic studies. The results of the study improve the understanding of ongoing periodic processes and pulsations in the atmosphere and can be used for scientific and educational purposes.

Keywords: analytical model, column of compressible fluid, equilibrium of the fluid column, nonlinear equation, climatic model, temperature oscillation

For citation: Radionoff A.A. Mathematical Study of Equilibrium of the Column of Compressible Atmospheric Air. Part 3: Non-Stationary Solutions. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2023;(1):112-119. (In Russ.).

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

Введение

Одной из классических задач физики атмосферы является задача о нахождении равновесного давления или температуры в неподвижном столбе атмосферы. Решение описывается во множестве монографий и учебников по физике атмосферы [1–7]. При нулевых скоростях течения воздуха в столбе несжимаемой атмосферы уравнения движения упрощаются до гипсометрического, которое интегрируется с учетом уравнения состояния. Получается барометрическая формула. Она является стационарной и удовлетворительно описывает измерения, но показывает некоторые отличия выше 8 км. Обзор работ, посвященных анализу процессов выделения тепла на высотах стратосферы, можно найти в [3, 6, 7].

В [7, 8] показано, что климатические условия вблизи поверхности изменяются на больших временных интервалах и квазипериодически пульсируют. Периоды потепления сменяются периодами похолодания [8]. Эти данные свидетельствуют, что состояние равновесия столба атмосферы не является стационарным.

Математическая модель

Барометрическая формула не учитывает сжимаемости воздуха, т.е. принимается неизменность плотности во времени. Равновесие столба сжимаемой атмосферы в [9] описывается уравнением

$$\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} - \frac{2}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial t} \right)^2 = \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} + g \frac{\partial \rho}{\partial z} + \rho \frac{\partial g}{\partial z} + (\mu_1 + \mu_2) \frac{\partial^2}{\partial z^2} \left(\frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial t} \right), \quad (1)$$

где p – давление; ρ – плотность; z – вертикальная координата, отсчитываемая вверх от поверхности; g – ускорение свободного падения, принимаемое константой; t – время; μ_1 и μ_2 – вязкость воздуха в приближении Экмана [10]. Это уравнение учитывает два условия равновесия столба сжимаемой атмосферы. В [9] обсуждается критерий необходимости учета сжимаемости воздуха при описании равновесия столба атмосферы высотой более 12 км и использование упрощений.

Пусть $p = A\rho^\gamma$, где A – константа; $\gamma = 1,4$ – показатель адиабаты. В этом случае уравнение (1) записывается для адиабатической температуры T , плотности и давления в виде

$$\frac{\partial^2 T}{\partial t^2} - \frac{\gamma}{\gamma-1} \frac{1}{T} \left(\frac{\partial T}{\partial t} \right)^2 = c^2 \left(\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{1}{\gamma-1} \frac{1}{T} \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)^2 \right) + g \frac{\partial T}{\partial z} + (\gamma-1) T \frac{\partial g}{\partial z}, \quad (2)$$

$$\frac{\partial^2 \rho}{\partial t^2} - \frac{2}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial t} \right)^2 = c^2 \left(\frac{\partial^2 \rho}{\partial z^2} + \frac{\gamma-1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial z} \right)^2 \right) + g \frac{\partial \rho}{\partial z} + \rho \frac{\partial g}{\partial z}, \quad (3)$$

$$\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} - \frac{\gamma+1}{\gamma} \frac{1}{p} \left(\frac{\partial p}{\partial t} \right)^2 = c^2 \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} + g \frac{\partial p}{\partial z} + \gamma p \frac{\partial g}{\partial z}, \quad (4)$$

где $c^2 = \gamma R_a T$ – квадрат скорости звука.

Граничные условия для уравнения (2)

$$\frac{\partial T}{\partial z} (z = 0, t) = T_{zb}(t), T(z = 0, t) = T_b(t), \quad (5)$$

для уравнения (3) –

$$\frac{\partial \rho}{\partial z}(z = 0, t) = \rho_{zb}(t), \rho(z = 0, t) = \rho_b(t), \quad (6)$$

для (4) –

$$\frac{\partial p}{\partial z}(z = 0, t) = p_{zb}(t), p(z = 0, t) = p_b(t), \quad (7)$$

где $p_{zb}(t), p_b(t)$ – известные функции времени.

В качестве начальных условий для решений уравнений (2)–(4) примем некоторые профили $\theta_s(z), p_s(z), \rho_s(z)$, известные из данных эксперимента в некоторый момент времени $t = 0$.

Если турбулентная вязкость записывается в виде $\mu_1 = \mu_1(t, z)$, то левая часть уравнения (1) изменится:

$$\frac{\partial^2 \rho}{\partial t^2} + \frac{1}{\rho^2} \left(\frac{\partial \rho}{\partial z} \frac{\partial \mu_1}{\partial z} - \rho \frac{\partial^2 \mu_1}{\partial z^2} \right) \frac{\partial \rho}{\partial t} - \frac{2}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial t} \right)^2 = \dots, \quad (8)$$

а уравнение (2) можно переписать в виде

$$\frac{\partial^2 T}{\partial t^2} + \frac{1}{\rho_b T^{\gamma-1}} \left(\frac{1}{\gamma-1} \frac{\partial T}{\partial z} \frac{\partial \mu_1}{\partial z} - T \frac{\partial^2 \mu_1}{\partial z^2} \right) \frac{\partial T}{\partial t} - \frac{\gamma}{\gamma-1} \frac{1}{T} \left(\frac{\partial T}{\partial t} \right)^2 = \dots \quad (9)$$

Результаты численного анализа уравнений (8), (9) представлены ниже. Уравнения (2)–(4), описывающие равновесие столба сжимаемой атмосферы, зависят от времени, и при некоторых дополнительных упрощениях могут быть записаны их нестационарные решения.

Решение для температуры

Решение стационарного уравнения (2) зависит от времени [9]. Имеется еще одна зависимость от времени, возникающая для нестационарного уравнения (2).

Примем упрощающие предположения: $g = \text{Const}$, $\partial g / \partial z = g_z = \text{Const}$; $c = c_0 = \text{Const}$. Будем искать решение в виде $T(t, z) = F(t)G(z)$, где $F(t)$ – функция времени; $G(z)$ – функция вертикальной координаты. Подставив этот вид решения в уравнение (2), получим два независимых уравнения:

$$\frac{d^2 F}{dt^2} - \frac{\gamma}{\gamma-1} \frac{1}{F} \left(\frac{dF}{dt} \right)^2 = \lambda_T F, \quad (10)$$

$$c_0^2 \left(\frac{d^2 G}{dz^2} + \frac{1}{\gamma-1} \frac{1}{G} \left(\frac{dG}{dz} \right)^2 \right) + g \frac{dG}{dz} + (\gamma - 1) g_z G = \lambda_T G. \quad (11)$$

Эти уравнения включают произвольный постоянный параметр λ_T . Далее будут рассматриваться только частные решения (10), (11), полученные при каком-то конкретном значении параметра λ_T , для определения которого нужно привлекать дополнительные данные, например из наблюдений.

При $\lambda_T < 0$ уравнению (10) удовлетворяет вещественное выражение, которое на больших временах стремится к нулю тем быстрее, чем больше модуль λ_T . Откажемся от отрицательных значений параметра λ_T как противоречащих наблюдениям.

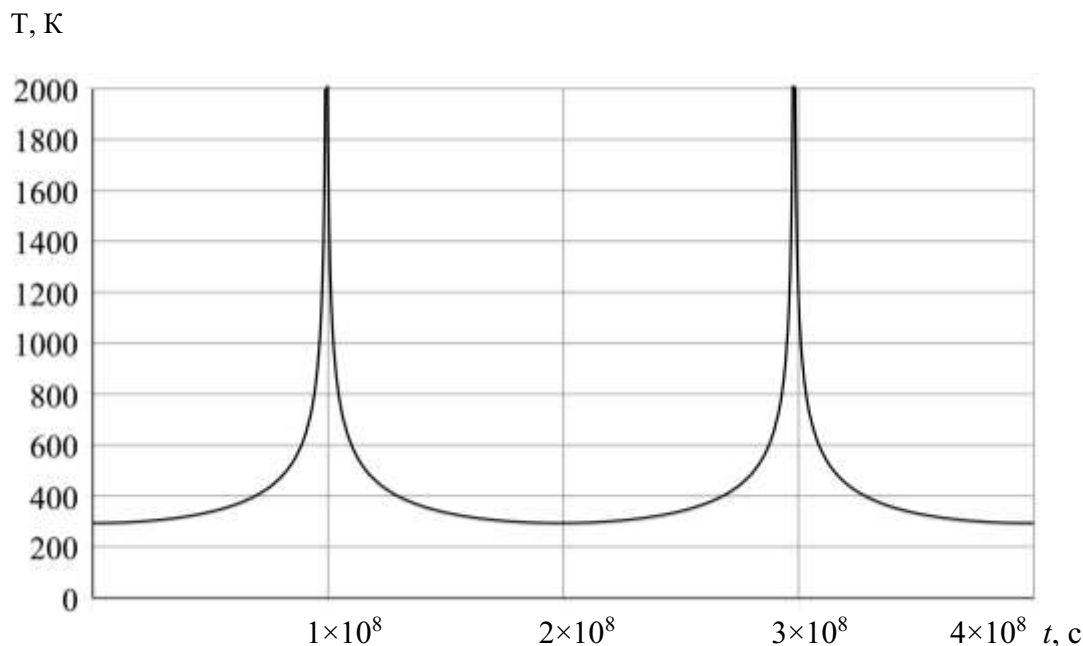
При положительных λ_T решение уравнения (10) имеет вид

$$F(t) = \frac{[\lambda_T(\gamma-1)]^{\frac{\gamma-1}{2}}}{\left[\left(C_1 \cos\left(t \sqrt{\frac{\lambda_T}{\gamma-1}}\right) - C_2 \sin\left(t \sqrt{\frac{\lambda_T}{\gamma-1}}\right) \right)^2 \right]^{\frac{\gamma-1}{2}}}, \quad (12)$$

где C_1, C_2 – постоянные интегрирования.

В решении (12) возникают периодические сингулярности, поскольку знаменатель этого выражения периодически достигает нуля при ненулевых λ_T (рисунок). Острые максимумы температуры разделены длительными периодами времени, которые расположены между точками сингулярностей, в течение которых температура изменяется незначительно.

Для определения постоянных C_1, C_2 выберем начальное условие в момент времени, соответствующий минимальным значениям температуры (рисунок), при этом $C_2 = 0$. В этот момент времени определена функция $T_s(z)$, отражающая профиль температуры. На рисунке $T_s = 293$ К.



Зависимость $T(t)$ при $\lambda_T = 10^{-16} \text{ c}^{-2}$ / Dependence $T(t)$ at $\lambda_T = 10^{-16} \text{ s}^{-2}$

Решение уравнения (2) записывается в виде произведения (12) на решение уравнения (11) [9]:

$$T = T_S \frac{\exp\left(\frac{-z g(\gamma-1) + \sqrt{\delta}}{2\gamma c_0^2}\right)}{\cos^2\left(t \sqrt{\frac{\lambda_T}{\gamma-1}}\right)^{\frac{\gamma-1}{2}}} \left[\frac{\gamma^2 c_0^4}{\delta} \left(C_3 \exp\left(\frac{z\sqrt{\delta}}{(\gamma-1)c_0^2}\right) - C_4 \right)^2 \right]^{\frac{\gamma-1}{2\gamma}}, \quad (13)$$

где $\delta = (\gamma - 1) \left(4\gamma\lambda_T c_0^4 - 4\gamma g_z c_0^2 (\gamma - 1) + g^2 (\gamma - 1) \right)$,

$$C_3 = T_b^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \left(\frac{T_{zb}}{T_b} + \frac{g(\gamma-1) + \sqrt{\delta}}{2\gamma c_0^2} \right), C_4 = T_b^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \left(\frac{T_{zb}}{T_b} + \frac{g(\gamma-1) - \sqrt{\delta}}{2\gamma c_0^2} \right).$$

Решение (13) не содержит мнимой части и является вещественным для любого момента времени. Зависимость от времени решения (13), изображенная на рисунке, является строго периодическими пульсациями при $\lambda_T > 0$.

При различных значениях параметра λ_T высота, на которой возникает особая точка решения (13), отличается при одинаковых значениях граничных условий T_b и T_{zb} . Увеличение λ_T приводит к увеличению высоты особой точки, а уменьшение λ_T – к уменьшению этой высоты. Для малых $\lambda_T \approx 10^{-20} \text{ c}^{-2}$ эта зависимость пренебрежимо мала.

Численный анализ уравнения (2). Решение нестационарного уравнения (2) при скорости звука $c^2 = \gamma R_a T$ аналитически найти не удастся. Это решение можно найти при помощи численного интегрирования. Будем искать решение в виде $T(t, z) = \vartheta(t)\theta(z)$, где $\theta(z)$ – некоторый профиль температуры, заданный в размерном виде; $\vartheta(t)$ – безразмерная функция порядка единицы. Подставим в уравнение (2). Получим обыкновенное дифференциальное уравнение

$$\frac{d^2 \vartheta}{dt^2} - \frac{\gamma}{\gamma-1} \frac{1}{\vartheta} \left(\frac{d\vartheta}{dt} \right)^2 = K_1 \vartheta^2 + K_2 \vartheta, \quad (14)$$

где

$$K_1 = \gamma R_a \left(\frac{d^2 \theta}{dz^2} + \frac{1}{\gamma-1} \frac{1}{\theta} \left(\frac{d\theta}{dz} \right)^2 \right), K_2 = \frac{g}{\theta} \frac{d\theta}{dz} + (\gamma - 1) g_z$$

можно оценить из экспериментальных данных для θ . Начальное условие для (14) выберем в виде $\vartheta(t = 0) = \vartheta_S = 1$. В уравнении (14) интерес представляет зависимость решения от времени.

В численном решении уравнения (14) возникает расходимость в некоторой точке. Для ее устранения используем поведение аналитического решения (13) для частного случая $c = c_0$. Алгоритм численного решения уравнения (14) необходимо модифицировать: в момент времени,

когда температура увеличивается до значения $> 10^4$ К, меняется знак первой производной температуры по времени на противоположный. Численное решение уравнения (14) с такой модификацией алгоритма показывает хорошее совпадение численного и аналитического решений при $c = c_0$ (при прочих одинаковых параметрах) и позволяет проинтегрировать уравнение (14) для произвольного интервала времени. С учетом зависимости скорости звука от времени и рассмотренных модельных профилей $\theta(z)$ в численном решении возникают сингулярности (рисунок).

Решение для давления

Аналитическое решение для давления зависит от времени. Для уравнения (4) примем упрощения: $g = \text{Const}$, $\partial g / \partial z = g_z = \text{Const}$, $c = c_0 = \text{Const}$. Решение ищется в виде $T(t, z) = F(t)G(z)$, где $F(t)$ – функция времени, $G(z)$ – вертикальной координаты. После подстановки в (4) получаются два уравнения:

$$\begin{aligned} \frac{d^2 F}{dt^2} - \frac{\gamma+1}{\gamma} \frac{1}{F} \left(\frac{dF}{dt} \right)^2 &= \lambda_p F, \\ c_0^2 \frac{d^2 G}{dz^2} + g \frac{dG}{dz} + \gamma G g_z &= \lambda_p G, \end{aligned} \quad (15)$$

где λ_p – постоянный параметр.

От отрицательных значений λ_p следует отказаться, поскольку в этом случае решение стремится к нулю с течением времени. Для $\lambda_p > 0$ решение

$$F(t) = (\gamma \lambda_p)^{\gamma/2} \left([C_5 \sin(t\sqrt{\lambda_p/\gamma}) - C_6 \cos(t\sqrt{\lambda_p/\gamma})]^2 \right)^{-\gamma/2}, \quad (16)$$

где C_5, C_6 – произвольные постоянные. Функция (16) периодически во времени достигает бесконечных значений в виде острых пиков (рисунок).

Откажемся от независимой от высоты части решения уравнения (15). В этом случае решение уравнения (15) переходит в гидростатическую формулу [2]. Решение уравнения (4) записывается в виде

$$p = p_s \left[\cos^2 \left(t \sqrt{\frac{\lambda_p}{\gamma}} \right) \right]^{-\frac{\gamma}{2}} \exp \left(- \frac{g + \sqrt{g^2 - 4(\gamma g_z - \lambda_p) c_0^2}}{2c_0^2} z \right). \quad (17)$$

В выражение (17) вошел неопределенный параметр λ_p , для которого верны замечания, сделанные относительно параметра λ_T .

Решение для плотности

Решение уравнения (3) ищется в виде $\rho(t, z) = F(t)G(z)$, где $F(t)$ – функция времени; $G(z)$ – функция вертикальной координаты при условиях $g = \text{Const}$, $\partial g / \partial z = g_z = \text{Const}$, $c = c_0 = \text{Const}$. После подстановки в (3) получаются два уравнения, временная зависимость определяется уравнением

$$\frac{d^2 F}{dt^2} - \frac{2}{F} \left(\frac{dF}{dt} \right)^2 = \lambda_\rho F,$$

где λ_ρ – постоянный параметр. При отрицательных значениях λ_ρ решение этого уравнения стремится к нулю во времени. При положительных λ_ρ

$$F(t) = (\lambda_\rho)^{1/2} \left([C_7 \sin(t\sqrt{\lambda_\rho}) - C_8 \cos(t\sqrt{\lambda_\rho})]^2 \right)^{-1/2}, \quad (18)$$

где C_7, C_8 – произвольные постоянные. Функция (18) периодически во времени достигает бесконечных значений в виде острых пиков (рисунок). Пространственная часть (3) записывается в виде

$$c_0^2 \left(\frac{d^2 \rho}{dz^2} + \frac{\gamma-1}{\rho} \left(\frac{d\rho}{dz} \right)^2 \right) + g \frac{d\rho}{dz} + \rho g_z = \lambda_\rho G.$$

Постоянные интегрирования определяются из граничных условий (6). Начальное условие примем в виде $\rho(t = 0) = \rho_s$, после чего решение уравнения (3) приобретает вид (при $C_7 = 0$)

$$\rho = \frac{\rho_s}{\sqrt{\cos^2(t\sqrt{\lambda_\rho})}} \left(\frac{\gamma c_0^2}{\delta} \right)^{\frac{1}{\gamma}} \left[\left(C_9 \exp\left(\frac{z\delta}{c_0^2}\right) - C_{10} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2\gamma}} \exp\left(-\frac{z(\gamma+\delta)}{2\gamma c_0^2}\right), \quad (19)$$

где $\delta^2 = g^2 - 4c_0^2(\gamma g_z - \lambda_\rho)$,

$$C_9 = \rho_b^\gamma \left(\frac{\rho_{zb}}{\rho_b} + \frac{g+\delta}{2\gamma c_0^2} \right), C_{10} = \rho_b^\gamma \left(\frac{\rho_{zb}}{\rho_b} + \frac{g-\delta}{2\gamma c_0^2} \right).$$

Обсуждение результатов

В работе рассматривается аналитическая модель, описывающая равновесное состояние столба сжимаемой атмосферы с учетом двух необходимых условий равновесия. Первое требует отсутствия вертикального движения воздуха, что следует из уравнения движения, второе – того же из уравнения неразрывности при изменении во времени плотности. Совместный учет этих двух факторов приводит к уравнению (1). Критерии и необходимость учета сжимаемости для столба атмосферы обсуждаются в [9].

Для адиабатического сжимаемого столба атмосферы уравнение (1) упрощается и может быть записано в виде (2)–(4). В настоящей работе показаны численные и аналитические решения этих уравнений, полученные при дополнительном упрощающем условии постоянства скорости звука. Это – физическое упрощение и отражает некоторые физические процессы [9]. Более общую зависимость скорости звука от вертикальной координаты и времени можно учесть, используя численные методы.

Решения (13), (17), (19) уравнений (2)–(4) положительны и непрерывны по высоте и почти во всех точках положительны и непрерывны по времени. Значение адиабатической температуры периодически достигает бесконечных значений по времени. В точке сингулярности меняется знак первой производной адиабатической температуры по времени на обратный (с $+\infty$ на $-\infty$). При этом в модели не используются источники тепла, действующие выше поверхности внутри столба воздуха, а скорость изменения адиабатической температуры является источником в уравнении теплопроводности, определяющем абсолютную температуру [9].

Адиабатическое приближение применимо на относительно коротких временных промежутках [5, 6]. Для атмосферы такой промежуток времени оценивается около 3 сут. Поскольку уравнения (2)–(4) описывают относительно быстрые процессы, протекающие со скоростью звука, для их получения адиабатическое приближение представляется приемлемым. Оценка показывает, что высоты 100 км происходящие вблизи поверхности изменения плотности достигают через ≈ 5 мин. Этот промежуток времени гораздо меньше, чем 3 сут, и адиабатическое приближение для решения уравнения (1) представляется работоспособным.

Для каждого из решений уравнений (2)–(4) частота возникающих периодических сингулярностей может отличаться. Однако нет оснований различать пульсационные процессы для разных величин, поскольку адиабатическая атмосфера полностью характеризуется какой-то одной величиной, например давлением. И величины λ_T , λ_p , λ_ρ в решениях уравнений (3)–(5) можно подобрать так, чтобы они описывали одну частоту пульсаций.

