

ИЗВЕСТИЯ
ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

*Северо-Кавказский
регион*

ЕСТЕСТВЕННЫЕ

НАУКИ

2021

4

Журнал основан в 1972 г. Ю.А. Ждановым

Главная редакция:

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

Редакционная коллегия:

М.А. Боровская – главный редактор, 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
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 ВНИЦ 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
Э.З. Эмирбеков – доктор биол. наук, профессор, Южный федеральный университет, Россия
В.Н. Труфанов – зам. председателя редколлегии, доктор геол.-мин. наук, профессор, Южный федеральный университет, Россия
А.В. Абанин – доктор физ.-мат. наук, профессор, Южный федеральный университет, Россия
Г.Г. Бабаян – доктор техн. наук, Центр эколого-ноосферных исследований НАН РА, Армения
О.С. Безуглова – доктор биол. наук, профессор, Южный федеральный университет, Россия
Н.И. Бойко – доктор геол.-мин. наук, профессор, Южный федеральный университет, Россия
А.В. Бочкарев – доктор геол.-мин. наук, профессор, Российский государственный университет нефти и газа им. И.М. Губкина, Россия
Л.С. Ворович – кандидат физ.-мат. наук, доцент, Южный федеральный университет, Россия
О.Н. Демина – доктор биол. наук, профессор, Карачаево-Черкесский государственный университет им. У.Д. Алиева, Россия
А.Г. Захаров – доктор техн. наук, профессор, Южный федеральный университет, Россия
Л.М. Зубов – доктор физико-математических наук, профессор, Южный федеральный университет, Россия
Я.М. Ерусалимский – зам. председателя редколлегии, кандидат физ.-мат. наук, доктор техн. наук, профессор, Южный федеральный университет, 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
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
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
П. Фаттал – 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
Т.А. Ватульян – ответственный секретарь по издательской деятельности журнала, 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

Над номером работали: Т.А. Ватульян, Л.С. Ворович, Е.М. Колосова, В.И. Литвиненко, О.В. Назаренко, М.С. Шипитко

Подписано в печать 24.12.2021. Выход в свет 28.12.2021. Формат 60×84 1/8. Бумага офсетная.
Шрифт Times. Усл. печ. л. 13,95. Уч.-изд. л. 15,56. Тираж 250 экз. Заказ № 8345.

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@sfnu.ru, адрес в Интернете: www.izvestiya.sfnu.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) 247-80-51

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
V.A. Babeshko - Academician, Russian Academy of Sciences, Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Kuban State University, Russia
B.S. Karamurзов - Doctor of Technical Sciences, Professor, Berbekov Kabardino-Balkarian State University, Russia
V.I. Kolesnikov - Academician, Russian Academy of Sciences, Doctor of Technical Sciences, Professor, Rostov State Transport University, Russia
A.G. Kusraev - Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Southern Mathematical Institute, Vladikavkaz Scientific Center, Russian Academy of Sciences, Russia
G.G. Matishov - Academician, Sciences, Doctor of Geology and Mineralogy, Professor, Federal Research Center the Southern Scientific Center, Russian Academy of Sciences, Russia
V.I. Minkin - Academician, Russian Academy of Sciences, Doctor of Chemistry, Professor, Southern Federal University, Russia
M.H. Rabadanov - Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Dagestan State University, Russia
E.Z. Emirbekov - Doctor of Biological Sciences, Professor, Southern Federal University, Russia
V.N. Trufanov - Deputy Chairman of the Editorial Board, Doctor of Geology and Mineralogy, Professor, Southern Federal University, Russia
A.V. Abanin - Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Southern Federal University, Russia
G.G. Babayan - Doctor of Technical Sciences, Center for Ecological and Noospheric Studies, National Academy of Sciences of Armenia, Armenia
O.S. Bezuglova - Doctor of Biology, Professor, Southern Federal University, Russia
N.I. Boiko - Doctor of Geology and Mineralogy, Professor, Southern Federal University, Russia
A.V. Bochkarev - Doctor of Geology and Mineralogy, Professor, Gubkin Russian State University of Oil and Gas, Russia
L.S. Vorovich - Candidate of Physics and Mathematics, Associate Professor, Southern Federal University, Russia
O.N. Dyomina - Doctor of Biological Sciences, Professor, Aliev Karachay-Cherkess State University, Russia
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
Ya.M. Erusalimsky - Deputy Chairman of the Editorial Board, Candidate of Physics and Mathematics, Doctor of Technical Sciences, Professor, Southern Federal University, 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 Science, Professor, Southern Federal University, Russia
E.M. Kolosova - Candidate of Physics and Mathematics, Southern Federal University, Russia
G.V. Kupovykh - Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Southern Federal University, Russia
S.V. Kurbatov - Doctor of Chemistry, Professor, Southern Federal University, Russia
A.M. Lerer - Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Southern Federal University, Russia
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
G.V. Pirogovskaya - Doctor of Agricultural Sciences, Professor, Institute of Soil Science and Agrochemistry, National Academy of Sciences of Belarus, Belarus
V.S. Rabinovich - Doctor of Physics and Mathematics, Professor, National Polytechnic Institute, Mexico
M.A. Sazykina - Doctor of Biological Sciences, Professor, Southern Federal University, Russia
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
T.A. Vatulyan - Assistant Editor for Publishing of the Journal, 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

Magazine released T.A. Vatulyan, L.S. Vorovich, E.M. Kolosova, V.I. Litvinenko, O.V. Nazarenko, M.S. Shipitko

Signed print December 24, 2021. The publication December 28, 2021. Format 60×84 1/8. Offset paper. Font Times .
Conv. print. sheets 13.95. Publ. sign. 15.56. Edition 250 copies. Order number 8345.

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@sfsu.ru, Web Address: www.izvestiya.sfsu.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) 247-80-51

ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ. СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ РЕГИОН

BULLETIN OF HIGHER EDUCATIONAL INSTITUTIONS. NORTH CAUCASUS REGION

doi 10.18522/1026-2237-2021-4

*Свидетельство о регистрации
ПИ № ФС 77 – 77252 от 25.11.2019,
выдано Федеральной службой по надзору
в сфере связи, информационных технологий
и массовых коммуникаций
Научный журнал
Издаётся с 1973 г.
Периодичность серии 4 номера в год
№ 4 (212) 2021 г.*

*Registration certificate
PI No. FS 77 - 77252 dated 25.11.2019
issued Federal Service for Supervision
of Communications, Information Technology,
and Mass Media
Science magazine
Published since 1973.
4 issues per a year
No. 4 (212) 2021*

ЕСТЕСТВЕННЫЕ НАУКИ

NATURAL SCIENCE

СОДЕРЖАНИЕ

CONTENTS

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ

PHYSICAL AND MATHEMATICAL SCIENCES

- Бабаев А.Б., Кряквин В.Д.** Матричное уравнение $AX+XB=C$ над конечным полем..... 4
- Ватульян А.О., Варченко А.А.** Исследование колебаний балки из функционально-градиентного материала с учетом затухания..... 10
- Казаков Е.А., Сумбатян М.А.** Метод улучшения аналитических результатов для вращающейся лопасти в сравнении с прямым численным расчетом..... 19

- Babaev A.B., Kryakvin V.D.** Matrix Equation $AX+XB=C$ over a Finite Field..... 4
- Vatulyan A.O., Varchenko A.A.** Investigation of Vibrations of a Beam Made of a Functionally Graded Material Taking into Account Attenuation..... 10
- Kazakov E.A., Sumbatyan M.A.** Method for Improving Analytical Results for a Rotating Blade Versus Direct Numerical Calculation..... 19

НАУКИ О ЗЕМЛЕ

SCIENCES OF EARTH

- Борисова Т.А., Бешенцев А.Н.** Риски лесных пожаров в бассейне озера Байкал: статистическая оценка и картографирование..... 26
- Бураева Е.А., Безуглова О.С., Горбов С.Н., Иванов Д.В., Михайлова Т.А., Кацаева Е.А., Маломыжева Н.В., Швецова Д.А., Ширяева А.А.** Особенности распределения радионуклидов в наземных экосистемах каштановой зоны в условиях Ростовской области..... 34
- Дегтярева Т.В.** Формирование микроэлементного состава тёмно-серых лесных почв Ставропольской возвышенности..... 45
- Матюгин В.А., Попов А.Е., Безуглова О.С.** Применение гуминовых препаратов на посевах озимой пшеницы в условиях полевого опыта на черноземе обыкновенном карбонатном..... 53
- Назаренко О.В., Куао Я.С.** Анализ изменчивости осадков в провинции Ольгин (Куба) за период 1970–2020 годы..... 61

- Borisova T.A., Beshentsev A.N.** Risks of Forest Fires in the Lake Baikal Basin: Statistical Assessment and Mapping..... 26
- Buraeva E.A., Bezuglova O.S., Gorbov S.N., Ivanov D.V., Mikhailova T.A., Kashchayeva E.A., Malomyzheva N.V., Shvetsova D.A., Shiryaeva A.A.** Features of Radionuclides Distribution in Terrestrial Ecosystems of the Chestnut Zone in the Conditions of the Rostov Region..... 34
- Degtyareva T.V.** Formation of Microelemental Composition of Dark Gray Forest Soils of the Stavropol Hill..... 45
- Matyugin V.A., Popov A.E., Bezuglova O.S.** The Application of Humic Preparations on Winter Wheat in a Field Experiment on Calcic Chernozem..... 53
- Nazarenko O.V., Quao Ya.S.** Analysis of Precipitation Variability in the Province of Holguin (Cuba) from 1970 to 2020..... 61

Шилин А.Г. Исследование функционирования льдо-образующих средств активных воздействий в реальных условиях применения	69	Shilin A.G. Research of Functioning of Ice-Forming Means of Active Impact in Real Conditions of Application.....	69
Jafarli J.V. Assessment of Groundwater Efficiency on Irrigation in the Area Between Turyanchay-Girdimanchay Rivers	74	Jafarli J.V. Assessment of Groundwater Efficiency on Irrigation in the Area Between Turyanchay-Girdimanchay Rivers	74

БИОЛОГИЧЕСКИЕ НАУКИ

Биарсланов А.Б., Залибеков З.Г., Гасанова З.У., Магомедова М.Х.-М., Гаджиев И.Р. Опыт применения вегетационного индекса в дистанционных исследованиях динамики продуктивности почвенного покрова Терско-Кумской низменности	81	Biarslanov A.B., Zalibekov Z.G., Gasanova Z.U., Magomedova M.H.-M., Gadzhiev I.R. Application Experience of the Vegetation Index in Remote Sensing Research of Soil Cover Productivity Dynamics in the Terek-Kuma Lowland	81
Гусейнов К.М., Гасанова А.Ш., Хлопкова М.В. К изучению биологии леща обыкновенного (<i>Abramis brama</i> L., 1758) юго-западного шельфа Северного Каспия	90	Guseynov K.M., Gasanova A.Sh., Khlopkova M.V. To the Study of the Biology of <i>Abramis brama</i> L. (1758) of the Southwestern Shelf of the North Caspian	90
Медведева А.М., Бирюкова О.А., Минкина Т.М., Кучменко Е.В., Манджиева С.С. Подвижность и распределение фосфора в черноземе обыкновенном при различных агротехнологиях	95	Medvedeva A.M., Biryukova O.A., Minkina T.M., Kuchmenko E.V., Mandzhieva S.S. Phosphorus Mobility and Distribution in Haplic Chernozem under Various Agrotechnologies	95
Щербина В.Г. Рекреационные изменения аллелопатической активности корневых систем древостоя в лесных экосистемах	103	Scherbina V.G. Recreational Changes in the Allelopathic Activity of the Root Systems of the Stand in Forest Ecosystems	103

НАШИ ЮБИЛЯРЫ

Ватульян А.О., Иваночкин П.Г., Чебаков М.И., Беляк О.А. Владимир Иванович Колесников (к 80-летию со дня рождения).....	113	Vatulyan A.O., Ivanochkin P.G., Chebakov M.I., Belyak O.A. Vladimir Ivanovich Kolesnikov (on the Occasion of His 80th Birthday).....	113
---	-----	---	-----

ПАМЯТИ УЧЕНОГО

Наседкин А.В., Карякин М.И., Ватульян А.О. Александр Владимирович Белокоп (1941–2013)	116	Nasedkin A.V., Karjakin M.I., Vatulyan A.O. Aleksandr Vladimirovich Belokon (1941–2013)	116
Указатель материалов, опубликованных в журнале «Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Естественные науки» в 2021 г.	118	Index of Articles Published in the Journal “Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science” in 2021	118

BIOLOGICAL SCIENCES

OUR PERSONS

IN MEMORY OF SCIENTIST

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ

Научная статья

УДК 512.624.3

doi: 10.18522/1026-2237-2021-4-4-9

МАТРИЧНОЕ УРАВНЕНИЕ $AX+XB=C$ НАД КОНЕЧНЫМ ПОЛЕМАливерд Бахтиярович Бабаев¹, Вадим Донатович Кряквин²✉^{1,2} Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, Россия¹albabaev@sfnedu.ru²kryakvin@sfnedu.ru ✉

Аннотация. Рассматривается матричное уравнение $AX+XB=C$ над конечным полем Галуа. Исследуются вопросы его разрешимости. Для анализа разрешимости выполняется преобразование уравнения к виду $\tilde{A}\tilde{X}+\tilde{X}\tilde{B}=\tilde{C}$, где матрицы $\tilde{A}$ и $\tilde{B}$ имеют жорданову нормальную форму над полем разложения произведения характеристических многочленов матриц A и B . Это позволяет рассматривать последнее уравнение в виде системы блочных равенств. Для этого матрицы $\tilde{A}$, $\tilde{B}$, $\tilde{C}$, $\tilde{X}$ разбиваются на блоки $\tilde{A}_{\alpha\beta}$, $\tilde{B}_{\alpha\beta}$, $\tilde{C}_{\alpha\beta}$, $\tilde{X}_{\alpha\beta}$, каждый из которых соответствует только одной жордановой клетке с собственным значением λ_α матрицы A и только одной жордановой клетке с собственным значением μ_β матрицы B . Для нахождения неизвестных блоков используется метод итераций Фробениуса. Если характеристические многочлены матриц A и B являются взаимно простыми, то решение матричного уравнения существует и является единственным. Если же для некоторых пар корней из поля разложения характеристических многочленов матриц A и B верно равенство $\lambda_\alpha+\mu_\beta=0$, то решение существует тогда и только тогда, когда выполняется условие разрешимости. Приведены примеры, иллюстрирующие полученные результаты.

Ключевые слова: матричное уравнение, конечное поле Галуа, поле разложения многочлена, спектр матрицы, жорданова нормальная форма, условие разрешимости

Для цитирования: Бабаев А.Б., Кряквин В.Д. Матричное уравнение $AX+XB=C$ над конечным полем // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. 2021. № 4. С. 4–9.

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

PHYSICAL AND MATHEMATICAL SCIENCES

Original article

MATRIX EQUATION $AX+XB=C$ OVER A FINITE FIELDAliverd B. Babaev¹, Vadim D. Kryakvin²✉^{1,2}Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia¹albabaev@sfnedu.ru ✉²kryakvin@sfnedu.ru

Annotation. The matrix equation $AX+XB=C$ over a finite Galois field is considered, and the questions of the solvability of this equation are investigated. To analyze the solvability, the equation is transformed to the form $\tilde{A}\tilde{X}+\tilde{X}\tilde{B}=\tilde{C}$, where the matrices $\tilde{A}$ and $\tilde{B}$ have Jordan normal form over the decomposition field of the product of

the characteristic polynomials of the matrices A and B . This allows us to consider the last equation in the form of a system of block equalities. For this, the matrices $\tilde{A}$, $\tilde{B}$, $\tilde{C}$, $\tilde{X}$ are partitioned into blocks $\tilde{A}_{\alpha\beta}$, $\tilde{B}_{\alpha\beta}$, $\tilde{C}_{\alpha\beta}$, $\tilde{X}_{\alpha\beta}$, each of which corresponds to only one Jordan box with an eigenvalue λ_α of the matrix A and only one Jordan box with an eigenvalue μ_β of the matrix B . To find the unknown blocks, the Frobenius iteration method is used. If the characteristic polynomials of the matrices A and $-B$ are coprime, the solution to the matrix equation exists and is unique. If $\lambda_\alpha + \mu_\beta = 0$ is true for some pairs of roots from the decomposition field of the product the the characteristic polynomials of the matrices A and B , then the solution exists if and only if the solvability condition is satisfied. Examples are given to illustrate the obtained results.

Keywords: matrix equation, finite Galois field, decomposition field of a polynomial, spectrum of a matrix, Jordan normal form, solvability condition

For citation: Babaev A.B., Kryakvin V.D. Matrix Equation $AX + XB = C$ over a Finite Field. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science*. 2021;(4):4-9. (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 1896 г. Ф.Г. Фробениус [1] исследовал матричное уравнение $AX - XB = 0$ в связи с описанием всех матриц, коммутирующих с матрицей A : $AX - XA = 0$ [2, с. 199–207]. Подходы к исследованию матричного уравнения

$$AX + XB = C, \quad (1)$$

связанные с использованием методов решений систем дифференциальных уравнений, изложены в монографиях П. Ланкастера [3, с. 239–241] и Р. Беллмана [4, с. 211–212]. В работах А.К. Деменчука и Е.К. Макарова [5, 6] получены формулы для решения матричного уравнения при дополнительных условиях на уравнение. Е.Л. Рабкин в работе [7] в 2014 г. полностью описал алгебраическими методами условия разрешимости матричного уравнения (1) и представил формулы для нахождения общего решения над полем комплексных чисел. Интерес к этому матричному уравнению и актуальность его исследования подтверждаются недавними публикациями по этой теме, например [8, 9]. Алгебраичность подходов работ [1, 2, 6] позволяет осуществить перенос полученных в них результатов на случай матричного уравнения, рассматриваемого над конечным полем Галуа [10]. Очевидно, что основным приложением является поиск и подсчёт количества матриц енад конечным полем, которые коммутируют с заданной матрицей. Конечно, иногда интересны матрицы X и их количество, удовлетворяющие соотношению $AX = XB$ для заданных матриц A и B . Для неоднородного уравнения приложения могут возникать, например, в криптографии и алгебраической теории помехоустойчивого кодирования.

Постановка задачи

Будем исследовать матричное уравнение (1), где A и B – квадратные матрицы порядка n и m соответственно; C – матрица размером $n \times m$. Матрицы A, B, C заданы над полем Галуа GF_q , неизвестная матрица X размером $n \times m$ – с элементами из GF_q . Рассматриваются стандартные вопросы об условиях разрешимости матричного уравнения (1), в случае разрешимости – о количестве решений, а также формулы для их вычисления.

Основные преобразования

Первым важным шагом для решения матричного уравнения (1) является приведение матриц A и B к жордановой нормальной форме. Для этого придётся рассмотрение матричного уравнения перенести в расширение поля GF_q (в поле разложения произведения характеристических многочленов матриц A и B), которое будем обозначать GF_Q ($GF_q \subset GF_Q$). Тогда жордановы нормальные формы матриц A и B будут иметь клеточно-диагональную форму

$$\tilde{A} = \text{diag}(J_{n_1}(\lambda_1), J_{n_2}(\lambda_2), \dots, J_{n_k}(\lambda_k)), \quad \tilde{B} = \text{diag}(J_{m_1}(\mu_1), J_{m_2}(\mu_2), \dots, J_{m_l}(\mu_l)),$$

где клетки матрицы $\tilde{A}$ порядка n_i имеют вид

$$J_{n_i}(\lambda_i) = \begin{pmatrix} \lambda_i & 1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_i & 1 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_i & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & \lambda_i & 1 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & \lambda_i \end{pmatrix};$$

λ_i – собственные числа матрицы $\mathbf{A}$ из поля GF_Q . Аналогично для матрицы $\mathbf{B}$. Пусть $\mathbf{U}$ и $\mathbf{V}$ – соответственно матрицы перехода к жордановой нормальной форме матриц $\mathbf{A}$ и $\mathbf{B}$, т.е. выполнены равенства $\tilde{\mathbf{A}} = \mathbf{U}^{-1}\mathbf{A}\mathbf{U}$, $\tilde{\mathbf{B}} = \mathbf{V}^{-1}\mathbf{B}\mathbf{V}$, где $\tilde{\mathbf{A}}$ и $\tilde{\mathbf{B}}$ – матрицы, имеющие жорданову нормальную форму над полем GF_Q ($\mathbf{U}$ и $\mathbf{V}$ заданы над GF_Q). Тогда уравнение (1) можно преобразовать к виду

$$\tilde{\mathbf{A}}\tilde{\mathbf{X}} + \tilde{\mathbf{X}}\tilde{\mathbf{B}} = \tilde{\mathbf{C}}, \quad (2)$$

где

$$\tilde{\mathbf{X}} = \mathbf{U}^{-1}\mathbf{X}\mathbf{V}, \quad \tilde{\mathbf{C}} = \mathbf{U}^{-1}\mathbf{C}\mathbf{V}. \quad (3)$$

Следуя методу работы [7], получаем, что матрицы $\tilde{\mathbf{C}}, \tilde{\mathbf{X}}$ в равенстве (2) разбиваются на блоки $\tilde{\mathbf{C}}_{\alpha\beta}, \tilde{\mathbf{X}}_{\alpha\beta}$ размером $n_\alpha \times m_\beta$, каждый из которых соответствует только одной жордановой клетке $J_{n_\alpha}(\lambda_\alpha)$ с собственным значением λ_α матрицы $\mathbf{A}$ и только одной жордановой клетке $J_{m_\beta}(\mu_\beta)$ с собственным значением μ_β матрицы $\mathbf{B}$. Для каждого такого блока $\tilde{\mathbf{X}}_{\alpha\beta}$ из (2) получаем матричное уравнение вида

$$(\lambda_\alpha \mathbf{E} + J_{n_\alpha}(0))\tilde{\mathbf{X}}_{\alpha\beta} + \tilde{\mathbf{X}}_{\alpha\beta}(\mu_\beta \mathbf{E} + J_{m_\beta}(0)) = \tilde{\mathbf{C}}_{\alpha\beta}, \quad (4)$$

где $\mathbf{E}$ – единичная матрица соответствующего размера.