Одна из возможностей оценить величину параметра λ_T – это историческая реконструкция периодических изменений климатических условий вблизи поверхности планеты. По геохронологическим данным [7, 8], в прошлом случались периоды похолоданий и последующих потеплений атмосферы. Если оценивать λ_T по хронологии этих событий, интервал времени 350 лет соответствует значению $\lambda_T \approx 10^{-19} \text{ с}^{-2}$. Именно такие промежутки времени просматриваются в графиках работы [8]. Более длительному интервалу десять тысяч лет соответствует значение $\lambda_T \approx 10^{-22} \cdot \text{с}^{-2}$.

Изображенная на рисунке зависимость аналитического решения (13) для температуры от времени показывает, что как нагрев всего столба атмосферы, так и ускорение во времени нагрева могут являться свойством сжимаемой атмосферы [11], а решение (13) может оказаться полезным инструментом при анализе этих измерений.

Учитывая огромное множество происходящих в атмосфере явлений, трудно точно выразить зависимость турбулентной вязкости по высоте столба атмосферы и во времени. Однако наиболее существенные изменения турбулентной вязкости происходят в пограничном слое атмосферы.

Для примера рассмотрим результаты моделирования эксперимента Wangara для 33-го и 34-го дней [12, 13]. Этот эксперимент проводился непрерывно несколько месяцев и посвящен измерению характеристик пограничного слоя атмосферы. Показано, что в дневное время турбулентная вязкость возрастает до 100 Па·с на высоте, не превышающей 1000 м, и уменьшается до значений ниже 1 Па·с в ночное время [13]. Выше 1000 м суточные изменения турбулентной вязкости не превышают 1 Па·с все время суток

Используя эти результаты, можно получить оценки: $\partial\mu_1/\partial z \sim 0,5$ Па·с/м² и $\partial^2\mu_1/\partial z^2 \sim 0,01$ Па·с/м² для дневного времени. Для ночного времени эти оценки еще меньше. Производные $\partial\mu_1/\partial z$ и $\partial^2\mu_1/\partial z^2$, входящие в уравнение (9), являются периодическими функциями времени, которые можно выразить суммой гармонических функций.

Множество численных решений автора с идеализированными значениями функций $\partial\mu_1/\partial z$ и $\partial^2\mu_1/\partial z^2$ (заданными различными периодическими функциями, моделирующими суточные вариации граничных условий) показывает неизменное существование пульсирующего характера решения уравнения (9), подобное изображенному на рисунке.

Заключение

Учет сжимаемости столба атмосферы приводит к уравнениям (2)–(4), и при дополнительном предположении о постоянстве скорости звука записывается аналитическое решение этих уравнений. Аналитическая модель столба сжимаемой атмосферы может быть полезным инструментом для оценки характеристик атмосферы и их поведения во времени и с высотой.

Полученные решения показывают, что в атмосфере могут возникать периодические температурные пульсации, причиной появления которых являются эндогенные свойства столба сжимаемой атмосферы. Аналитическое исследование уравнений аэродинамики улучшает понимание сложных процессов, протекающих в атмосфере, позволяет сузить интервалы параметров, для которых необходимо строить подробное численное решение в тех случаях, когда недостаточно точности аналитического решения.

Список источников

1. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. Т. VI: Гидродинамика. М.: Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит.-ры, 1988. 736 с.
2. Скорер Р. Аэрогидродинамика окружающей среды. М.: Мир, 1980. 551 с.
3. Моханкумар К. Взаимодействие стратосферы и тропосферы. М.: Физматлит, 2011. 452 с.
4. Эккарт К. Гидродинамика океана и атмосферы. М.; Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2004. 238 с.
5. Гилл А. Динамика атмосферы и океана: в 2 т. М.: Мир, 1986. Т. 1. 396 с. Т. 2. 415 с.
6. Salby M.L. Fundamentals of Atmospheric Physics. San Diego: Elsevier Science, Academic Press, 1996. 627 p.
7. Randall D.A., Wood R.A., Bony S., Colman R., Fife J., Kattsov V., Pitman A., Shukla J., Srinivasan J., Stouffer R.J., Sumi A., Taylor K.E. Climate Models and Their Evaluation // Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge; New York: Cambridge University Press, 2007.
8. Клименко В.В. Климат: непрочитанная глава истории. М.: МЭИ, 2009. 408 с.
9. Радионов А.А. Математическая модель равновесия столба сжимаемой атмосферы. Часть 1: Стационарные решения для температуры // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2022. № 3. С. 79–90.
10. Ekman V.W. On the influence of the Earth's rotation on ocean currents // Arkiv. Matematik. Astron. Fysik. 1905. Vol. 2. P. 1–53.
11. Yangyang Xu, Veerabhadran R., David G.V. Global warming will happen faster than we think // Nature. 2018. Vol. 564.
12. Clarke R.H., Dyer A.J., Brook R.R., Reid D.G., Troup A.J. The Wangara experiment: Boundary layer data // CSIRO Division of Meteorological Physics Tech. 1971. Vol. 19. P. 358.
13. Yamada T., Mellor G. A simulation of the Wangara Atmospheric Boundary Layer Data // J. Atmos. Sci. 1975. Vol. 32. P. 2309–2329.

References

1. Landau L. D., Lifshitz E. M. *Theoretical physics. Vol. VI: Hydrodynamics*. Moscow: Nauka Publ., Main Editorial Office of Physical and Mathematical Literature; 1988. 736 p. (In Russ.).
2. Scorer R. *Aerohydrodynamics of the environment*. Moscow: Mir Publ.; 1980. 551 p. (In Russ.).
3. Mohankumar K. *Interaction of the stratosphere and the troposphere*. Moscow: Fizmatlit Publ.; 2011. 452 p. (In Russ.).
4. Ekkart K. *Hydrodynamics of the ocean and atmosphere*. Moscow; Izhevsk: SIC Regular and chaotic dynamics Press; 2004. 238 p. (In Russ.).
5. Gill A. *Dynamics of the atmosphere and ocean*: in 2 vol. Moscow: Mir Publ.; 1986. Vol. 1. 396 p. Vol. 2. 415 p. (In Russ.).
6. Salby M.L. *Fundamentals of Atmospheric Physics*. San Diego: Elsevier Science, Academic Press; 1996. 627 p.
7. Randall D.A., Wood R.A., Bony S., Colman R., Fichet T., Fyfe J., Kattsov V., Pitman A., Shukla J., Srinivasan J., Stouffer R.J., Sumi A., Taylor K.E. *Climate Models and Their Evaluation. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge; New York: Cambridge University Press; 2007.
8. Klimenko V. V. *Climate: an unread chapter of history*. Moscow: Moscow Power Engineering Institute Press; 2009. 408 p. (In Russ.).
9. Radionoff A. A. Analytical study of equilibrium of the compressible column of atmospheric air. Part 1: Stationary solution for temperature. *Izv. vuzov. Sev.-Kavk. region. Estestv. nauki = Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science*. 2022;(3):79-90. (In Russ.).
10. Ekman V. W. On the influence of the Earth's rotation on ocean currents. *Arkiv. Matematik. Astron. Fysik*. 1905;2:1-53.
11. Yangyang Xu, Veerabhadran R., David G. V. Global warming will happen faster than we think. *Nature*. 2018;564.
12. Clarke R. H., Dyer A. J., Brook R. R., Reid D. G., Troup A. J. The Wangara experiment: Boundary layer data. *CSIRO Division of Meteorological Physics Tech*. 1971;19:358.
13. Yamada T., Mellor G. A simulation of the Wangara Atmospheric Boundary Layer Data. *J. Atmos. Sci*. 1975;32:2309-2329.

Информация об авторе

А.А. Радионов – кандидат технических наук, научный сотрудник, лаборатория математического моделирования.

Information about the author

A.A. Radionoff - Candidate of Science (Technical Science), Researcher, Laboratory of the Mathematical Modeling.

Статья поступила в редакцию 28.07.2022; одобрена после рецензирования 10.08.2022; принята к публикации 02.03.2023.
The article was submitted 28.07.2022; approved after reviewing 10.08.2022; accepted for publication 02.03.2023.

Научная статья

УДК 556.182

doi: 10.18522/1026-2237-2023-1-120-128

УПРАВЛЕНИЕ ВОДНЫМИ РЕСУРСАМИ В МИРЕ

Татьяна Сергеевна Фролова

Институт географии РАН, Москва, Россия

bibikova@igras.ru

Аннотация. Сделан обзор существующих подходов к управлению водными ресурсами на международном уровне. Показана специфика управления водными ресурсами в развитых и развивающихся странах. Проанализированы особенности внедрения интегрированного управления водными ресурсами в странах мира. Рассмотрены основные структуры, осуществляющие мониторинг и контроль за состоянием трансграничных водных объектов. Рассмотрены особенности продвижения Водной рамочной директивы в странах ЕС. Анализ системы управления водными ресурсами на международном уровне позволяет более комплексно оценивать состояние мировых водных ресурсов.

Ключевые слова: управление водными ресурсами, водное хозяйство, трансграничные водные объекты, международные бассейновые комиссии, Водная рамочная директива

Благодарности: исследования выполнены в рамках темы государственного задания Института географии РАН FMGE-2019-0007 (AAAA-A19-119021990093-8).

Для цитирования: Фролова Т.С. Управление водными ресурсами в мире // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. 2023. № 1. С. 120–128.

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

Original article

WATER RESOURCES MANAGEMENT IN THE WORLD

Tatiana S. Frolova

Institute of Geography RAS, Moscow, Russia

bibikova@igras.ru

Abstract. The article provides an overview of existing approaches to water resources management at the international level. The specificity of water resources management in developed and developing countries has been shown. The features of the implementation of integrated water resources management in the countries of the world have been analysed. The main governing bodies that monitor and control the state of transboundary water bodies have been considered. The peculiarities of the promotion of the Water Framework Directive in the EU countries have been shown. The analysis of the water resources management system at the international level allows a more comprehensive assessment of the state of the world's water resources.

Keywords: water resources management, water industry, transboundary water bodies, international river basin commissions, Water Framework Directive

Acknowledgments: the research was carried out within the framework of the state task of the Institute of Geography RAS FMGE-2019-0007 (AAAA-A19-119021990093-8).

For citation: Frolova T.S. Water Resources Management in the World. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2023;(1):120-128. (In Russ.).

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

© Фролова Т.С., 2023

Введение

Система управления водными ресурсами отдельной страны во многом определяется ее культурно-историческим потенциалом. Традиционно в мире не было предусмотрено самостоятельной управляющей структуры или закона, регулирующих использование водных ресурсов. При этом в настоящее время в развитых странах современный подход к управлению постепенно заменил устаревшие законы и политику, что не всегда можно сказать о развивающихся странах, где культурные, религиозные и различные научные течения, обусловленные колонизацией, во многом сыграли и продолжают играть решающую роль [1–3]. Это значит, что управление водными ресурсами в таких странах сосредоточено лишь на водопользовании и разделении водных ресурсов, практически игнорируя вопросы их охраны и рационального использования. Во многих странах водное законодательство осталось на уровне тех времен, когда вода считалась неисчерпаемым ресурсом, что полностью перестало соответствовать современным реалиям [3–7].

Последователи таких международных научных течений, как институциональный либерализм и неореализм, считают, что вода в скором времени станет причиной серьезных конфликтов из-за ее политического значения, дефицита, нерационального использования и территориального разделения. В первую очередь это касается территорий, расположенных в нижних течениях рек, поскольку они напрямую зависят от влияния на сток вышерасположенных стран. Кроме того, конфликты по поводу водных ресурсов в будущем могут обостряться из-за современных изменений климата, что отразится на водном балансе и, как следствие, на системах ирригации и водоснабжения [2, 8, 9].

Согласно разным источникам, в мире насчитывается более 300 международных речных бассейнов, количество которых постоянно обновляется [9–11]. Известно, что в них проживает более 40 % населения Земли, населяющих 150 стран, из которых 30 полностью расположены на территории международных речных бассейнов (включая Беларусь, Австрию, Венгрию, Швейцарию, Словакию, Армению, Сербию, Черногорию и др.). Суммарно международные бассейны занимают порядка 47 % территории суши и составляют, по различным подсчетам, от 54 до 80 % речного стока планеты [10–13].

Подобное распределение территории речных бассейнов нередко приводит к межнациональным конфликтам, что отчасти обусловлено длительным нерациональным воздействием гидротехнических сооружений на окружающую среду: от дефицита водных ресурсов до затоплений территории. В некоторых случаях водные споры являются результатом фундаментальных идеологических конфликтов [9, 14–20].

Подходы к управлению водными ресурсами

Среди сложившихся подходов к управлению водными ресурсами можно выделить традиционный подход: например, датский подход, преобразованный в итоге в законодательство, определяющее общественное владение и пользование ресурсами; римское право (подразумевает разделение водных ресурсов на общие, муниципальные и частные), которое оказало влияние на формирование водного законодательства части континентальной и островной Европы; гражданское право, которое разделило ресурсы на две категории: частные и общие (при этом пользуются водными ресурсами те, в чьей собственности они находятся, такой подход частично характерен для Испании, Португалии, Франции, Бельгии и Нидерландов и их бывших колоний, Центральной и Южной Америки и Филиппин); общее право – взяло свое начало в Великобритании и распространилось на колонии (в основе лежит прибрежное водопользование); мусульманский подход, в котором вода является божественным даром и не может принадлежать частным лицам, однако они не освобождены от платы за пользование водными ресурсами (некоторые мусульманские страны, например Турция и Иран, приняли закон о национализации воды, подразумевающий обязательное получение права на ее использование; также в Иордане, Алжире и Иране вода была признана собственностью государства, однако в большинстве мусульманских стран вода условно остается собственностью народа и регулируется шариатом); коммунистический подход подразумевает, что вода находится в собственности государства (характерно для стран пост-

советского пространства и Китая); индуистское водное право (сохранилось только на Бали, в Бутане и Непале), которое поддерживает идею о том, что вода не может кому-то принадлежать, а правом пользования обладает община [1–7, 21, 22].

Во многих странах также законодательно поддерживается концепция приоритетного использования водных ресурсов во времена водных кризисов. Например, водное законодательство бывшего СССР закрепило за местными властями право запрещать или ограничивать использование питьевой воды в промышленных целях в периоды нехватки воды. Кроме того, все водопользователи обязаны использовать воду рационально. В США в отдельных штатах (например, Миннесота) законодательством обозначен приоритет использования водных ресурсов во время засухи: бытовое водоснабжение, безвозвратное потребление не более 10 тыс. галлонов (порядка 38 тыс. л) в день, орошение, производство электроэнергии и прочее использование. В Тайване в 1983 г. в закон о воде были внесены поправки, определяющие приоритет бытового водоснабжения над прочими типами использования воды. В Зимбабве в 1998 г. также был принят закон, выдвигающий на первое место питьевое водоснабжение, а также водоснабжение животноводства. В национальном законе о водных ресурсах Южноафриканской Республики 1998 г. уделяется приоритетное внимание конкретным видам использования воды, в частности, он определяет систему создания резервуаров для обеспечения водой населения и природных экосистем. Питьевое водоснабжение становится приоритетным тогда, когда признается право человека на воду, что не всегда характерно для развивающихся стран. К примеру, в Индии приоритетным до сих пор является ирригационное водопользование [1, 2, 4–6, 23–26].

В большинстве стран право на воду определяется в количественных показателях в единицу времени. Однако в некоторых странах и регионах это право определяется как доля в водном объекте. Такой подход характерен для древних ирригационных систем, таких, например, как система ирригации субак на о. Бали, локализованное орошение через резервуары в Шри-Ланке, система плотин и каналов в Непале, канатное орошение в Иране и Мексике. Также долевое право на воду сохранилось в некоторых регионах Испании как следствие мусульманской оккупации на рубеже первого тысячелетия. Долевое право на воду часто возникало в тех местах, где инвестиции в водный объект были высокими. Вклад в эти инвестиции определял индивидуальную долю в распределении водных ресурсов. Примечательно, что в Чили права на воду определяются в абсолютных единицах объема в единицу времени, при этом правом на воду можно торговать. Однако в случае нехватки воды право на воду уменьшается пропорционально дефициту, возникающему в бассейне реки или источнике воды. Пропорциональные права могут также продаваться на рынке воды. В некоторых странах, например в Колумбии, все источники воды являются собственностью государства, при этом частная собственность на воду возможна, если источник воды естественным образом испаряется и возвращается в землю, находящуюся в частном владении. Однако закон устанавливает утерю собственности на воду после трех лет неиспользования земли [1–4, 6, 27, 28].

Интегрированное управление водными ресурсами

В настоящее время многие развивающиеся страны пытаются внедрить интегрированное управление водными ресурсами, однако даже разработка и внедрение соответствующего законодательства не означают последовательное его исполнение. В 1987 г. Индия разработала национальную водную политику, которая предписывала справедливое распределение водных ресурсов и устойчивое использование урожая. Однако политика не имела большого эффекта, так как не были организованы соответствующие контролируемые структуры, которые должны следить за исполнением закона [2, 6, 29–31].

В развитых странах интегрированное управление водными ресурсами внедряется быстрее благодаря более чуткому реагированию экономики на инструменты регулирования, хорошей мониторинговой базе, относительно равномерному уровню жизни населения, политике, направленной на устойчивое развитие. Однако в развитых странах не все институциональные системы поддерживают интеграцию, что часто мешает эффективному внедрению инструментов разумного управления ресурсами, а также ослабляет их связь с национальной политикой государств [29–31].

В свою очередь, в развивающихся странах система управления ресурсами построена в основном сверху вниз, что упрощает задачу внедрения интегрированного управления, а также позволяет вводить систему постепенно и локально, ориентируясь на сохранение или изменение традиций, связанных с водными ресурсами, отдельные слои населения, регулирование конфликтов, состояние гидротехнических сооружений и т.п. С другой стороны, сознательный подход к управлению требует более весомых финансовых инвестиций, что далеко не всегда возможно в рамках развивающегося государства. Кроме того, непонимание сложных комплексных актов, регулирующих водопользование, право на водные ресурсы, необходимость унификации законодательства относительно различных слоев и категорий населения, фактическая невозможность контроля исполнения изменений в водном законодательстве сильно осложняют внедрение рационального подхода к использованию воды на уровне государства и общества.

Международные речные бассейновые комиссии

Одним из органов, призванных решать водные проблемы на международном уровне, являются международные речные бассейновые комиссии.

В Европе существует несколько таких комиссий, регулирующих вопросы судоходства, использования воды и гидроэнергетики. Например, существует Центральная комиссия судоходства по Рейну, задача которой – решать вопросы судоходства по реке. Комиссия включает представителей из Франции, Германии, Нидерландов, Швейцарии и Великобритании, которые могут давать странам соответствующие рекомендации. При этом экологическое состояние самой реки контролируется Международной комиссией по защите Рейна, которая появилась после строительства Большого Эльзасского канала в 1950 г. В ее функции входят сбор и распространение информации о состоянии реки, а также анализ и составление отчета об улучшении гидрологических показателей. Однако сама комиссия не имеет законодательной власти, а ее постановления носят рекомендательный характер. В случае если они одобрены странами-членами, комиссия осуществляет дальнейший мониторинг [32].

Белградская конвенция 1948 г. регулирует вопросы, касающиеся р. Дунай. Однако энергетика и судоходство регулируются отдельным органом – Дунайской комиссией. Помимо этого, существует международное соглашение прибрежных стран о загрязнении и сохранении окружающей среды (некоторые прибрежные страны к нему не присоединились: Швейцария, Албания, Италия, Польша, Македония) [33].

В Северной Америке была создана специальная международная комиссия между США и Канадой в 1909 г. Она включает 6 представителей, по 3 с каждой стороны. В юрисдикции комиссии находятся вопросы, касающиеся всех трансграничных водотоков в регионе. Если какой-то проект может повлиять на состояние реки, комиссия должна выдать свое согласие перед его реализацией [34].

США и Мексикой также была организована комиссия по вопросам международных границ и водных ресурсов (кроме подземных). Она состоит из 2 представителей, имеющих право организовывать дополнительные комиссии. Ее решения должны быть одобрены обоими правительствами [28].

В Южной Америке бассейн р. Плата контролируется межправительственной комиссией, которая является результатом соглашений между Аргентиной, Боливией, Бразилией, Парагваем и Уругваем. В комиссию входят по одному представителю из каждой страны [35].

В Азии с 1995 г. существует комиссия по р. Меконг для продвижения сотрудничества Камбоджи, Лаоса, Таиланда и Вьетнама (с 2002 г. Китай и Мьянма присоединились как партнеры по диалогу, таким образом, все прибрежные страны в настоящее время работают вместе) [36].

В 1960 г. была создана комиссия по р. Инд между Индией и Пакистаном, с одним представителем от каждой страны. В ее компетенцию входили мониторинг, исследования и совместная организация проектов. Однако с 2016 г. Индия заявила о намерении пересмотреть и прекратить водное соглашение. В 2019 г. действие договора было приостановлено, что привело к ужесточению конфликта между странами. Переговоры возобновились с 2021 г. Также в 1996 г. Индия и Бангладеш образовали совместный комитет по р. Ганг [37, 38].