Условие единственности

Повторяя выкладки работы [7], получаем, что для любого блока $\tilde{\mathbf{X}}_{\alpha\beta}$, такого, что выполняется условие $\lambda_\alpha + \mu_\beta \neq 0$, в поле GF_Q имеет место равенство

$$\tilde{\mathbf{X}}_{\alpha\beta} = \sum_{i=0}^{n_\alpha+m_\beta-2} \frac{(-1)^i}{(\lambda_\alpha+\mu_\beta)^{i+1}} \sum_{k=0}^i C_i^k J_{n_\alpha}(0)^k \tilde{\mathbf{C}}_{\alpha\beta} J_{m_\beta}(0)^{i-k}. \quad (5)$$

Если для всех точек спектра λ_α матрицы $\mathbf{A}$ и для всех точек спектра μ_β матрицы $\mathbf{B}$ выполняется условие $\lambda_\alpha + \mu_\beta \neq 0$, то матрица $\tilde{\mathbf{X}}$ существует, а следовательно, и решение матричного уравнения $\mathbf{A}\mathbf{X} + \mathbf{X}\mathbf{B} = \mathbf{C}$ существует и является единственным. Очевидно, что в этом случае матрица $\mathbf{X}$ состоит из элементов, принадлежащих полю GF_Q .

Теорема 1. Матричное уравнение (1) над полем GF_q имеет, причем единственное, решение тогда и только тогда, когда характеристические многочлены матриц $\mathbf{A}$ и $-\mathbf{B}$ являются взаимно простыми. Решение $\mathbf{X} = \mathbf{U}\tilde{\mathbf{X}}\mathbf{V}^{-1}$ можно построить из блоков (5).

Заметим, что все вычисления в последней формуле выполняются в поле разложения произведения характеристических многочленов. Тем не менее получающаяся в итоге матрица $\mathbf{X}$ состоит из элементов, принадлежащих полю GF_q .

Пример 1. Рассмотрим уравнение (1) над полем Галуа GF_3 с матрицами

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 1 & 0 \\ 0 & 2 & 1 & 1 \\ 2 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 2 \end{pmatrix}, \mathbf{B} = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 2 & 2 \\ 1 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}, \mathbf{C} = \begin{pmatrix} 2 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 2 & 2 \\ 2 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 2 & 1 \end{pmatrix}.$$

Характеристические многочлены матриц $\mathbf{A}$ и $-\mathbf{B}$ соответственно равны $x^4 + 2x^2 + x + 2$ и $x^4 + 2x^2 + x$. Легко проверяется, что они взаимно просты. Значит, уравнение имеет единственное решение. По формулам (3) и (5) получаем, что решение имеет вид

$$\mathbf{X} = \begin{pmatrix} 0 & 2 & 0 & 2 \\ 0 & 0 & 2 & 0 \\ 1 & 0 & 2 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 2 \end{pmatrix}.$$

При этом, если пользоваться формулами (2), (4) для вычисления матрицы $\mathbf{X}$, то эти вычисления нужно выполнять в поле разложения произведения характеристических многочленов, состоящем из 729 элементов.

Условие разрешимости

Пусть многочлен h – наибольший общий делитель характеристических многочленов матриц $\mathbf{A}$ и $-\mathbf{B}$. Обозначим через $\sigma(h)$ множество всех корней многочлена h (в поле разложения этого многочлена). В теореме 1 был учтен случай пустого множества $\sigma(h)$. Пусть это множество не пусто. Это значит, что для некоторых блочных равенств (3) выполняется равенство $\lambda_\alpha + \mu_\beta = 0$. Тогда (4) равносильно уравнению $\mathbf{J}_{n_\alpha}(0)\tilde{\mathbf{X}}_{\alpha\beta} + \tilde{\mathbf{X}}_{\alpha\beta}\mathbf{J}_{m_\beta}(0) = \tilde{\mathbf{C}}_{\alpha\beta}$.

Очевидно, что отсюда следует система равенств $\tilde{x}_{i+1,j} + \tilde{x}_{i,j-1} = \tilde{c}_{ij}$, где $i = 1, 2, \dots, n_\alpha$, $j = 1, 2, \dots, m_\beta$, если считать, что $\tilde{x}_{n_\alpha+1,j} = \tilde{x}_{i,0} = 0$.

Итерируя $r-1$ раз равенство $\tilde{x}_{ij} = \tilde{c}_{i,j+1} - \tilde{x}_{i+1,j+1}$, получим

$$\tilde{x}_{ij} = \sum_{k=0}^{r-1} (-1)^k \tilde{c}_{i+k,j+k+1} + (-1)^r \tilde{x}_{i+r,j+r}.$$

Так как $\tilde{x}_{n_\alpha,j} = \tilde{c}_{n_\alpha,j+1}$ и $\tilde{x}_{i1} = \tilde{c}_{i-1,1}$, то

$$\sum_{k=1}^r (-1)^k \tilde{c}_{n_\alpha-r+k,k} = 0, \quad r = 1, 2, \dots, \min(n_\alpha, m_\beta). \quad (6)$$

Условие (6) является достаточным для разрешимости блочного уравнения (4). При выполнении условия (6) получаем формулу для вычисления элементов неизвестного блока $\tilde{\mathbf{X}}_{\alpha\beta}$

$$\tilde{x}_{ij} = \sum_{k=0}^{i-1} (-1)^k \tilde{c}_{i-k-1,j-k}, \quad j = 1, 2, \dots, m_\beta, \quad i = 1, 2, \dots, n_\alpha, \quad (7)$$

если $n_\alpha \geq m_\beta$, $\tilde{c}_{0j}$ являются свободными неизвестными, $\tilde{c}_{ij} = 0$ при $i < 0$, и формулу

$$\tilde{x}_{ij} = \sum_{k=0}^{n_\alpha-i} (-1)^k \tilde{c}_{i+k,j+k+1}, \quad i = 1, 2, \dots, n_\alpha, \quad j = 1, 2, \dots, m_\beta, \quad (8)$$

если $n_\alpha < m_\beta$, $\tilde{c}_{i,m_\beta+1}$ являются свободными неизвестными, $\tilde{c}_{ij} = 0$ при $j > m_\beta + 1$.

Теорема 2. Матричное уравнение (1) над полем GF_q имеет хотя бы одно решение тогда и только тогда, когда для всех $\lambda_\alpha \in \sigma(h)$ и μ_β , таких, что $\lambda_\alpha + \mu_\beta = 0$, для блока $\tilde{\mathbf{C}}_{\alpha\beta}$ выполняется условие разрешимости (6). При этом элементы неизвестного блока $\tilde{\mathbf{X}}_{\alpha\beta}$ вычисляются по формуле (7), если $n_\alpha \geq m_\beta$. В противном случае элементы неизвестного блока $\tilde{\mathbf{X}}_{\alpha\beta}$ вычисляются по формуле (8).

Пример 2. Рассмотрим уравнение (1) над полем Галуа GF_2 с матрицами

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \end{pmatrix}, \mathbf{B} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}, \text{ и) } \mathbf{C} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \text{ или ii) } \mathbf{C} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

Характеристические многочлены матриц $\mathbf{A}$ и $-\mathbf{B}$ соответственно равны $x^4 + x^2$ и x^4 . Они не взаимно просты, поэтому уравнение либо не имеет решения, либо их больше одного. Оказалось, что оба характеристических многочлена раскладываются на линейные множители в исходном поле. Собственные числа матрицы $\mathbf{A}$ – 0 и 1 кратности 2. Матрица $\mathbf{B}$ имеет одно нулевое собственное значение кратности 4. Если $\mathbf{U}$ и $\mathbf{V}$ – матрицы перехода к жордановой нормальной форме для матриц $\mathbf{A}$ и $\mathbf{B}$ соответственно,

$$\mathbf{U} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \mathbf{V} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \end{pmatrix}, \text{ то}$$

$$\tilde{\mathbf{A}} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \tilde{\mathbf{B}} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \text{ и) } \tilde{\mathbf{C}} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}, \text{ ii) } \tilde{\mathbf{C}} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \end{pmatrix}.$$

i) Матрица $\mathbf{A}$ состоит из двух жордановых клеток второго порядка, матрица $\mathbf{B}$ – из одной. Поэтому в соответствии с алгоритмом разбиваем матрицу $\tilde{\mathbf{C}}$ на блоки

$$\tilde{\mathbf{C}}_{11} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}, \tilde{\mathbf{C}}_{21} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}.$$

Условие (6) нужно проверять только для блока $\tilde{\mathbf{C}}_{11}$, отвечающего нулевым собственным значениям. При $r = 1$ $\sum_{k=1}^1 \tilde{c}_{2-1+k,k} = \tilde{c}_{21} = 0$. При $r = 2$ $\sum_{k=1}^2 \tilde{c}_{2-2+k,k} = \tilde{c}_{11} + \tilde{c}_{22} = 0$.

Условие (6) выполняется, а значит, решение существует и единственности нет. Более того, можно утверждать, что различных решений ровно четыре. Неизвестный блок блочного уравнения для блока $\tilde{\mathbf{C}}_{11}$ ищем по формуле (8). Рассмотрим случай, когда оба свободных элемента равны нулю. Остальные три случая получаются аналогично при выборе других значений свободных элементов. Тогда

$$\tilde{x}_{11} = \sum_{k=0}^{2-1} \tilde{c}_{1+k,1+k+1} = \tilde{c}_{12} + \tilde{c}_{23} = 1.$$

$$\text{Аналогично находятся остальные элементы блока. } \tilde{\mathbf{X}}_{11} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 \end{pmatrix}.$$

Второй блок находим по формуле (5)

$$\tilde{\mathbf{X}}_{21} = \sum_{i=0}^{2+4-2} \frac{1}{(1+0)^{i+1}} \sum_{k=0}^i \mathbf{C}_i^k \mathbf{J}_2^k(0) \tilde{\mathbf{C}}_{21} \mathbf{J}_4^{i-k}(0) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \end{pmatrix}.$$

$$\text{Оба блока дают матрицу } \tilde{\mathbf{X}} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \end{pmatrix}.$$

$$\text{Находим матрицу (одно из четырех решений) } \mathbf{X} = \mathbf{U} \tilde{\mathbf{X}} \mathbf{V}^{-1} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \end{pmatrix}.$$

$$\text{ii) Как и раньше, разбиваем матрицу } \tilde{\mathbf{C}} \text{ на блоки } \tilde{\mathbf{C}}_{11} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \end{pmatrix}, \tilde{\mathbf{C}}_{21} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \end{pmatrix}.$$

Первый блок нужно проверить на выполнение условия (6). Для $r = 1$ это условие выполняется, а для $r = 2$ $\sum_{k=1}^2 \tilde{c}_{2-2+k,k} = \tilde{c}_{11} + \tilde{c}_{22} = 1 \neq 0$.

В этом случае матричное уравнение не имеет решения.

Число решений матричного уравнения

Отметим особо, что для блочного уравнения, отвечающего жордановой клетке порядка i матрицы $\mathbf{A}$ с λ на главной диагонали и жордановой клетке порядка j матрицы $\mathbf{B}$ с $-\lambda$ на главной диагонали, количество свободных неизвестных среди всех элементов неизвестного блока равно $\min(i, j)$. Учитывая все блочные уравнения для фиксированного $\lambda \in \sigma(h)$, получаем, что число свободных неизвестных среди всех элементов всех неизвестных блоков равно $\sum_{i=1}^n k_i^A(\lambda) \sum_{j=1}^m k_j^{-B}(\lambda) \min(i, j)$, где через $k_i^A(\lambda)$ и $k_j^{-B}(\lambda)$ обозначено количество жордановых клеток матрицы $\mathbf{A}$ порядка i с λ на диагонали и, соответственно, количество жордановых клеток матрицы $\mathbf{B}$ порядка j с $-\lambda$ на диагонали. Учитывая все точки множества $\sigma(h)$, получим количество свободных неизвестных среди всех элементов неизвестной матрицы $\mathbf{X}$ $t = \sum_{\lambda} \sum_{i=1}^n k_i^A(\lambda) \sum_{j=1}^m k_j^{-B}(\lambda) \min(i, j)$, где суммирование в первой сумме ведется по всем $\lambda \in \sigma(h)$.

Введем обозначение $r_i^A(\lambda) = \text{rang}((\mathbf{A} - \lambda \mathbf{E})^i)$ для ранга i -й степени матрицы $\mathbf{A} - \lambda \mathbf{E}$ при $\lambda \in \sigma(h)$. Хорошо известно [11, 12], что число жордановых клеток i -го порядка с собственным значением λ на главной диагонали можно найти по формуле $k_i^A(\lambda) = r_{i-1}^A(\lambda) - 2r_i^A(\lambda) + r_{i+1}^A(\lambda)$.

Воспользовавшись этим, разбив внутреннюю сумму на два слагаемых $\sum_{j=1}^m k_j^B(-\lambda) \min(i, j) = \sum_{j=1}^i k_j^B(-\lambda) \cdot j + \sum_{j=i+1}^m k_j^B(-\lambda) \cdot i$ и учитывая свойства $r_i^{-B}(\lambda)$, получим равенство $\sum_{j=1}^m k_j^B(\lambda) \min(i, j) = r_0^{-B}(\lambda) - r_i^{-B}(\lambda)$.

Число свободных неизвестных среди всех неизвестных элементов матрицы $\mathbf{X}$ равно $t = \sum_{\lambda} \sum_{i=1}^n [r_{i-1}^A(\lambda) - 2r_i^A(\lambda) + r_{i+1}^A(\lambda)] [m - r_i^{-B}(\lambda)]$.

Таким образом, если множество $\sigma(h)$ не пусто и выполняется условие разрешимости, то число решений матричного уравнения (1) равно q^t .

Список источников

1. Frobenius G. Ueber die vertauschbare Matrizen // Sitz.-Ber. Akad. Wiss. Phys. Math. Klasse. Berlin, 1896. P. 601–614.
2. Гантмахер Ф. Р. Теория матриц. М.: Наука, 1967. 560 с.
3. Ланкастер П. Теория матриц. М.: Наука, 1973. 280 с.
4. Беллман Р. Введение в теорию матриц. М.: Наука, 1969. 368 с.
5. Деменчук А.К., Макаров Е.К. Полиномиальная формула для самосопряженных решений матричного уравнения $AX-XA=C$ с нормальным коэффициентом // Докл. НАН Беларуси. 2008. Т. 52, № 2. С. 5–10.
6. Demenchuk A.K., Makarov E.K. Explicit polynomial formulas for solutions of the matrix equation $AX-XA=C$ // J. of Mathematical Physics. 2009. Vol. 50, № 8. P. 083508. Doi: 10.1063/1.3187779.
7. Рабкин Е.Л. Полное исследование матричного уравнения $AX+XB=C$ и, в частности, $AX+XA=C$ // Алгебра и анализ. 2014. Т. 26, № 1. С. 165–184.
8. Икрамов Х.Д. Условия нормальности матричных уравнений типа Сильвестра // Докл. Академии наук. 2014. Т. 459, № 4. С. 403. Doi: 10.7868/S0869565214340064.
9. Икрамов Х.Д., Воронцов Ю.О. Численное решение матричных уравнений Сильвестра с нормальными коэффициентами // Вестн. Московского ун-та. Серия 15: Вычислительная математика и кибернетика. 2017. № 4. С. 3–6.
10. Лидл Р., Нидеррайтер Г. Конечные поля. М.: Мир, 1988. Т. 1, 2. 822 с.
11. Козак А.В., Пилиди В.С. Линейная алгебра. М.: Вузовская книга, 2001. 216 с.
12. Кряквин В.Д. Линейная алгебра в задачах и упражнениях. СПб.: Лань, 2016. 592 с.

References

1. Frobenius G. Ueber die vertauschbare Matrizen. Sitz.-Ber. Akad. Wiss. Phys.- Math. Klasse. Berlin, 1896:601-614. (In Deutsch).
2. Gantmacher F. R. *The theory of matrices*. Moscow: Nauka Publ.; 1967. 560 p. (In Russ.).
3. Lancaster P. *The theory of matrices*. Moscow: Nauka Publ.; 1973. 280 p. (In Russ.).
4. Bellman R. *Introduction to matrix analysis*. Moscow: Nauka Publ.; 1969. 368 p. (In Russ.).
5. Demenchuk A. K., Makarov E. K. A polynomial formula for selfadjoint solutions of the matrix equation $AX-XA=C$ with a normal coefficient. *Dokl. Nats. akad. nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*. 2008;52(2):5-10. (In Russ.).
6. Demenchuk A. K., Makarov E. K. Explicit polynomial formulas for solutions of the matrix equation $AX-XA=C$. *J. of Mathematical Physics*. 2009;50(8):083508, doi: 10.1063/1.3187779.
7. Rabkin E.L. Full investigation of the matrix equation $AX+XB=C$ and specifically of the equation $AX-XA=C$. *St. Petersburg Mathematical Journal*. 2015;26(1):117-130.
8. Ikramov Kh. D. Normality conditions for matrix equations of the Sylvester type. *Dokl. Math*. 2014;90(3):727-729, doi: 10.7868/S0869565214340064.
9. Ikramov Kh. D., Vorontsov Yu. O. Numerical solution of Sylvester matrix equations with normal coefficients. *Moscow Univ. Comput. Math. Cybern.* 2017;41(4):153-156.
10. Lidl R., Niederreiter H. *Finite fields*. Moscow: Mir Publ.; 1988. Vol. 1, 2. 822 p. (In Russ.).
11. Kozak A.V., Pilidi V.S. *Linear algebra*. Moscow: Vuzovskaya kniga Publ.; 2001. 216 p. (In Russ.).
12. Kryakvin V.D. *Linear algebra in problems and exercises*. Saint Petersburg: Lan Publ.; 2016. 592 p. (In Russ.).

Информация об авторах

Бабаев А.Б. – аспирант, кафедра алгебры и дискретной математики, Институт математики, механики и компьютерных наук им. И.И. Воровича.

Кряквин В.Д. – кандидат физико-математических наук, доцент, кафедра алгебры и дискретной математики, Институт математики, механики и компьютерных наук им. И.И. Воровича.

Information about the authors

Babaev A.B. - Postgraduate, Department of Algebra and Discrete Mathematics, Vorovich Institute of Mathematics, Mechanics and Computer Science.

Kryakvin V.D. - Candidate of Science (Physics and Mathematics), Associate Professor, Department of Algebra and Discrete Mathematics, Vorovich Institute of Mathematics, Mechanics and Computer Science.

Статья поступила в редакцию 07.09.2021; одобрена после рецензирования 24.09.2021; принята к публикации 26.11.2021.
The article was submitted 07.09.2021; approved after reviewing 24.09.2021; accepted for publication 26.11.2021.

Научная статья

УДК 539.3

doi: 10.18522/1026-2237-2021-4-10-18

ИССЛЕДОВАНИЕ КОЛЕБАНИЙ БАЛКИ ИЗ ФУНКЦИОНАЛЬНО-ГРАДИЕНТНОГО МАТЕРИАЛА С УЧЕТОМ ЗАТУХАНИЯ

Александр Ованесович Ватульян^{1✉}, Анастасия Андреевна Варченко²

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

¹Южный математический институт – филиал ВНИИ РАН, Владикавказ, Россия

¹aovatulyan@sfedu.ru✉

²aner@sfedu.ru

Аннотация. Рассмотрена задача о колебаниях неоднородной балки из функционально-градиентного материала в рамках различных моделей деформирования – модели Эйлера – Бернулли и модели Тимошенко при наличии затухания, которое описывается в рамках концепции комплексных модулей для стандартного вязкоупругого тела. Левый конец балки зажат, а на правом конце действует сосредоточенный момент, осциллирующий с некоторой частотой. Решение построено двумя способами. В первом из них на основе асимптотического анализа осуществлено построение решения в низкочастотной области, показано полное совпадение решений для рассматриваемых моделей в низкочастотной области (до первого резонанса) для любых законов неоднородности. Во втором с помощью метода пристрелки проанализировано влияние реологических факторов на амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) неоднородной вязкоупругой балки в частотном диапазоне до третьего резонанса. Проведен сравнительный анализ АЧХ двух моделей для различных законов неоднородности. Представлены АЧХ для различных законов неоднородности, изучено движение резонансных частот в зависимости от безразмерного времени релаксации.

Ключевые слова: изгибные колебания, модель Эйлера – Бернулли, модель Тимошенко, неоднородность, вязкоупругость, метод пристрелки, асимптотический анализ

Для цитирования: Ватульян А.О., Варченко А.А. Исследование колебаний балки из функционально-градиентного материала с учетом затухания // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. 2021. № 4. С. 10–18.

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

Original article

INVESTIGATION OF VIBRATIONS OF A BEAM MADE OF A FUNCTIONALLY GRADED MATERIAL TAKING INTO ACCOUNT ATTENUATION

Alexander O. Vatulyan^{1✉}, Anastasiya A. Varchenko²

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

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

¹aovatulyan@sfedu.ru✉

²aner@sfedu.ru

Annotation. The problem of oscillations of an inhomogeneous beam made of a functionally gradient material in the framework of various deformation models - the Euler-Bernoulli model and the Timoshenko model in the presence of attenuation, which is described within the framework of the concept of complex modules for a standard viscoelastic body, is considered. The left end of the beam is pinched, and at the right end there is a concentrated moment oscillating with a certain frequency. The solution is built in two ways. In the first of them, on the basis of asymptotic analysis, a

© Ватульян А.О., Варченко А.А., 2021

solution was constructed in the low-frequency domain, and a complete coincidence of solutions for the models under consideration in the low-frequency domain (up to the first resonance) for any laws of inhomogeneity was shown. In the second case, the influence of rheological factors on the amplitude-frequency characteristics of an inhomogeneous viscoelastic beam in the frequency range up to the third resonance was analyzed using the targeting method. A comparative analysis of the frequency response of two models for different laws of heterogeneity is carried out. Frequency response for various laws of inhomogeneity are presented, the movement of resonant frequencies depending on the dimensionless relaxation time is studied.

Keywords: bending vibrations of beams, Euler-Bernoulli beam, Timoshenko model, viscoelasticity, targeting method, deformation models, asymptotic analysis

For citation: Vatulyan A.O., Varchenko A.A. Investigation of Vibrations of a Beam Made of a Functionally Graded Material Taking into Account Attenuation. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2021;(4):10-18. (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

Исследование характеристик неоднородных материалов (полимеры, композиты, функционально-градиентные материалы (ФГМ), геологические породы, биологические ткани) и совершенствование моделей их деформирования в настоящее время являются одними из важнейших направлений развития механики сплошной среды. Вследствие сложности прямых экспериментальных оценок механических свойств таких материалов с неоднородностью и сложной реологией важна разработка различных методов идентификации свойств и неоднородных характеристик, основанных на моделях линейной неоднородной вязкоупругости [1–3]. В настоящей работе рассмотрено влияние реологических факторов на амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) балки с переменными свойствами. При этом используется концепция комплексных модулей, в которой при анализе установившихся колебаний однородных структур достаточно заменить в соответствующей краевой задаче теории упругости упругие характеристики на комплексные функции частоты колебаний [4, 5]. Подобный подход реализован в настоящей работе для анализа колебаний неоднородных балок в рамках различных моделей деформирования – классической модели Эйлера – Бернулли и учитывающей поперечные сдвиги модели Тимошенко. При этом задача исследования колебаний такого часто встречающегося элемента конструкций сведена к решению краевой задачи для обыкновенного дифференциального оператора с переменными комплексными коэффициентами (аналогичные задачи в рамках классических моделей исследованы в [6–8]), которая анализируется с помощью метода пристрелки. Представлены АЧХ для различных законов неоднородности, изучено движение резонансных частот, проведен асимптотический анализ изучаемых задач и построено решение в низкочастотной области.

Исследование задачи в рамках модели Эйлера – Бернулли (модель 1)

Рассмотрим колебания консольно закрепленной неоднородной вязкоупругой балки. Будем считать, что левый конец балки закреплён, а на правом действует момент M , осциллирующий с частотой ω . Пусть балка занимает объем $V = [0; L] \times S$, где L – длина балки; S – поперечное сечение, постоянное по её длине.

Сначала рассмотрим упругий случай, обозначая далее через $w(x)$ прогиб срединной линии; ρ – плотность материала балки; $E(x)$ – переменный модуль Юнга. Ось $x = x_1$ направим по нейтральной оси. Будем считать, что оси x_2 и x_3 совпадают с главными осями инерции балки.

В рамках модели Эйлера – Бернулли имеем известные соотношения:

$$\sigma_{11} = E\varepsilon_{11}, \quad u_3 = w(x), \quad u_1 = -x_3w', \quad \varepsilon_{11} = u_1' = -x_3w'', \quad \sigma_{11}\varepsilon_{11} = E(x_3w'')^2,$$

где σ_{11} , ε_{11} – компоненты тензора напряжений и деформаций соответственно. Потенциальная и кинетическая энергия находятся следующим образом:

$$\Pi = \frac{1}{2} \int_V E(x_3w'')^2 dV = \frac{1}{2} \int_S x_3^2 dS \int_0^L Ew''^2 dx_1 = \frac{1}{2} \int_0^L EIw''^2 dx_1, \quad T = \frac{1}{2} \rho \omega^2 \int_0^L S w^2 dx_1,$$

где $I = \int_S x_3^2 dS$ – момент инерции поперечного сечения балки.

Из принципа Остроградского – Гамильтона можно построить уравнение колебаний и сформулировать граничные условия [9, 10]. Краевая задача имеет вид

$$(EIw''(x))'' - \rho\omega^2 Sw(x) = 0, \quad w(0) = w'(0) = 0; \quad EIw''(L) = M; \quad (EIw''(x))'(L) = 0.$$

Введём безразмерные переменные и параметры – безразмерную координату $\xi = x/L$ и $E = E_0 G(\xi)$, $k^4 = (\rho\omega^2 SL^4 / IE_0)$ (здесь E_0 – характерное значение модуля Юнга).

Для формирования краевой задачи с учетом затухания используем модель стандартного вязкоупругого тела и принцип соответствия, согласно которому упругие характеристики (модуль Юнга в рассматриваемом случае) надо заменить на комплекснозначную функцию частоты колебаний (или безразмерного частотного параметра k). Введем в рассмотрение комплексный модуль для неоднородной среды $G(\xi, k) = (i\tau kg(\xi) + h(\xi)) / (1 + i\tau k)$, где $h(\xi)$, $g(\xi)$ – безразмерные функции, которые отражают законы изменения длительного и мгновенного модулей упругости в зависимости от безразмерной координаты и удовлетворяют неравенству $g(\xi) > h(\xi)$; τ – безразмерное время релаксации. После обезразмеривания уравнение колебаний балки в рамках рассматриваемой модели примет вид

$$(Gw'')'' - k^4 w = 0. \quad (1)$$

Сформулируем граничные условия (в силу линейности задачи в дальнейшем будем считать, что $M = 1$).

$$w|_{\xi=0} = 0, \quad w'|_{\xi=0} = 0, \quad Gw''|_{\xi=1} = 1, \quad (Gw'')'|_{\xi=0} = 0. \quad (2)$$

Задача (1), (2) представляет собой краевую задачу для дифференциального оператора с переменными комплексными коэффициентами. Проведём её исследование в двух случаях: при малых k на основе асимптотического анализа и в общем случае на основе метода пристрелки.

Опишем общую схему исследования. Для уравнения (1) 4-го порядка с переменными коэффициентами осуществим процесс сведения к канонической системе дифференциальных уравнений первого порядка.

Введём вектор $\mathbf{U} = (U_1, U_2, U_3, U_4)$ следующим образом: $U_1 = w$, $U_2 = w'$, $U_3 = Gw''$, $U_4 = (Gw'')$.

Тогда каноническая система дифференциальных уравнений и соответствующие граничные условия примут вид

$$U'_1 = U_2, \quad U'_2 = U_3/G, \quad U'_3 = U_4, \quad U'_4 = k^4 U_1, \quad (3)$$

$$U_1(0) = 0, \quad U_2(0) = 0, \quad U_3(1) = 1, \quad U_4(1) = 0. \quad (4)$$

Метод пристрелки предполагает решение двух вспомогательных задач Коши для системы первого порядка (3). Сформулируем начальные условия для двух вспомогательных задач Коши относительно векторов $\mathbf{U}^1 = (U_{11}, U_{12}, U_{13}, U_{14})$ и $\mathbf{U}^2 = (U_{21}, U_{22}, U_{23}, U_{24})$.

$$U_{11}(0) = 0, \quad U_{12}(0) = 0, \quad U_{13}(0) = 1, \quad U_{14}(0) = 0,$$

$$U_{21}(0) = 0, \quad U_{22}(0) = 0, \quad U_{23}(0) = 0, \quad U_{24}(0) = 1.$$

После решения задач Коши и нахождения векторов $\mathbf{U}^1, \mathbf{U}^2$ ищем решение исходной задачи (3), (4) в виде линейной комбинации $\mathbf{U} = C_1 \mathbf{U}^1 + C_2 \mathbf{U}^2$, причем постоянные C_1, C_2 определяются из оставшихся граничных условий

$$\begin{cases} U_3(1) = C_1 U_{13}(1) + C_2 U_{23}(1) = 1, \\ U_4(1) = C_1 U_{14}(1) + C_2 U_{24}(1) = 0. \end{cases}$$

Найдя из последней системы C_1, C_2 , можно строить решение для любых законов неоднородности в различных частотных диапазонах. Некоторые дальнейшие результаты приведены ниже.

Исследование задачи в рамках модели Тимошенко (модель 2)

Используем для моделирования колебаний консольно закрепленной балки из ФГМ при тех же условиях нагружения (момент M приложен на конце балки) модель Тимошенко в упругом случае, а для учета затухания – принцип соответствия. Соответствующие гипотезы модели Тимошенко при учете касательных напряжений имеют вид [11, 12] $u_3 = w$, $u_1 = x_3 \theta$, $\varepsilon_{13} = \frac{1}{2}(w' + \theta)$, $\sigma_{13} = \mu(w' + \theta)$, $\varepsilon_{11} = x_3 \theta'$, $\varepsilon_{33} = 0$, $\sigma_{11} = E x_3 \theta'$, μ – модуль сдвига.

Потенциальная и кинетическая энергия при деформировании балки с учётом касательных напряжений имеет вид [13]

$$\Pi = \frac{1}{2} \int_0^L \int_S [E(x_3 \theta')^2 + \mu(w' + \theta)^2] dS dx_1 = \frac{1}{2} \int_0^L E \left[I(\theta')^2 + \frac{1}{2(1+\nu)} (w' + \theta)^2 S \right] dx_1,$$

$$T = \frac{1}{2} \rho \omega^2 \int_0^L [S w^2 + I \theta^2] dx_1.$$

Далее используем вариационный принцип Гамильтона – Остроградского и из условия стационарности получим систему дифференциальных уравнений [14, 15]:

$$\begin{cases} -(k^* \mu S(w' + \theta))' - \rho \omega^2 S w = 0, \\ -(EI \theta')' + k^* \mu S(w' + \theta) - \rho \omega^2 I \theta = 0, \\ w(0) = 0, \theta(0) = 0, E(L)I \theta'(L) = -M, (k^* \mu S(w' + \theta))(L) = 0. \end{cases}$$

Здесь параметр $k^* = 1/K$ – коэффициент, учитывающий неравномерность распределения касательных напряжений по поперечному сечению стержня (введён С.П. Тимошенко для прямоугольного поперечного сечения [16, 17]); $K = F/(I^2 \int_{-h}^h S_y^2(x)/b(x) dx)$, причем для прямоугольного поперечного сечения $k^* \approx 0,833$ или $k^* = 10(1 + \nu)/(12 + 11\nu)$ [10, 11] (ν – коэффициент Пуассона), далее $x_1 \equiv x$.

После обезразмеривания, аналогичного описанному выше, и введения комплексного модуля $G(\xi, k)$ получаем следующую систему дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} -(G\theta')' + smG(w' + \theta) - \frac{\theta k^4}{m} = 0 \\ sm(G(w' + \theta))' + k^4 w = 0 \end{cases}, \quad (5)$$

где $s = (k^* \mu_0)/E_0$, $m = (SL^2)/I$, $k^4 = (\rho \omega^2 SL^4)/IE_0$.

Соответствующие граничные условия при $M = 1$ примут вид

$$w(0) = 0, \theta(0) = 0, [G\theta'](1) = -1, [G(\theta + w')](1) = 0. \quad (6)$$

Для системы (5) осуществим процесс сведения к канонической системе дифференциальных уравнений с помощью новых неизвестных. Введём вектор $\mathbf{V} = (V_1, V_2, V_3, V_4)$ следующим образом:

$$V_1 = w, V_2 = \theta, V_3 = G(\theta + w'), V_4 = G\theta'.$$

Тогда уравнение и граничные условия примут вид

$$V_1' = V_3/G - V_2, V_2' = V_4/G, V_3' = (-k^4 V_1)/sm, V_4' = smV_3 - k^4/m V_2, \quad (7)$$

$$V_1(0) = 0, V_2(0) = 0, V_3(1) = 0, V_4(1) = -1. \quad (8)$$

Сформулируем вспомогательные задачи Коши для краевой задачи (7), (8) относительно вектор-функций $\mathbf{V}^1 = (V_{11}, V_{12}, V_{13}, V_{14})$ и $\mathbf{V}^2 = (V_{21}, V_{22}, V_{23}, V_{24})$, где

$$V_{11}(0) = 0, V_{12}(0) = 0, V_{13}(0) = 1, V_{14}(0) = 0, \quad (9)$$

$$V_{21}(0) = 0, V_{22}(0) = 0, V_{23}(0) = 0, V_{24}(0) = 1. \quad (10)$$

Далее находим решения задач Коши (7), (9) и (7), (10). Линейная их комбинация $\mathbf{Z} = D_1 \mathbf{V}^1 + D_2 \mathbf{V}^2$ есть общее решение исходной задачи; при выполнении граничных условий (6) можно определить постоянные D_1, D_2 из системы

$$\begin{cases} Z_3(1) = D_1 V_{13}(1) + D_2 V_{23}(1) = 0, \\ Z_4(1) = D_1 V_{14}(1) + D_2 V_{24}(1) = -1 \end{cases}$$

и построить решение исходной задачи. Результаты вычислительных экспериментов будут представлены ниже.

Асимптотический анализ задачи в низкочастотной области

Модель 1. Построим решение краевой задачи (1), (2) при малых k , т.е. в низкочастотной области на основе метода возмущений. Будем отыскивать решение в виде $w = w_0 + ikw_1 + O(k^2)$.

Учитывая разложение $G(\xi, k) = (h + ik\tau g)/(1 + i\tau k) = h + ik\tau(g - h) + O(k^2)$, сформулируем краевые задачи, собирая слагаемые при одинаковых степенях k .

$$k^0: (hw_0'')'' = 0, w_0(0) = 0, w_0'(0) = 0, hw_0''(1) = 1, (hw_0'')'(1) = 0.$$

$$k^1: (\tau w_0''(g - h) + hw_1'')'' = 0,$$

$$w_1(0) = 0, w_1'(0) = 0, (\tau w_0''(g - h) + hw_1'')(1) = 0, (\tau w_0''(g - h) + hw_1'')'(1) = 0.$$

Нетрудно построить решение сформулированной задачи. Интегрируя уравнение в первой задаче, получим $hw_0'' = 1$, откуда находим $w_0'' = h^{-1}(\xi)$,

$$w_0(\xi) = \int_0^\xi (\xi - \eta) h^{-1}(\eta) d\eta. \quad (11)$$

Во второй задаче интегрирование осуществляем аналогично.

$$w_1'' = \tau w_0'' \frac{(h-g)}{h} = \tau \frac{(h-g)}{h^2},$$

$$w_1(\xi) = \tau \int_0^\xi (\xi - \eta) \frac{h(\eta) - g(\eta)}{h^2(\eta)} d\eta < 0, \quad (12)$$

что следует из исходного ограничения на модули $g(x) > h(x)$.

Отметим, что функция $w_1(\xi)$ пропорциональна времени релаксации и при стремлении его к нулю также стремится к нулю.

Модель 2. Будем искать решение задачи при малых k , используя разложения

$$w = w_0 + ikw_1 + O(k^2), \quad \theta = \theta_0 + ik\theta_1 + O(k^2).$$

Сформулируем краевые задачи при одинаковых степенях k .

$$k^0: \quad -(h\theta_0')' + smh(w_0 + \theta_0) = 0, \quad (h(w_0' + \theta_0))' = 0,$$

$$w_0(0) = 0, \quad \theta_0(0) = 0, \quad h\theta_0'(1) = -1, \quad h(\theta_0 + w_0')(1) = 0.$$

$$k^1: \quad -(h\theta_1' + \tau(g-h)\theta_0')' + sm(h(w_1' + \theta_1) + \tau(g-h)(w_0' + \theta_0)) = 0.$$

$$(h(w_1' + \theta_1) + \tau(g-h)(w_0' + \theta_0))' = 0, \quad w_1(0) = 0, \quad \theta_1'(0) = 0,$$

$$(h\theta_1' + \tau(g-h)\theta_0')(1) = 0, \quad (h(w_1' + \theta_1) + \tau(g-h)(w_0' + \theta_0))(1) = 0.$$

Из первой задачи находим $w_0' + \theta_0 = 0 \Rightarrow \theta_0 = -w_0'$, $h\theta_0' = -1$, $\theta_0' = -\frac{1}{h}$, $w_0'' = h^{-1}(\xi)$, что совпадает с моделью 1. Этот результат означает, что в низкочастотном случае модель Тимошенко вырождается в модель Эйлера – Бернулли и для неоднородных балок.

Интегрируя уравнение во второй задаче и учитывая граничные условия, получим

$$\theta_1' = -\tau \frac{(g-h)}{h} \theta_0', \quad \text{откуда } \theta_1 = \tau \int_0^\xi \frac{g(\eta) - h(\eta)}{h^2(\eta)} d\eta, \quad (13)$$

$$w_1' = -\theta_1, \quad w_1(\xi) = \tau \int_0^\xi (\xi - \eta) \frac{(h(\eta) - g(\eta))}{h^2(\eta)} d\eta, \quad (14)$$

что также совпадает с моделью 1. Таким образом, асимптотический анализ в низкочастотном случае показал, что главные члены асимптотических разложений в изучаемых моделях совпадают независимо от законов неоднородности.

Численные результаты исследования

Реализация метода пристрелки произведена в пакете Maple. При этом на этапе ввода информации были заданы функции, характеризующие неоднородные свойства и время релаксации, далее после разделения действительной и мнимой части и решения ряда вспомогательных задач Коши строилось решение. Результаты вычислительных экспериментов приведены ниже.

В рамках описанной выше схемы метода пристрелки получены графики амплитудно-частотных зависимостей для разных моделей.

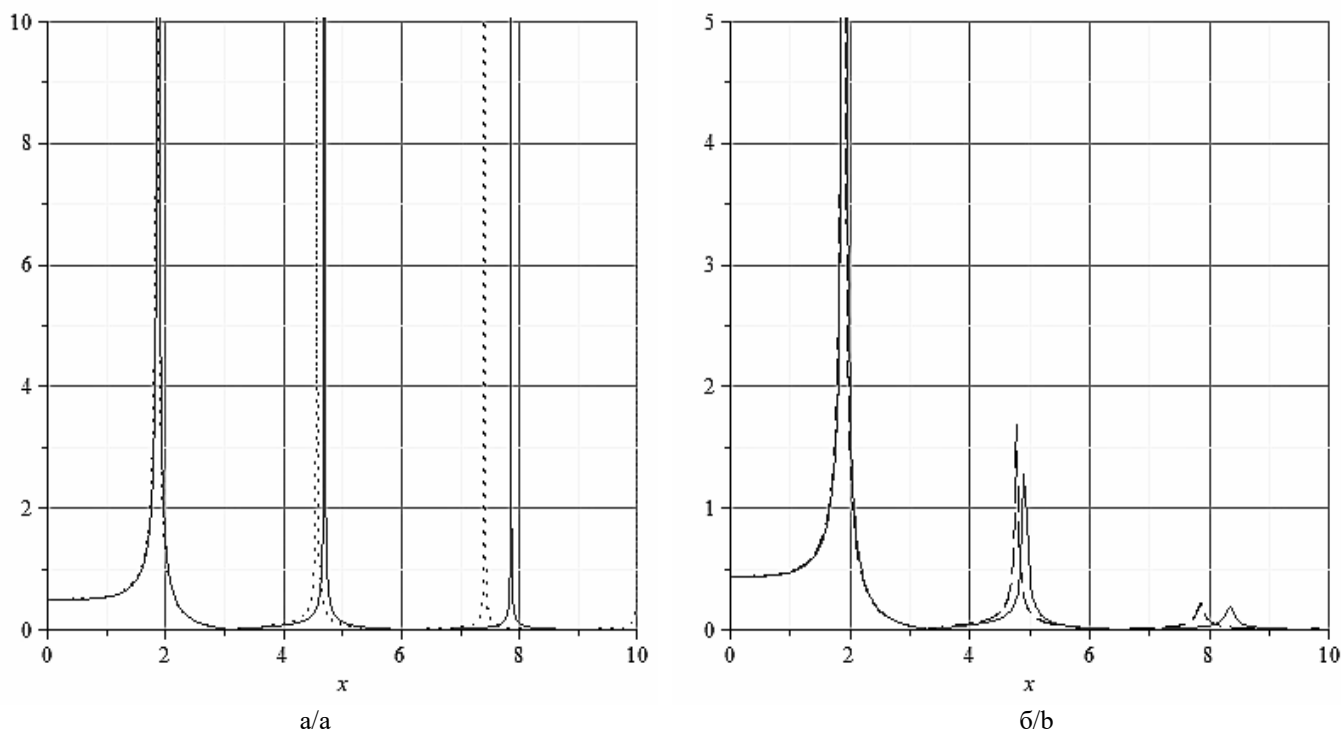
Амплитуда прогиба неограниченна в окрестности резонансов в упругом случае и имеет конечные значения при $\tau > 0$. Резонансные значения для вязкоупругого случая определялись из условия максимума амплитуды. Отметим, что они достаточно близки в упругом и вязкоупругом случаях при малом параметре τ . При помощи метода половинного деления найдены достаточно точные значения резонансов в упругом случае ($k_1 = 1,875104$, $k_2 = 4,694091$, $k_3 = 7,854757$), которые совпадают с приведёнными в литературе [10, 11].

Результаты вычислительных экспериментов показали, что значения резонансных частот для вязкоупругого случая, задаваемого функцией G , где $h = 1 + x^2$, $g = 1,5 + x^3$, увеличиваются (сдвигаются вправо) при увеличении времени релаксации (табл. 1).

Точные значения резонансов, полученные с помощью метода половинного деления (модель Тимошенко для упругого случая, т.е. при $\tau = 0$, $G = 1$), $k_1 = 1,86865$, $k_2 = 4,58697$, $k_3 = 7,46407$ немного меньше, чем для модели Эйлера – Бернулли.

На рисунке изображены АЧХ для моделей 1, 2 в упругом и вязкоупругом случаях при $\tau = 0,01$.

Результаты, приведенные в табл. 1, позволяют сделать вывод о том, что при увеличении времени релаксации значения резонансов сдвигаются вправо, причем чем больше величина безразмерного времени релаксации, тем больше это смещение.



АЧХ для модели 1 (сплошная линия) и модели 2 (пунктирная) при $\tau = 0,01$: а – упругий случай; б – вязкоупругий / Amplitude-frequency characteristics for model 1 (solid line) and model 2 (dotted line) at $\tau = 0.01$: a - elastic case; b - viscoelastic

Таблица 1 / Table 1

Сравнение резонансных значений при изменении времени релаксации для моделей 1 и 2
/ Comparison of resonant values when the relaxation time changes for models 1 and 2

Время релаксации	k_1		k_2		k_3	
	Номер модели					
	1	2	1	2	1	2
$\tau = 0$	1,875104	1,86865	4,694091	4,58697	7,854757	7,46407
$\tau = 0,001$	1,900378	1,89344	4,916557	4,78608	8,329632	7,85596
$\tau = 0,003$	1,900384	1,89344	4,916635	4,78518	8,329994	7,85647
$\tau = 0,005$	1,900394	1,89345	4,916784	4,78538	8,330661	7,85743
$\tau = 0,007$	1,900410	1,89347	4,917013	4,78568	8,331752	7,85904
$\tau = 0,01$	1,900443	1,89350	4,917492	4,78631	8,334156	7,86234
$\tau = 10$	2,082801	2,07496	5,299593	5,16194	8,950762	8,44993

Исследуем, как будут меняться АЧХ для моделей 1 и 2 в зависимости от времени релаксации и законов изменения длительного и мгновенного модулей, удовлетворяющих неравенству $g(\xi) > h(\xi)$. При этом будем применять законы, имеющие одинаковые средние:

$$h_0 = \int_0^1 h(\xi) d\xi = \int_0^1 (1 + x^2) dx = \frac{4}{3}, g_0 = \int_0^1 g(\xi) d\xi = \int_0^1 (1,5 + x^3) dx = \frac{7}{4}.$$

Рассмотрим 4 варианта функций h, g , входящих в описание комплексных модулей.

$$\text{I. } h_1 = 1 + 2x/3, g_1 = 1,5 + 3x^2/4. \quad (15)$$

$$\text{II. } h_2 = 1 + 4x^3/3, g_2 = 1,5 + 5x^4/4. \quad (16)$$

$$\text{III. } h_3 = 1 + 5x^4/3, g_3 = 1,5 + 7x^6/4. \quad (17)$$

$$\text{IV. } h_4 = 2 - 4x/3, g_4 = 2 - 3x^2/4. \quad (18)$$

В табл. 2 представлены значения резонансов для разных законов неоднородности с одинаковыми средними.