В Африке постоянная объединенная комиссия была создана Египтом и Суданом в 1958 г., она регулировала распределение воды р. Нил между странами, а также вопросы строительства Асуанского гидроузла. Комиссия обязана планировать и проводить проверки, внедрение проектов и распределение воды [19, 20].

Река Нигер протекает через 9 стран (Бенин, Буркина-Фасо, Камерун, Кот-д'Ивуар, Гвинея, Мали, Нигер, Нигерия, Чад). Комиссия по р. Нигер была основана в 1964 г. Основной ее функцией является продвижение идеи сотрудничества между прибрежными странами, преимущественно в областях водных ресурсов, энергетики, сельского и лесного хозяйства и транспорта [39].

Река Замбези, четвертая по величине в Африке, обеспечивает водой 8 стран (Ангола, Ботсвана, Малави, Мозамбик, Намибия, Танзания, Замбия и Зимбабве). Среди населения этих стран только порядка 30 % имеют доступ к чистой воде и санитарно-медицинским услугам. Однако в регионе не наблюдается серьезных конфликтов, что может впоследствии измениться из-за возрастающего уровня загрязнения реки. После долгих переговоров в 2004 г. была создана комиссия по р. Замбези, которая продвигает идею разумного и равноправного использования водных ресурсов наравне с эффективным управлением и устойчивым развитием [40].

Водная рамочная директива

Помимо международных бассейновых комиссий, на территории Европы с 2000 г. действует система интегрированного управления водными бассейнами. Она призвана поддерживать поверхностные и подземные воды Европейского союза в хорошем состоянии. Оценивается нагрузка отдельно на каждый водный объект, и вырабатывается система специальных мер по восстановлению его экологического, биологического, химического и физического состояния. Новые страны – члены ЕС также обязаны имплементировать Водную директиву, несмотря на характерное для них в прошлом влияние коммунистической модели управления водными ресурсами (когда вода почти полностью принадлежит государству). Некоторые будущие потенциальные страны – члены ЕС, например Турция, также имеют совсем иную модель подхода к водным ресурсам, обусловленную исламской культурой. Директива предполагает полное изменение водного законодательства в части бассейнового управления и мониторинга состояния поверхностных и подземных водных ресурсов. Она также включает в себя контроль за источниками загрязнения и сохранением количества воды. Директива требует от стран внедрения планов по управлению речными бассейнами, основанных на активном общественном участии и установлении эффективной системы оплаты за ресурсы.

Водная рамочная директива оценивается как наиболее значимый юридический инструмент, который является максимально прозрачным и понятным для успешного управления качеством и количеством воды. Однако некоторые вещи остаются неясными до сих пор, например, степень контроля за состоянием водных объектов, а также сам термин «хорошее состояние». Возникают некоторые задержки с отчетами о состоянии водных ресурсов стран ЕС, неточное или неполное внедрение основ Водной директивы в местные законодательства. Кроме того, большинство стран не владеет соответствующими средствами и методами оценки биологического состояния водных объектов. Более того, как показывают исследования, страны по-разному интерпретируют положения Водной директивы [41, 42].

Выводы

Анализ системы управления водными ресурсами на международном уровне позволяет более комплексно оценивать состояние мировых водных ресурсов, учитывая то, что в зарубежной практике в основном используется бассейновый подход к управлению водными ресурсами.

Интегрированный подход к управлению водными ресурсами необходим из-за их ограниченности, постепенного загрязнения, сложной взаимосвязи ресурсов между собой, для разумного распределения между нуждами общества и экосистем, рационального использования гидротехнических сооружений во избежание нежелательных последствий.

Разделение водных ресурсов и распределение территории речных бассейнов между различными странами нередко приводят к межнациональным конфликтам. Одним из органов, призванных решать водные проблемы на международном уровне, являются международные речные бассейновые комиссии. Однако решения большинства комиссий носят рекомендательный характер и не имеют юридической силы.

Водная рамочная директива оценивается как наиболее значимый юридический инструмент, который является максимально прозрачным и понятным для успешного управления качеством и количеством воды. Однако остается невыясненным ряд вопросов, касающихся ее внедрения в законодательную систему новых стран – членов ЕС.

Список источников

1. *Dellapenna J.W., Gupta J.* The evolution of the law and politics of water. Springer, 2009. 416 p.
2. *Gupta J.* (Inter)national Water Law and Governance: Paradigm Lost or Gained? Inaugural address as professor of policy and law on water resources and the environment, Department of Management and Institutions at the UNESCO-IHE, Institute for Water Education in Delft, 22.03.2004. 2004.
3. *Naff T.* Islamic Law and the Politics of Water // The Evolution of the Law and Politics of Water. Springer, 2009. P. 37–52.
4. *Caponera D., Nanni M.* Principles of water law and administration. London: Routledge, 2019. 398 p.
5. *Ramazzotti M.* Readings in Customary African Water Law. FAO Legislative Study, 58. Rome, Italy, 1996.
6. *Singh C.* Water rights and principles of water resources management. New Delhi: Indian Law Institute, 1991. 158 p.
7. *Teclaff L.A.* Water law in historical perspective. Buffalo, USA: William S. Hein Company, 1985. 369 p.
8. *Agyenim J.B.* Investigating institutional arrangements for integrated Water Resource Management in Developing Countries: The Case of the White Volta Basin, Ghana. Amsterdam: VU University, 2011.
9. Transboundary Freshwater Dispute Database (TFDD), Case Studies-Water Conflict Resolution, Department of Geosciences, Oregon State University. URL: <https://transboundarywaters.science.oregonstate.edu/> (дата обращения: 05.11.2022).
10. *McCracken M., Wolf A.* Updating the Register of International River Basins of the world // International J. of Water Resources Development. 2019. Vol. 35, iss. 5. P. 732–782.
11. *Wolf A., Natharius J., Danielson J., Ward B., Pender J.* International river basins of the world // International J. of Water Resources Development. 1999. Vol. 15, iss. 4. P. 387–427.
12. CIA World Factbook. URL: <https://www.cia.gov/library/publications/the-world-factbook/> (дата обращения: 05.11.2022).
13. The United Nations World Water Development Reports. URL: <http://www.unesco.org/new/en/natural-sciences/environment/water/wwap/wwdr/> (дата обращения: 05.11.2022).
14. *Gleick P.H., Heberger M.* Water Conflict Chronology // The World's Water. Washington, DC: Island Press, 2014.
15. Land, Island and Maritime Frontier Dispute (El Salvador/Honduras). Judgment, I.C.J. Reports 1986–1992, 2002–2003.
16. Boundary dispute between Benin and Niger (river Niger): Summary of the Judgment of 12.07.2005. International Court of Justice.
17. Pulp Mills on the River Uruguay (Argentina v. Uruguay): Summary of the Judgment of 20.04.2010. International Court of Justice.
18. *Kalpakian J.* Identity, Conflict and Cooperation in International River Systems. Aldershot: Ashgate Publishers, 2004. 222 p.
19. *Nicol A., Shahin M.* The Nile: moving beyond cooperation. Water Policy Programme, ODI. International Hydrological Programme (IHP) of the United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO). Technical Document in Hydrology. 2003. No. 16.
20. *Nicol A.* The dynamics of river basin cooperation: The Nile and Okavango basins // Transboundary Rivers, Sovereignty and Development: Hydropolitical drivers in the Okavango River Basin, Pretoria: African Water Issue Research Unit, Green Cross International, 2003.
21. *Liu B., Speed R.* Water Resources Management in the People's Republic of China // Water Resources Development. 2009. Vol. 25 (2). P. 193–208.
22. *Mostert E.* Integrated Water Resources Management in the Netherlands: How Concepts Function // J. of Contemporary Water Research and Education. 2006. Iss. 135. P. 19–27.
23. *Hall N.* The North American Great Lakes // The Evolution of the Law and Politics of Water. Springer, 2009. P. 281–299.

24. Kotov V. Russia: Historical Dimensions of Water Management // The Evolution of the Law and Politics of Water. Springer, 2009. P. 139–156.
25. Matinenga E.T. A new water act for Zimbabwe? // Water for agriculture in Zimbabwe: policy and management options for the smallholder sector. Harare: UZ, 2000. P. 219–224.
26. Kidd M. South Africa: The Development of Water Law // The Evolution of the Law and Politics of Water. Springer, 2009. P. 87–105.
27. Donoso G., Melo O. Water Quality Management in Chile: Use of Economic Instruments // Biswas A.K., Braga B., Tortajada C., Rodriguez D.J. (eds.). Water Quality Management in the Americas. Water Resources Development and Management. Berlin, Heidelberg: Springer, 2006. P. 229–251.
28. Hearne R.R. Evolving Water Management Institutions in Mexico // Water Resources Research. 2004. Vol. 40 (12).
29. Boutkan E., Sticker A. Enhanced Water Resources Base for Sustainable Integrated Water Resources Management // Natural Resources Forum. 2004. Vol. 28 (2). P. 150–154.
30. Hooper B. Integrated Water Resources Management: Governance, Best Practice, and Research Challenges // J. of Contemporary Water Research & Education. 2006. Iss. 135. P. 1–7.
31. Hooper B. Integrated River Basin Governance: Learning from International Experience. London: International Water Association Publishing, 2005. 306 p.
32. Central Commission for the Navigation of the Rhine. URL: <https://www.ccr-zkr.org/> (дата обращения: 05.11.2022).
33. Danube Commission. URL: <https://www.danubecommission.org/dc/en/> (дата обращения: 05.11.2022).
34. International Joint Commission. URL: <https://www.ijc.org/en> (дата обращения: 05.11.2022).
35. Treaty on the River Plate Basin // Int. Legal Materials. 1969. Vol. 8, № 5. P. 905–909.
36. Mekong River Commission. URL: <https://www.mrcmekong.org/> (дата обращения: 05.11.2022).
37. The Indus waters treaty 1960 between the Government of India, the Government of Pakistan and the International Bank for Reconstruction and Development. No. 6032. 19.09.1960.
38. Agreement between the Government of the People's Republic of Bangladesh and the Government of the Republic of India on sharing of the Ganges waters at Farakka and on augmenting its flows. No. 16210. 05.11.1977.
39. Autorite du Bassin du Niger. URL: <http://www.abn.ne/> (дата обращения: 05.11.2022).
40. Mikiyasu N. Politics behind Zambezi Action Plan // Water Policy. 1998. Vol. 1, iss. 4. P. 397–409.
41. Bruin E.F.L.M. de, Jaspers G.W., Gupta J. The EU Water Framework Directive: challenges for institutional implementation // J. Vermaat (ed.). Challenges in Coastal Zone Management in the EU. Springer, 2005. P. 153–169.
42. Kelly M., Bennett C., Coste M., Delgado C., Delmas F., Denys L., Ector L., Fauville C., Ferréol M., Golub M., Jarlman A., Kahlert M., Lucey J., Ni Chatháin B., Pardo I., Pfister P., Picinska-Faltynowicz J., Rosebery J., Schranz C., Schaumburg C., van Dam H., Vilbaste S. A comparison of national approaches to setting ecological status boundaries in phytobenthos assessment for the European Water Framework Directive: results of an inter-calibration exercise // Hydrobiologia. 2009. Vol. 621, № 1. P. 169–182.

References

1. Dellapenna J.W., Gupta J. *The evolution of the law and politics of water*. Springer Publ.; 2009. 416 p.
2. Gupta J. *(Inter) national Water Law and Governance: Paradigm Lost or Gained?* Inaugural address as professor of policy and law on water resources and the environment, Department of Management and Institutions at the UNESCO-IHE, Institute for Water Education in Delft, 22.03.2004. 2004.
3. Naff T. Islamic Law and the Politics of Water. *The Evolution of the Law and Politics of Water*. Springer Publ.; 2009:37-52.
4. Caponera D., Nanni M. *Principles of water law and administration*. London: Routledge Publ.; 2019. 398 p.
5. Ramazzotti M. *Readings in Customary African Water Law*. FAO Legislative Study, 58. Rome, Italy, 1996.
6. Singh C. *Water rights and principles of water resources management*. New Delhi: Indian Law Institute Press; 1991. 158 p.
7. Teclaff L.A. *Water law in historical perspective*. Buffalo, USA: William S. Hein Company Publ.; 1985. 369 p.
8. Agyenim J.B. *Investigating institutional arrangements for integrated Water Resource Management in Developing Countries: The Case of the White Volta Basin, Ghana*. Amsterdam: VU University Press; 2011.
9. Transboundary Freshwater Dispute Database (TFDD), Case Studies-Water Conflict Resolution, Department of Geosciences, Oregon State University. Available from: <https://transboundarywaters.science.oregonstate.edu> [Accessed 5th November 2022].

10. McCracken M., Wolf A. Updating the Register of International River Basins of the world. *International J. of Water Resources Development*. 2019;35(5):732-782.
11. Wolf A., Natharius J., Danielson J., Ward B., Pender J. International river basins of the world. *International J. of Water Resources Development*. 1999;15(4):387-427.
12. *CIA World Factbook*. Available from: <https://www.cia.gov/library/publications/the-world-factbook/> [Accessed 5th November 2022].
13. *The United Nations World Water Development Reports*. Available from: <http://www.unesco.org/new/en/natural-sciences/environment/water/wwap/wwdr/> [Accessed 5th November 2022].
14. Gleick P.H., Heberger M. Water Conflict Chronology. *The World's Water*. Washington; DC: Island Press; 2014.
15. *Land, Island and Maritime Frontier Dispute (El Salvador/Honduras)*. Judgment, I.C.J. Reports 1986-1992, 2002-2003.
16. *Boundary dispute between Benin and Niger (river Niger)*: Summary of the Judgement of July 12, 2005. International Court of Justice.
17. *Pulp Mills on the River Uruguay (Argentina v. Uruguay)*: Summary of the Judgment of April 20, 2010. International Court of Justice.
18. Kalpakian J. *Identity, Conflict and Cooperation in International River Systems*. Aldershot: Ashgate Publ.; 2004. 222 p.
19. Nicol A., Shahin M. *The Nile: moving beyond cooperation*. Water Policy Programme, ODI. International Hydrological Programme (IHP) of the United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO). Technical Document in Hydrology. 2003. No. 16.
20. Nicol A. The dynamics of river basin cooperation: The Nile and Okavango basins. *Transboundary Rivers, Sovereignty and Development: Hydropolitical drivers in the Okavango River Basin, Pretoria*. African Water Issue Research Unit, Green Cross International, 2003.
21. Liu B., Speed R. Water Resources Management in the People's Republic of China. *Water Resources Development*. 2009;25(2):193-208.
22. Mostert E. Integrated Water Resources Management in the Netherlands: How Concepts Function. *J. of Contemporary Water Research and Education*. 2006;(135):19-27.
23. Hall N. The North American Great Lakes. *The Evolution of the Law and Politics of Water*. Springer Publ.; 2009:281-299.
24. Kotov V. Russia: Historical Dimensions of Water Management. *The Evolution of the Law and Politics of Water*. Springer Publ.; 2009:139-156.
25. Matinenga E.T. A new water act for Zimbabwe? *Water for agriculture in Zimbabwe: policy and management options for the smallholder sector*. Harare: UZ Publ.: 2000:219-224.
26. Kidd M. South Africa: The Development of Water Law. *The Evolution of the Law and Politics of Water*. Springer Publ.; 2009:87-105.
27. Donoso G., Melo O. Water Quality Management in Chile: Use of Economic Instruments. Biswas A.K., Braga B., Tortajada C., Rodriguez D.J., eds. *Water Quality Management in the Americas. Water Resources Development and Management*. Berlin; Heidelberg: Springer Publ.; 2006:229-251.
28. Hearne R.R. Evolving Water Management Institutions in Mexico. *Water Resources Research*. 2004;40(12).
29. Boutkan E., Sticker A. Enhanced Water Resources Base for Sustainable Integrated Water Resources Management. *Natural Resources Forum*. 2004;28(2):150-154.
30. Hooper B. Integrated Water Resources Management: Governance, Best Practice, and Research Challenges. *J. of Contemporary Water Research & Education*. 2006;(135):1-7.
31. Hooper B. *Integrated River Basin Governance: Learning from International Experience*. London: International Water Association Publ.; 2005. 306 p.
32. *Central commission for the navigation of the Rhine*. Available from: <https://www.ccr-zkr.org/> [Accessed 5th November 2022]
33. *Danube commission*. Available from: <https://www.danubecommission.org/dc/en/> [Accessed 5th November 2022].
34. *International joint commission*. Available from: <https://www.ijc.org/en> [Accessed 5th November 2022].
35. Treaty on the River Plate Basin. *Int. Legal Materials*. 1969;8(5):905-909.
36. *Mekong River Commission*. Available from: <https://www.mrcmekong.org/> [Accessed 5th November 2022]
37. *The Indus waters treaty 1960 between the Government of India, the Government of Pakistan and the International Bank for Reconstruction and Development*. No. 6032. 19.09.1960.
38. *Agreement between the Government of the People's Republic of Bangladesh and the Government of the Republic of India on sharing of the Ganges waters at Farakka and on augmenting its flows*. No. 16210. 05.11.1977.
39. *Autorite du Bassin du Niger*. Available from: <http://www.abn.ne/> [Accessed 5th November 2022].
40. Mikiyasu N. Politics behind Zambezi Action Plan. *Water Policy*. 1998;1(4):397-409.

41. Bruin E.F.L.M. de, Jaspers G.W., Gupta, J. The EU Water Framework Directive: challenges for institutional implementation. J. Vermaat, ed. *Challenges in Coastal Zone Management in the EU*. Springer Publ.; 2005:153-169.

42. Kelly M., Bennett C., Coste M., Delgado C., Delmas F., Denys L., Ector L., Fauville C., Ferréol M., Golub M., Jarlman A., Kahlert M., Lucey J., Ni Chatháin B., Pardo I., Pfister P., Picinska-Faltynowicz J., Rosebery J., Schranz C., Schaumburg C., van Dam H., Vilbaste S. A comparison of national approaches to setting ecological status boundaries in phytobenthos assessment for the European Water Framework Directive: results of an inter-calibration exercise. *Hydrobiologia*. 2009;621(1):169-182.

Информация об авторе

Т.С. Фролова – кандидат географических наук, научный сотрудник, лаборатория гидрологии.

Information about the author

T.S. Frolova - Candidate of Science (Geography), Researcher, Laboratory of Hydrology.

*Статья поступила в редакцию 08.11.2022; одобрена после рецензирования 18.12.2022; принята к публикации 02.03.2023.
The article was submitted 08.11.2022; approved after reviewing 18.12.2022; accepted for publication 02.03.2023.*

Original article
UDC 551.576.4(479.25)
doi: 10.18522/1026-2237-2023-1-129-136

STATISTICAL ANALYSIS OF CONVECTIVE PROCESSES OVER THE ABSHERON PENINSULA

Aygun A. Bashirova

National Aviation Academy of the Republic of Azerbaijan, Baku, Republic of Azerbaijan
aygun.agayeva@bk.ru

Abstract. This paper is focuses on to determine the air masses observed during convective processes in Baku and the Absheron Peninsula in 2011-2020. As well as to identify the frequency of air masses and atmospheric phenomena by seasons and years. The purpose of this study is to determine weather phenomena that is significantly influence the safety and the operational activity of air traffic, particularly, in the areas of the aerodrome and route.

The formation of thunderstorms is a particularly important meteorological event that has major relevance to aviation safety. Despite all the safety improvements, the weather is still today a major cause of aviation accidents and incidents. According to the International Civil Aviation Organization (ICAO) statistics, 15-20 % of plane crashes are caused by severe weather conditions. Hazards associated with convective weather include thunderstorms with severe turbulence, intense up- and downdrafts, lightning, hail, heavy precipitation, icing, wind shear, microbursts and strong low-level winds. As a source of the information regular observations of Heydar Aliyev International Airport, also soundings, satellite images, surface and upper air maps were used.

Key words: thunderstorm, Absheron Peninsula, air masses, Heydar Aliyev International Airport, convective processes, lightning, regular observations, sounding, satellite images

For citation: Bashirova A.A. Statistical Analysis of Convective Processes Over the Absheron Peninsula. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2023;(1):129-136.

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

Научная статья

СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ КОНВЕКТИВНЫХ ПРОЦЕССОВ НАД АПШЕРОНСКИМ ПОЛУОСТРОВОМ

Айгюн Агабала Баширова

Национальная академия авиации Азербайджана, Баку, Республика Азербайджан
aygun.agayeva@bk.ru

© Bashirova A.A., 2023

Аннотация. Данная работа посвящена определению воздушных масс, наблюдаемых при конвективных процессах в Баку и на Апшеронском полуострове в 2011–2020 гг., а также выявлению повторяемости воздушных масс и атмосферных явлений по сезонам и годам. Целью данного исследования является определение явлений погоды, оказывающих существенное влияние на безопасность и эксплуатационную деятельность воздушного движения, в частности в районах аэродрома и маршрута.