Таблица 2 / Table 2

Резонансы для моделей 1 и 2 при разных законах неоднородности (в зависимости от времени релаксации) / Resonances for models 1 and 2 with different laws of inhomogeneity (depending on time relaxation)

Время релаксации	Вариант	k_1	k_2	k_3
Модель 1				
$\tau = 0,001$	I	1,92899	4,96920	8,37958
	II	1,88868	4,86793	8,27623
	III	1,88310	4,82822	8,22487
	IV	2,14497	5,11003	8,40656
$\tau = 0,01$	I	1,93784	4,97866	8,38373
	II	1,88875	4,86893	8,28082
	III	1,88316	4,82923	8,22951
	IV	2,14500	5,11101	8,41142
Модель 2				
$\tau = 0,001$	I	1,86782	4,83746	7,90490
	II	1,88173	4,73904	7,80634
	III	1,87610	4,70210	7,75894
	IV	2,13559	4,98295	7,95005
$\tau = 0,01$	I	1,87382	4,84261	7,91952
	II	1,88179	4,74038	7,81324
	III	1,87616	4,70344	7,76596
	IV	2,13563	4,98416	7,95702

Из данных, приведенных в табл. 2, вытекает, что законы изменения функций $h(\xi)$ и $g(\xi)$ (15)–(18) с одинаковыми средними в значительной степени влияют на смещение резонансов функций вправо.

Заключение

В представленной работе изучены колебания неоднородных вязкоупругих балок в рамках моделей Эйлера – Бернулли и Тимошенко. Осуществлен анализ решения в низкочастотной области, получены решения в явном виде для произвольных законов неоднородности, показано полное совпадение решений в низкочастотной области для любых законов неоднородности. С помощью метода пристрелки проанализировано влияние реологических факторов на АЧХ неоднородной вязкоупругой балки. Проведен сравнительный анализ АЧХ двух моделей для различных законов неоднородности, выявлен рост резонансных значений с увеличением времени релаксации и установлено достаточно выраженное уменьшение амплитуд с ростом частоты. По сравнению с однородным случаем выявлено смещение резонансных значений вправо как для возрастающих, так и убывающих законов неоднородности. Приведены результаты вычислительных экспериментов.

Список источников

1. Söderström T. System Identification Techniques for Estimating Material Functions from Wave Propagation Experiments // *Inverse Problems in Engineering*. 2002. Vol. 10, № 5. P. 413–439.
2. Hafidi A.El., Martin B., Ersoy S. Identification of viscoelastic material properties based on Big Bang-Big Crunch optimization method. *Vibroengineering PROCEDIA*. 2016. Vol. 10. P. 102–107.
3. Qiu J., Li F.-F. Identification of Viscoelastic Constitutive Parameters of a Cell Based on Fluid-Structure Coupled Finite Element Model and Experiment // *Mathematical Problems in Engineering*. Vol. 2019. Article ID 5868561, 13 p.
4. Мейз Дж. Теория и задачи механики сплошных сред. М.: Мир, 1974. 239 с.
5. Вильде М.В., Сергеева Н.В. Развитие асимптотических методов анализа дисперсионных соотношений для наследственно-упругого сплошного цилиндра // *Изв. Сарат. ун-та. Нов. сер. Сер. Математика. Механика. Информатика*. 2017. Т. 17, № 2. С. 183–195.
6. Endo M. Study on an alternative deformation concept for the Timoshenko beam and Mindlin plate models // *International J. of Engineering Science*. 2015. Vol. 87. P. 32–46.
7. Yildirim K., Kucuk I. Active piezoelectric vibration control for a Timoshenko beam // *J. of the Franklin Inst.* 2016. Vol. 353. P. 95–107.
8. Guk N.A., Stepanova N.I. Identification of the geometry and elastic properties of rigid inclusions in a thin plate // *Eastern-European J. of Enterprise Technologies*. 2016. Vol. 2, № 7(80). P. 4–9. Doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.64395>.
9. Крысько В.А., Жигалов М.В., Салтыкова О.А. Нелинейная динамика балок Эйлера – Бернулли и типа Тимошенко // *Изв. вузов. Машиностроение*. 2008. № 6. С. 7–27.
10. Филиппов А.П. Колебания деформируемых систем. М.: Машиностроение, 1970. 736 с.
11. Ватутьян А.О., Беляк О.А., Сухов Д.Ю., Явруян О.В. Обратные и некорректные задачи. Ростов н/Д., Изд-во Южн. фед. ун-та, 2011. 232 с.
12. Ватутьян А.О., Осипов А.В. Поперечные колебания балки с локализованными неоднородностями // *Вестн. ДГТУ*. 2012. Т. 12, № 8. С. 34–40.
13. Федоров А.Е., Лохов В.А. О применении теории вязкоупругости в эстетической хирургии // *Рос. журн. биомеханики*. 2003. Т. 7, № 4. С. 32–43.
14. Ерофеев В.И., Кажаяев В.В., Лисенкова Е.Е., Семерикова Н.П. Динамическое поведение балок моделей Бернулли – Эйлера, Рэлея и Тимошенко, лежащих на упругом основании (сравнительный анализ) // *Вестн. Нижегородского ун-та им. Н.И. Лобачевского*. 2011. № 5-3. С. 274–278.
15. Салтыкова О.А., Папкова И.В., Крысько В.А. Об истинности хаотических колебаний контактных задач гибких балок, описываемых моделями Эйлера – Бернулли, Тимошенко и их комбинациями // *Нелинейная динамика машин School-NDM 2017 : сб. IV Междунар. школы-конференции молодых ученых*. 2017. С. 393–400.
16. Ватутьян А.О., Васильев Л.В. Об определении параметров закрепления неоднородной балки при наличии затухания // *Изв. Сарат. ун-та. Нов. сер. Сер. Математика. Механика. Информатика*. 2016. Т. 16, № 4. С. 449–456.
17. Работнов Ю.Н. Ползучесть элементов конструкций. М.: Наука, 1966. 752 с.

References

1. Söderström T. System Identification Techniques for Estimating Material Functions from Wave Propagation Experiments. *Inverse Problems in Engineering*. 2002;10(5):413-439.
2. Hafidi A. El., Martin B., Ersoy S. Identification of viscoelastic material properties based on Big Bang-Big Crunch optimization method. *Vibroengineering PROCEDIA*. 2016;10:102-107.
3. Qiu J., Li F.-F. Identification of Viscoelastic Constitutive Parameters of a Cell Based on Fluid-Structure Coupled Finite Element Model and Experiment. *Mathematical Problems in Engineering*. 2019;2019:5868561.
4. Maze J. *Theory and problems of continuum mechanics*. Moscow: Mir Publ.; 1974. 239 p. (In Russ.).
5. Vilde M.V., Sergeeva N.V. Development of asymptotic methods for the analysis of dispersion relations for a hereditarily elastic solid cylinder. *Izv. Sarat. un-ta. Nov. ser. Ser. Matematika. Mekhanika. Informatika = Izvestiya of Saratov University. Mathematics. Mechanics. Informatics*. 2017;17(2):183-195. (In Russ.).
6. Endo M. Study on an alternative deformation concept for the Timoshenko beam and Mindlin plate models. *International Journal of Engineering Science*. 2015;87:32-46.
7. Yildirim K., Kucuk I. Active piezoelectric vibration control for a Timoshenko beam. *J. of the Franklin Inst.* 2016;353:95-107.
8. Guk N. A., Stepanova N. I. Identification of the geometry and elastic properties of rigid inclusions in a thin plate. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2016;2(7):4-9, doi: 10.15587/1729-4061.2016.64395.
9. Krysko V.A., Zhigalov M.V., Saltykova O.A. Nonlinear dynamics of Euler-Bernoulli beams and Timoshenko type. *Izv. vuzov. Mashinostroenie = BMSTU Journal of Mechanical Engineering*. 2008;(6):7-27. (In Russ.).

10. Filippov A.P. *Vibrations of deformable systems*. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1970. 736 p. (In Russ.).
11. Vatulyan A.O., Belyak O.A., Sukhov D.Yu., Yavruyan O.V. *Inverse and incorrect tasks*. Rostov-on-Don: Southern Federal University Press; 2011. 232 p. (In Russ.).
12. Vatulyan A.O., Osipov A.V. Transverse vibrations of a beam with localized inhomogeneities. *Vestn. DGTU = Advanced Engineering Research*. 2012;12(8):34-40. (In Russ.).
13. Fedorov A.E., Lokhov V.A. On the application of the theory of viscoelasticity in aesthetic surgery. *Ros. zhurn. biomekhaniki = Russian Journal of Biomechanics*. 2003;7(4):32-43. (In Russ.).
14. Erofeev V.I., Kazhaev V.V., Lisenkova E.E., Semerikova N.P. Dynamic behavior of beams of Bernoulli-Euler, Rayleigh and Timoshenko models lying on an elastic base (comparative analysis). *Vestn. Nizhegorodskogo un-ta im. N.I. Lobachevskogo = Vestnik of Lobachevsky University of Nizhni Novgorod*. 2011;(5-3):274-278. (In Russ.).
15. Saltykova O.A., Papkova I.V., Krysko V.A. On the truth of chaotic oscillations of contact problems of flexible beams described by Euler-Bernoulli, Timoshenko models and their combinations. *Nonlinear dynamics of machines School-NDM 2017. Collection of the IV International School-Conference of Young Scientists*. 2017:393-400. (In Russ.).
16. Vatulyan A.O., Vasiliev L.V. On determining the parameters of fixing an inhomogeneous beam in the presence of attenuation. *Izv. Sarat. un-ta. Nov. ser. Ser. Matematika. Mekhanika. Informatika = Izvestiya of Saratov University. Mathematics. Mechanics. Informatics*. 2016;16(4):449-456. (In Russ.).
17. Worknov Yu. N. *Creep of structural elements*. Moscow: Nauka Publ.; 1966. 752 p. (In Russ.).

Информация об авторах:

Ватульян А.О. – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой теории упругости, Институт математики, механики и компьютерных наук им. И.И. Воровича, Южный федеральный университет; заведующий отделом дифференциальных уравнений, Южный математический институт – филиал Владикавказского научного центра РАН.

Варченко А.А. – магистр, кафедра теории упругости, Институт математики, механики и компьютерных наук им. И.И. Воровича.

Information about the author

Vatulyan A.O. - Doctor of Science (Physics and Mathematics), Professor, Head of the Department of Elasticity Theory, Vorovich Institute of Mathematics, Mechanics and Computer Sciences, Southern Federal University; Head of the Department of Differential Equations, Southern Mathematical Institute - Branch of the Vladikavkaz Scientific Center, Russian Academy of Sciences.

Varchenko A.A. - Master, Department of Elasticity Theory, Vorovich Institute of Mathematics, Mechanics and Computer Sciences.

Статья поступила в редакцию 31.08.2021; одобрена после рецензирования 12.09.2021; принята к публикации 26.11.2021.

The article was submitted 31.08.2021; approved after reviewing 12.09.2021; accepted for publication 26.11.2021.

Научная статья

УДК 533.6

doi: 10.18522/1026-2237-2021-4-19-25

МЕТОД УЛУЧШЕНИЯ АНАЛИТИЧЕСКИХ РЕЗУЛЬТАТОВ ДЛЯ ВРАЩАЮЩЕЙСЯ ЛОПАСТИ В СРАВНЕНИИ С ПРЯМЫМ ЧИСЛЕННЫМ РАСЧЕТОМ

Евгений Алексеевич Казаков¹, Межлум Альбертович Сумбатян²✉

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

¹Eugene.A.Kazakov@yandex.ru

²masumbatyan@sfedu.ru ✉

Аннотация. Предлагается аналитический метод вычисления значения силы тяги тонкой вращающейся пластинки. В отличие от теории тонкого крыла, описывающей поступательное движение пластинки, и классического подхода представления пластинки как набора плоских задач, соответствующих сечениям лопасти, предлагаемый метод позволяет рассматривать вращающуюся тонкую пластинку как целое. Получено двумерное интегральное уравнение, позволяющее описать пластинку произвольной формы и закрученности. Сингулярные члены уравнения качественно соответствуют сингулярным членам классического уравнения для поступательного движения тонкой пластинки, а дополнительные регулярные члены отвечают за вращательный характер движения. В среде моделирования ANSYS CFX поставлен численный эксперимент над вращающейся тонкой пластинкой. Проведено сравнение результатов численного эксперимента с данными, полученными классическим методом плоской задачи и предлагаемым аналитическим методом. Предлагаемый метод позволяет в три раза снизить отклонение значения силы тяги, найденного аналитически, от значения, полученного численно, – с 200 до 75 %.

Ключевые слова: аэродинамика, тонкая пластинка, вращение, теория тонкого крыла, теория малых возмущений, аналитический метод

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ), проект № 19-29-06013.

Для цитирования: Казаков Е.А., Сумбатян М.А. Метод улучшения аналитических результатов для вращающейся лопасти в сравнении с прямым численным расчетом // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. 2021. № 4. С. 19–25.

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

Original article

METHOD FOR IMPROVING ANALYTICAL RESULTS FOR A ROTATING BLADE VERSUS DIRECT NUMERICAL CALCULATION

Eugene A. Kazakov¹, Mezhlum A. Sumbatyan²✉

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

¹Eugene.A.Kazakov@yandex.ru

²masumbatyan@sfedu.ru ✉

Annotation. The paper proposes an analytical method for calculating the value of the driving force of a thin rotating plate. The classical approach represents the plate as a set of plane problems corresponding to the section of the blade. The theory of a thin wing describes the translational motion of the plate. Unlike them, the proposed method allows us to consider a rotating thin plate as a whole. A two-dimensional integral equation permitting to describe a plate of any shape and twist is obtained. The singular terms of the obtained equation qualitatively correspond to the singular terms of the classical equation for the translational motion of the thin plate, and additional regular terms are responsible for the rotational character of the motion. A numerical experiment of rotating thin plate was performed in the AN-

SYS CFX simulation software. The results of the numerical experiment are compared with the data obtained by the classical method of the plane problem and the proposed analytical method. The proposed method permits reducing the deviation of the draft value obtained analytically from the value obtained numerically by three times – from 200 to 75 %.

Keywords: aerodynamics, thin plate, rotation, theory of thin lifting surface, perturbation theory, analytical method

Acknowledgments. This work was financially supported by the Russian Foundation for Basic Research (RFBR), project No. 19-29-06013.

For citation: Kazakov E.A., Sumbatyan M.A. Method for Improving Analytical Results for a Rotating Blade Versus Direct Numerical Calculation. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2021;(4):19-25. (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

Стандартный способ аналитических расчетов для вращающейся лопасти – применение двумерной теории к набору плоских задач, соответствующих сечениям лопасти. Поскольку двумерная теория обтекания тонкой дуги дает явные аналитические результаты [1], такой метод традиционно используется в теоретических работах и при проектировании, несмотря на то что он дает существенную ошибку. Как правило, грубые теории дают сильно завышенное значение силы тяги по сравнению с истинным значением. Более точные теории описаны классиками гидро- и аэродинамики [2], однако не дают достаточную в сравнении с натурными экспериментами точность, тем более что эти теории непросто реализовать на практике. В связи с этим для этой задачи развивались различные приближенные подходы [3, 4]. Между тем вопрос о возможности построить точную с теоретической точки зрения теорию, аналогичную теории малых возмущений в теории тонкого крыла, и надежную с практической точки зрения в смысле близости с экспериментом, по-прежнему остается открытым. Некоторый вариант подхода к этой задаче именно в данной трактовке реализуется в настоящей работе.

Основной целью работы является построение расчетной модели в рамках классической теории тонкого крыла и теории малых возмущений, которая позволяет с большей точностью, чем двумерная, рассчитать значение силы тяги для вращающейся лопасти. Предлагается новый полуаналитический метод, который сокращает погрешность получаемых результатов до 75–80 % вместо 200 %, которые наблюдаются при применении двумерной задачи.

Постановка задачи

Рассматривается тонкая слабоизогнутая лопасть, вращающаяся вокруг оси x_1 с угловой скоростью ω , так что в текущий момент времени ось лопасти проходит через ось x_2 . Рабочая поверхность лопасти описывается уравнением $x_1 = f(x_2, x_3)$ (рис. 1). В соответствии с классической трактовкой принимается линеаризованная аэродинамическая теория по малым возмущениям. Предполагается, что малыми являются закрученность лопасти и угол атаки α , т.е. величины $|\partial f / \partial x_2|$ и $|\partial f / \partial x_3|$.

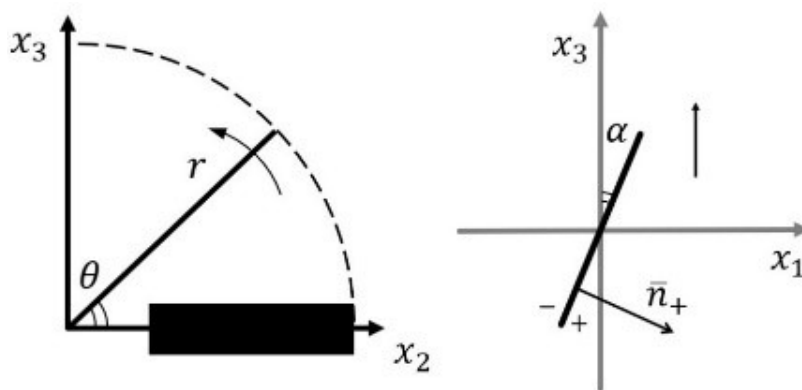


Рис. 1. Привязка координатных осей к тонкой лопасти / Fig. 1. Arrangement of the coordinate axes of a thin blade

Таким образом, поверхность лопасти располагается близко к плоскости вращения x_2x_3 , и угол между вектором нормали к поверхности лопасти и осью x_1 также мал. Это позволяет перенести граничное условие непроницаемости поверхности лопасти на соответствующую ей проекцию S в плоскости вращения x_2x_3 . Предполагается, что течение жидкости безвихревое везде, за исключением вихревой пелены, срывающейся с задней кромки лопасти. Задача является стационарной во вращающейся системе координат, связанной с лопастью.

Метод решения

Для применения стандартных методов теории потенциала запишем кинематическое условие рассматриваемой задачи:

$$\varphi(x_1, r, \omega t + \theta, t) = \varphi(x_1, r, \theta, 0) \Rightarrow \omega \frac{\partial \varphi}{\partial \theta} + \frac{\partial \varphi}{\partial t} = 0 \Rightarrow \frac{\partial \varphi}{\partial t} = -\omega \frac{\partial \varphi}{\partial \theta}.$$

Интеграл Коши – Лагранжа в линеаризованном виде

$$\frac{p}{\rho} + \frac{\partial \varphi}{\partial t} = \frac{p_0}{\rho} \Rightarrow \frac{p'}{\rho} = -\frac{\partial \varphi}{\partial t} \Rightarrow \frac{p'}{\rho} = \omega \frac{\partial \varphi}{\partial \theta}. \quad (1)$$

Граничное условие непроницаемости на лопасти имеет вид $(\bar{v} \cdot \bar{n}) = (\bar{v}_b \cdot \bar{n})$, где верхний штрих означает возмущение соответствующей величины, нижний индекс b – лопасть (blade). С учетом того, что в линейном приближении $\bar{v} = \{v'_1, v'_2, v'_3\}$, $\bar{n} = \left\{1, -\frac{\partial f}{\partial x_2}, -\alpha\right\}$, $v_b = \{0, 0, \omega r\} \approx \{0, 0, \omega x_2\}$, получаем

$$(\bar{v} \cdot \bar{n}) = (\bar{v}_b \cdot \bar{n}) \Rightarrow v'_1 = -\omega x_2 \alpha, \quad (2)$$

где отброшены малые второго порядка малости.

Основная формула теории потенциала [5]:

$$p'(x) = \iint_S \left[p' \frac{\partial G}{\partial n_y} - \frac{\partial p'}{\partial n_y} G \right] ds_y \quad (3)$$

справедлива в произвольной точке жидкости x для возмущения аэродинамического давления как величины, которая непрерывна везде в жидкости, независимо от того, как расположена вихревая пелена. При этом функция Грина имеет вид $G = \frac{1}{4\pi r} = \frac{1}{4\pi|x-y|}$, $\begin{cases} x = (x_1, x_2, x_3) = (x_1, r, \theta) \\ y = (y_1, y_2, y_3) = (y_1, \mu, \psi) \end{cases}$.