Формирование гроз является важным метеорологическим явлением, которое имеет большое значение для безопасности полетов. Несмотря на все улучшения безопасности, погода по-прежнему остается основной причиной авиационных происшествий и инцидентов. По статистике Международной организации гражданской авиации, 15–20 % авиакатастроф происходят из-за сложных погодных условий. Опасности, связанные с конвективной погодой, включают грозы с сильной турбулентностью, интенсивные восходящие и нисходящие потоки воздуха, молнии, град, сильные осадки, обледенение, сдвиг ветра, микропорывы и сильный ветер на малых высотах. В качестве источника информации использовались регулярные наблюдения в Международном аэропорту им. Гейдара Алиева, а также зондирование, спутниковые снимки, карты поверхности и верхних слоев атмосферы.

Ключевые слова: гроза, Апшеронский полуостров, воздушные массы, Международный аэропорт им. Гейдара Алиева, конвективные процессы, молнии, регулярные наблюдения, зондирование, спутниковые снимки

Для цитирования: Bashirova A.A. Statistical Analysis of Convective Processes Over the Absheron Peninsula // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. 2023. № 1. С. 129–136.

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

Introduction

The study of thunderstorms is one of the most important areas of research in the field of atmospheric electricity, since lightning discharges pose the greatest threat to humans, technical devices, engineering structures, energy facilities, aviation and agriculture [1, 2].

The formation of thunderstorms is associated with the passage of cold fronts, convection processes and powerful updrafts in the atmosphere. The occurrence of thunderstorms is closely dependent on orography [3]. The formation of thunderstorms is also significantly affected by the orientation and height of the slopes, orographic protection. The relief of Azerbaijan is very diverse. Along with the high ridges rising above the snow line, there are extensive plains and lowlands, partially located below sea level. The distance from the Caspian Sea also affects thunderstorm activity. The lowest number of thunderstorm days (5-7 days) is observed offshore and coastal locations. Here, sea breezes affect the decrease in thunderstorm activity. Among the factors influencing the processes of atmospheric circulation over the Absheron Peninsula, the dominant role is played by the high mountain ranges of the Main Caucasus. The mountains of the Main Caucasus are a natural barrier that prevents the direct impact of cold air masses from the northwest. Air masses reaching the Absheron Peninsula meet with small hills in the northwestern and western parts. These small obstacles cause a slight deceleration of the air masses and thus change the thermodynamics of local processes. As a result, there is a convergence of air masses over Absheron, which provides additional energy reserves to the total flow. As a result, the air moves southward and causes Strong (22-27 knots) to Gale (34-40 knots) force N'y winds over Absheron Peninsula. The plains in the south-west of Absheron also affect its weather. In summer, because of over-heating during the day, a thermal minimum (a zone of low pressure) forms over the plain. It usually moves eastward from the southern part of the peninsula and forms short-term northerly winds in the lower part of the air over Absheron [4-7].

The proximity of the sea has a great influence on the atmospheric circulation and transformation of air masses over Absheron. In summer, the sea softens the warm air coming from the plains of Central Asia and the Caspian Sea. In winter, it increases the low temperature of cold air masses from the north. This increases cyclonic activity over the Caucasus and the Caspian Sea. In the cold season, the sea surface is warmer than the air, so the sea warms the air a little. As the cold air masses move from north to south, they warm up slightly as they cover long distances on the water [8].

Methods

As a result of the research, it was found that convective processes occurred when the following air masses entered the territory of the republic: Azores High; Arctic Maritime air masses; Continental Arctic air masses; Continental air of mid-latitudes; Southern cyclones and Central Asian anticyclone.

Continental Arctic air masses enter the Caspian Sea and Azerbaijan from northwestern Siberia, the Kara and Barents seas. Continental Arctic air masses, retaining some of their original features, rarely enter the Caspian Sea and Azerbaijan, especially the Absheron Peninsula. They usually undergo a strong transformation into cold continental air of mid-latitudes. In some cases, Continental Arctic air masses reaching the Absheron Peninsula in winter cause a sudden deterioration of the weather [9, 10].

Arctic Maritime air masses entering the Caspian Sea and the Caucasus from Spitsbergen and Greenland move southward, turning them into cold continental air of mid-latitudes. In the warm season, Arctic Maritime air masses usually enter the territory of Azerbaijan in a modified form. This condition is most pronounced during the summer months. At the same time, lightning, thunder and showers are observed over Absheron.

The climate of the Absheron Peninsula highly depends on the influence of the Azores High. Also known as the Azores anticyclone is a semi-permanent anticyclonic region with relatively consistent high pressure and subsiding air over the Atlantic Ocean. This phenomenon is especially common in the warm half of the year. Depending on the season, the directions of the maximum species of the Azores change: in winter they move to the north, and in summer to the south.

The first subtype of the anticyclone - Azores High center or its swirl moves over the northern part of the Atlantic Ocean through Eastern Great Britain towards Central Europe, Ukraine, then takes northern trajectory starting from North Caucasus to the Caspian Sea and Central Asia. These air masses get cool before reaching Absheron peninsula. Sometimes Azores High gets intensified due to moving Arctic air while following high trajectory. In the situation like that, very cold air masses move over Absheron Peninsula. When the region shows exposure to Azores High, the northern area of the Caspian Sea has North East convergence zone, North West convergence zone is observed in the central parts of the Sea with North convergence zone recorded in the South; in contrast, the South Caspian region hosts divergence zone.

The second subtype of the anticyclone - Azores High center or the swirl follows the south trajectory of move covering the Bay of Biscay, southern European areas, the South of Ukraine, the Northern Caucasus, the Caspian Sea and Central Asia. Exposure of our territory to Azores High is frequently recorded in warm season.

Continental air of mid-latitudes is divided into two subtypes. In the first half, air masses come to the Absheron Peninsula from Western Siberia and Kazakhstan, and in the second half - from the central and southern parts of Eastern Europe. The first subspecies is observed in the cold half of the year, when an anticyclone develops over Western Siberia and Kazakhstan.

The passage of the Southern cyclones, both individually and in series, is accompanied by the inflow of cold air masses from the northern regions into the Caspian Sea, including Absheron. This causes long-term changeable weather over Absheron Peninsula.

The influx of continental air masses from Central Asia to the Absheron Peninsula occurs under conditions of a strong anticyclone and strong cyclonic activity in the eastern regions of the Mediterranean and Black Seas. As the cyclone moves northeast, it interacts with the Central Asian anticyclone, causing the air masses of Central Asia to spread to the Caspian Sea and Absheron [5, 9].

Results and Discussion

Along with the analysis of the physical and synoptic conditions of the formation of cumulonimbus clouds during the meteorological support of civil aviation flights, the statistical study of the probability of their recurrence is also very important from a practical point of view. Thus, the factors that have the greatest impact on meteorological phenomena during aviation flights are associated with convective processes occurring in the atmosphere.

The presented above a bar chart illustrates the frequency of air masses entering to Baku and the Absheron Peninsula in 2011-2020 (Fig. 1). As seen from the bar chart convective processes in Baku and on the Absheron Peninsula occurred mainly as a result of the entering of air masses from Azores islands, Arctic Maritime and Continental Arctic masses into our territory. Convective processes were minimal during Continental air of mid-latitudes, Central Asian anticyclone and Southern cyclones.

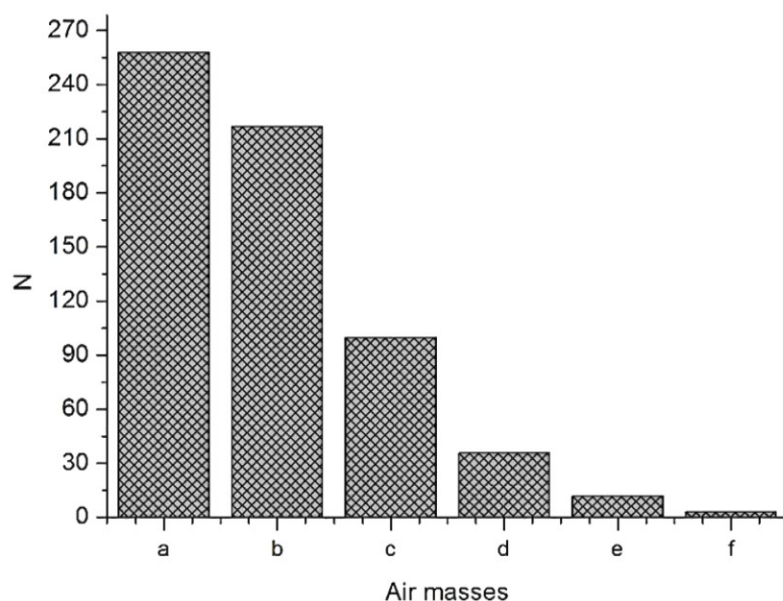


Fig. 1. Frequency of air masses over Absheron Peninsula for 2011-2020 years. a - Azores High; b - Arctic Maritime air masses; c - Continental Arctic air masses; d - Continental air of mid-latitudes; e - Southern cyclones; f - Central Asian anticyclone / Рис. 1. Повторяемость воздушных масс над Апшеронским полуостровом в 2011–2020 гг. а – воздушные массы с Азорских островов; б – арктические морские воздушные массы; в – континентальные арктические воздушные массы; г – континентальный воздух средних широт; д – южные циклоны; е – среднеазиатский антициклон.

Cumulonimbus clouds are born through convection, often growing from small cumulus clouds over a hot surface. They can also form along cold fronts because of forced convection, where milder air is forced to rise over the incoming cold air. Given below bar chart and graph (Fig. 2) represents the frequency of occurrence of cumulonimbus clouds, monthly and yearly, for a specified period of time. As shown below bar chart cumulonimbus clouds were observed almost for the whole year. According to the graph, the sharp rise has been recorded in 2016. As a result of the study, it was found that during the study period, 2016 was the year of the most active convective processes for Baku and the Absheron Peninsula. The strong lightning process and rain showers that took place on 28.09.16 and 17.10.16 on the Absheron Peninsula are also explained by the inflow of Arctic Maritime air masses [10-13].

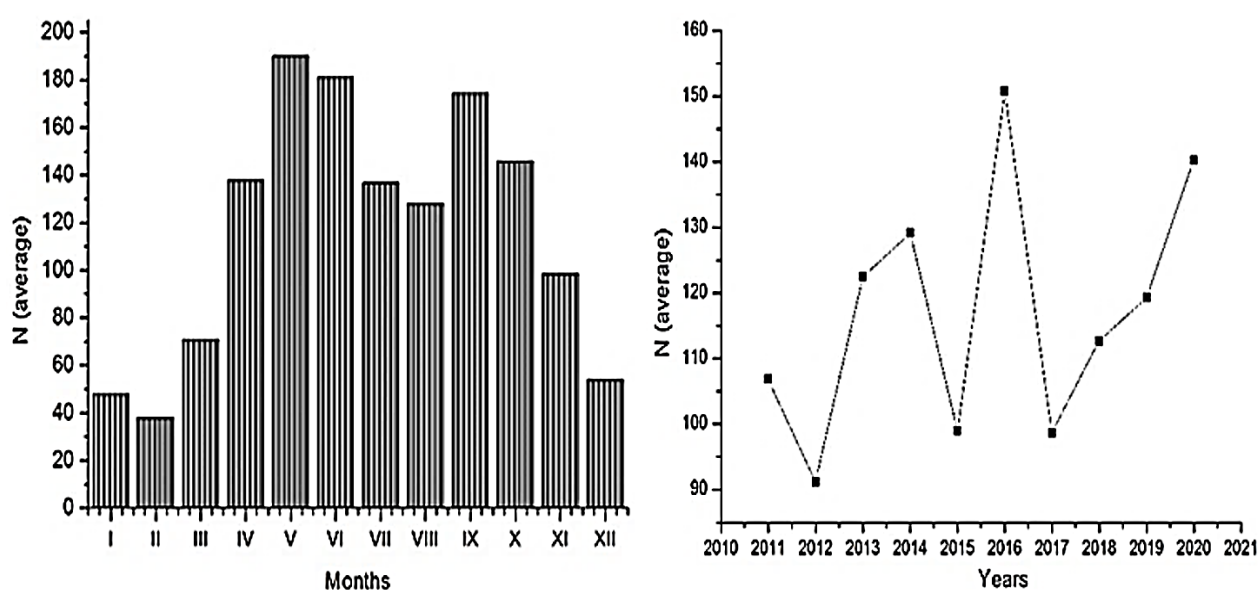


Fig. 2. Frequency of Cb clouds on the territory of Heydar Aliyev International Airport / Рис. 2. Повторяемость кучево-дождевых облаков на территории Международного аэропорта им. Гейдара Алиева

The presented below bar chart and graph (Fig. 3) shows the frequency of rain showers, monthly and yearly. The maximum amount of rain showers was observed in April and November with peak in October and the minimum was in July.

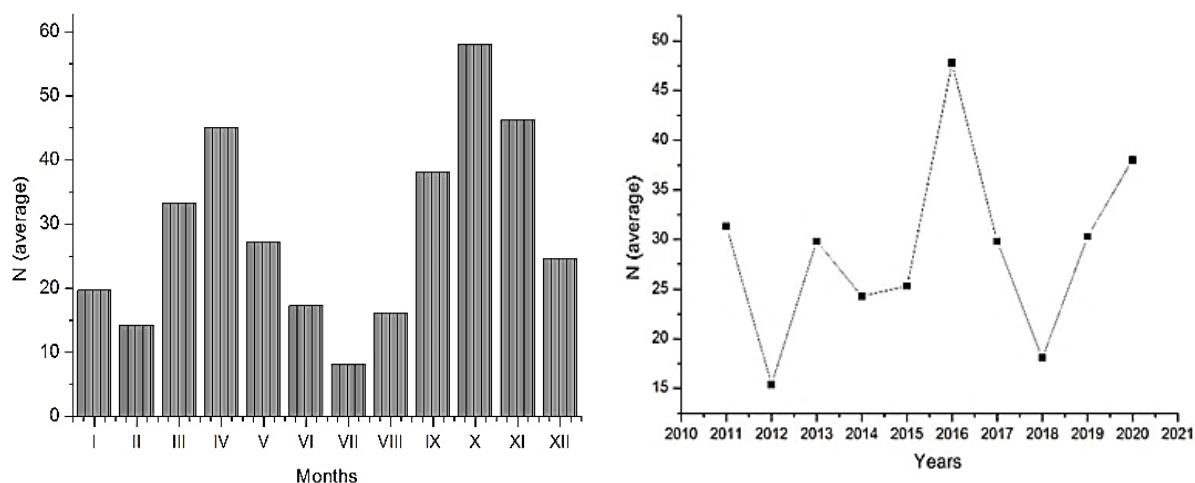


Fig. 3. Frequency of rain showers on the territory of Heydar Aliyev International Airport / Рис. 3. Повторяемость ливневого дождя на территории Международного аэропорта им. Гейдара Алиева

The bar chart and graph (Fig. 4) have been preferred to illustrate frequency of thundery shower monthly and yearly. The lowest frequency of thundery shower was recorded in winter. The maximum frequency of thundery shower was observed in September.

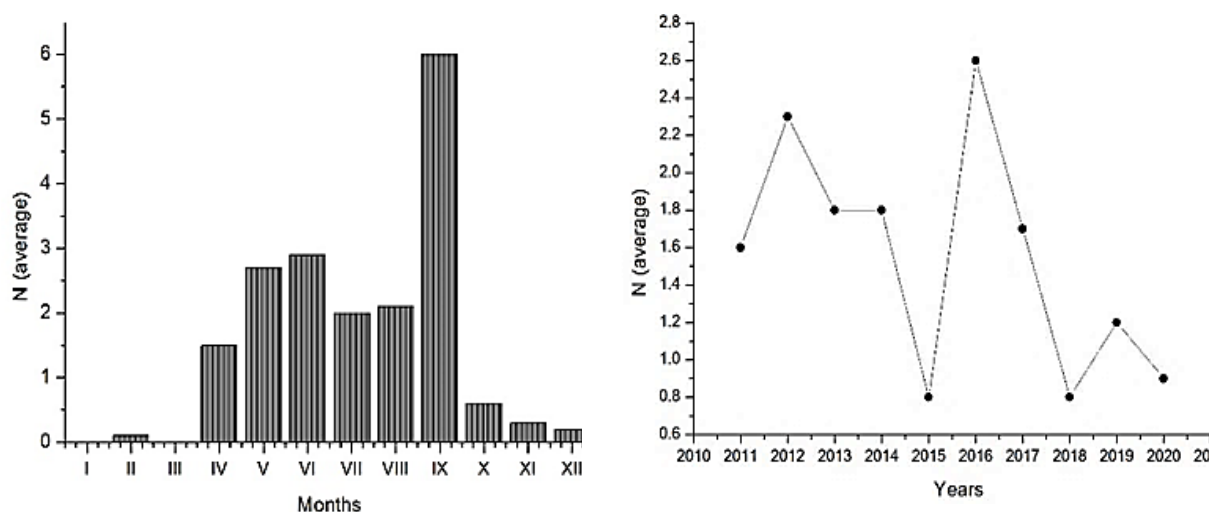


Fig. 4. Frequency of thundery showers on the territory of Heydar Aliyev International Airport / Рис. 4. Повторяемость грозовых ливней на территории Международного аэропорта им. Гейдара Алиева

As we know for the development of thunderstorm, we need a large depth of convection with a large amount of moisture. The temperature of the top of the cloud should be colder than -20°C . The simple bar chart and graph (Fig. 5) represents average monthly and yearly thunderstorm from 2011 to 2020. The maximum frequency of thunderstorm was observed in May and June (4.7 and 5.0 respectively). During the winter period, thunderstorm was not observed.

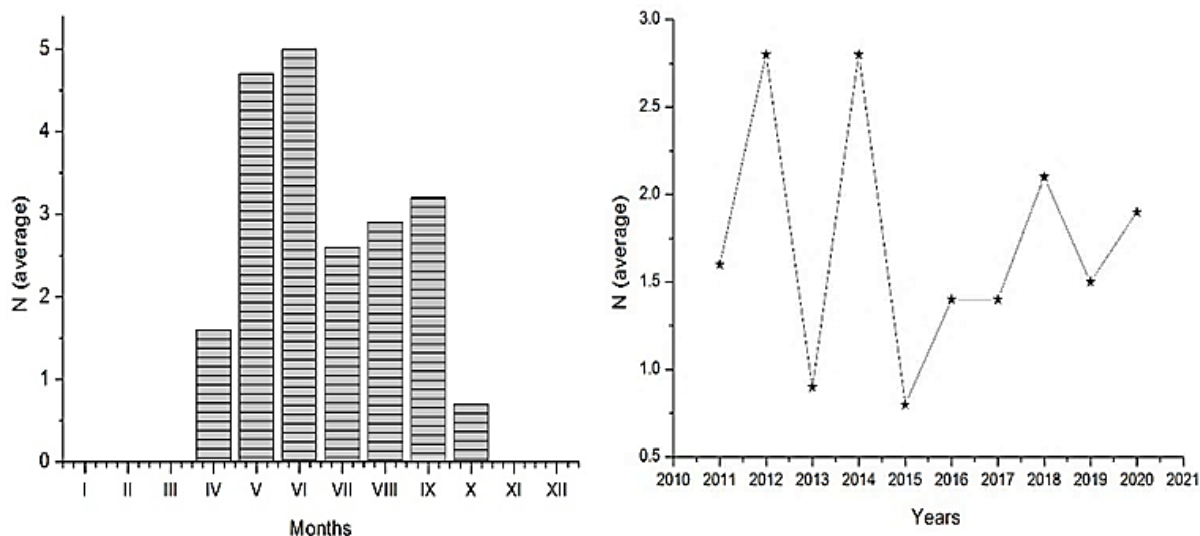


Fig. 5. Frequency of thunderstorm (without shower) on the territory of Heydar Aliyev International Airport / Рис. 5. Повторяемость гроз (без ливня) на территории Международного аэропорта им. Гейдара Алиева

Sleet showers when surface air temperatures are below 0 °C and cumulonimbus clouds are observed. Sleet has no internationally agreed definition but is reported in meteorological observations as a combination or mix of rain and snow. Sleet may occur when a warm layer of air lies above a below-freezing layer of air at the Earth's surface.

During this period for Baku and Absheron Peninsula the maximum frequency of sleet was observed in November and January (1.0 and 3.4 respectively). The peak of snow shower was in December and February (7.9 and 9.3 respectively) (Fig. 6.).