С учетом соотношения (1)

$$\frac{\partial p'}{\partial n_y} = (\nabla p' \cdot \bar{n}_y) = \rho \omega \left\{ \frac{\partial^2 \varphi'}{\partial \psi \partial y_1}, \frac{\partial^2 \varphi'}{\partial \psi \partial y_2}, \frac{\partial^2 \varphi'}{\partial \psi \partial y_3} \right\} \cdot \left\{ 1, -\frac{\partial f}{\partial y_2}, -\alpha \right\} = \rho \omega \frac{\partial^2 \varphi'}{\partial \psi \partial y_1}.$$

Из (3) следует

$$\frac{\partial \varphi'(x)}{\partial \theta} = \iint_S \left[\frac{\partial \varphi'(y)}{\partial \psi} \cdot \frac{\partial G(y, x)}{\partial n_y} - \frac{\partial^2 \varphi'}{\partial \psi \partial y_1} G(y, x) \right] dS_y = \iint_S \left[\gamma(y) \frac{\partial G(y, x)}{\partial y_1} - \frac{\partial v'_1}{\partial \psi} G(y, x) \right] dS_y, \quad (4)$$

где $\gamma(y)$ – функция, связанная со скачком аэродинамического давления на лопасти; $x = (x_1, x_2, x_3)$ – произвольная фиксированная точка в жидкости; $y = (y_1, y_2, y_3)$ – точка, по которой происходит интегрирование по поверхности. В явном виде $\gamma(y)$ выглядит следующим образом:

$$\gamma(y) = \frac{\partial \varphi'}{\partial \psi} \Big|_+ - \frac{\partial \varphi'}{\partial \psi} \Big|_- = \frac{1}{\rho \omega} (p_+ - p_-).$$

Очевидно, что в цилиндрической системе координат

$$\begin{cases} y_2 = \mu \cos \psi, & x_2 = r \cos \theta, \\ y_3 = \mu \sin \psi, & x_3 = r \sin \theta. \end{cases} \quad (5)$$

Из (2) и (5) следует, что $v'_1(y) = -\omega y_2 \alpha$, поэтому

$$G \frac{\partial v'_1}{\partial \psi} = \frac{1}{4\pi \mu} \cdot (-\omega \cdot \alpha) \frac{\partial y_2}{\partial \psi} = -\frac{\omega \alpha \mu}{4\pi \mu} \frac{\partial (\cos \psi)}{\partial \psi} = -\omega \alpha (-\sin \psi).$$

Эта функция нечётна по ψ , поэтому по крайней мере для лопастей, симметричных по x_3 , а следовательно, и по ψ , второй интеграл в (4) равен нулю. Тогда (4) принимает вид

$$\frac{\partial \varphi(x)}{\partial \theta} = \frac{1}{4\pi} \iint_S \gamma(y) \frac{\partial}{\partial y_1} \left[\frac{1}{\sqrt{(y_1-x_1)^2 + (y_2-x_2)^2 + (y_3-x_3)^2}} \right]_{y_1=0} dy_2 dy_3.$$

Это эквивалентно равенству $\frac{\partial \varphi(x)}{\partial \theta} = \frac{1}{4\pi} \iint_S \gamma(y) \frac{x_1 dy_2 dy_3}{[x_1^2 + (y_2-x_2)^2 + (y_3-x_3)^2]^{3/2}}.$

Отсюда

$$\left. \frac{\partial^2 \varphi'}{\partial x_1 \partial \theta} \right|_{x_1=0} = \frac{1}{4\pi} \iint_S \frac{\gamma(y) dy_2 dy_3}{[(y_2-x_2)^2 + (y_3-x_3)^2]^{3/2}}. \quad (6)$$

Интегрируем (6) по θ . Поскольку $d\theta = \frac{x_2}{x_2^2 + x_3^2} dx_3$, то интегрирование по θ можно заменить на интегрирование по x_3 от текущей точки до бесконечности вверх по потоку, где возмущения равны нулю:

$$\begin{aligned} \left. \frac{\partial^2 \varphi'}{\partial x_1 \partial x_3} \right|_{x_1=0} &= \frac{x_2}{4\pi(x_2^2 + x_3^2)} \iint_S \gamma(y_2, y_3) \frac{dy_2 dy_3}{[(x_2-y_2)^2 + (x_3-y_3)^2]^{3/2}} \Rightarrow \\ v_1' |_{x_1=0} &= \left. \frac{\partial \varphi'}{\partial x_1} \right|_{x_1=0} = -\frac{x_2}{4\pi} \int_{x_3}^{\infty} \frac{dz}{x_2^2 + z^2} \iint_S \frac{\gamma(y_2, y_3) dy_2 dy_3}{[(x_2-y_2)^2 + (z-y_3)^2]^{3/2}}. \end{aligned}$$

Последнее выражение с учетом граничного условия (2) принимает вид

$$\frac{1}{4\pi} \int_{x_3}^{\infty} \frac{dz}{x_2^2 + z^2} \iint_S \frac{\gamma(y_2, y_3) dy_2 dy_3}{[(x_2-y_2)^2 + (z-y_3)^2]^{3/2}} = \omega \alpha. \quad (7)$$

Вычислим интеграл (7) по частям:

$$\begin{aligned} I &= \int_{x_3}^{\infty} \frac{dz}{(z^2 + x_2^2)[(z-y_3)^2 + (x_2-y_2)^2]^{3/2}}, \quad u = \frac{1}{z^2 + x_2^2}, \quad du = -\frac{2z dz}{(z^2 + x_2^2)^2}, \\ dv &= \frac{dz}{[(z-y_3)^2 + (x_2-y_2)^2]^{3/2}}, \quad v = \frac{z-y_3}{(x_2-y_2)^2 \sqrt{(z-y_3)^2 + (x_2-y_2)^2}}. \end{aligned}$$

Тогда

$$I = -\frac{x_3 - y_3}{(x_3^2 + x_2^2)(x_2 - y_2)^2 \sqrt{(x_3 - y_3)^2 + (x_2 - y_2)^2}} + \frac{2}{(x_2 - y_2)^2} \int_{x_3}^{\infty} \frac{z(z-y_3) dz}{(z^2 + x_2^2)^2 \sqrt{(z-y_3)^2 + (x_2 - y_2)^2}}. \quad (8)$$

Обозначим последний интеграл через I_1 . Поскольку вдоль хорды лопасти величины x_3, y_3 малы, если лопасть узкая, то положим в (8) $x_3 \approx 0, y_3 \approx 0$. Получим

$$I_1 \approx \int_0^{\infty} \frac{z^2 dz}{(z^2 + x_2^2)^2 \sqrt{z^2 + (x_2 - y_2)^2}} = \int_0^{\infty} \frac{dz}{(z^2 + x_2^2) \sqrt{z^2 + (x_2 - y_2)^2}} - x_2^2 \int_0^{\infty} \frac{dz}{(z^2 + x_2^2)^2 \sqrt{z^2 + (x_2 - y_2)^2}}.$$

Обозначим первый интеграл в последней строке I_2 и воспользуемся табличным значением для второго интеграла [6]. В результате получим

$$I_1 = I_2 - x_2^2 \left\{ \frac{z \sqrt{z^2 + (x_2 - y_2)^2}}{2[(x_2 - y_2)^2 - x_2^2] x_2^2 (z^2 + x_2^2)} \right\} \Big|_{z=0}^{\infty} + \frac{(x_2 - y_2)^2 - 2x_2^2}{2[(x_2 - y_2)^2 - x_2^2] x_2^2} I_2 \left\{ -\frac{1}{2[(x_2 - y_2)^2 - x_2^2]} [(x_2 - y_2)^2 I_2 - 1] \right\},$$

где

$$I_2 = \frac{1}{x_2 \sqrt{x_2^2 - (x_2 - y_2)^2}} \ln \frac{\sqrt{x_2^2 - (x_2 - y_2)^2} + x_2}{|x_2 - y_2|} \quad \text{при } |x_2 - y_2| < x_2, \quad (9)$$

$$I_2 = \frac{1}{x_2 \sqrt{(x_2 - y_2)^2 - x_2^2}} \operatorname{arctg} \frac{\sqrt{(x_2 - y_2)^2 - x_2^2}}{x_2} \quad \text{при } |x_2 - y_2| \geq x_2.$$

Окончательно из (7) получаем следующее двумерное интегральное уравнение:

$$\frac{1}{4\pi} \iint_S \gamma(y_2, y_3) K(x_2, x_3, y_2, y_3) dy_2 dy_3 = \omega \alpha, \quad (x_2, x_3) \in S,$$

где ядро имеет вид

$$K = I = \frac{y_3 - x_3}{(x_3^2 + x_2^2)(x_2 - y_2)^2 \sqrt{(x_3 - y_3)^2 + (x_2 - y_2)^2}} + \frac{(x_2 - y_2)^2 I_2 - 1}{(x_2 - y_2)^2 [(x_2 - y_2)^2 - x_2^2]}. \quad (10)$$

При этом I_2 выражается формулами (9). Поскольку $\frac{1}{(x_2 - y_2)^2 [(x_2 - y_2)^2 - x_2^2]} = \frac{1}{x_2^2} \left[\frac{1}{(x_2 - y_2)^2 - x_2^2} - \frac{1}{(x_2 - y_2)^2} \right]$, то из (10) выделяется главная сингулярная часть

$$K = \frac{y_3 - x_3}{(x_3^2 + x_2^2)(x_2 - y_2)^2 \sqrt{(x_3 - y_3)^2 + (x_2 - y_2)^2}} + \frac{1}{x_2^2 (x_2 - y_2)^2} + \frac{I_2}{(x_2 - y_2)^2 - x_2^2} - \frac{1}{x_2^2 [(x_2 - y_2)^2 - x_2^2]},$$

где первые два слагаемых – сингулярные члены, третье и четвертое – регулярные члены ядра. В итоге первый член является аналогом первого члена для классической теории тонкого крыла, второй – аналогом второго [7], третий и четвертый члены, не имеющие особенностей, отвечают за вращательный характер движения пластинки как целого вместо поступательного в классической теории крыла.

Интегральное уравнение (7) решалось методом дискретных вихрей [8] в разработанной компьютерной программе в среде программирования C++.

Решение прямым численным методом

Для верификации результатов вычислений предложенного в данной работе полуаналитического метода сравнивалось значение силы тяги, полученное в рамках предлагаемого метода, классического набора двумерных задач и численного эксперимента, поставленного в среде моделирования ANSYS CFX.

Для случая вращательного движения тонкой пластинки классическую формулу двумерной теории [1] необходимо модифицировать с учётом изменения скорости набегающего потока вдоль размаха лопасти $P = 2\pi\rho v^2 b\alpha$, где b – полухорда. С учётом того, что $v(x_2) = \omega x_2$, имеем $P = \int_l^L 2\pi\rho(\omega x_2)^2 b\alpha dx_2$, $P = \frac{2}{3}\pi\rho b\alpha\omega^2(L^3 - l^3)$.

В качестве геометрических параметров исследуемого объекта были выбраны линейные размеры лопасти квадрокоптера DJI Mavic Air: длина хорды $2b = 1$ см; длина по размаху $L - l = 6$ см; расстояние от оси вращения до лопасти $l = 0,5$ см. Вычислительный эксперимент рассматривал цилиндрический объём воздуха, вращающийся вокруг собственной оси с угловой скоростью, равной угловой скорости вращающейся лопасти. Цилиндр был разделён на два центрально-симметричных субдомена плоскостью, содержащей в себе жёсткую тонкую пластинку (рис. 2), соответствующую размерам лопасти. Такой подход позволяет избежать технических ошибок при описании идеально тонкой пластинки, а также даёт возможность рассматривать силу на каждой её стороне независимо. Угол атаки пластинки задавался наклоном разделительной плоскости относительно оси, проходящей через хорду.

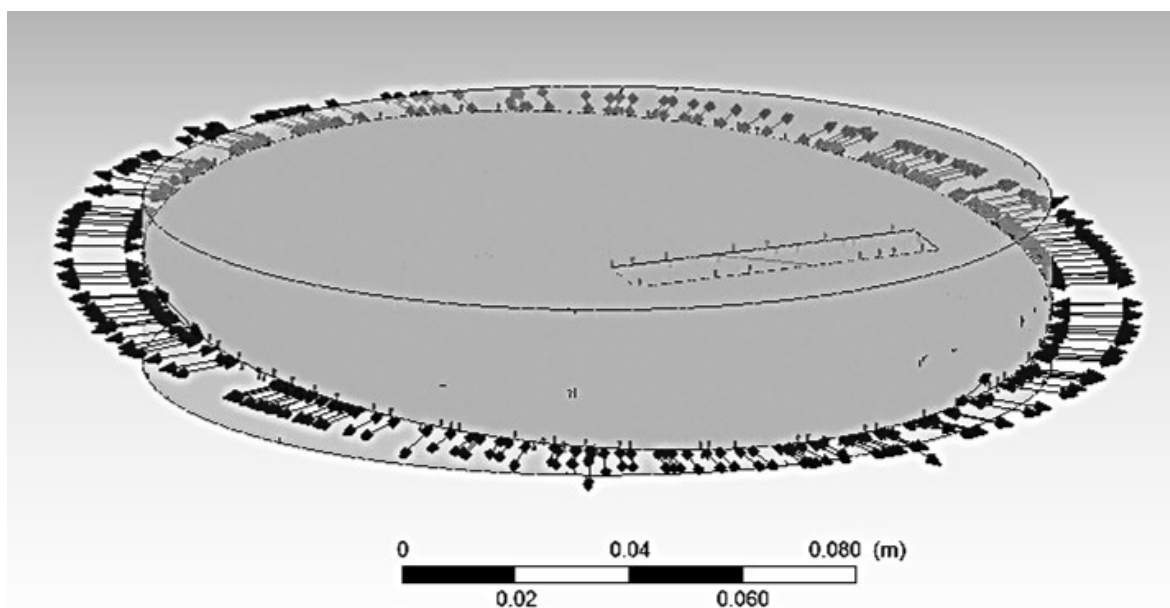


Рис. 2. Геометрия модели в среде ANSYS CFX / Fig. 2. Geometry of the model in the ANSYS CFX software

Основной метод среды моделирования ANSYS CFX предполагает разбивку исследуемой среды на отдельные элементы варьируемого размера (в рамках данной работы – на тетраэдры) с последующим вычислением значений физических величин в узлах сетки и минимизацией параметра невязки. Метод позволяет изменять густоту узлов сетки в областях, представляющих исследовательский интерес – вблизи вращающейся лопасти и на границах доменов. В то же время укрупнение элементов в областях, менее важных для рассмотрения, снижает требования к вычислительным ресурсам.

В данной работе используется представленная в ANSYS CFX модель турбулентности k-epsilon, либо ламинарный расчёт без учёта турбулентности, система уравнений Навье – Стокса, включающая в себя уравнения неразрывности, моментов, полной либо тепловой энергии и уравнение состояния идеального газа. С учётом рассматриваемых параметров исследуемой лопасти сжимаемость среды не оказывает существенного (более одного процента) влияния на итоговое значение силы тяги. Характерный размер элемента в численном эксперименте – порядка сантиметра, вблизи лопасти, разделительной плоскости и боковой поверхности цилиндрического домена – порядка миллиметра. Общее число элементов в сетке – 1,4 млн.

Результаты расчётов

В первой серии экспериментов (табл. 1) варьировалось значение угла атаки α при неизменной угловой скорости $\omega = 1257$ рад/с, плотность невозмущённого идеального газа $\rho = 1,1765$ кг/м³.

Таблица 1 / Table 1

Значения силы тяги для случая $\omega = 1257$ рад/с / The value of the draft force, $\omega = 1257$ rad/s

$\alpha, ^\circ$	P, Н			C++/ANSYS	Классика/ANSYS
	ANSYS CFX	C++	Классика		
1	0,02872166	0,05428	0,093513	1,89	3,255835491
2	0,0599567	0,1086	0,187026	1,81	3,119351132
3	0,0718167	0,1628	0,280539	2,26	3,906319839
4	0,1125846	0,2171	0,374052	1,93	3,322408216
5	0,1602236	0,2714	0,467564	1,69	2,91819682
8	0,2317718	0,4342	0,748103	1,87	3,227756785
10	0,265236	0,5428	0,935129	2,05	3,525648856

Во второй серии расчётов (табл. 2) при фиксированном угле атаки $\alpha=5^\circ$ варьировалось значение угловой скорости, прочие параметры оставались неизменными.

Таблица 2 / Table 2

Значения силы тяги для случая $\alpha=5^\circ$ / The value of the draft force for $\alpha=5^\circ$

ω , рад/с	P, Н			C++/ANSYS	Классика/ANSYS
	ANSYS CFX	C++	Классика		
628,5	0,0354135	0,0678	0,116891	1,92	3,30074689
1257	0,1602236	0,2714	0,467564	1,69	2,91819682
1885,5	0,362547	0,611	1,05202	1,69	2,901747911
2514	0,649678	1,0862	1,870258	1,67	2,878746087
3142	0,980484	1,6967	2,921348	1,73	2,979495841

Заключение

Предложенный фундаментальный полуаналитический метод позволяет почти втрое сократить отклонение теоретических значений по классической двумерной теории плоских сечений от результатов прямого численного расчёта для случая идеально тонкой одиночной вращающейся лопасти. Метод даёт возможность рассматривать закрученную лопасть произвольной формы, а все применяемые допущения физически корректны и соответствуют реальным современным формам лопастей воздушных винтов, что допускает также применение предлагаемого метода для практического использования.

Список источников

1. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. М.: Наука, 1973. 848 с.
2. Жуковский Н.Е. Вихревая теория гребного винта. М.; Л.: Гостехиздат, 1950. 239 с.
3. Mescheryakov K., Sumbatyan M.A., Bondarchuk A.A. A boundary integral equation over the thin rotating blade of a wind turbine // *Engineering Analysis with Boundary Elements*. 2016. Vol. 71. P. 20–26.
4. Sumbatyan M.A., Mescheryakov K.I. Two-dimensional integral equation for a thin wind turbine blade rotating in the round tunnel // *Mechanics Research Communications*. 2017. Vol. 85. P. 1–4.
5. Сумбатян М.А., Скалия А. Основы теории дифракции с приложениями в механике и акустике. М.: Физматлит, 2013. 328 с.
6. Прудников А.П., Брычков Ю.А., Маричев О.И. Интегралы и ряды. Элементарные функции. М.: Наука, 1981. 800 с.
7. Sumbatyan M.A., Bondarchuk A.A., Mescheryakov K.I. An efficient numerical algorithm in the classical 3D theory of thin lifting surface in a flow of non-viscous incompressible fluid // *Mechanics Research Communications*. 2018. Vol. 89. P. 18–22.
8. Белоцерковский С.М., Лифанов И.К. Численные методы в сингулярных интегральных уравнениях. М.: Наука, 1985. 254 с.

References

1. Loitsyanskiy L.G. *Mechanics of liquids and gases*. Moscow: Nauka Publ.; 1973. 848 p. (In Russ.).
2. Zhukovsky N.E. *Vortex theory of screw propeller*. Moscow, Leningrad: Gostekhizdat Publ.; 1950. 239 p. (In Russ.).
3. Mescheryakov K., Sumbatyan M.A., Bondarchuk A.A. A boundary integral equation over the thin rotating blade of a wind turbine. *Engineering Analysis with Boundary Elements*. 2016;71:20-26.
4. Sumbatyan M.A., Mescheryakov K.I. Two-dimensional integral equation for a thin wind turbine blade rotating in the round tunnel. *Mechanics Research Communications*. 2017;85:1-4.
5. Sumbatyan M.A., Scalia A. *Fundamentals of diffraction theory with applications in mechanics and acoustics*. Moscow: Fizmatlit Publ.; 2013. 328 p. (In Russ.).
6. Prudnikov A.P., Brychkov Yu.A., Marichev O.I. *Integrals and series. Elementary functions*. Moscow: Nauka Publ.; 1981. 800 p. (In Russ.).
7. Sumbatyan M.A., Bondarchuk A.A., Mescheryakov K.I. An efficient numerical algorithm in the classical 3D theory of thin lifting surface in a flow of non-viscous incompressible fluid. *Mechanics Research Communications*. 2018;89:18-22.
8. Belotserkovsky M., Lifanov I.K. *Numerical methods in singular integral equations*. Moscow: Nauka Publ.; 1985. 254 p. (In Russ.).

Информация об авторах

Казаков Е.А. – аспирант, кафедра теоретической и компьютерной гидроаэродинамики, Институт математики, механики и компьютерных наук им. И.И. Воровича.

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

Information about the authors

Kazakov E.A. - Postgraduate, Department of Theoretical and Computational Hydroaerodynamics, Vorovich Institute of Mathematics, Mechanics and Computer Science.

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

Статья поступила в редакцию 02.09.2021; одобрена после рецензирования 17.09.2021; принята к публикации 26.11.2021.

The article was submitted 02.09.2021; approved after reviewing 17.09.2021; accepted for publication 26.11.2021.

НАУКИ О ЗЕМЛЕ

Научная статья

УДК 528.94

doi: 10.18522/1026-2237-2021-4-26-33

РИСКИ ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ В БАССЕЙНЕ ОЗЕРА БАЙКАЛ:
СТАТИСТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА И КАРТОГРАФИРОВАНИЕ**Татьяна Анатольевна Борисова¹, Андрей Николаевич Бешенцев²**^{1,2}Байкальский институт природопользования СО РАН, Улан-Удэ, Россия¹tabor@binm.ru²abesh@binm.ru

Аннотация. Представлены результаты исследования лесопожарных рисков на территории бассейна оз. Байкал по статистическим материалам России и Монголии за 1998–2018 гг. с использованием геоинформационной технологии. В качестве технологического решения для хранения, обработки и расчётных операций со статистическими данными предложено создание векторного хранилища статистических данных программной среды ArcGIS. Хранилище составлено посредством оверлейных операций со слоями единиц территориального деления, по которым осуществляется государственный статистический учёт лесных пожаров, а также слоями растительности, населённых пунктов и дорожной сети. В работе представлен фрагмент хранилища. Проведена оценка горимости лесов за исследуемый период по территориям соседних стран, выполнен сравнительный пространственно-временной анализ повторяемости и площади возгораний, их масштабов, рассмотрены основные факторы пожароопасности и причины пожаров. Разработана методика геоинформационного картографирования лесных пожаров на основе статистических материалов. Выполнена оценка интегрального риска в разрезе лесничеств на основании расчёта удельных показателей физического, экономического и социального рисков. Составлена карта интегрального риска лесных пожаров в бассейне оз. Байкал в границах лесхозов, проведён анализ их распространения по исследуемой территории.

Ключевые слова: статистические материалы, природные лесные пожары, причины горимости, оценка риска, геоинформационное картографирование, ГИС

Благодарности: исследование проведено в рамках государственного задания БИП СО РАН.

Для цитирования: Борисова Т.А., Бешенцев А.Н. Риски лесных пожаров в бассейне озера Байкал: статистическая оценка и картографирование // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. 2021. № 4. С. 26–33.

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

SCIENCES OF EARTH

Original article

RISKS OF FOREST FIRES IN THE LAKE BAIKAL BASIN:
STATISTICAL ASSESSMENT AND MAPPING**Tatyana A. Borisova¹, Andrew N. Beshentsev²**

Baikal Institute of Nature Management, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Ulan-Ude, Russia

¹tabor@binm.ru²abesh@binm.ru

© Борисова Т.А., Бешенцев А.Н., 2021

Abstract. The article presents the results of a study of forest fire risks in the territory of the lake Baikal basin according to statistical materials of Russia and Mongolia for the period 1998-2018 using geoinformation technology. As a technological solution for storing, processing and calculating operations with statistical data, the creation of a vector storage of statistical data of the ArcGIS software environment is proposed. The repository is compiled by means of overlay operations with layers of territorial divisions for which state statistical accounting of forest fires is carried out, as well as layers of vegetation, settlements and the road network, a fragment of the repository is presented. The assessment of forest burnability for the study period in the territories of neighboring countries was carried out, a comparative spatial and temporal analysis of the frequency and area of fires, their scale was performed, the main fire hazard factors and causes of fires were considered. A method of geoinformation mapping of forest fires based on statistical materials has been developed. The integral risk was assessed in the context of forest areas based on the calculation of specific indicators of physical, economic and social risks. A map of the integral risk of forest fires in the lake basin has been compiled. Baikal is located within the boundaries of forestry enterprises, an analysis of their distribution in the studied territory is carried out.

Keywords: statistical materials, natural forest fires, causes of burning, risk assessment, geoinformation mapping, GIS

Acknowledgments: the study was carried out within the framework of the state assignment of the BINM SB RAS.

For citation: Borisova T.A., Beshentsev A.N. Risks of Forest Fires in the Lake Baikal Basin: Statistical Assessment and Mapping. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2021;(4):26-33. (In Russ.).

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

Введение

Среди чрезвычайных ситуаций в Байкальском регионе за последнее десятилетие ведущее место занимают лесные пожары, которые наносят значительный ущерб экосистемам бассейна оз. Байкал и представляют серьезную угрозу для жизнедеятельности населения и хозяйственных объектов. Необходимость расчета ущерба и картографирования потенциальных рисков от пожаров обусловлена важностью определения капиталовложений, направляемых на предотвращение или уменьшение влияния негативных прямых и косвенных воздействий лесных пожаров.

Анализ научных публикаций свидетельствует о том, что в настоящее время большинство исследований базируется на использовании статистических материалов или спутниковых данных, а также комбинации этих подходов. В этом направлении выполнен анализ информационно-статистического обеспечения охраны лесных земель от пожаров. Изучены источники информации о лесных пожарах в РФ и сопоставлены данные, получаемые из официальной статистической отчетности Рослесхоза и других организаций [1]. Разработана обобщенная статистическая модель вероятности возгораний и потенциального риска на основе исторических данных [2]. Предложена методика пространственно-статистического анализа факторов развития пожаров [3]. Сформулированы методические подходы для управления лесопожарными рисками на основе аналитической информации [4]. Разработана ГИС «Лесные пожары» и определено её место в оперативной системе наблюдений очагов возгораний [5]. Особое внимание уделяется защите населённых пунктов от лесных пожаров [6]. Проведён мониторинг пожарной опасности территории и оценка их экологических последствий [7]. Предложена методика анализа статистических данных по лесным пожарам [8].

Главной проблемой лесных пожаров является ущерб для хозяйства и населения. Показатель соотношения ущерба и затрат на его предотвращение определяет экономическую эффективность вложенных средств и дальнейший выбор финансирования наиболее эффективных природоохранных мероприятий. При этом надёжно оценить размер ущерба от лесных пожаров зачастую не представляется возможным, поскольку их последствия находят отражение в разных отраслях экономики, проявляются не только на пораженных территориях, но и за их пределами, даже спустя несколько лет [9].

Следует отметить, что результаты оценок, полученные только по спутниковым данным, не подтверждённые наземными обследованиями и инвентаризационными картографическими документами, не всегда обладают достаточной надёжностью. Несмотря на высокую метрическую точность регистрации ареалов пожаров, эти данные имеют несистемный характер и не дают возможности определения долговременных закономерностей возникновения и развития лесных пожаров, поскольку не каждая организация или учёный имеют возможность для этого создать необходимый

набор снимков высокого разрешения в динамике лет. В отличие от единовременных спутниковых данных материалы государственной статистики представляют собой унифицированные массивы сводной агрегированной документированной информации о количественной стороне лесопожарных процессов. При этом структурность этой информации отражает закономерный порядок связи информационно-показательных в составе всего массива статистики, обеспечивает его целостность и тождественность при различных преобразованиях. Кроме того, вся прочая ведомственная статистика ведётся по единицам территориально-административного деления, что обеспечивает возможность междисциплинарной интеграции статистических данных.

Таким образом, для эффективного территориального управления землями лесного фонда и снижения рисков природных пожаров в бассейне оз. Байкал необходимы современные программно-технические средства и специальные информационные ресурсы, позволяющие интеграцию статистических и других (полевые обследования, спутниковые данные, исторические материалы) данных для обеспечения объективной и оперативной оценки пожарной опасности. Данное исследование посвящено разработке методических основ использования материалов государственной статистики для геоинформационного картографирования лесопожарных рисков на базе современного геоинформационного ресурса – векторного хранилища статистических данных (ВХСД).

Материалы и методы исследования

Бассейн оз. Байкал располагается на территории двух государств. Более половины его площади (55,4 %) находится в Монголии. Различия природных зон на территории бассейна по распространению лесов, их типу, структуре, бонитету, а также антропогенной нарушенности определяют неоднородные условия по классу их пожароопасности. Площадь лесных территорий бассейна оз. Байкал составляет 29,7 млн га, из них на территории России – более 71,1 % с общим запасом древесины 2356,5 млн м³. В лесах доминируют хвойные породы деревьев, среди которых наиболее распространены лиственница, сосна и др. Согласно официальным данным [10], в российской части бассейна площадь земель лесного фонда достигает 22,4 млн га, занятая лесом – около 19,5 млн га. На территории Монголии эти показатели составляют 11,1 и 8,6 млн га соответственно.

Информационной базой исследования послужили официальные статистические данные Государственного лесного агентства [11] по категориям земель и природным пожарам за период 1998–2018 гг. и статистические материалы лесного комитета Министерства окружающей среды и туризма Монголии [12] в разрезе лесхозов и лесничеств по трем субъектам РФ (Республика Бурятия, Забайкальский край, Иркутская область) и по девяти аймакам территории Монголии (Тув, Архангай, Сэлэнгэ Завхан, Хувсгул, Булган, Уверхангай, Дархан-Уул, Орхон). Исходными данными являются справки о пожарах, сводные ведомости лесхозов и лесничеств по годам. В результате первичной обработки были получены количество и площадь очагов возгораний по годам, площади типов лесной растительности, средства, затраченные на тушение. Для исследования региональной лесопожарной ситуации разработана и использована методика геоинформационного картографирования рисков лесных пожаров (таблица).

Расчёт показателей риска по каждой территориальной единице выполнен посредством объединения атрибутивных таблиц и последующих математических операций программной среды (суммирование, умножение, деление).

Расчёт показателей рисков основывается на параметре уязвимости [13] и рассчитывается по формуле $V(H) = S(H) / S(T)$, где $S(H)$ – площадь поражённого леса; $S(T)$ – площадь участка. Уязвимость показывает долю поражённого леса от площади оцениваемого участка и даёт возможность определить удельный физический риск (от 0 до 1), который используется при картографировании $R(sf) = P(H) \times V(H)$, га/га·год, где $P(H)$ – число случаев за рассматриваемый период. Если на участке лесного массива пожары отмечаются ежегодно, то он принимается за единицу [14]. Показатель физического риска требуется для расчетов экономического риска, находится по формуле $R(f) = S(H) \times P(H)$, га/год.

Социальный риск, или вероятность нахождения населения в зоне возможного поражения, рассчитывается по формуле $R(s) = R(f) \times d(p)$, чел/год, где $d(p)$ – плотность населения.

**Методика геоинформационного картографирования рисков лесных пожаров
/ The technique of geoinformation mapping of forest fire risks**

№	Процедура	Действия и операции
1	Редакционно-подготовительные работы	Изучение района исследования; сбор картографических и статистических материалов показателей горимости лесов в динамике; выбор и обоснование методических подходов и оценочных операций, определение показателей рисков
2	Разработка структуры базы данных	Картографирование пространственных единиц статистического учёта лесных пожаров; картографирование объектов риска: населённые пункты у границы леса (количество жителей, плотность населения, огнестойкость строений), социальные и экономические объекты; формирование системы оценочных показателей: количество очагов возгорания, площадь гарей по годам исследований
3	Создание ВХСД	Выбор топографической основы; составление ВХСД посредством оверлейных операций программной среды со слоями базовых пространственных единиц статистического учёта лесных пожаров; геометрическая коррекция слоёв; ввод статистических данных
4	Расчёт риска	Расчётные операции со столбцами таблицы атрибутов; оценка уязвимости, физического, экономического, социального рисков; расчёт интегрального риска
5	Геоинформационное картографирование	Создание ГИС-проектов; разработка легенд карт, выбор шкал классификаций, компоновка, разработка штрихового и фоновое оформления; разработка системы запросов рисков; составление карт рисков

Обсуждение результатов

Хранение и расчёт статистических данных осуществляется на базе ВХСД, представляющего собой цифровое покрытие (shp-файл) и таблицу атрибутов (dbf-файл) среды ArcGIS. ВХСД содержит базовые единицы территориального деления, по которым ведётся государственная статистика лесных пожаров: муниципальные образования, лесничества, лесхозы, административные районы, аймаки. Статистические данные внесены по лесничествам, суммированы по лесхозам и административным районам двух стран. Совмещение покрытия хранилища с векторным слоем «лес» позволяет исключить нелесные территории из оценки. Соответственно, каждый полигон покрытия содержит все атрибуты совмещаемых векторных слоёв (рис. 1).

Результаты показывают, что в среднем в год на территории бассейна оз. Байкал пожарами поражаются 308,8 тыс. га лесов, из которых почти половину составляют леса Монголии. Высокие значения рисков характерны для лесных массивов южной части России и граничащих северных аймаков Монголии как наиболее освоенных и заселённых. В российской части наиболее уязвимыми являются участки лесничеств Петровск-Забайкальского и Хилокского административных районов (Забайкальский край), на которых ежегодные потери леса составляют 35,6 тыс. га, и в монгольской части такими территориями являются аймаки Сэлэнгэ и Булган – 94,8 тыс. га.

Масштабность природных пожаров по количеству возгораний и площади поражения обусловлена как климатическими аномалиями с высокой продолжительностью засух, широким распространением светлохвойных лесов, так и антропогенными факторами. Весенне-летний период зачастую характеризуется повышенным температурным режимом с недостаточным увлажнением и суховеями. В отдельные годы существенный дефицит влаги может наблюдаться в течение всего лета [14]. При этом следует отметить, что природные случаи пожаров вследствие сухих гроз составляют 12,5 %. Большую негативную роль в возгорании лесов играют антропогенные факторы, такие как неосторожное обращение с огнём в пожароопасный период, негативные последствия хозяйственной деятельности на лесных территориях, браконьерство, умышленные поджоги [15].

Климатические экстремумы в основном коррелируют с данными повторяемости катастрофических пожаров. Так, наиболее сложными засушливыми на всей территории бассейна были 2000, 2003, 2007, 2009 и 2015, 2017 годы. Максимальное число возгораний на российской стороне зарегистрировано в 2003 г., что составило 2317 случаев, на территории Монголии в 2002 г. – 187. Экстремальные масштабные зоны поражения лесов пожарами в средней и северной частях бассейна Байкала отмечены в 2015 г., где площадь достигала 841,02 тыс. га. На территории Монголии самым катастрофичным стал 2007 г.,

природными пожарами (лесные, степные) было охвачено 667,1 тыс. га, из которых более половины – лесные земли.

Оценка рисков для территории трансграничного бассейна оз. Байкал выполнена за 1998–2018 гг. Данный период можно в целом рассматривать как засушливый, но в нем регистрируются годы сильных засух, относительно стабильные (типичные для территории) и влажные климатические ситуации.



Рис. 1. Фрагмент ВХСД / Fig. 1. Fragment of the statistical data warehouse

На исследуемой территории выделено 46 полигонов (лесхозов) для оценки рисков и выполнено их геоинформационное картографирование. На первом этапе составлены частные карты физического, социального и экономического рисков исследуемой территории. Карта физического риска регистрирует пораженность природными пожарами лесных земель и особенно лесных массивов. Карта экономического риска отображает потенциально подверженные пожарам объекты хозяйственной инфраструктуры и территории населённых пунктов. Карта социального риска характеризует территорию по пожароопасности для населения. Максимальными показателями на российской стороне характеризуются территории восточной и юго-восточной частей бассейна, в Монголии – приграничные северные районы. Значительному социальному риску подвержены относительно густонаселенные территории южной и центральной частей Республики Бурятия, западная часть Забайкальского края и северная часть Монголии. Карта интегрального риска от лесных пожаров разработана по результатам обобщенного анализа частных карт рисков. При выявлении уровня суммарного риска большой вес имели показатели поражения населения (социальный риск). Для картографирования интегрального риска на территории бассейна оз. Байкал удельные показатели переведены в балльную шкалу значения рисков (очень низкий, низкий, средний, высокий, очень высокий) (рис. 2).

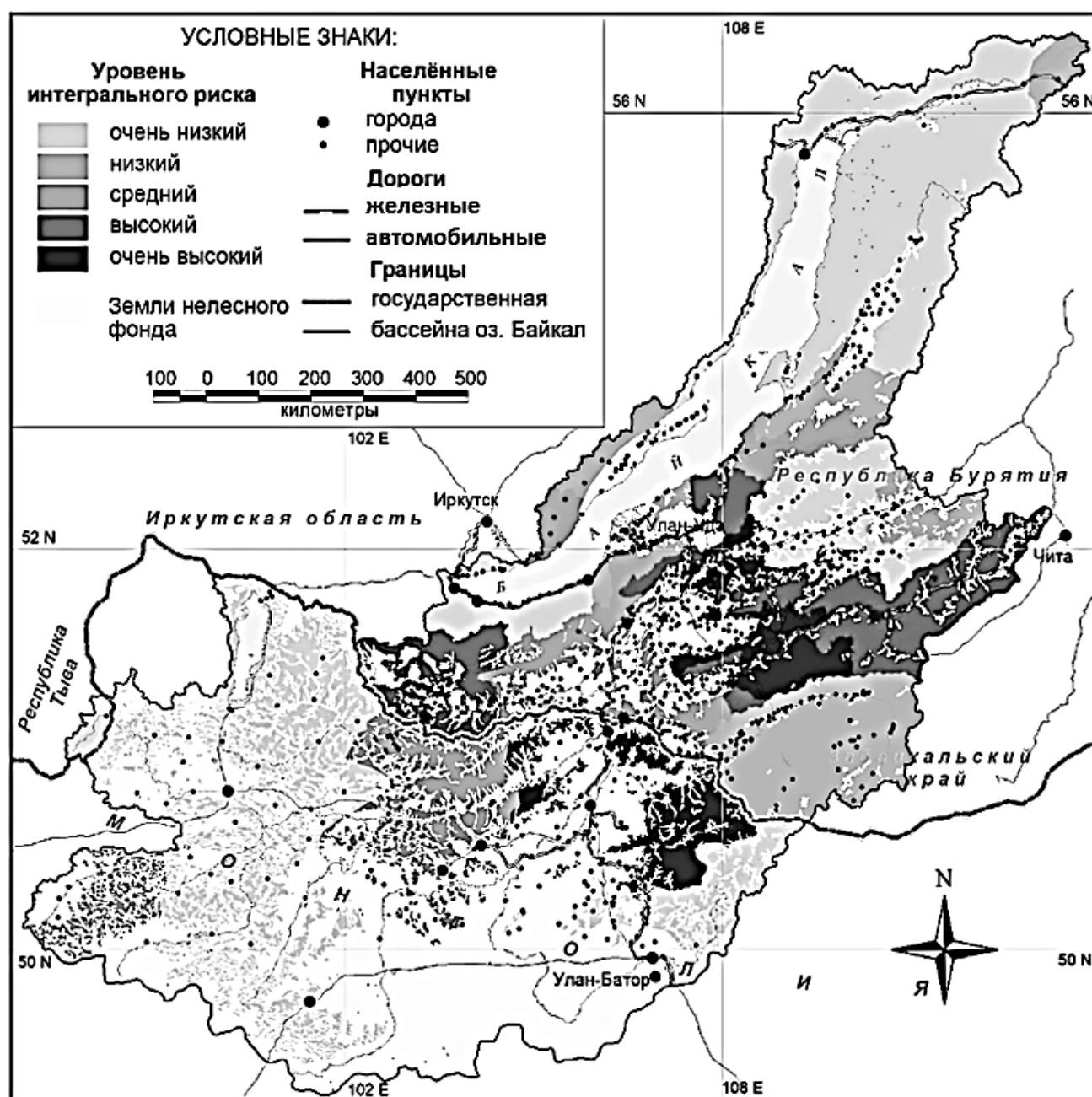


Рис. 2. Интегральный риск лесных пожаров в бассейне оз. Байкал

/ Fig. 2. Integral risk of forest fires in the lake Baikal basin

Заключение

Исследование показывает, что территория бассейна оз. Байкал вследствие своих особых физико-географических условий принадлежит к одному из наиболее уязвимых регионов для природных лесных пожаров. Их распространение и размеры во многом зависят от погодно-климатических показателей, значительное количество очагов на участках интенсивного хозяйственного использования территории свидетельствует об антропогенном факторе. За рассматриваемый период в российской части около 9 % пройдено пожарами, из которых большая часть приходится на лесные земли. В среднем ежегодно уничтожается 118,3 тыс. га лесных массивов, что составляет 0,6 %. На территории Монголии за этот период около 7,4 % площади поражено лесными и степными пожарами, что составляет 0,5 %. Для выявленных территорий с высоким уровнем риска в дальнейшем необходимо

проведение детализированных исследований и разработка обоснованных рекомендаций по лесовосстановлению и минимизации лесопожарных рисков.

Предлагаемый методический подход создания и использования ВХСД является надёжным инструментом геоинформационного картографирования рисков от лесных пожаров. При этом такое техническое решение универсально для работы с любыми статистическими данными в области наук о Земле.

Список источников

1. Моисейкина Л.Г., Куджаев Н.А. Информационно-статистическое обеспечение анализа охраны лесных земель от пожаров // Статистика и экономика. 2013. № 4. С. 149–153. <https://doi.org/10.21686/2500-3925-2013-4-149-153>.
2. Braun J., Jones B., Lee J., Woolford D., Wotton M. Forest fire risk assessment: an illustrative example from Ontario, Canada // J. of Probability and Statistics. 2010. Vol. 2010. Article ID 823018. 26 p. Doi: 10.1155/2010/823018.
3. Abdi O., Kamkar B., Shirvani Z., Teixeira da Silva J., Buchroithner M. Spatial-statistical analysis of factors determining forest fires: a case study from Golestan, Northeast Iran // Geomatics, Natural Hazards and Risk. 2015. Vol. 9(1). P. 267–280.
4. Thompson M., Wei Y., Calkin D. Risk Management and Analytics in Wildfire Response // Current Forestry Report. 2019. Vol. 5. P. 226–239. <https://doi.org/10.1007/s40725-019-00101-7>.
5. Татарников А.В. ГИС «Лесные пожары» в оперативной системе анализа спутниковых наблюдений очагов пожаров // Солнечно-земная физика. 2004. № 5 (118). С. 34–35.
6. Астахин А.С. Вопросы защиты сельских населённых пунктов от лесных пожаров // Современные тенденции развития науки и технологий. 2016. № 7-7. С. 19–24.
7. Муравьева С.Б., Высоцкий О.Г., Исаченко Ю.С. Мониторинг пожарной опасности территорий Брянской и Гомельской областей и оценка экологических последствий от лесных пожаров. Брянск: Новый проект, 2016. 168 с.
8. Зубарева А.Е., Перминов В.А. Анализ статистических данных по лесным пожарам в Томской области // Вестн. науки Сибири. 2014. № 1 (11). С. 25–32.
9. Жаринов С.Н., Голубева Е.И. Экономическая оценка последствий лесных пожаров (на примере Тверской области) // Вестн. Московского ун-та. География. 2017. № 3. С. 61–69.
10. Государственный доклад «О состоянии озера Байкал и мерах по его охране за период 2003–2018 гг.». URL: http://www.mnr.gov.ru/docs/gosudarstvennye_doklady/o_sostoyanii_ozera_baykal_i_merakh_po_ego_okhrane/ (дата обращения: 01.07.2021).
11. Федеральное агентство лесного хозяйства. URL: <http://rosleshoz.gov.ru/> (дата обращения: 16.04.2021).
12. Ministry of Environment and Tourism of Mongolia. URL: <https://www.mne.mn/> (дата обращения: 16.04.2021).
13. Природные опасности России. Т. 6: Оценка и управление природными рисками / под ред. А.Л. Рагозина. М.: КРУК, 2003. 320 с.
14. Борисова Т.А. Природно-антропогенные риски в бассейне оз. Байкал. Новосибирск: Гео, 2013. 126 с.
15. Борисова Т.А. Риски лесных пожаров в Байкальском регионе на примере Республики Бурятия // Использование и охрана природных ресурсов в России. 2016. № 3. С. 42–47.

References

1. Moiseikina L.G., Kudzhaev N.A. Information and statistical support for the analysis of forest land protection from fires. *Statistika i ekonomika = Statistics and Economics*. 2013;(4):149-153, <https://doi.org/10.21686/2500-3925-2013-4-149-153>. (In Russ.).
2. Braun J., Jones B., Lee J., Woolford D., Wotton M. Forest fire risk assessment: an illustrative example from Ontario, Canada. *Journal of Probability and Statistics*. 2010;2010:823018, doi: 10.1155/2010/823018.
3. Abdi O., Kamkar B., Shirvani Z., Teixeira da Silva J., Buchroithner M. Spatial-statistical analysis of factors determining forest fires: a case study from Golestan, Northeast Iran. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*. 2015;9:267-280.
4. Thompson M., Wei Y., Calkin D. Risk Management and Analytics in Wildfire Response. *Current Forestry Report*. 2019;5:226-239, <https://doi.org/10.1007/s40725-019-00101-7>.
5. Tatarnikov A. V. GIS “Forest fires” in the operational system for the analysis of satellite observations of fire centers. *Solnechno-zemnaya fizika = Solar-Terrestrial Physics*. 2004;(5):34-35. (In Russ.).
6. Astakhin A.S. Issues of protecting rural settlements from forest fires. *Sovremennye tendentsii razvitiya nauki i tekhnologii = Modern Trends in the Development of Science and Technology*. 2016;(7-7):19-24. (In Russ.).
7. Muravyova S.B., Vysotsky O.G., Isachenko Yu.S. Monitoring the fire hazard in the Bryansk and Gomel regions and assessing the environmental consequences of forest fires. Bryansk: Novyi proekt Publ.; 2016. 168 p. (In Russ.).
8. Zubareva A.E., Perminov V.A. Analysis of statistical data on forest fires in the Tomsk region. *Вестн. науки Сибири = Journal of Wellbeing Technologies*. 2014;(1):25-32. (In Russ.).