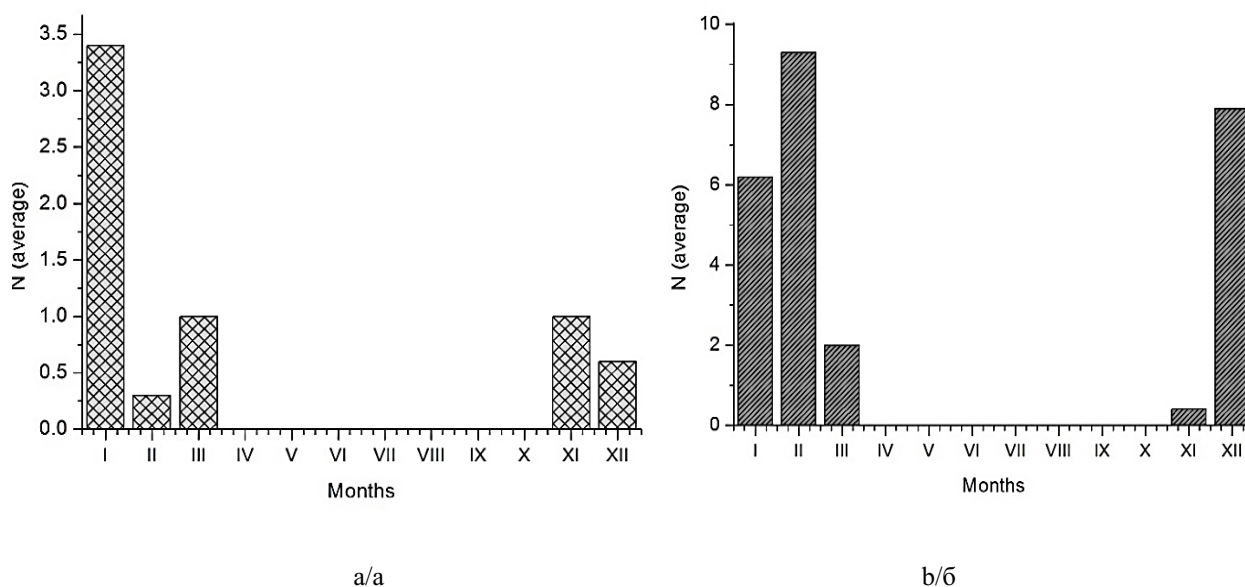


Fig. 6. Frequency of sleet shower (a) and snow shower (b) on the territory of Heydar Aliyev International Airport / Рис. 6. Повторяемость ливня с мокрым снегом (а) и ливневого снега (б) на территории Международного аэропорта им. Гейдара Алиева

It should be noted that such a statistical analysis of hazardous atmospheric phenomena leads to an increase in operational weather forecasts and other qualitative indicators [14-16].

Conclusion

Taking into account the importance of studying cumulonimbus clouds and related atmospheric phenomena, based on archived weather data for 2011-2020 at Heydar Aliyev International Airport, the statistical frequency of cumulonimbus clouds, thunderstorms and other atmospheric phenomena associated with these clouds by months and years have been analyzed. For this purpose Meteorological Aerodrome Reports for Heydar Aliyev International Airport (METAR), surface maps, upper air maps for 700 and 500 hPa levels, satellite images and soundings were analyzed. For statistical analyses of climatic characteristic at the airport of Heydar Aliyev, records from AWOS have been received and processed scrupulously. Initial data have been obtained from hourly and a half hourly recorded meteorological data at the range from 2011 to 2020.

References

1. Doswell III Ch. A. Societal impacts of severe thunderstorms and tornadoes: Lessons learned and implications for Europe. *Atmospheric Research*. 2003;62(2):135-152.
2. Ahrens C.D., Jackson P.L., Jackson Ch.E.J. *Meteorology Today: An Introduction to Weather, Climate, and The Environment*. Nelson Education Ltd.; 2012. 594 p.
3. Pashaev A.M., Imanov F.A., Huseynov N.Sh., Kuliev G.I., Nabiev R.N. *Climatic characteristics of Heydar Aliyev Airport*. Baku, 2007. 208 p. (In Russ.).
4. Huseynov N.Sh., Malikov B.M. Statistical prognosis modeling of thunderstorm at the Heydar Aliyev Airport. *7th European Conference on Severe Storms*. Helsinki, Finland, 2013:37-54.
5. Papinashvili K.I. *Atmospheric processes in Transcaucasia and their connection with macrocirculation processes over Eurasia*. Leningrad: Gidrometeoizdat Publ.; 1963. 184 p. (In Russ.).
6. Safarov S.H. Thunderstorm phenomena on the territory of Azerbaijan. *Hydrometeorology and Ecology*. 2007;(3):44-54. (In Russ.).
7. Safarov S.H., Mehdieva G. Sh. The real situation with lightning in the territory of Azerbaijan. *GESJ: Physics*. 2017;(2):25-32. (In Russ.).
8. Safarov S.H. *Hailstorm and mud flow phenomena on the territory of Azerbaijan and radar-tracking methods of their forecasting*. Baku: Elm Publ.; 2012. 292 p. (In Russ.).
9. Madatzade A.A. *Air types and climate of Absheron Peninsula*. Baku: Institute of Geography of the National Academy of Sciences Press; 1960. (In Azeri).
10. Doswell III Ch.A. *Severe Convective Storms*. The American Meteorological Society. University of Oklahoma Press; 2000. 69 p.
11. Doswell III Ch.A. The distinction between large-scale and mesoscale contribution to severe convection: a case study example. *NOAA, Environmental Research Laboratories – Weather Research Program*. Boulder, 1987:3-14.
12. Huseynov N.Sh., Agayeva A.A. Statistical analysis of atmospheric phenomena associated with convective processes on the territory of Heydar Aliyev International Airport. *Herald of the Azerbaijan Engineering Academy*. 2018;10(4):123-127. (In Azeri).
13. Huseynov N.Sh., Karimova A.V., Agayeva A.A. Comprehensively analysis of the strong convective processes on the Absheron Peninsula. *Herald of the Azerbaijan Engineering Academy*. 2017;9(4):127-132. (In Azeri).
14. Krauss T.V., Sinkevich A.A., Veremei N.E., Dovgalyuk Yu.A. A comprehensive study of the characteristics of a cumulonimbus clouds that developed over the Arabian Peninsula under conditions of a large deficit of the dew point in the atmosphere. Part 1. Natural observations and numerical simulations. *Russian Meteorology and Hydrology*. 2011;(2):44-59.
15. Leshhenko G.P. *Aviation meteorology*. Kirovograd, 2009. 488 p. (In Russ.).
16. Safonova T.V. *Aviation meteorology: textbook*. Ulyanovsk: UVAU GA Press; 2005. 215 p. (In Russ.).

Список источников

1. *Doswell III Ch.A. Societal impacts of severe thunderstorms and tornadoes: Lessons learned and implications for Europe // Atmospheric Research*. 2003. Vol. 62 (2). P. 135–152.
2. *Ahrens C.D., Jackson P.L., Jackson Ch.E.J. Meteorology Today: An Introduction to Weather, Climate, and The Environment*. Nelson Education Ltd., 2012. 594 p.
3. *Пашаев А.М., Иманов Ф.А., Гусейнов Н.Ш., Кулиев Г.И., Набиев Р.Н.* Климатическая характеристика аэропорта Гейдара Алиева. Баку, 2007. 208 с.

4. *Huseynov N.Sh., Malikov B.M.* Statistical prognosis modeling of thunderstorm at the Heydar Aliyev Airport // 7th European Conference on Severe Storms. Helsinki, Finland, 2013. P. 37–54.
5. *Папинашвили К.И.* Атмосферные процессы в Закавказье и их связь с макроциркуляционными процессами над Евразией. Л.: Гидрометеиздат, 1963. 183 с.
6. *Сафаров С.Г.* Грозовые явления на территории Азербайджана // Гидрометеорология и экология. 2007. № 3 (46). С. 44–54.
7. *Сафаров С.Г., Мехтиева Г.Ш.* Реальное положение с молниями на территории Азербайджана // ГЭНЖ: Физика. 2017. № 2 (18). С. 25–32.
8. *Сафаров С.Г.* Грозоградовые и селевые явления на территории Азербайджана и радиолокационные методы их прогнозирования. Баку: Элм, 2012. 292 с.
9. *Madatzade A.A.* Air types and climate of Absheron Peninsula. Baku: Institute of Geography of the National Academy of Sciences, 1960. (In Azeri).
10. *Doswell III. Ch.A.* Severe Convective Storms. The American Meteorological Society. University of Oklahoma, 2000. 69 p.
11. *Doswell III. Ch.A.* The distinction between large-scale and mesoscale contribution to severe convection: A case study example // NOAA, Environmental Research Laboratories – Weather Research Program. Boulder, 1987. P. 3–14.
12. *Huseynov N.Sh., Agayeva A.A.* Statistical analysis of atmospheric phenomena associated with convective processes on the territory of Heydar Aliyev International Airport // Herald of the Azerbaijan Engineering Academy. 2018. Vol. 10, № 4. P. 123–127. (In Azeri).
13. *Huseynov N.Sh., Karimova A.V., Agayeva A.A.* Comprehensively analysis of the strong convective processes on the Absheron Peninsula // Herald of the Azerbaijan Engineering Academy. 2017. Vol. 9, № 4. P. 127–132. (In Azeri).
14. *Krauss T.V., Sinkevich A.A., Veremei N.E., Dovgalyuk Yu.A.* A comprehensive study of the characteristics of a cumulonimbus clouds that developed over the Arabian Peninsula under conditions of a large deficit of the dew point in the atmosphere. Part 1. Natural observations and numerical simulations // Russian Meteorology and Hydrology. 2011. № 2. P. 44–59.
15. *Леценко Г.П.* Авиационная метеорология. Кировоград, 2009. 488 с.
16. *Сафонова Т.В.* Авиационная метеорология: учеб. пособие. Ульяновск: УВАУ ГА, 2005. 215 с.

Information about the author

A.A. Bashirova - PhD Student, Lecturer, Department of Aviation Meteorology.

Информация об авторе

А.А. Баширова – докторант, преподаватель, кафедры авиационной метеорологии.

*Статья поступила в редакцию 01.07.2022; одобрена после рецензирования 17.08.2022; принята к публикации 02.03.2023.
The article was submitted 01.07.2022; approved after reviewing 17.08.2022; accepted for publication 02.03.2023.*

БИОЛОГИЧЕСКИЕ НАУКИ BIOLOGICAL SCIENCES

Научная статья

УДК 631.46; 57.044

doi: 10.18522/1026-2237-2023-1-137-141

ИЗМЕНЕНИЕ АКТИВНОСТИ КАТАЛАЗЫ В ПОЧВАХ КРЫМА ПРИ ЗАГРЯЗНЕНИИ МАЗУТОМ

Владимир Геннадьевич Гайворонский^{1✉}, Сергей Ильич Колесников², Анна Андреевна Кузина³, Камиль Шагидуллоевич Казеев⁴

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

¹ vggayvoronskiy@sfedu.ru ✉

² kolesnikov@sfedu.ru

³ ankuzin@sfedu.ru

⁴ kazeev@sfedu.ru

Аннотация. Оценено изменение активности каталазы основных почв Крымского полуострова при загрязнении мазутом. Установлено, что с увеличением степени загрязнения почв мазутом активность каталазы снижается. Построен ряд устойчивости основных почв Крыма к загрязнению мазутом по активности каталазы (почвы расположены по мере снижения их устойчивости): коричневые выщелоченные красноцветные (73) > черноземы неполноразвитые (65) = коричневые карбонатные (65) > темно-каштановые солонцеватые (60) ≥ бурые лесные слабонасыщенные (55) ≥ черноземы остаточнок-карбонатные (51) = черноземы южные (51). Установленная последовательность определяется степенью оструктуренности и биологической активности почв, влияющей на окислительные условия и скорость деградации мазута в почве.

Ключевые слова: мазутное загрязнение, устойчивость почв, черноземы, коричневые почвы, бурые лесные почвы, Крымский полуостров

Благодарности: исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания в сфере научной деятельности № FENW-2023-0008, программы стратегического академического лидерства Южного федерального университета («Приоритет 2030», № СП-12-22-10), Президента РФ (МК-2688.2022.1.5 и НШ-449.2022.5).

Для цитирования: Гайворонский В.Г., Колесников С.И., Кузина А.А., Казеев К.Ш. Изменение активности каталазы в почвах Крыма при загрязнении мазутом // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. 2023. № 1. С. 137–141.

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

Original article

CHANGES IN CATALASE ACTIVITY IN CRIMEAN SOILS DUE TO FUEL OIL CONTAMINATION

Vladimir Gennadievich Gaivoronsky^{1✉}, Sergei Ilyich Kolesnikov², Anna Andreevna Kuzina³, Kamil Shagidulloevich Kazeev⁴

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

¹ vggayvoronskiy@sfedu.ru ✉

² kolesnikov@sfedu.ru

³ ankuzin@sfedu.ru

⁴ kazeev@sfedu.ru

© Гайворонский В.Г., Колесников С.И., Кузина А.А., Казеев К.Ш., 2023

Abstract. *The change in the activity of catalase in the main soils of the Crimean Peninsula under the contamination with fuel oil was estimated. It has been established that with an increase in the degree of soil contamination with fuel oil, the activity of catalase decreases. A series of resistance of the main soils of the Crimea to fuel oil pollution was built according to the activity of catalase (soils are arranged as their resistance decreases): brown leached red-colored (73) > incompletely developed chernozems (65) = brown calcareous (65) > dark chestnut solonchic (60) ≥ brown forest slightly unsaturated (55) ≥ chernozems of residual carbonate (51) = southern chernozems (51). The established sequence is determined by the degree of structure and biological activity of soils, which affect the oxidative conditions and the rate of destruction of fuel oil in the soil.*

Keywords: *oil pollution, soil stability, chernozems, brown soils, brown forest soils, Crimean Peninsula*

Acknowledgments: *the research was financially supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (No. FENV-2023-0008), the program of strategic academic leadership of the Southern Federal University ("Priority 2030", No. SP-12-22-10), the President of the Russian Federation (MK-2688.2022.1.5 and SH-449.2022.5).*

For citation: *Gaivoronsky V.G., Kolesnikov S.I., Kuzina A.A., Kazeev K.Sh. Changes in Catalase Activity in Crimean Soils due to Fuel Oil Contamination. Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science. 2023;(1):137-141. (In Russ.).*

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

Разливы мазута чаще всего происходят в местах прохождения трубопроводов, при транспортировке, а также при использовании топочного мазута в качестве горючего для тепловых электростанций и котельных.

Нефтепродукты наносят большой ущерб почвенным и водным экосистемам [1]. Они представляют собой смесь органических соединений, имеющих низкую биодоступность, и относятся к потенциально мутагенным и канцерогенным веществам [2, 3].

В настоящее время на территории Крыма функционируют 17 котельных на мазутном топливе, при этом износ оборудования оценивается в 70–90 % [4].

Определение активности каталазы благодаря высокой чувствительности и информативности, простоте анализа, высокой скорости метода, малой трудоемкости относится к одному из результативных параметров биодиагностики состояния почв при оценке экотоксичности поллютантов [5].

Цель исследования – оценить изменение каталазной активности в основных типах и подтипах почв Крыма при загрязнении мазутом.

На территории полуострова Крым были отобраны почвы: черноземы (карбонатные, южные, неполноразвитые, темно-каштановые солонцеватые, бурые лесные слабонасыщенные), коричневые (карбонатные, выщелоченные красноцветные). В таблице указаны характеристики перечисленных почв.

Для лабораторного моделирования загрязнения были отобраны образцы из слоя почвы 0–10 см, где накапливается основное количество загрязняющих веществ.

Загрязнение моделировали в лабораторных условиях. Мазут вносили в концентрации 1, 5, 10 % от массы почв. Такие концентрации мазута в почве и более отмечаются в местах его разлива [6].

Мазут вносили во влажную почву. Это связано с тем, что если сначала внести мазут в сухую почву, а затем добавить воду, то вода будет очень тяжело впитываться в загрязненную почву. После внесения мазута почву перемешивали, добиваясь равномерного загрязнения.

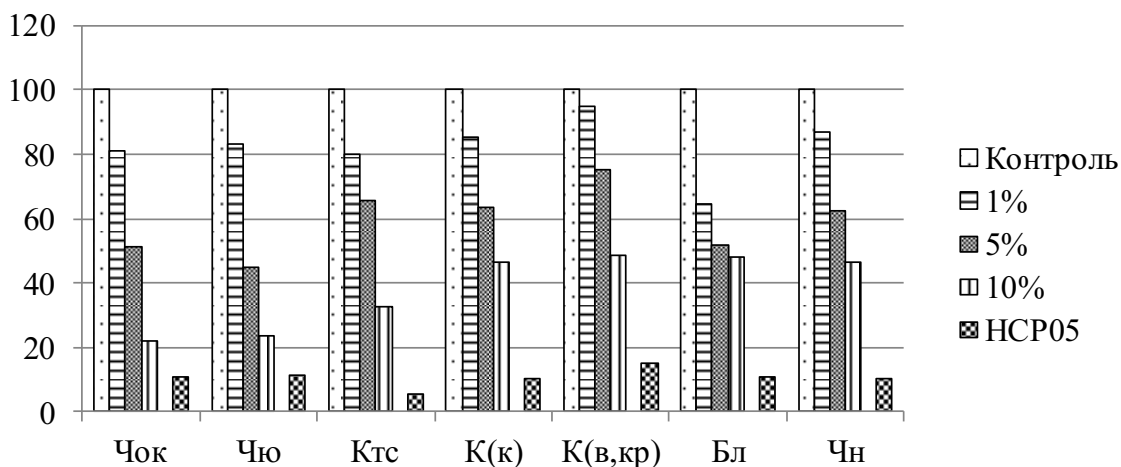
Ее инкубировали в вегетационных сосудах при комнатной температуре (+20–22 °С) и оптимальном увлажнении (60 % полной влагоемкости) в трехкратной повторности.

Активность каталазы определяли методом Галстяна [7, 8] через 30 сут после загрязнения. Установлено, что этот срок является наиболее информативным для оценки химического воздействия на почву [9].

Результаты исследования представлены на рисунке.

Местоположение и характеристики почв / Location and characteristics of soils

Почва	Название почвы по [10]	Экосистема	Место отбора	Координаты	Содержание органического вещества, %	pH	Гранулометрический состав	Численность бактерий, млрд/г	Активность каталазы, мл O ₂ /г/мин	Активность дегидрогеназ, мг ТФФ/г/24 ч	Обилие бактерий рода <i>Azotobacter</i> , % обработки
Черноземы остаточно-карбонатные, Чок	Leptic Chernozems Skeletic	Пашня	Республика Крым, Белогородский район, с. Крым-роза	45°3'44.70"N 34°21'51.60"E	3,1	7,8	Тяжелосуглинистый	5,4	8,9	19,3	100
Черноземы южные, Чю	Haptic Chernozems Pachic	Пашня	Республика Крым, Ленинский район, с. Горностаевка	45°17'23.70"N 36°13'42.30"E	3,3	7,9	Тяжелосуглинистый	4,6	9,0	19,1	100
Темно-каштановые солонцеватые, Ктс	Endosalic Kastanozems Sodic	Пашня	Республика Крым, Ленинский район, с. Батальное	45°11'4.64"N 35°36'15.83"E	3,7	7,5	Тяжелосуглинистый	3,7	7,0	13,0	79
Коричневые карбонатные, К(к)	Haptic Cambisols Eutric	Виноградник	Республика Крым, г. о. Алушта, с. Кипарисное	44°36'19.74"N 34°21'15.06"E	1,7	7,8	Тяжелосуглинистый	3,5	6,9	10,9	49
Коричневые выщелоченные красноцветные, К(в,кр)	Haptic Cambisols Eutric	Можжевеловое редколесье	Республика Крым, г. о. Ялта, заповедник «Мыс Мартьян»	44°30'34.70"N 34°14'53.55"E	6,8	6,9	Глинистый	8,1	11,7	18,6	56
Бурые лесные слабонасыщенные, Бл	Haptic Cambisols Eutric	Буковый лес	Республика Крым, Ангарский перевал	44°45'30.85"N 34°20'35.22"E	1,4	5,3	Тяжелосуглинистый	5,7	5,4	18,4	22
Черноземы неполноразвитые, Чн	Mollic Leptosols Eutric	Пашня	Республика Крым, Симферопольский район, с. Трудовое	45° 0'44.44"N 34°12'41.18"E	2,6	7,9	Тяжелосуглинистый	4,5	7,7	13,3	100



Изменение активности каталазы в почвах Крыма при загрязнении мазутом /
The change in catalase activity in the soils of the Crimea during contamination with fuel oil

В результате проведенных модельных опытов установлено, что загрязнение почв мазутом, как правило, снижает активность каталазы почв Крыма. Чем выше концентрация мазута в почве, тем сильнее ингибируется активность каталазы. Мазут обволакивает почвенные частицы, ограничивает доступ воздуха и блокирует работу окислительно-восстановительного фермента каталазы.

При сравнительной оценке степени снижения активности каталазы в результате мазутного загрязнения был получен ряд почв Крыма по степени их устойчивости к загрязнению мазутом (почвы расположены по мере снижения их устойчивости): коричневые выщелоченные красноцветные (73) > коричневые карбонатные (65) = черноземы неполноразвитые (65) > темно-каштановые солонцеватые (60) > бурые лесные слабонасыщенные (55) ≥ черноземы остаточного карбонатные (51) = черноземы южные (51). Последовательность почв, отражающая степень снижения активности каталазы в результате загрязнения мазутом, во многом определяется оструктуренностью и биологической активностью (таблица), влияющими на воздухообмен и скорость деструкции мазута в почве. Подобная закономерность проявляется при загрязнении мазутом почв Северного Кавказа [11–13].

Выводы

1. Загрязнение мазутом снижает активность каталазы в почвах Крыма. Чем выше концентрация мазута в почве, тем сильнее ингибируется активность каталазы.

2. Получен ряд почв Крыма по степени их устойчивости к загрязнению мазутом (почвы расположены по мере снижения их устойчивости): коричневые выщелоченные красноцветные (73) > коричневые карбонатные (65) = черноземы неполноразвитые (65) > темно-каштановые солонцеватые (60) > бурые лесные слабонасыщенные (55) ≥ черноземы остаточного карбонатные (51) = черноземы южные (51). Установленная последовательность определяется степенью оструктуренности и биологической активности почв, влияющей на окислительные условия и скорость деструкции мазута в почве.

Список источников

1. Yeung C.W., Law B.A., Milligan T.G., Lee K., Whyte L.G., Greer C.W. Analysis of bacterial diversity and metals in produced water, seawater and sediments from an offshore oil and gas production platform // *Mar. Pollut. Bull.* 2011. Vol. 62. P. 2095–2105.
2. Janbandhu A., Fulekar M.H. Biodegradation of phenanthrene using adapter microbial consortium isolated from petrochemical contaminated environment // *J. Hazard Mater.* 2011. Vol. 187. P. 333–340.
3. Souza E.C., Vessoni-Penna T.C., de Souza Oliveira R.P. Biosurfactant-enhanced hydrocarbon bioremediation: an overview // *Int. Biodeter. Biodegr.* 2014. Vol. 89. P. 88–94.
4. URL: <https://crimea.ria.ru/20220208/kogda-v-krymu-perestanut-topit-uglem-i-mazutom-1122294523.html> (дата обращения: 11.08.2022).
5. Колесников С.И., Татосян М.Л., Азнаурьян Д.К. Изменение ферментативной активности чернозема обыкновенного при загрязнении нефтью и нефтепродуктами в модельных экспериментах // *Докл. Рос. академии с/х наук.* 2007. № 5. С. 32–34.
6. Геннадиев А.Н., Пиковский Ю.И., Цибарт А.С., Смирнова М.А. Углеводороды в почвах: происхождение, состав, поведение (обзор) // *Почвоведение.* 2015. № 10. С. 1195–1209. Doi: 10.7868/S0032180X15100020.
7. Казеев К.Ш., Колесников С.И., Акименко Ю.В., Даденко Е.В. Методы биодиагностики наземных экосистем. Ростов н/Д.: Изд-во ЮФУ, 2016. 356 с.
8. Методы почвенной микробиологии и биохимии / под ред. Д.Г. Звягинцева. М.: Изд-во МГУ, 1991. 304 с.
9. Kolesnikov S.I., Kazeev K.Sh., Akimenko Yu.V. Development of regional standards for pollutants in the soil using biological parameters // *Environmental Monitoring and Assessment.* 2019. Vol. 191. P. 54402. <https://doi.org/10.1007/s10661-019-7718-3>.
10. World Reference Base for Soil Resources. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. 4th ed. International Union of Soil Sciences (IUSS). Vienna, Austria, 2022. 234 p.
11. Колесников С.И., Гайворонский В.Г., Ротина Е.Н., Казеев К.Ш., Вальков В.Ф. Оценка устойчивости почв Юга России к загрязнению мазутом по биологическим показателям (в условиях модельного эксперимента) // *Почвоведение.* 2010. № 8. С. 995–1000.
12. Дауд Р.М., Колесников С.И., Минникова Т.В., Кузина А.А., Казеев К.Ш., Акименко Ю.В. Оценка устойчивости почв аридных экосистем к химическому загрязнению. Ростов н/Д.; Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2021. 256 с. Doi: 10.18522/801273509.

13. Колесников С.И., Дайд Р.М., Кузина А.А., Казеев К.Ш., Акименко Ю.В. Региональные нормативы содержания мазута варидных почвах Юга России // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. 2019. № 3. С. 25–29.

References

1. Yeung C.W., Law B.A., Milligan T.G., Lee K., Whyte L.G., Greer C.W. Analysis of bacterial diversity and metals in produced water, seawater and sediments from an offshore oil and gas production platform. *Mar. Pollut. Bull.* 2011;62:2095-2105.
2. Janbandhu A., Fulekar M.H. Biodegradation of phenanthrene using adapter microbial consortium isolated from petrochemical contaminated environment. *J. Hazard Mater.* 2011;187:333-340.
3. Souza E.C., Vessoni-Penna T.C., de Souza Oliveira R.P. Biosurfactant-enhanced hydrocarbon bioremediation: an overview. *Int. Biodeter. Biodegr.* 2014;89:88-94.
4. Available from: <https://crimea.ria.ru/20220208/kogda-v-krymu-perestanut-topit-uglem-i-mazutom-1122294523.html> [Accessed 11th August 2022]. (In Russ.).
5. Kolesnikov S.I., Tatosyan M.L., Aznauryan D.K. Changes in the enzymatic activity of ordinary chernozem during contamination with oil and petroleum products in model experiments. *Dokl. Rossiiskoi akademii sel'skokhozyaistvennykh nauk = Russian Agricultural Sciences.* 2007;(5):32-34. (In Russ.).
6. Gennadiev A.N., Pikovskiy Yu.I., Tsibart A.S., Smirnova M.A. Hydrocarbons in soils: origin, composition, behavior (review). *Pochvovedenie = Soil Science.* 2015;(10):1195-1209, doi: 10.7868/S0032180X15100020. (In Russ.).
7. Kazeev K.Sh., Kolesnikov S.I., Akimenko Yu.V., Dadenko E.V. *Methods of biodiagnostics of terrestrial ecosystems.* Rostov-on-Don: SFU Press; 2016. 356 p. (In Russ.).
8. Zvyagintsev D.G., ed. *Methods of soil microbiology and biochemistry.* Moscow: Moscow State University Press; 1991. 304 p. (In Russ.).
9. Kolesnikov S.I., Kazeev K.S., Akimenko Y.V. Development of regional standards for pollutants in the soil using biological parameters. *Environmental Monitoring and Assessment.* 2019;191:54402, <https://doi.org/10.1007/s10661-019-7718-3>.
10. *World Reference Base for Soil Resources. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps.* 4th ed. International Union of Soil Sciences (IUSS), Vienna, Austria, 2022. 234 p.
11. Kolesnikov S.I., Gaivoronsky V.G., Rotina E.N., Kazeev K.Sh., Valkov V.F. Assessment of soil stability in the South of Russia to fuel oil pollution by biological indicators (in the conditions of a model experiment). *Pochvovedenie = Soil Science.* 2010;(8):995-1000. (In Russ.).
12. Daud R.M., Kolesnikov S.I., Minnikova T.V., Kuzina A.A., Kazeev K.Sh., Akimenko Yu.V. *Assessment of soil stability of arid ecosystems to chemical pollution.* Rostov-on-Don; Taganrog: SFU, Press; 2021. 256 p., doi: 10.18522/801273509. (In Russ.).
13. Kolesnikov S.I., Daud R.M., Kuzina A.A., Kazeev K.Sh., Akimenko Yu.V. Regional standards for the content of fuel oil in arid soils of the South of Russia. *Zashchita okruzhayushchei sredy v neftegazovom komplekse = Environmental Protection in the Oil and Gas Complex.* 2019;(3):25-29. (In Russ.).

Информация об авторах

В.Г. Гайворонский – кандидат биологических наук, доцент.

С.И. Колесников – доктор сельскохозяйственных наук, профессор, заведующий кафедрой экологии и природопользования.

А.А. Кузина – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник.

К.Ш. Казеев – доктор географических наук, профессор, директор Академии биологии и биотехнологии им. Д.И. Иванковского.

Information about the authors

V.G. Gaivoronsky - Candidate of Science (Biology), Associate Professor.

S.I. Kolesnikov - Doctor of Science (Agricultural Science), Professor, Head of the Department of Ecology and Nature Management.

A.A. Kuzina - Candidate of Science (Biology), Senior Researcher.

K.Sh. Kazeev - Doctor of Science (Geography), Professor, Director of the Academy of Biology and Biotechnology.

Статья поступила в редакцию 29.08.2022; одобрена после рецензирования 25.10.2022; принята к публикации 02.03.2023.
The article was submitted 29.08.2022; approved after reviewing 25.10.2022; accepted for publication 02.03.2023.

Научная статья

УДК 57.044; 631.46

doi: 10.18522/1026-2237-2023-1-142-147

ВЛИЯНИЕ ЗАГРЯЗНЕНИЯ AgNPs НА ЭМИССИЮ УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА ЧЕРНОЗЕМОМ

Н.И. Цепина¹, **С.И. Колесников²**, **Т.В. Минникова³**, **А.С. Русева⁴**, **Д.А. Труфанов⁵**

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

¹ cepinanatalia@yandex.ru

² kolesnikov@sfedu.ru

³ tminnikova@sfedu.ru

⁴ ruseva.ann@yandex.ru

⁵ dtrufanov@sfedu.ru

Аннотация. Проведено исследование влияния загрязнения наночастицами серебра (AgNPs) на эмиссию углекислого газа (CO₂) черноземом в остром экотоксикологическом эксперименте (первые 7 сут от момента загрязнения). Чернозем обыкновенный был загрязнен AgNPs разного размера (10, 100 и 1000 нм) в концентрациях 1, 10 и 100 мг/кг, а также оксидом серебра (Ag₂O) (для сравнения). В результате исследования установлено, что AgNPs размером 10 нм в 1-е сут эксперимента по эмиссии CO₂ менее токсичны, чем частицы других размеров, но через 7 сут эксперимента становятся наиболее токсичными. Чем больше концентрация AgNPs, тем больше токсическое воздействие на эмиссию CO₂. Чем меньше размер наночастиц, тем больше токсическое воздействие. По степени экотоксичности наночастицы серебра образуют следующую последовательность: AgNPs (10 нм) > AgNPs (100 нм) > AgNPs (1000 нм).

Ключевые слова: почва, серебро, наночастицы, загрязнение, дыхание почв, биологическая активность, острый экотоксикологический эксперимент

Благодарности: исследование выполнено при государственной поддержке гранта Российского научного фонда № 22-74-00054 в Южном федеральном университете.

Для цитирования: Цепина Н.И., Колесников С.И., Минникова Т.В., Русева А.С., Труфанов Д.А. Влияние загрязнения AgNPs на эмиссию углекислого газа черноземом // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. 2023. № 1. С. 142–147.

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

Original article

INFLUENCE OF AgNPs POLLUTION ON CARBON DIOXIDE EMISSION BY CHERNOZEM

N.I. Tsepina¹, **S.I. Kolesnikov²**, **T.V. Minnikova³**, **A.S. Ruseva⁴**, **D.A. Trufanov⁵**

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

¹ cepinanatalia@yandex.ru

² kolesnikov@sfedu.ru

³ tminnikova@sfedu.ru

⁴ ruseva.ann@yandex.ru

⁵ dtrufanov@sfedu.ru

© Цепина Н.И., Колесников С.И., Минникова Т.В., Русева А.С., Труфанов Д.А., 2023

Abstract. A study was made of the effect of pollution with silver nanoparticles (AgNPs) on the emission of carbon dioxide by chernozem in an acute ecotoxicological experiment (the first 7 days from the moment of pollution). The ordinary chernozem was contaminated with AgNPs of various sizes (10, 100 and 1000 nm) at concentrations of 1, 10 and 100 mg/kg, as well as Ag₂O (for comparison). As a result of the study, it was found that AgNPs with a size of 10 nm on the first day of the experiment on CO₂ emission are less toxic than other sizes, but after 7 days of the experiment they become the most toxic. The greater the concentration of AgNPs, the greater the toxic effect on CO₂ emission. The smaller the size of the nanoparticles, the greater the toxic effect. According to the degree of ecotoxicity, AgNPs form the following sequence: AgNPs (10 nm) > AgNPs (100 nm) > AgNPs (1000 nm).

Keywords: soil, silver, nanoparticles, pollution, soil respiration, biological activity, acute ecotoxicological experiment

Acknowledgments: the study was carried out with the state support of the Russian Science Foundation grant No. 22-74-00054 at the Southern Federal University.

For citation: Tsepina N.I., Kolesnikov S.I., Minnikova T.V., Ruseva A.S., Trufanov D.A. Influence of AgNPs Pollution on Carbon Dioxide Emission by Chernozem. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2023;(1):142-147. (In Russ.).

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

Антропогенная деятельность, связанная с производством, использованием и утилизацией продукции на основе наночастиц серебра (AgNPs), способствует их накоплению в почвенных экосистемах [1–4]. По результатам обзора экотоксикологических исследований было показано, что AgNPs оказывают негативное влияние на представителей почвенной биоты [5–7]. Эффект негативного влияния AgNPs чаще всего проявляется в снижении длины корней и побегов растений [8–10], численности бактерий [11–13], активности почвенных ферментов [13–16], выживаемости почвенных животных [17, 18]. Стоит отметить, что именно от состояния биоты зависит процесс дыхания почвы, в результате которого происходит выделение углекислого газа с поверхности почвы в атмосферу. Эмиссия углекислого газа является важнейшей частью биогеохимического цикла углерода, который характеризует биологическую активность и здоровье почв. Отсутствие публикаций, посвященных влиянию AgNPs на показатель эмиссии углекислого газа почвой, обуславливает актуальность проведения исследований в данной области.

Цель работы – оценить влияние загрязнения AgNPs на эмиссию углекислого газа черноземом в остром экотоксикологическом эксперименте.

Материалы и методы

В качестве объекта исследования выбран чернозем обыкновенный. Он обладает высоким уровнем плодородия, благодаря чему интенсивно используется в сельском хозяйстве. Зафиксированные авторами концентрации серебра в незагрязненной почве составляют 0,01–1 мг/кг [19]. В загрязненных почвах его содержание составляет до 35,9 мг/кг [20], в почвах рудных месторождений – до 7000 мг/кг [21].

В лабораторных условиях было смоделировано загрязнение чернозема обыкновенного наночастицами серебра размером 10 и 100 нм и микрочастицами размером 1000 нм в концентрациях 1, 10 и 100 мг/кг почвы. Для сравнения токсического действия наночастиц серебра исследовали загрязнение чернозема оксидом серебра в вышеуказанных концентрациях (1, 10 и 100 мг/кг почвы). Для оценки влияния наночастиц серебра разных размеров на эмиссию углекислого газа черноземом исследовали верхний слой почвы (0–20 см). Дозы были рассчитаны исходя из фоновых концентраций серебра. Фоновое содержание серебра в черноземе обыкновенном – 0,303 мг/кг.

Был проведен острый экотоксикологический эксперимент для оценки влияния AgNPs на интенсивность эмиссии углекислого газа из почвы на 1-е, 3-е и 7-е сут после загрязнения. Эксперимент проводился при температуре 22 °С.

Регулярный контроль эмиссии углекислого газа осуществлялся с помощью газоанализатора EGM PP Systems (USA). Определение углекислого газа проводили в part per million (ppm).

Для проверки полученных данных на достоверность применялся дисперсионный анализ с последующим определением наименьшей существенной разности (НСР).

Результаты и их обсуждение

Результаты воздействия AgNPs на эмиссию углекислого газа черноземом представлены в табл. 1. Значения контроля снижаются на 13 и 14 % соответственно на 3-и и 7-е сут, что обусловлено снижением биологических процессов в почве с течением времени.

В первые сут после внесения AgNPs размером 10 нм и оксида серебра (Ag₂O) в концентрации 1 мг/кг установлена стимуляция эмиссии CO₂ на 10 и 6 % от контроля, что подтверждает острое токсикологическое воздействие на численность гетеротрофов почвы при внесении загрязняющего вещества и является проявлением гормезиса. При внесении AgNPs размером 100 и 1000 нм достоверных отличий от контроля на протяжении 7 сут эксперимента не обнаружено.

С ростом концентрации AgNPs 10 нм и оксида серебра размером 1000 нм от 1 до 100 мг/кг установлено ингибирование эмиссии CO₂ на 13 и 5 % относительно контроля. Таким образом, чем больше концентрация AgNPs, тем больше токсическое воздействие.

По истечении 7 сут эксперимента установлено, что AgNPs 10 нм в 1-е сут эксперимента по эмиссии CO₂ менее токсичны, чем AgNPs 100 и 1000 нм, но через 7 сут эксперимента становятся наиболее токсичными. Чем меньше размер наночастиц, тем больше токсическое воздействие.

Таблица 1 / Table 1

Эмиссия CO₂ в черноземе обыкновенном, загрязненном AgNPs разного размера (10, 100 и 1000 нм) и оксидом серебра, ppm / CO₂ emission in chernozem contaminated with AgNPs of various sizes (10, 100 and 1000 nm) and Ag₂O, ppm

Загрязняющее вещество	Размер, нм	Концентрация, мг/кг	Продолжительность загрязнения, сут			
			1	3	7	НСР05
Контроль			478	416	412	30
AgNPs	10	1	521	427	414	32
		10	500	419	405	31
		100	456	401	415	30
		НСР05	34	29	27	
	100	1	467	410	418	30
		10	472	412	419	29
		100	470	404	413	30
		НСР05	33	31	29	
	1000	1	485	418	430	31
		10	475	415	412	25
		100	475	412	413	30
		НСР05	33	29	32	
Ag ₂ O	1000	1	507	414	412	31
		10	498	412	410	28
		100	491	409	400	30
		НСР05	35	27	28	

По степени экотоксичности наночастицы серебра расположены в виде ряда: Ag₂O (1000 нм) > AgNPs (10 нм) > AgNPs (100 нм) > AgNPs (1000 нм). Наибольшую токсичность по эмиссии CO₂ на состояние почвы оказывает оксид серебра и AgNPs размером 10 нм. Высокая экотоксичность AgNPs размером 10 нм обусловлена разрушением AgNPs с высвобождением ионов серебра, их сульфидирование и т. п. [22, 23].

В табл. 2 показано снижение эмиссии CO₂ через 7 сут после внесения AgNPs относительно 1-го дня измерения.

Таблица 2 / Table 2

Заключение

Снижение эмиссии CO₂ (Δ, %) через 7 дней после внесения AgNPs относительно 1-го дня измерения / Decrease in CO₂ emission (Δ, %) 7 days after AgNPs application relative to the 1st day of measurement

Размер AgNPs, нм	Концентрация AgNPs, мг/кг	Δ, %
10	1	21
	10	19
	100	9
100	1	10
	10	11
	100	12
1000	1	11
	10	13
	100	13

В результате исследования эмиссии CO₂ при загрязнении чернозема AgNPs и Ag₂O установлено, что AgNPs размером 10 нм в 1-е сут эксперимента по эмиссии CO₂ менее токсичны, чем другие размеры, но через 7 сут эксперимента становятся наиболее токсичными. Более высокие концентрации серебра в почве оказывают более сильное токсическое воздействие на эмиссию CO₂. Степень токсического воздействия зависит от размера наночастиц: чем меньше размер наночастиц, тем оно значительнее. Наночастицы серебра по степени токсичности образуют следующую последовательность: AgNPs (10 нм) > AgNPs (100 нм) > AgNPs (1000 нм). Результаты исследования целесообразно использовать при биодиагностике состояния почв, загрязненных AgNPs.

Список источников

1. Michels C., Perazzoli S., Soares M. Inhibition of the enriched culture of ammonium-oxidizing bacteria by two different nanoparticles: silver and magnetite // *Common Environment Science*. 2017. Vol. 586. P. 995–1002.
2. Kaegi R., Voegelін A., Sinnet B., Zuleeg S., Hagendorfer H., Burkhardt M., Siegrist H. Behavior of metallic silver nanoparticles in a pilot wastewater treatment plant // *Environmental Science & Technology*. 2011. Vol. 45. P. 3902–3908.
3. Khanna V.K. *Nanomaterials and their Properties* // *Integrated Nanoelectronics*. New Delhi: Springer, 2016. P. 25–41.
4. Künniger T., Gerecke A.C., Ulrich A., Huch A., Vonbank R., Heeb M., Wichser A., Haag R., Kunz P., Faller M. Release and environmental impact of silver nanoparticles and conventional organic biocides from coated wood-façades // *Environmental Pollution*. 2014. Vol. 184. P. 464–471.
5. Цепина Н.И., Колесников С.И., Минникова Т.В., Тимошенко А.Н., Казеев К.Ш. Сравнительная оценка экотоксичности четырех химических форм серебра по ферментативной активности почвы // *Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки*. 2022. № 4-2. С. 118–124. Doi: 10.18522/1026-2237-2022-4-2-118-124.
6. Yan C., Huang J., Cao C., Li R., Ma Y., Wang Y. Effects of PVP-coated silver nanoparticles on enzyme activity, bacterial and archaeal community structure and function in a yellow-brown loam soil // *Environmental Science and Pollution Research*. 2020. Vol. 27. P. 8058–8070.
7. Yin L., Colman B.P., McGill B.M., Wright J.P., Bernhardt E.S. The effect of silver nanoparticles on the germination and early growth of eleven wetland plants // *PLOS ONE*. 2012. Vol. 7. P. e47674.
8. Цепина Н.И., Колесников С.И., Минникова Т.В., Тимошенко А.Н., Казеев К.Ш. Оценка экотоксичности химических соединений серебра по показателям фитотоксичности чернозема // *АгроЭкоИнфо*. 2022. № 5. URL: http://agroecoinfo.ru/STATYI/2022/5/st_535.pdf (дата обращения: 22.08.2022).
9. Song U., Jun H., Waldman B., Roh J., Kim Y., Yi J., Lee E.J. Functional analyses of nanoparticle toxicity: a comparative study of the effects of TiO₂ and Ag on tomatoes (*Lycopersicon esculentum*) // *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2013. Vol. 93. P. 60–67.
10. Thuesombat P., Hannongbua S., Akasit S., Chadchawan S. Effect of silver nanoparticles on rice (*Oryza sativa* L. cv. KDML 105) seed germination and seedling growth // *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 2014. Vol. 104. P. 302–309.
11. Grün A., Straskraba S., Schulz S., Schloter M., Emmerling C. Long-term effects of environmentally relevant concentrations of silver nanoparticles on microbial biomass, enzyme activity, and functional genes involved in the nitrogen cycle of loamy soil // *J. of Environmental Science*. 2018. Vol. 69. P. 12–22.
12. Montes de Oca-Vásquez G., Solano-Campos F., Vega-Baudrit J.R., López-Mondéjar R., Vera A., Morenof J.L., Bastida F. Organic amendments exacerbate the effects of silver nanoparticles on microbial biomass and community composition of a semiarid soil // *Science of the Total Environment*. 2020. Vol. 744. P. 140919.
13. Kolesnikov S., Tsepina N., Minnikova T., Kazeev K., Mandzhieva S., Sushkova S., Minkina T., Mazarji M.,

Singh R.K., Rajput V.D. Influence of Silver Nanoparticles on the Biological Indicators of Haplic Chernozem // Plants. 2021. Vol. 10. P. 1022.