9. Zharinov S.N., Golubeva E.I. Economic assessment of the consequences of forest fires (on the example of the Tver region). *Vestn. Moskovskogo un-ta. Geografiya* = *Moscow University Bulletin. Series 5, Geography*. 2017;(3):61-69. (In Russ.).

10. State report "On the state of Lake Baikal and measures for its protection for the period 2003-2018". Available from: http://www.mnr.gov.ru/docs/gosudarstvennye_doklady/o_sostoyanii_ozera_baykal_i_merakh_po_ego_okhrane/ [Accessed 1st July 2021]. (In Russ.).

11. Federal Forestry Agency. Available from: <http://rosleshoz.gov.ru/> [Accessed 16th April 2021]. (In Russ.).

12. Ministry of Environment and Tourism of Mongolia. Available from: <https://www.mne.mn/> [Accessed 16th April 2021].

13. Ragozin A.L., ed. *Natural hazards of Russia. Vol. 6. Assessment and management of natural risks*. Moscow: KRUK Publ.; 2003. 320 p. (In Russ.).

14. Borisova T.A. *Natural and anthropogenic risks in the basin of the lake Baikal*. Novosibirsk: Geo Publ.; 2013. 126 p. (In Russ.).

15. Borisova T.A. Risks of forest fires in the Baikal region on the example of the Republic of Buryatia. *Ispol'zovanie i okhrana prirodnikh resursov v Rossii* = *Use and Protection of Natural Resources in Russia*. 2016;(3):42-47. (In Russ.).

Информация об авторах

Борисова Т.А. – кандидат географических наук, старший научный сотрудник, лаборатория геоинформационных систем.

Бешенцев А.Н. – доктор географических наук, профессор РАН, заведующий лабораторией геоинформационных систем.

Information about the authors

Borisova T.A. - Candidate of Science (Geography), Senior Researcher, Laboratory of Geoinformation Systems.

Beshentsev A. N. - Doctor of Science (Geography), Professor RAS, Head of Laboratory of Geoinformation Systems.

Статья поступила в редакцию 21.09.2021; одобрена после рецензирования 06.10.2021; принята к публикации 26.11.2021.

The article was submitted 21.09.2021; approved after reviewing 06.10.2021; accepted for publication 26.11.2021.

Научная статья

УДК 57.014:58.051

doi: 10.18522/1026-2237-2021-4-34-44

ОСОБЕННОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ РАДИОНУКЛИДОВ В НАЗЕМНЫХ ЭКОСИСТЕМАХ КАШТАНОВОЙ ЗОНЫ В УСЛОВИЯХ РОСТОВСКОЙ ОБЛАСТИ

Е.А. Буреава^{1✉}, О.С. Безуглова², С.Н. Горбов³, Д.В. Иванков⁴, Т.А. Михайлова⁵, Е.А. Кацаева⁶, Н.В. Маломыжева⁷, Д.А. Швецова⁸, А.А. Ширяева⁹

^{1,2,3,4,5,6,7,8,9}Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, Россия

¹buraeva@sfedu.ru✉

²osbesuglova@sfedu.ru

³sngorbov@sfedu.ru

⁴ivankov@sfedu.ru

⁵tatmihaylova@sfedu.ru

⁶kashaeva@sfedu.ru

⁷lia.2013@yandex.ru

⁸dshvecova@sfedu.ru

⁹ashiryaeva@sfedu.ru

Аннотация. Определение радиоактивности почв населенных пунктов и природных территорий необходимо для выявления зон с повышенным уровнем содержания радионуклидов. Работа посвящена изучению особенностей загрязнения растений естественными дозообразующими радионуклидами (^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K) и искусственным ^{137}Cs в условиях полусухих степей на примере Ростовской области. В качестве объектов исследования использованы образцы почв (преимущественно каштановых) и травянистых растений, отобранных в Цимлянском, Волгодонском, Дубовском и Орловском районах Ростовской области в экспедициях 2014–2017 гг. Удельную активность (концентрацию) радионуклидов в почве и растениях измеряли гамма-спектрометрическим методом. Показано, что распределение искусственного радионуклида ^{137}Cs в почвенном покрове Ростовской области неравномерно. Наименьшее содержание естественных радионуклидов характерно для аллювиально-луговых почв и солончаков облегченного гранулометрического состава, сформированных в поймах рек и на прибрежных участках озера Маныч-Гудило. В каштановых и темно-каштановых почвах содержание естественных радионуклидов практически сопоставимо, так как вариация удельной активности данных радионуклидов в этих почвах находится в пределах погрешности измерений (10–15 %). Уровень загрязнения радионуклидами растений обусловлен климатическими условиями в период отбора и, как следствие, механическим загрязнением частицами почвы, пыли как в период дождей, так и в засуху, когда почва начинает пылить.

Ключевые слова: естественные радионуклиды, радиоцезий (^{137}Cs), полусухая (семиаридная) степь, наземные экосистемы, загрязнение, почва, травянистые растения, подстилка

Благодарности: исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (государственное задание в сфере научной деятельности научный проект № 0852-2020-0032) / (БА30110/20-3-07ИФ).

Для цитирования: Буреава Е.А., Безуглова О.С., Горбов С.Н., Иванков Д.В., Михайлова Т.А., Кацаева Е.А., Маломыжева Н.В., Швецова Д.А., Ширяева А.А. Особенности распределения радионуклидов в наземных экосистемах каштановой зоны в условиях Ростовской области // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. 2021. № 4. С. 34–44.

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

Original article

FEATURES OF RADIONUCLIDES DISTRIBUTION IN TERRESTRIAL ECOSYSTEMS OF THE CHESTNUT ZONE IN THE CONDITIONS OF THE ROSTOV REGION

E.A. Buraeva^{1✉}, O.S. Bezuglova², S.N. Gorbov³, D.V. Ivankov⁴, T.A. Mikhailova⁵, E.A. Kashchayeva⁶, N.V. Malomyzheva⁷, D.A. Shvetsova⁸, A.A. Shiryayeva⁹

^{1,2,3,4,5,6,7,8,9}Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia

^{1✉}buraeva@sfedu.ru

²osbesuglova@sfedu.ru

³sngorbov@sfedu.ru

⁴ivankov@sfedu.ru

⁵tatmihaylova@sfedu.ru

⁶kashaeva@sfedu.ru

⁷llia.2013@yandex.ru

⁸dshvecova@sfedu.ru

⁹ashiryayeva@sfedu.ru

Abstract. The determination of the radioactivity of soils in settlements and natural territories is necessary to identify areas with an increased level of radionuclide content. The paper is devoted to studying the features of accumulation of natural radionuclides (^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K) and artificial ^{137}Cs by plants in the conditions of semiarid steppes on the example of the chestnut zone of the Rostov region. Samples of soils and plants selected in the Tsimlyansky, Volgodosky, Dubovsky and Orlovsky districts of the Rostov region during the 2014-2017 expeditions were used as objects of research. The activity concentration of radionuclides in soil and plants was measured by gamma spectrometric method of radionuclide analysis. It is shown that the distribution of artificial radionuclide ^{137}Cs in the soil cover of the Rostov region, caused by the accident at the Chernobyl nuclear power plant, is extremely uneven and depends on the humus content. Biogenic element ^{40}K accumulates in the surface horizon, also correlating with the humus content. The activity concentration of ^{137}Cs content on ^{40}K is most clearly displayed in the upper layer (0-10 cm). The lowest activity concentration of natural radionuclides is typical for alluvial-meadow soils and salt marshes of lightweight granulometric composition formed in floodplains of rivers and on coastal areas of lake Many-Gudilo. In chestnut and dark-chestnut soils, the activity concentration of natural radionuclides is almost comparable, since variations in the activity concentration of these radionuclides in these soils are within the measurement error (10-15 %). The aggregated transfer factors from soil to plants for all radionuclides were generally less than 0.4 m²/kg. Variations in radionuclide aggregated transfer factors in the ecosystem are caused by climatic conditions during the selection period and, as a result, by mechanical contamination of soil particles and dust both during rains and during droughts, when the soil begins to dust.

Keywords: natural radionuclides, radiocaesium (^{137}Cs), semiarid steppe, terrestrial ecosystems, accumulation, soil, herbaceous plants, litter

Acknowledgments: the study was carried out with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (State assignment in the field of scientific activity, scientific project No. 0852-2020-0032) / (BA30110 / 20-3-07IF).

For citation: Buraeva E.A., Bezuglova O.S., Gorbov S.N., Ivankov D.V., Mikhailova T.A., Kashchayeva E.A., Malomyzheva N.V., Shvetsova D.A., Shiryayeva A.A. Features of Radionuclides Distribution in Terrestrial Ecosystems of the Chestnut Zone in the Conditions of the Rostov Region. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science*. 2021;(4):34-44. (In Russ.).

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

Введение

Определение радиоактивности почв населенных пунктов и природных территорий необходимо для выявления зон с повышенным уровнем содержания радионуклидов. Пешеходная гамма-съемка (определение мощности эквивалентной дозы гамма-излучения) при радиоэкологических исследованиях дает представление о наличии радиоактивных аномалий на территориях или объектах. При этом данные о концентрации и распределении радионуклидов в почвах, растениях и иных объектах эко-

сферы можно получить методами гамма-спектрометрии. Информация о распределении радионуклидов по почвенному профилю также представляет интерес, так как поступление радиоактивных веществ в растения и грунтовые воды, а также уровень излучений на поверхности во многом определяются глубиной и формой закрепления в почвенном профиле. Изучению вертикального распределения естественных (ЕРН) и искусственных (ИРН) радионуклидов в различных экосистемах посвящено множество работ. Основное внимание уделяется формированию дозы излучения для поверхностных (дневных) горизонтов почв за счет ЕРН [1, 2], оценке радионуклидных отношений для определения нарушения радиоактивного равновесия в зонах с повышенным естественным фоном [3], использованию некоторых ЕРН (например, ^{210}Pb) в качестве одного из маркеров эрозионно-аккумулятивных процессов [4] и для оценки радоноопасности территорий и объектов [5]. Отмечается недостаточное количество исследований по изучению миграции и переносу радионуклидов в системе почва – растения [6, 7].

Для юга европейской части России подобные радиоэкологические исследования не проводились. При этом на степных территориях активно изучаются особенности распределения тяжелых металлов [8, 9] и искусственного радионуклида ^{137}Cs [10] в почвах, процессы опустынивания [11], исследуются вопросы и проблемы краснокнижных почв [12]. Необходимо отметить, что в Ростовской области в каштановой зоне расположена Ростовская АЭС, а Цимлянский, Волгодонской и Дубовский районы попадают в зону её влияния, следовательно, и обязательного мониторинга, а в Орловском и Ремонтненском районах располагается особо охраняемая природная территория – заповедник «Ростовский».

Целью работы является оценка особенностей накопления растениями естественных дозообразующих радионуклидов (^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K) и искусственного ^{137}Cs в условиях полусухих степей на примере каштановой зоны Ростовской области. Работа является продолжением комплекса исследований, проводимых в Южном федеральном университете с целью создания карт территориального распределения ЕРН и их временной динамики. Полученные сведения могут быть использованы как справочная информация для оценки изменений в уровнях фоновой активности радионуклидов в окружающей среде из-за различных природных геологических процессов или техногенного влияния на экосистемы.

Объекты и методы исследований

Эколого-географическая характеристика региона исследования. Сухостепная зона в пределах Ростовской области представлена Донской провинцией, на территории которой выделяют все типы каштановых почв (Kastanozems). Широко распространены солонцы (Solonchaks) и лугово-каштановые (Gleyic Kastanozems) почвы, встречаются солончаки (Solonchaks). Гранулометрический состав почв преимущественно тяжелосуглинистый и легкоглинистый [13]. Почвообразующие породы – глины и лессовидные суглинки, в поймах рек – аллювиальные отложения.

Климатические условия сухостепной зоны характеризуются резко континентальным климатом: очень сухим летом и жесткой зимой. Годовое количество осадков составляет 320–390 мм, сумма активных температур – 3200–3300 °С, гидротермический коэффициент районов исследования – 0,4–0,5 [13].

Отбор почвенных и растительных проб. В качестве объектов исследования использованы образцы почв и растений, отобранных в Цимлянском (контрольный участок (КУ) 201), Волгодонском (КУ 75а, 12), Дубовском (КУ 3) и Орловском районах (К3, К4) Ростовской области в экспедициях 2014–2017 гг. (рис. 1).

Экспедиции проводились преимущественно в летний период (с июня по сентябрь). Контрольные участки расположены на целинных или залежных почвах. Растения срезались с площади от 0,05 до 0,5 м² в зависимости от мощности растительного покрова. С этой же площади снималась подстилка (травяной или степной войлок). Разделение растительной массы по видам растений, подстилки – по степени разложения не проводилось.

Почва для оценки латерального и радиального распределения радионуклидов отбиралась в пятикратной повторности из прикопок глубиной 0–10 см и из почвенных разрезов глубиной до 150 см (последовательно, слоями 0–1, 1–3, 3–5, 5–10, 10–15, 15–25, 25–35 см и далее слоями по 10 см до дна).

Методы измерений. Для оценки содержания радионуклидов в почвах и растениях использовали гамма-спектрометрическую установку «Прогресс-гамма сцинтилляционный» на основе NaI(Tl)-детектора. Применяли стандартные методики подготовки и измерений почвенных и растительных проб [14, 15]. Образцы почвы и растений высушивали до воздушно-сухого состояния. Почву перетирали до размера частиц не более 1 мм, растения измельчали до размеров порядка 1 см.

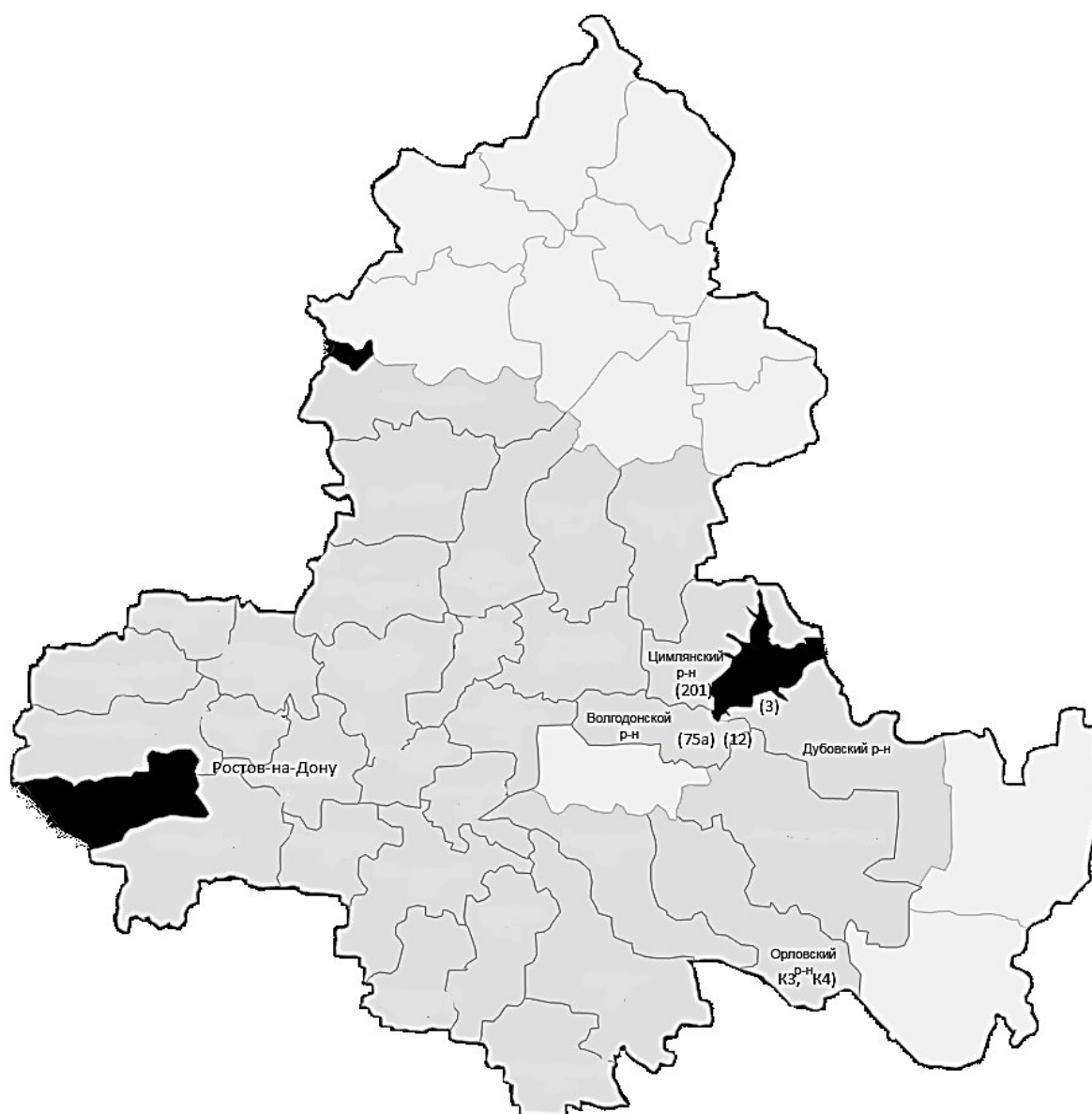


Рис. 1. Карта Ростовской области с выделенными районами исследований
/ Fig. 1. Map of the Rostov region with a dedicated research area

Использовались счетные геометрии Маринелли 0,5 л, Маринелли 1 л и чашка Петри. Время измерения гамма-спектров составляло 1–2 ч для счетных геометрий Маринелли 0,5 л, Маринелли 1 л и 24 ч – для чашки Петри. Погрешность определения удельной активности радионуклидов в образцах почвы и растений не превышала 15 %.

Определение гранулометрического состава почвенных образцов проводили по ГОСТ 12536-2014, гумуса в почвенных образцах – по методу Тюрина в модификации Симакова, pH водной вытяжки (почвенной суспензии) – по ГОСТ 2423-85.

Результаты и обсуждение

Содержание радионуклидов в почвах. Основная задача данного исследования – оценка особенностей распределения радионуклидов в почвах и травянистых растениях (в том числе в степной подстилке) в полусухих степях Ростовской области. На рис. 2 представлены вариации радионуклидов в различных почвах региона исследования.

ИРН ^{137}Cs (рис. 2, табл. 1) в различных районах Ростовской области распределен крайне неравномерно и попал в почву в результате аварии на Чернобыльской АЭС. В верхнем слое почвы (0–10 см) имеет

место прямая зависимость удельной активности данного радионуклида от содержания гумуса [10]. Тем не менее взаимодействие этого радионуклида с гумусом достаточно сложное, ионы Cs^+ образуют слабые связи с гуминовыми кислотами (ГК), в то же время комплексообразование ионов с ГК значительно увеличивается при подщелачивании среды, что обусловлено усилением ионизации карбоксильных групп ГК [16]. В целом поверхностные горизонты почв степей Ростовской области нейтральные и слабощелочные с диапазоном pH в пределах 7,0–7,8 [13], что может способствовать образованию гуматов цезия. Повышенное содержание радиоцезия в поверхностном слое может быть обусловлено еще и сорбцией цезия гумином [16]. Однако, учитывая тяжелый гранулометрический состав почвы, наличие натрия в почвенно-поглощающем комплексе (ППК) и, следовательно, пептизацию коллоидов, можно предположить, что цезий накапливается в поверхностном слое почвы также за счет образования сорбционных связей с глинистыми минералами. Изменение концентрации ^{137}Cs в верхнем слое почвы может быть обусловлено временем отбора в разные годы и, возможно, сочетанием метеорологических условий в периоды отбора.