14. Mishra P., Xue Y., Eivazi F., Afrasiabi Z. Size, concentration, coating, and exposure time effects of silver nanoparticles on the activities of selected soil enzymes // Geoderma. 2021. Vol. 381. P. 114682.

15. Ottoni C.A., Lima Neto M.C., Leo P., Ortolan B.D., Barbieri E., De Souza A.O. Environmental impact of biogenic silver nanoparticles in soil and aquatic organisms // Chemosphere. 2020. Vol. 239. P. 124698.

16. Shin Y.J., Kwak J.I., An Y.J. Evidence for the inhibitory effects of silver nanoparticles on the activities of soil exoenzymes // Chemosphere. 2012. Vol. 88. P. 524–529.

17. Makama S., Pilla J., Undas A., Dimmers V.J., Peters R., Puntjes V.F., Van De Brink N.V. Properties of affecting silver nanoparticles *Lumbricus rubellus*, located in the soil // Environmental Pollution. 2016. Vol. 218. P. 870–878.

18. Shoults -Wilson W.A., Reinsh B.B., Tsyusko O.V., Bertsh P.M., Lowry G.V., Unrin J.M. Role of particle size and soil type in the toxicity of silver nanoparticles to worms // Soil Science Society of America J. 2011. Vol. 75. P. 365–377.

19. Jones K.C., Davies B.E., Peterson P.J. Silver in Welsh soils: Physical and chemical distribution studies // Geoderma. 1986. Vol. 37. P. 157–174.

20. Yildirim D., Sasmaz A. Phytoremediation of As, Ag, and Pb in contaminated soils using terrestrial plants grown on Gumuskoy mining area (Kutahya Turkey) // J. of Geochemical Exploration. 2017. Vol. 182. P. 228–234.

21. Дружинин А.В., Карелина Е.В. Основные типы промышленных месторождений серебра // Вестн. РУДН. Серия: Инженерные исследования. 2008. № 1. С. 35–41.

22. Куликова Н.А. Наночастицы серебра в почве: поступление, трансформация, токсичность (обзор) // Почвоведение. 2021. № 3. С. 304–319. Doi: 10.31857/S0032180X21030096.

23. Schlich K., Klawonn T., Terytze K., Hund-Rinke K. Hazard assessment of a silver nanoparticle in soil applied via sewage sludge // Environmental Sciences Europe. 2013. Vol. 25. P. 1–14. Doi: 10.1186/2190-4715-25-17.

References

1. Michels C., Perazzoli S., Soares M. Inhibition of the enriched culture of ammonium-oxidizing bacteria by two different nanoparticles: silver and magnetite. *Common Environment Science*. 2017;586:995-1002.

2. Kaegi R., Voegelin A., Sinnet B., Zuleeg S., Hagedorfer H., Burkhardt M., Siegrist H. Behavior of metallic silver nanoparticles in a pilot wastewater treatment plant. *Environmental Science & Technology*. 2011;45:3902-3908.

3. Khanna V.K. Nanomaterials and their Properties. *Integrated Nanoelectronics*. New Delhi: Springer Publ.; 2016:25-41.

4. Künniger T., Gerecke A.C., Ulrich A., Huch A., Vonbank R., Heeb M., Wichser A., Haag R., Kunz P., Faller M. Release and environmental impact of silver nanoparticles and conventional organic biocides from coated wooden façades. *Environmental Pollution*. 2014;184:464-471.

5. Tsepina N.I., Kolesnikov S.I., Minnikova T.V., Timoshenko A.N., Kazeev K.Sh. Comparative assessment of the ecotoxicity of four chemical forms of silver according to the enzymatic activity of the soil. *Izv. vuzov. Sev.-Kavk. region. Estestv. nauki = Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science*. 2022;(4-2):118-124, doi: 10.18522/1026-2237-2022-4-2-118-124. (In Russ.).

6. Yan C., Huang J., Cao C., Li R., Ma Y., Wang Y. Effects of PVP-coated silver nanoparticles on enzyme activity, bacterial and archaeal community structure and function in a yellow-brown loam soil. *Environmental Science and Pollution Research*. 2020;27:8058-8070.

7. Yin L., Colman B.P., McGill B.M., Wright J.P., Bernhardt E.S. The effect of silver nanoparticles on the germination and early growth of eleven wetland plants. *PLOS ONE*. 2012;7:e47674.

8. Tsepina N.I., Kolesnikov S.I., Minnikova T.V., Timoshenko A.N., Kazeev K.Sh. Evaluation of the ecotoxicity of chemical compounds of silver in terms of phytotoxicity of chernozem. *AgroEcoInfo*. 2022;(5). Available from: http://agroecoinfo.ru/STATYI/2022/5/st_535.pdf [Accessed 22nd August 2022]. (In Russ.).

9. Song U., Jun H., Waldman B., Roh J., Kim Y., Yi J., Lee E.J. Functional analyses of nanoparticle toxicity: a comparative study of the effects of TiO₂ and Ag on tomatoes (*Lycopersicon esculentum*). *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2013;93:60-67.

10. Thuesombat P., Hannongbua S., Akasit S., Chadchawan S. Effect of silver nanoparticles on rice (*Oryza sativa* L. cv. KDML 105) seed germination and seedling growth. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 2014;104:302-309.

11. Grün A., Straskraba S., Schulz S., Schlöter M., Emmerling C. Long-term effects of environmentally relevant concentrations of silver nanoparticles on microbial biomass, enzyme activity, and functional genes involved in the nitrogen cycle of loamy soil. *Journal of Environmental Science*. 2018;69:12-22.

12. Montes de Oca-Vásquez G., Solano-Campos F., Vega-Baudrit J.R., López-Mondéjar R., Vera A., Morenó J.L.,

Bastidaf F. Organic amendments exacerbate the effects of silver nanoparticles on microbial biomass and community composition of a semiarid soil. *Science of the Total Environment*. 2020;744:140919.

13. Kolesnikov S., Tsepina N., Minnikova T., Kazeev K., Mandzhieva S., Sushkova S., Minkina T., Mazarji M., Singh R.K., Rajput V.D. Influence of silver nanoparticles on the biological indicators of haplic chernozem. *Plants*. 2021;10:1022.

14. Mishra P., Xue Y., Eivazi F., Afrasiabi Z. Size, concentration, coating, and exposure time effects of silver nanoparticles on the activities of selected soil enzymes. *Geoderma*. 2021;381:114682.

15. Ottoni C.A., Lima Neto M.C., Leo P., Ortolan B.D., Barbieri E., De Souza A.O. Environmental impact of biogenic silver nanoparticles in soil and aquatic organisms. *Chemosphere*. 2020;239:124698.

16. Shin Y.J., Kwak J.I., An Y.J. Evidence for the inhibitory effects of silver nanoparticles on the activities of soil exoenzymes. *Chemosphere*. 2012;88:524-529.

17. Makama S., Pilla J., Undas A., Dimmers V.J., Peters R., Puentes V.F., Van De Brink N.V. Properties of affecting silver nanoparticles *Lumbricus rubellus*, located in the soil. *Environmental Pollution*. 2016;218:870-878.

18. Shoultz-Wilson W.A., Reinsh B.B., Tsyusko O.V., Bertsh P.M., Lowry G.V., Unrin J.M. Role of particle size and soil type in the toxicity of silver nanoparticles to worms. *Soil Science Society of America Journal*. 2011;75:365-377.

19. Jones K.C., Davies B.E., Peterson P.J. Silver in Welsh soils: Physical and chemical distribution studies. *Geoderma*. 1986;37:157-174.

20. Yildirim D., Sasmaz A. Phytoremediation of As, Ag, and Pb in contaminated soils using terrestrial plants grown on Gumuskoy mining area (Kutahya Turkey). *Journal of Geochemical Exploration*. 2017;182:228-234.

21. Druzhinin A.V., Karelina E.V. The main types of industrial silver deposits. *Vestnik RUDN. Seriya: Inzhenernye issledovaniya = RUDN Journal of Engineering Research*. 2008;(1):35-41. (In Russ.).

22. Kulikova N.A. Silver nanoparticles in soil: intake, transformation, toxicity (review). *Pochvovedenie = Eurasian Soil Sci*. 2021;(3):304-319, doi: 10.31857/S0032180X21030096. (In Russ.).

23. Schlich K., Klawonn T., Terytze K., Hund-Rinke K. Hazard assessment of a silver nanoparticle in soil applied via sewage sludge. *Environmental Sciences Europe*. 2013;25:1-14, doi: 10.1186/2190-4715-25-17.

Информация об авторах

Наталья Игоревна Цепина – кандидат биологических наук, младший научный сотрудник, Академия биологии и биотехнологии им. Д.И. Ивановского.

Сергей Ильич Колесников – доктор сельскохозяйственных наук, профессор, заведующий кафедрой экологии и природопользования, Академия биологии и биотехнологии им. Д.И. Ивановского.

Татьяна Владимировна Минникова – кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник, Академия биологии и биотехнологии им. Д.И. Ивановского.

Анна Степановна Русева – аспирант, кафедра экологии и природопользования, Академия биологии и биотехнологии им. Д.И. Ивановского.

Дмитрий Александрович Труфанов – аспирант, кафедра экологии и природопользования, Академия биологии и биотехнологии им. Д.И. Ивановского.

Information about the authors

Natalia I. Tsepina - Candidate of Science (Biology), Junior Researcher, Academy of Biology and Biotechnology named by D.I. Ivanovsky.

Sergey I. Kolesnikov - Doctor of Science (Agricultural Sciences), Professor, Head of Department of Ecology and Nature Management, Academy of Biology and Biotechnology named by D.I. Ivanovsky.

Tatiana V. Minnikova - Candidate of Science (Biology), Leading Researcher, Academy of Biology and Biotechnology named by D.I. Ivanovsky.

Anna S. Ruseva – Postgraduate Student, Department of Ecology and Nature Management, Academy of Biology and Biotechnology named by D.I. Ivanovsky.

Dmitry A. Trufanov – Postgraduate Student, Department of Ecology and Nature Management, Academy of Biology and Biotechnology named by D.I. Ivanovsky.

Статья поступила в редакцию 07.09.2022; одобрена после рецензирования 24.09.2022; принята к публикации 02.03.2023.
The article was submitted 07.09.2022; approved after reviewing 24.09.2022; accepted for publication 02.03.2023.

НАШИ ЮБИЛЯРЫ

OUR PERSONS

Персоналии

doi: 10.18522/1026-2237-2023-1-148-150

АНАТОЛИЙ ГЕОРГИЕВИЧ КУСРАЕВ (к 70-летию со дня рождения)

Personalities

ANATOLY GEORGIEVICH KUSRAEV (to the 70th Birthday)



14 февраля 2023 г. исполнилось 70 лет выдающемуся математику и организатору науки, заслуженному деятелю науки РФ, доктору физико-математических наук, профессору Анатолию Георгиевичу Кусраеву.

Анатолий Георгиевич родился в селе Гром Цхинвальского района Юго-Осетинской автономной области в семье школьного учителя. В 1969 г. он поступил на математический факультет Северо-Осетинского государственного университета им. К.Л. Хетагурова, а в 1971-м перевелся на механико-математический факультет Новосибирского госуниверситета.

В 1975 г. он с отличием окончил мехмат Новосибирского университета, в котором прошел путь от студента до профессора.

Анатолий Георгиевич принадлежит к математической школе лауреата Нобелевской премии академика Л.В. Канторовича и является одним из наиболее ярких ее представителей. Им получены фундаментальные результаты по

многим актуальным проблемам современного функционального анализа и их приложениям.

Он – общепризнанный в мире лидер в области использования синтеза методов математической логики, алгебры и анализа для решения новых классов задач. Ему принадлежат выдающиеся результаты мирового уровня в области порядкового анализа и теории векторных решеток.

Первые значимые научные результаты были им получены еще в студенческие годы в Новосибирском государственном университете под руководством профессора Г.П. Акилова, который и стал его научным руководителем в аспирантуре. Первые исследования, получившие признание специалистов, составили основу его кандидатской диссертации (1979 г.) и были посвящены развитию теории субдифференциального исчисления.

Широкую известность Анатолию Георгиевичу принес метод булевозначных реализаций, оказавшийся чрезвычайно плодотворным и перспективным в дальнейших приложениях. С его помощью проблема изучения сложных алгебраических объектов была сведена к исследованию более простых булевозначных аналогов.

Интенсивная научная работа позволила ему достаточно быстро после защиты кандидатской диссертации выйти на новый уровень. В его докторской диссертации «Векторнозначная двойственность функциональных пространств: теория и приложения», защищенной в возрасте 33 лет, в 1986 г., в Новосибирске, проведено глубокое по содержанию и обилию новых идей исследование. Внутреннее описание субдифференциалов, решение задачи абстрактного дезинтегрирования в пространствах Канторовича, операторные варианты теоремы Радона – Никодима – вот наиболее яркие достижения, нашедшие отражение в его докторской диссертации.

В последующих научных исследованиях А.Г. Кусраева было представлено распространение субдифференциального исчисления на более широкий класс операторов, построена теория мажорируемых операторов в решеточно нормированных пространствах, получены новые результаты о разложении мажорируемых операторов и векторных мер, найдена полная система инвариантов для инъективных банаховых решеток. По степени широты и актуальности тематики, разнообразию изучаемых объектов, оригинальности предлагаемых методов научное творчество А.Г. Кусраева вносит крупный вклад в современную математику. Им опубликовано более 300 научных работ, включая около 40 монографий и учебных пособий.

Его монографии и учебники стали настольными книгами для специалистов и используются при подготовке талантливой молодежи во многих университетах России и мира. Под непосредственным научным руководством А.Г. Кусраева 20 молодых ученых выполнили и успешно защитили кандидатские диссертации; трое его учеников стали докторами наук. Многие из них – известные математики, работают в научных центрах и университетах России, США, Канады, Израиля, Турции. Блестящий лектор, он неоднократно выступал со своими лекциями и докладами на многих крупных международных научных конференциях и семинарах в ведущих научных центрах.

До 1991 г. профессиональная деятельность А.Г. Кусраева была связана с Институтом математики им. С.Л. Соболева СО РАН и Новосибирским государственным университетом, где он работал.

После переезда в 1991 г. во Владикавказ он возглавил кафедру математического анализа Северо-Осетинского государственного университета им. К.Л. Хетагурова. Вскоре он стал инициатором открытия двух новых специализаций в университете – математической экономики и математической экологии. Под его руководством и при его непосредственном участии разработан и внедрен комплекс новых спецкурсов, а содержание традиционных образовательных курсов для математиков и их преподавание подняты на качественно новый уровень.

С середины 90-х гг. начинается новый этап в жизни Анатолия Георгиевича. Вместе с неординарной по объему и качеству научной и педагогической работой на первый план выходит его масштабная научно-организационная деятельность. По его инициативе в 1994 г. был создан Государственный научный центр Республики Северная Осетия – Алания (РСО-А), который в 2000 г. был реорганизован во Владикавказский научный центр (ВНЦ) РАН и РСО – Алании. А.Г. Кусраев – бессменный руководитель этого центра с момента его создания и до 2018 г. Важной вехой на пути становления ВНЦ как мощного регионального центра современной науки стало создание в 1996 г. Института прикладной математики и информатики, преобразованного по решению бюро Отделения математических наук РАН в 2007 г. в Южный математический институт (ЮМИ) ВНЦ РАН. Это преобразование позволило сформировать качественно новый этап в развитии математической науки в Северной Осетии, а затем и на всем Юге России. Его основной целью стало развитие математических исследований не только на Юге России, но и в других регионах страны, поддержка различных форм интеграции с Южным федеральным университетом (ЮФУ), включая создание подразделений ЮМИ в других городах Юга России. А.Г. Кусраев, став инициатором создания и реорганизации научных институтов в ВНЦ, внес большой вклад в наполнение их деятельности реальным содержанием для их плодотворного развития, подготовки научных кадров. Он является основателем и главным редактором научных журналов «Вестник Владикавказского научного центра» и «Владикавказский математический журнал», инициатором и организатором математических форумов, включающих в себя широчайший спектр научно-образовательных мероприятий: конференций и научных школ для школьников и студентов, семинаров для учителей математики и международных конференций для ученых. Анатолий Георгиевич многие годы является членом редколлегии журнала «Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки».

Значительное внимание А. Г. Кусраев уделяет координации научных действий в южном регионе.

При его непосредственном участии и руководстве традиционной для ЮМИ ВНЦ РАН стала Международная научная конференция «Порядковый анализ и смежные вопросы математического моделирования», которая проводится один раз в два года, начиная с 2003 г., и является крупным научным событием, той площадкой, где происходит обмен научной информацией ученых Юга России и зарубежных коллег.

В 2008 г. по его инициативе и под его руководством создан и успешно осуществляется совместный издательский проект ЮМИ и ЮФУ «Итоги науки. Юг России», нацеленный на интеграцию академической и университетской науки, благодаря которому увидели свет исследования многих математиков региона.

Умение видеть перспективу и широта научных взглядов, организаторские способности стали веской причиной для его включения в состав совета РАН по координации деятельности региональных отделений и научных центров. В 2002–2005 гг. он входил в состав правительства РСО-А, в котором он успешно курировал вопросы научно-технической политики.

В 2008–2009 гг. А.Г. Кусраев параллельно со своей основной работой в научном центре был министром образования и науки Республики Южная Осетия (РЮО). Его деятельность на этом посту в трудное для региона время в значительной мере определила главные концепции и задачи развития научно-образовательного комплекса РЮО и заложила основу на годы вперед.

Заслуги А.Г. Кусраева получили высокую оценку государства и научной общественности. Он удостоен званий «Заслуженный деятель науки РСО-А» (2003 г.) и «Заслуженный деятель науки РФ» (2007 г.), награжден орденами Дружбы (2007 г.) и Дружбы РЮО (2010 г.).

Говорят, что 70 лет – возраст мудрости. «Мудрый учитель и достойный сын своего народа», – так характеризуют его коллеги и ученики. Личность А.Г. Кусраева служит примером для подражания своей высокой нравственной культурой и потрясающей эрудированностью. В одном из интервью Анатолий Георгиевич так выразил свое отношение к жизни и пониманию счастья: «Родители обеспечили мне счастливое детство, моя страна дала мне возможность реализовать себя в науке, судьба свела меня с выдающимися людьми, ставшими моими учителями и наставниками. Мои дети разделяют ценности, которыми я дорожу. Разве не это счастье?»

Анатолий Георгиевич – не только блестящий математик и организатор науки, он простой в общении и гостеприимный человек, оптимист, умеющий видеть перспективу и находить выходы из самых сложных жизненных ситуаций.

Коллеги и редакция журнала поздравляют Анатолия Георгиевича с 70-летием и от всей души желают ему доброго здоровья, дальнейших творческих успехов по всем направлениям его многогранной и масштабной деятельности, талантливых учеников, любви родных и близких!

А.В. Абанин, А.О. Ватульян, М.И. Карякин, С.Н. Мелихов

Персоналии

doi: 10.18522/1026-2237-2023-1-151-153

МИХАИЛ ИГОРЬЕВИЧ КАРЯКИН
(к 60-летию со дня рождения)

Personalities

MIKHAIL IGORIEVICH KARYAKIN
(to the 60th Birthday)



23 февраля 2023 г. исполнилось 60 лет директору Института математики, механики и компьютерных наук им. И.И. Воровича Южного федерального университета, члену редакционной коллегии журнала, доктору физико-математических наук Михаилу Игорьевичу Карякину.

Михаил Игорьевич в 1980 г. поступил, а в 1985-м с отличием окончил механико-математический факультет Ростовского государственного университета по специальности «механика». В год выпуска поступил в аспирантуру на кафедру теории упругости, во время которой под руководством профессора Л.М. Зубова исследовал ряд важных задач в рамках нелинейной теории упругости. В 1989 г. после окончания аспирантуры он защитил кандидатскую диссертацию «Нелинейные эффекты в теории дислокаций Вольтерра», в которой была развита теория дислокаций Вольтерра, изучено влияние геометрической и физической нелинейности на напряженно-деформированное состояние в окрестности оси изолированного дефекта.

С 1988 г. М.И. Карякин работает в родном университете, занимая последовательно должности ассистента, старшего преподавателя, доцента кафедры теории упругости, активно включается в учебный процесс и научную работу со студентами. В это период он приобретает преподавательский опыт, работает заместителем декана по научной работе.

Новый этап в его жизни наступил во время создания и формирования ЮФУ. В 2008 г. Михаил Игорьевич Карякин избран деканом факультета математики, механики и компьютерных наук. Перед ним стояли непростые задачи по реорганизации учебного процесса и активизации научных исследований на факультете, решать которые приходилось в сложные времена административных преобразований – перестали существовать ЮГИНФО ЮФУ (вычислительный центр) и Научно-исследовательский институт механики и прикладной математики. Небольшое количество оставшихся коллективов и лабораторий присоединили к мехмату, реформируя его в 2014 г. в Институт математики, механики и компьютерных наук им. И.И. Воровича. В его состав включены кафедры бывшего РГПИ, занимавшиеся подготовкой учителей математики и информатики. Сможет ли созданный институт достичь существовавшего в учебно-научном комплексе «Математика. Механика» РГУ, а затем ЮФУ уровня научных исследований и их интеграции в учебный процесс – пока неясно, но во многом это зависит от возглавившего институт директора М.И. Карякина.

Под руководством М.И. Карякина коллектив института добился значительных успехов в совершенствовании образовательного процесса, разработке и внедрении новых технологий обучения, создании новых образовательных программ и их реализации, в том числе и на международном уровне. Этому способствовала и пройденная им ранее полугодовая стажировка в Университете Северной Каролины в Роли (США).

Направления подготовки «Прикладная математика и информатика» и «Фундаментальная информатика и информационные технологии» успешно прошли процедуру международной аккредитации и реаккредитации в Институте аккредитации, сертификации и обеспечения качества (Германия, ACQUIN).

Под руководством М.И. Карякина и при его непосредственном участии в ЮФУ успешно реализован проект «Интернационализация учебных планов на уровне магистра в российских вузах в южном регионе» по программе «Темпус-IV» (2011–2014 гг.). С 2019 по 2022 г. М.И. Карякин – руководитель проекта «Разработка магистерских программ в области мобильных приложений и разработки игр в партнерских университетах», который выполнялся консорциумом университетов в рамках программы Европейского союза «Эразмус+».

В 2018 г. на базе института создан Региональный научно-образовательный математический центр ЮФУ, основной целью которого является обеспечение мирового уровня научных исследований и содействие подготовке высококвалифицированных кадров по укрупненной группе специальностей «математика».

В институте продолжается интенсивная работа по совершенствованию существовавших на мехмате направлений подготовки бакалаврских и магистерских программ, а также созданию и открытию новых. В 2019 г. проект разработки магистерской программы «Компьютерная математика: теория и приложения» стал победителем конкурсного отбора на предоставление финансирования в целях разработки и реализации передовых образовательных программ с привлечением научно-педагогических работников из университетов, входящих в топ-200 предметных глобальных рейтингов. В 2021 г. в рамках соглашения с Минобрнауки России под руководством М.И. Карякина разработана новая образовательная программа «Искусственный интеллект: математические модели и прикладные решения» для обеспечения подготовки магистров по специальности 01.04.02 «Прикладная математика и информатика». Успешной деятельностью М.И. Карякина способствует его участие в работе федеральных учебно-методических объединений по математике, механике, компьютерным и информационным наукам.

Несмотря на значительную занятость административной работой, Михаил Игорьевич продолжает заниматься научными исследованиями в области нелинейной теории упругости, в том числе и с учениками. Им подготовлены четыре кандидата наук. Выполненная под его руководством научная работа студентки Т. Сигаевой получила в 2012 г. медаль Российской академии наук для студентов высших учебных заведений России в области проблем машиностроения, механики и процессов управления.

М.И. Карякин возглавлял два научных проекта по федеральной целевой программе «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России», цикл хозяйственных договоров «Дизайн и оптимизация формы мембран для датчиков давления» с фирмой «Эндресс+Хаузер» (Германия).

В 2014 г. М.И. Карякин защитил докторскую диссертацию «Равновесие и устойчивость нелинейно-упругих тел при учете изолированных дефектов и микроструктуры материала». Среди научных результатов, представленных в диссертации, отметим следующие: разработаны программные средства для реализации полуобратного метода нелинейной теории упругости, предназначенные как для численного исследования задач равновесия, так и для аналитического изучения эффектов второго и высших порядков, для автоматизированного генерирования уравнений нейтрального равновесия при исследовании устойчивости упругих тел на основе бифуркационного подхода; с их помощью решен ряд новых задач об эффектах второго порядка в задачах изгиба и кручения нелинейно-упругих тел.

Решена задача о нахождении класса моделей нелинейно-упругого поведения материала, для которого диаграмма растяжения имеет падающий участок, а процесс растяжения при этом является устойчивым.

Построены новые точные решения задач о напряжениях, возникающих в сплошном цилиндре из сжимаемого нелинейно-упругого материала с изолированными дефектами типа винтовой дислокации и клиновой дисклинации, впервые обнаружены и проанализированы разрывные решения таких задач; разработана теория разрывных решений задач о равновесии несжимаемых нелинейно-упругих тел с изолированными дефектами, сформулированы необходимые условия возникновения дефекта через предельные соотношения для функции удельной потенциальной энергии.

Доказано существование дефектов типа дислокаций Вольтерра в нелинейно-упругом континууме Коссера. На основе найденных новых точных решений задач об изолированных дефектах в средах Коссера проанализировано влияние учета нелинейности и моментных напряжений на механические поля дислокаций как в регулярном случае, так и для разрывных решений.

Представлен численно-аналитический алгоритм исследования равновесия и устойчивости круговых гофрированных мембран, испытывающих большие деформации. С его помощью показано, что проявляющаяся в экспериментах чувствительность сферического купола по отношению к начальным несовершенствам связана с большим количеством близко расположенных точек бифуркации соответствующего оператора, которые порождают неосесимметричные моды. Доказано, что целенаправленным внесением небольших технологических изменений в форму купола можно добиться устранения большинства из этих точек бифуркации для обеспечения осесимметричной работы мембраны. Для мембран с относительно большой начальной деформацией установлено, что вместо прохлопывания мембраны существует возможность плавного устойчивого перехода из одного осесимметричного состояния в несмежное дальнейшее через этап неосесимметричного деформирования.

В настоящее время научные интересы М.И. Карякина сосредоточены на нелинейной теории упругости, теории устойчивости при конечных деформациях, моделях биомеханики, эволюционных алгоритмах и технологиях программирования.

Он автор и соавтор более ста публикаций, в том числе учебных пособий «Тензорное исчисление. Основы теории» (М.: Вузовская книга, совм. с Л.М. Зубовым), «Технологии программирования и компьютерный практикум на языке Python» и «Визуализация механических систем, процессов и явлений: проектные задания с использованием VPython» (Ростов н/Д.; Таганрог: ЮФУ, с соавт). С 2005 г. М.И. Карякин является одним из инициаторов проведения и председателем Организационного комитета ежегодной школы-семинара «Математическое моделирование и биомеханика в современном университете», регулярно поддерживаемой РФФИ. Михаил Игорьевич – член редколлегии журнала «Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки».

Достижения Михаила Игорьевича за годы работы в РГУ и ЮФУ по достоинству оценены. В 2015 г. он награжден почетной грамотой Министерства науки и высшего образования РФ, а в 2020-м ему присвоено звание «Почетный работник сферы образования Российской Федерации».

Михаил Игорьевич – простой и отзывчивый человек, обладающий чувством юмора и оптимистическим отношением к жизни. Он всегда приходит на помощь коллегам и студентам, находит выход из сложной ситуации.

Коллектив мехмата и редакционная коллегия журнала искренне поздравляют Михаила Игорьевича с юбилеем и желают новых достижений в науке и образовании!

А.О. Ватульян, Я.М. Ерусалимский

***Редколлегия и редакция журнала сердечно поздравляют юбиляров,
желают им неиссякаемой энергии, оптимизма, крепкого здоровья,
благодарных учеников и успехов во всех их начинаниях!***

НАУЧНАЯ ЖИЗНЬ

SCIENTIFIC LIFE

Материалы конференции

doi: 10.18522/1026-2237-2023-1-154-156

III МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ «БИОЛОГИЧЕСКОЕ РАЗНООБРАЗИЕ: ИЗУЧЕНИЕ, СОХРАНЕНИЕ, ВОССТАНОВЛЕНИЕ, РАЦИОНАЛЬНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ» (г. Керчь, 13–18 сентября 2022 г.)

Виктор Аркадьевич Миноранский¹, Юлия Валерьевна Тимофеевко²

¹ Ассоциация «Живая природа степи», Ростов-на-Дону, Россия

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

Для цитирования: Миноранский В.А., Тимофеевко Ю.В. III Международная научно-практическая конференция «Биологическое разнообразие: изучение, сохранение, восстановление, рациональное использование» (г. Керчь, 13–18 сентября 2022 г.) // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. 2023. № 1. С. 155–157.

Conference materials

III INTERNATIONAL SCIENTIFIC AND PRACTICAL CONFERENCE "BIOLOGICAL DIVERSITY: STUDY, CONSERVATION, RESTORATION, RATIONAL USE" (Kerch, September 13-18, 2022)

Victor A. Minoransky¹, Julia V. Timofeenko²

¹ Association "Wild Nature of the Steppe", Rostov-on-Don, Russia

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

For citation: Minoransky V.A., Timofeenko J.V. III International Scientific and Practical Conference "Biological Diversity: Study, Conservation, Restoration, Rational Use" (Kerch, September 13-18, 2022). *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2023;(1):155-157. (In Russ.).

Проблемы сохранения природных ресурсов и биоразнообразия в настоящее время являются наиболее важными, сложными и труднорешаемыми. На базе кафедры водных биоресурсов и марикультуры Керченского государственного морского технологического университета (КГМТУ) 13–18 сентября 2022 г. состоялась III Международная научно-практическая конференция «Биологическое разнообразие: изучение, сохранение, восстановление, рациональное использование». Организаторами её, как и предыдущих, стали КГМТУ, ассоциация «Живая природа степи», АзНИИРХ, Карадагская научная станция и другие структуры. Тематика докладов включала фун-

даментальную биологию, наземные и водные экосистемы, экологическое воспитание и образование, биоразнообразие и благополучие населения. Актуальность проблем сохранения, восстановления и устойчивого использования биоразнообразия, его ресурсов привлекла внимание представителей научных, учебных и других структур. В конференции приняли участие ученые Москвы, Санкт-Петербурга, Керчи, Симферополя, Севастополя, Краснодар, Ростова-на-Дону, Воронежа, Рязани, Чебоксар, Мурманска, Архангельска, Петропавловска-Камчатского, Южно-Сахалинска, Владивостока, Хабаровска, Улан-Удэ, а также Белоруссии, Казахстана, Абхазии, Узбекистана, Греции, Турции, Китая, Финляндии, Новой Зеландии.

Свои исследования представили специалисты Крымского ФУ, Кубанского ГУ, ЮФУ, МГУ, СПбГУ, Северного ФУ им. М.В. Ломоносова, Сахалинского ГУ, Костанайского регионального ун-та, Керченского ГМТУ, Донского ГТУ, Астраханского ГТУ, Калининградского ГТУ, институтов РАН и других научных структур, в частности ИПЭЭ РАН, Института биологии южных морей РАН, ЮНЦ РАН, Федерального исследовательского центра комплексного изучения Арктики, Карадагской научной станции, Тихоокеанского института географии ДВО РАН, ассоциации «Живая природа степи», белорусского Института рыбного х-ва, Института экологии АН Абхазии, Российско-Вьетнамского тропического НИИ и технологического центра Хошимина, Института ботаники АН РУ и Института микробиологии АН РУ (Ташкент). Работники ВНИРО и его филиалов (Азово-Черноморский, Волжско-Каспийский, Байкальский, Санкт-Петербургский, Полярный, Хабаровский, Сахалинский, Тихоокеанский) посвятили свои материалы проблемам водных экосистем России и зарубежья. Активное участие в работе приняли специалисты ботанов (Никитский, Донецкий, Чебоксарский, Ташкентский), заповедников (Карадагский, Ростовский, Воронежский, дирекция «Заповедники Крыма», Бадай-Тугай) и других особо охраняемых природных территорий (ООПТ).

В сообщениях рассмотрены проблемы оценки роли биоразнообразия и отдельных его компонентов в существовании экосистем Земли, государств, регионов, отдельных территорий (акватории) и жизни людей. Объектами исследований являлись различные организмы – от микроорганизмов, водорослей до членистоногих, птиц, зверей. Изучались их биологические, генетические, экологические, морфологические и другие особенности, роль отдельных видов и групп в экосистемах, представлены рекомендации по регулированию их численности. Выяснен состав живых организмов в различных экосистемах, определена роль инвазионных видов, количество которых возрастает. Уделено внимание разработке и внедрению новых методов и технологий в процессе исследования биологических объектов. Большинство работ связано с организмами, имеющими важное ресурсное значение для населения (растения, промысловые ракообразные, рыбы, млекопитающие, птицы и др.). Определяются их биологические особенности, запасы, пути сохранения и восстановления, разведения в искусственных условиях.

Многие сообщения освещают вопросы негативного антропогенного влияния на экосистемы и их биоразнообразие (сточные воды, донные отложения полихлорбифенилов и других вредных веществ, микропластика в тканях животных, губительное влияние ряда водорослей на ихтиофауну и т.д.). Эти негативные проявления при игнорировании вопросов охраны и разумного использования природных ресурсов многочисленны и в наземных экосистемах, что приводит к их разрушению, обеднению биоразнообразия, потере природных ресурсов, ухудшению благосостояния и здоровья населения. Недостаток профессионалов, игнорирование их мнения властями и бизнесом в городах приводят к деградации микробиоценозов почв и наземной биоты, вырубке древесной растительности, замене её чужеродными видами, сокращению площадей зеленых «легких» и другим последствиям, что негативно отражается на благополучии и здоровье населения.

Ученые и специалисты разрабатывают и рекомендуют различные мероприятия по сохранению и восстановлению биоресурсов, устойчивому их использованию. Уделяется внимание высеву фитомелиораторов на породных отвалах угольных шахт, сохранению и восстановлению степных растений на пастбищах, опыту успешных охотничьих и рыболовных хозяйств по сохранению биоресурсов, влиянию биостимуляторов на урожайность и качество травосмесей в растениеводстве, техническим решениям вопросов снижения загрязнения водных экосистем и многим другим. Биологи ведут исследования по выяснению роли заповедников, иных ООПТ в сохранении ресурсных, редких, исчезающих видов растений и животных, всего биоразнообразия, по оптимизации экологической ситуации регионов. Внимание уделяется экологическому образованию и воспитанию населения, что в природоохранной деятельности дает хорошие результаты. Острыми остаются вопросы

участия бизнеса и чиновников в сохранении и восстановлении биоразнообразия, рациональном использовании природных ресурсов, прежде всего биологических.

Во время работы конференции участники познакомились с богатой историей г. Керчи и его достопримечательностями. Состоялись экскурсии в государственные природные заповедники «Опукский» в Крыму и «Утриш» на Черноморском побережье, где они могли оценить работу с охраняемыми экосистемами, деятельность сотрудников и их успехи в сохранении и восстановлении биоразнообразия. Научные материалы конференции, как и двух предыдущих, опубликованы и доступны всем заинтересованным лицам.

Информация об авторах

В.А. Миноранский – доктор сельскохозяйственных наук, профессор кафедры зоологии, Южный федеральный университет; президент ассоциации «Живая природа степи».

Ю.В. Тимофеевко – ассистент кафедры зоологии.

Information about the authors

V.A. Minoransky - Doctor of Science (Agricultural Science), Professor of the Department of Zoology, Southern Federal University; President of the Association "Wild Nature of the Steppe".

J.V. Timofeenko - Assistant of the Department of Zoology, Southern Federal University.

Над номером работали: Л.С. Ворович, Е.М. Колосова, В.И. Литвиненко, О.В. Назаренко, Н.Г. Шатравкина, М.С. Шипитко

Подписано в печать 27.03.2023. Выход в свет 31.03.2023. Формат 60×84 1/8. Бумага офсетная.
Шрифт Times. Усл. печ. л. 18,13. Уч.-изд. л. 20,19. Тираж 250 экз. Заказ № 8975.

Адрес редакции и издателя (для переписки): 344006, г. Ростов-на-Дону, ул. Большая Садовая, 105/42, ЮФУ,
журнал «Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Естественные науки»,
e-mail: izvestiya@sfedu.ru, адрес в Интернете: www.izvestiya.sfedu.ru

Адрес редколлегии: 344090, г. Ростов-на-Дону, пр. Стачки, 200/1, корп. 2, к. 110,
тел.: +7 (863) 218-40-00 доб. 11-093; доб. 11-094.

Отпечатано в отделе полиграфической, корпоративной и сувенирной продукции
Издательско-полиграфического комплекса КИБИ МЕДИА ЦЕНТРА ЮФУ,
344090, г. Ростов-на-Дону, пр. Стачки, 200/1, корп. 1, к 104, тел. +7 (863) 243-41-66

Magazine released L.S. Vorovich, E.M. Kolosova, V.I. Litvinenko, O.V. Nazarenko, N.G. Shatravkina, M.S. Shipitko

Signed print March 27, 2023. The publication March 31, 2023. Format 60×84 1/8. Offset paper. Font Times.
Conv. print. sheets 18.13. Publ. sign. 20.19. Edition 250 copies. Order number 8975.

Address of Editorial Board: 344006, Rostov-on-Don, Bolshaya Sadovaya St., 105/42,
SFU, journal “Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science”,
e-mail: izvestiya@sfedu.ru, Web Address: www.izvestiya.sfedu.ru

Address of Editorial Board: 344090, Rostov-on-Don, Stachki Ave, 200/1, build. 2, room 110,
phone +7 (863) 218-40-00 ext. 11-093; ext. 11-094.

Printed in the printing department, and corporate souvenirs,
Publishing and printing complex KIBI MEDIA CENTER, SFU,
344090, Rostov-on-Don, Stachki Ave, 200/1, build. 1, room 104, phone (863) 243-41-66

**НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
«ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ.
СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ РЕГИОН. ЕСТЕСТВЕННЫЕ НАУКИ»**

Рецензируемый журнал «Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки» продолжает приём работ. Он имеет статус центрального издания и включён в перечень ВАК по следующим отраслям:

- физико-математические науки (математика, механика);
- науки о Земле.

Принимаются работы и по другим отраслям науки. Также печатаются материалы в разделах «Заметки о книгах», «Научная жизнь», «Штрихи к портрету».

Журнал издается с периодичностью 4 номера в год. С электронной версией можно ознакомиться на сайте Научной электронной библиотеки http://elibrary.ru/title_about.asp?id=7362. Опубликованные статьи индексируются в российских и международных электронных библиотеках и наукометрических базах данных: РИНЦ (RSCI), РУКОНТ, «Киберленинка», ЭБС «Университетская библиотека онлайн», ИВИС, Ulrich, EBSCO, Chemical Abstracts. Журнал включен в Russian Science Citation Index на платформе Web of Science.

Авторы, сохраняя за собой авторские права на работу и передавая журналу «Известия вузов. Северо-Кавказский регион» право первой публикации, автоматически принимают на себя обязательство не печатать её ни полностью, ни частично в каком-либо издании без указания ссылки на оригинальную публикацию в этом журнале.

Издательские услуги оплачиваются организацией или автором после утверждения статьи на редколлегии.

Оформление работ осуществляется согласно правилам:

1. Представляется статья в электронном виде. Перед заголовком указать индекс УДК.
2. Статья оформляется в формате .doc или .docx (MS Word) через 1,5 интервала, шрифтом Times New Roman размером 14 пт, страницы пронумерованы.
3. Сведения об авторах с указанием автора, ответственного за переписку, на русском и английском языках. Экспертное заключение.
4. Полное название организации на русском и английском языках.
5. Название статьи и фамилии авторов на русском и английском языках.
6. Аннотация на русском и английском языках (1000–1500 знаков / 150–200 слов).
7. Ключевые слова на русском и английском языках (8–10 слов).

Журнал распространяется по подписке через объединённый каталог «Пресса России», интернет-каталог «Пресса по подписке». Подписной индекс – 70415 (подписка на полугодие). 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 10.18522/1026-2237-2023-1. Известия высших учебных заведений.

Северо-Кавказский регион. Естественные науки.

2023. № 1