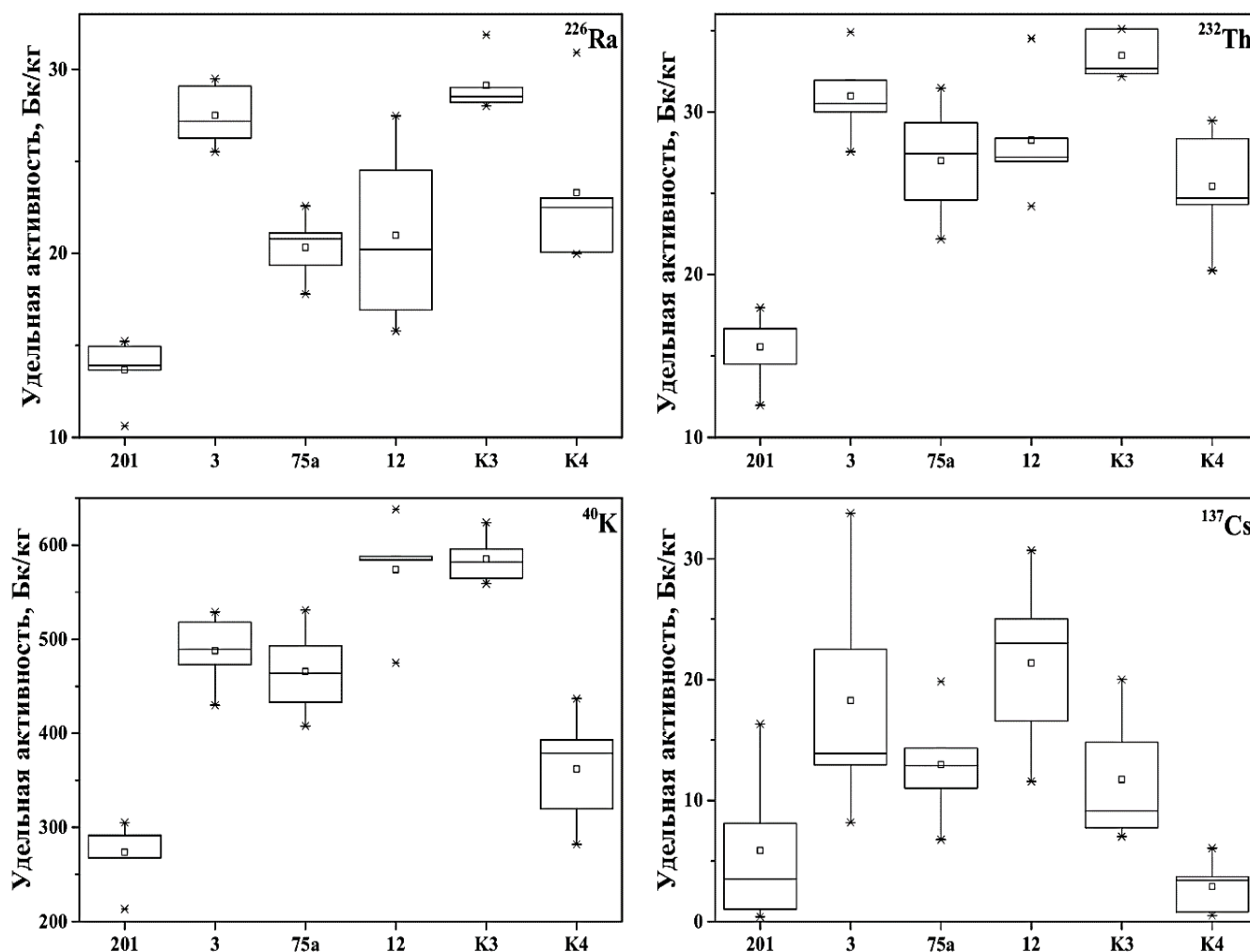


Рис. 2. Распределение радионуклидов в верхнем (0–10 см) слое почвы на различных площадках
/ Fig. 2. The distribution of radionuclides in the 0-10 cm soil layer

Наименьшим содержанием ЕРН (рис. 2, табл. 1) обладают аллювиально-луговые насыщенные почвы (Gleyic Fluvisols) и солончаки облегченного гранулометрического состава (табл. 2), сформированные в поймах рек и на прибрежных участках (КУ К4, прибрежная часть озера Маныч-Гудило и КУ 201, расположенный в пойме реки Дон). В каштановых и темно-каштановых почвах содержание ЕРН практически сопоставимо. Вариации удельной активности данных радионуклидов в основном находятся в пределах погрешности измерений (10–15 %).

Таблица 1 / Table 1

Среднее содержание радионуклидов в верхнем (0–10 см) слое почвы
/ The mean activity concentrations of radionuclides in the 0-10 cm soil layer

Контроль- ный участок	Тип почвы		Средняя удельная активность в слое 0–10 см, Бк/кг			
	Классификация 1977 г.	WRB	¹³⁷ Cs	²²⁶ Ra	²³² Th	⁴⁰ K
201	Аллювиально-луговая	Gleyic Fluvisols	5,9±1,4	13,7±1,5	15,6±1,6	273,7±30,2
K4	Солончак	Solonchak	2,9±0,8	23,3±2,5	25,4±2,2	362,1±35,9
K3	Каштановая	Luvic Kashtanozem	11,7±1,6	29,1±3,1	33,5±2,8	585,2±60,1
75a	Тёмно-каштановая	Haplic Kashtanozem	13,0±1,7	20,3±2,1	27,0±2,5	465,8±51,1
3	Тёмно-каштановая	Haplic Kashtanozem	18,3±1,8	27,5±3,0	31,0±3,2	487,8±51,2
12	Лугово-каштановая	Gleyic Kashtanozem	21,4±2,2	21,0±2,4	28,3±2,6	574,0±60,1

Таблица 2 / Table 2

Физико-химические свойства почв района исследований
/ Physics and chemical characteristics of the study area soils

КУ	Тип почвы		pH	Гумус, %	Частицы >0,01 мм, %
	Классификация 1977 г.	WRB			
201	Аллювиально-луговая	Gleyic Fluvisols	7,87	1,6	40,8
K4	Солончак	Solonchak	7,45	2,4	43,8
K3	Каштановая	Luvic Kashtanozem	7,71	3,3	51,9
75a	Тёмно-каштановая	Haplic Kashtanozem	7,93	4,3	54,3
3	Тёмно-каштановая	Haplic Kashtanozem	7,27	4,4	53,1
12	Лугово-каштановая	Gleyic Kashtanozem	7,96	5,0	59,4

Содержание ЕРН в почвах в основном зависит от почвообразующих пород, которые являются источником ⁴⁰K. Поэтому этот изотоп относительно равномерно распределен по всему почвенному профилю. В то же время, будучи биогенным элементом, он накапливается в поверхностных слоях с относительно высокой биологической активностью [17]. ИРН, такие как ¹³⁷Cs, попадают на поверхность почвы с радиоактивными выпадениями и мигрируют по почвенному профилю в виде солей, так как цезий, в силу своей очень высокой реакционной способности, активно реагирует со многими неметаллами и растворяется почти во всех кислотах, образуя соли. Не исключено и его передвижение по профилю с тонкими илистыми частицами, так как большинство почв региона в той или иной степени солонцевато, а, как известно, внедрение натрия в ППК сопровождается пептизацией минеральных коллоидов. Существует вероятность миграции радиоцезия по профилю и в виде комплексных соединений с гуминовыми веществами [16]. Тем не менее выпотной или периодически-выпотной тип водного режима способствует тому, что большая часть радиоцезия сосредотачивается в поверхностных горизонтах. Это происходит как за счет необменной сорбции глинистыми минералами, так и путем образования малоподвижных комплексных соединений с ГК и сорбции его гумином.

Обычно в черноземах и тёмно-каштановых почвах с мощным гумусовым горизонтом активность радиоцезия резко уменьшается с глубиной [10]. Поэтому зависимость содержания ¹³⁷Cs от ⁴⁰K наиболее четко отображается в верхнем слое (0–10 см) почвы, где присутствуют оба радионуклида (рис. 3). Коэффициент корреляции (K) в этом случае равен 0,539. Для степеней свободы F=964 критическое значение K≈0,06 при уровне статистической значимости 0,05. Тем самым взаимосвязь удельных активностей ⁴⁰K и ¹³⁷Cs в поверхностном слое почвы является статистически значимой. По глубине почвенного профиля также прослеживается прямая линейная зависимость содержания ⁴⁰K и ¹³⁷Cs. При критическом значении K=0,11 для степеней свободы F=304 (уровень значимости 0,05) полученный K=0,181. Эта величина также является статистически значимой.

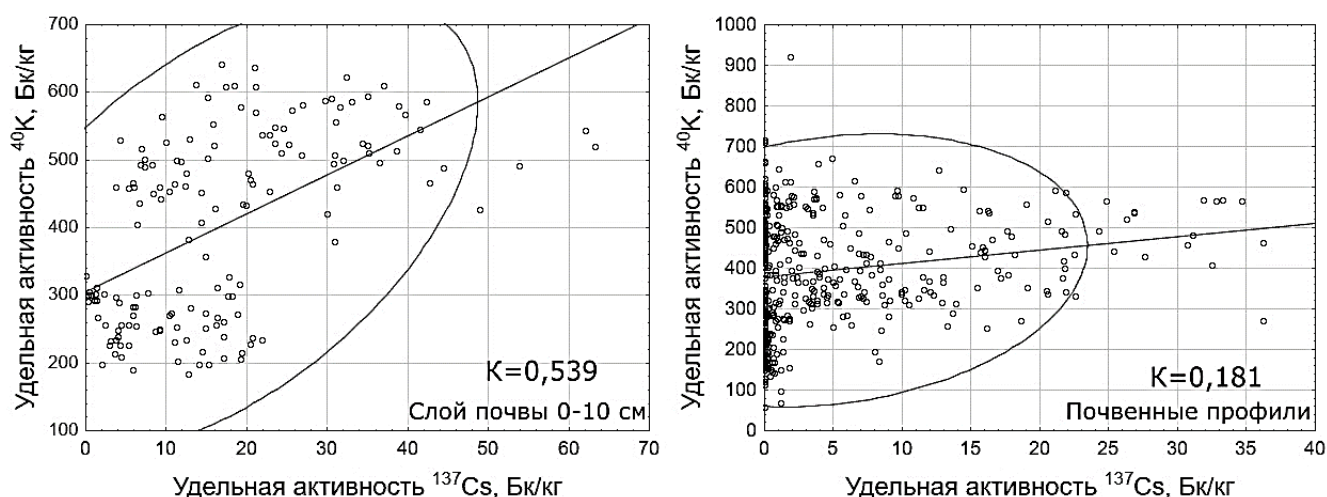


Рис. 3. Зависимость удельной активности ^{137}Cs от ^{40}K в почвах
/ Fig. 3. Dependence of $^{137}\text{Cs}/^{40}\text{K}$ activity concentrations in soils

Радионуклиды в растительной массе и подстилке. Накопление радионуклидов растительностью. Растительный покров на КУ 3, 75а, К3 представлен преимущественно полынно-злаковой степью – преобладают полынь австрийская (*Artemisia austriaca*), овсяница валлиская (*Festuca valesiaca*), мятлик луговой (*Poa pratensis*). На участках 201 и 12 встречается разнотравная луговая растительность. Здесь преобладают тысячелистник благородный (*Achillea nobilis*), пижма обыкновенная (*Tanacetum vulgare*), цикорий (*Cichorium intybus*), марьянник полевой (*Melampyrum arvense*), полынь австрийская (*Artemisia austriaca*), а также различные злаки. К4 характеризуется наличием в травостое представителей галофильной растительности типа сарсазана шишковатого (*Halocnemum strobilaceum*) и солянки мясистой (*Salsola faliosa*). На всех участках, кроме К4, растительный покров сомкнутый.

В табл. 3 приведены примеры содержания радионуклидов на участках со степной (КУ 75а) и луговой растительностью (КУ 12) в различные годы. На К4 растительный покров сильно изрежен и малочисленные растительные образцы не отбирались.

Таблица 3 / Table 3

Содержание радионуклидов в почве (слой 0–2 см), подстилке (травяном войлоке) и растительной массе (в растениях и подстилке удельная активность радионуклидов определялась в высушенной массе, всм)
/ The activity concentrations of radionuclides in the study area soils (layer 0-2 cm), litter and plant mass (in plants and litter, the activity concentrations of radionuclides was determined in the dried mass, dm)

Год	Объект	Удельная активность радионуклида, Бк/кг							
		^{137}Cs	^{226}Ra	^{232}Th	^{40}K	^{137}Cs	^{226}Ra	^{232}Th	^{40}K
		Лугово-каштановая почва, КУ 12				Тёмно-каштановая почва, КУ 75а			
2014	Почва	15,0	21,5	25,5	501,0	19,7	21,9	30,1	488,0
	Подстилка, всм	<1,0	<1,0	<1,0	312,6	3,3	5,7	<1,0	104,0
	Растения, всм	1,5	<1,0	<1,0	568,2	<1,0	28,2	14,1	101,0
2015	Почва	10,3	29,4	24,2	503,0	25,8	27,1	24,8	515,0
	Подстилка, всм	2,8	<1,0	<1,0	59,0	<1,0	12,3	<1,0	403,0
	Растения, всм	<1,0	<1,0	<1,0	213,0	<1,0	<1,0	58,0	119,0
2016	Почва	3,1	27,4	21,2	456,0	9,7	20,7	26,0	481,0
	Подстилка, всм	22,2	<1,0	3,0	<10,0	<1,0	18,1	11,5	82,0
	Растения, всм	16,1	<1,0	<1,0	15,0	4,6	<1,0	33,0	666,0
2017	Почва	17,4	13,0	32,8	745,0	6,4	14,9	36,0	663,0
	Подстилка, всм	57,0	<1,0	49,0	1132,0	17,6	<1,0	10,8	255,0
	Растения, всм	24,7	<1,0	<1,0	1349,0	26,1	<1,0	31,8	381,2

Для оценки накопления и переноса радионуклидов растениями активно используются коэффициенты накопления (K_n , отн. ед.) [6, 7] и перехода (K_p , m^2/kg) [18]. В данной работе оценивались уровни загрязнения (m^2/kg) растений радионуклидами по отношению содержания радионуклида в растительной массе (Bk/kg) к плотности загрязнения почвы на единицу площади (Bk/m^2).

На рис. 4 представлены примеры уровней загрязнения за различные годы для участков с луговой (КУ 12) и степной растительностью (КУ 75а). Загрязнение радионуклидами растений зависит от климатических особенностей региона произрастания, типа почвы, биологических особенностей растений, наличия доступных для растений соединений, содержащих радионуклиды. Не стоит исключать и фоновое содержание ЕРН в почвах, а также плотность выпадения искусственного радиоцезия в результате аварии на Чернобыльской АЭС и наличие предприятий топливной энергетики (особенно работающих на угле) [19, 20].

Достаточно высокие температуры воздуха и умеренный порывистый ветер в периоды отбора могут создавать условия для эолового переноса пылевой фракции поверхностных горизонтов почвы (особенно после уборки урожая), хотя все участки отбора расположены на целинных и залежных землях, но среди сельскохозяйственных угодий. Сильные кратковременные ливни могут приводить к загрязнению растений частицами почвы. Несмотря на то что отбор почвы и растительной массы проводился в сухой период, в отдельные годы фиксировались противоречивые результаты по уровням загрязнения радионуклидами растений и подстилки. На участках со степной растительностью радионуклиды обнаружены и в растительной массе, и в подстилке.

На участках с луговой растительностью содержание радионуклидов в растительной массе и в подстилке выше. Как следствие, K_p для ^{137}Cs выше, причем значения больше $1,0 m^2/kg$ фиксировались в периоды отбора образцов после кратковременных ливней. Принято считать, что радиоцезий слабо мигрирует в растения [7], а ^{226}Ra и ^{232}Th малоподвижны, поэтому приоритетным фактором поступления радионуклидов в растительную массу можно считать ее механическое загрязнение частицами почвы, пыли как в период дождей, так и в дни с пыльными бурями, весьма характерными для этой зоны.

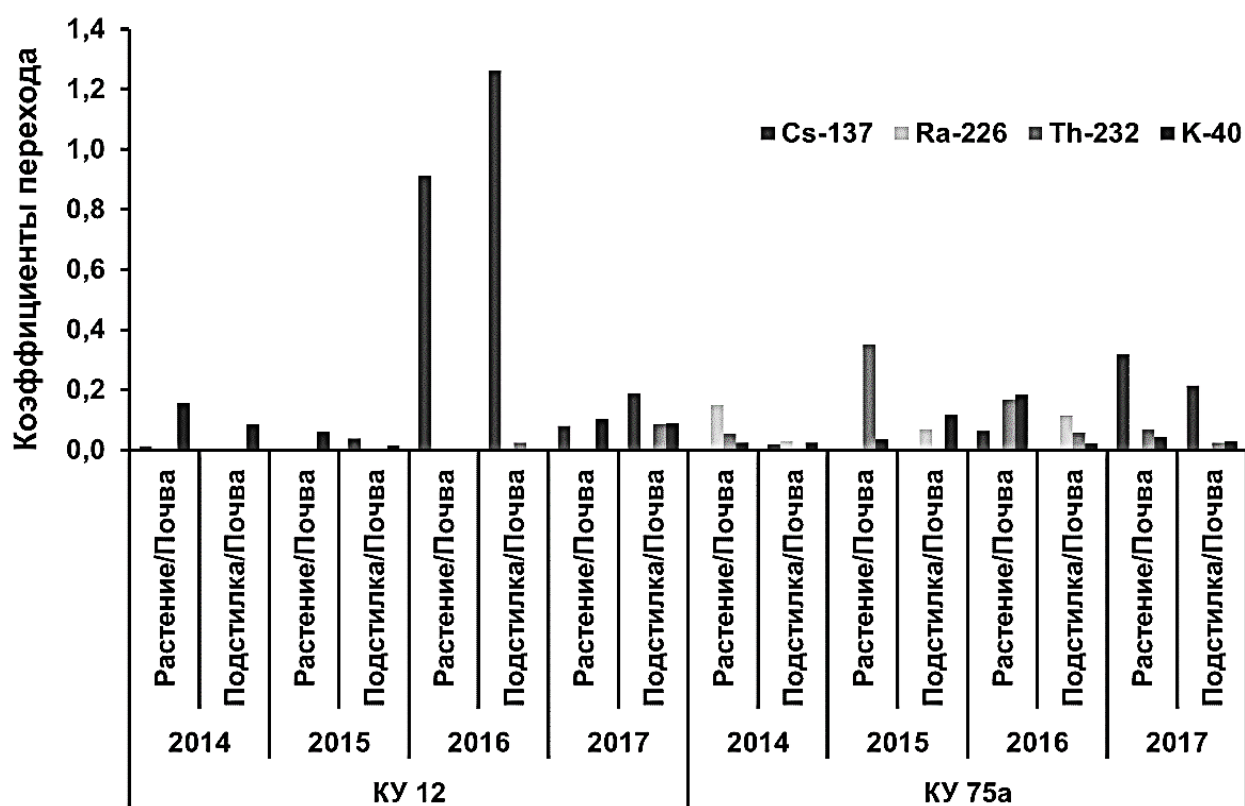


Рис. 4. Уровни загрязнения радионуклидами растений (V_3 , m^2/kg)
/ Fig. 4. The aggregated transfer factors of radionuclides from soil to plants (K_{ATF} , m^2/kg)

Выводы

1. Географически распределение ИРН ^{137}Cs в Ростовской области обусловлено аварией на Чернобыльской АЭС, что определяет крайнюю неравномерность его содержания в почвенном покрове.

2. Несмотря на то что содержание ЕРН в почвах зависит от состава почвообразующих пород, биогенный элемент ^{40}K накапливается в поверхностном горизонте, коррелируя с содержанием гумуса. ИРН, такие как ^{137}Cs , попадают на поверхность почвы с радиоактивными выпадениями. Определенная часть ионов цезия фиксируется ГК и гумином в поверхностном слое и закрепляется за счет необменной сорбции глинистыми минералами, поэтому зависимость содержания ^{137}Cs от ^{40}K наиболее четко отображается в верхнем слое (0–10 см). Другая часть мигрирует по почвенному профилю как в виде комплексных соединений с ГК, так и на минеральных коллоидах, пептизированных по причине присутствия натрия в ППК.

2. Наименьшее содержание ЕРН характерно для аллювиально-луговых почв и солончаков облегченного гранулометрического состава, сформированных в поймах рек и на прибрежных участках озера Маныч-Гудило. В каштановых и темно-каштановых почвах содержание ЕРН практически сопоставимо, так как вариации удельной активности данных радионуклидов в этих почвах находятся в пределах погрешности измерений (10–15 %).

4. Уровни загрязнения растений радионуклидами для всех радионуклидов составляли в основном менее 0,4 м²/кг. На участках с луговой растительностью содержание радионуклидов в растительной массе и подстилке высокое, и, как следствие, УЗ для ^{137}Cs выше 1,0 м²/кг часто фиксировался в периоды отбора после кратковременных ливней. Поскольку радиоцезий слабо мигрирует в растения, приоритетным фактором поступления радионуклидов в растительную массу можно считать поверхностное загрязнение пылью.

Список источников

1. Quindos L.S., Fernandez P.L., Rodenas C., Gomez-Arozamena J., Artech J. Conversion factors for external gamma dose derived from natural radionuclides in soils // J. Environ. Radioactivity. 2004. Vol. 71, № 2. P. 139–145.
2. Alatise O.O., Babalola I.A., Olowofela J.A. Distribution of some natural gamma-emitting radionuclides in the soils of the coastal areas of Nigeria // J. Environ. Radioactivity. 2008. Vol. 99, № 11. P. 1746–1749.
3. Dowdall M., O'Dea J. $^{226}\text{Ra}/^{238}\text{U}$ disequilibrium in an upland organic soil exhibiting elevated natural radioactivity // J. Environ. Radioactivity. 2002. Vol. 59, № 1. P. 91–104.
4. Геннадиев А.Н., Голосов В.Н., Чермянский С.С., Маркелов М.В., Ковач Р.Г., Беляев В.Р., Иванова Н.Н. Сравнительная оценка содержания в почвах магнитных сферул, ^{137}Cs и ^{210}Pb для целей индикации эрозионно-аккумулятивных процессов // Почвоведение. 2006. № 10. С. 1218–1234.
5. Doering C., Akber R., Heijnis H. Vertical distributions of ^{210}Pb excess, ^7Be and ^{137}Cs in selected grass covered soil in Southeast Queensland, Australia // J. Environ. Radioactivity. 2006. Vol. 87, № 2. P. 135–147.
6. Парамонова Т.А., Шамигурина Е.Н., Беляев В.Р., Комиссарова О.Л. Сравнительный анализ поступления ^{137}Cs в луговую растительность районов черноземной зоны, в различной степени загрязненных в результате аварии на Чернобыльской АЭС // Радиационная биология. Радиоэкология. 2017. Т. 57, № 4. С. 429–439.
7. Парамонова Т.А., Мамихин С.В. Корневое поглощение ^{137}Cs и его распределение между надземными и подземными органами растений: Анализ литературы // Радиационная биология. Радиоэкология. 2017. Т. 57, № 6. С. 646–662.
8. Минкина Т.М., Федоров Ю.А., Невидомская Д.Г., Манджиева С.С., Козлова М.Н. Особенности содержания и подвижность тяжелых металлов в почвах поймы реки Дон // Аридные экосистемы. 2016. Т. 22, № 1 (66). С. 86–98.
9. Чернова О.В., Безуглова О.С. Опыт использования данных фоновых концентраций тяжелых металлов при региональном мониторинге загрязнения почв // Почвоведение. 2019. № 8. С. 1015–1026.
10. Buraeva E.A., Bezuglova O.S., Stasov V.V., Nefedov V.S., Dergacheva E.V., Goncharenko A.A., Martynenko S.V., Goncharova L.Yu., Gorbov S.N., Malyshevsky V.S., Varduny T.V. Features of ^{137}Cs distribution and dynamics in the main soils of the steppe zone in the southern European Russia // Geoderma. 2015. № 259–260. P. 259–270.
11. Безуглова О.С., Назаренко О.Г., Ильинская И.Н. Динамика деградации земель в Ростовской области // Аридные экосистемы. 2020. Т. 26, № 2 (83). С. 10–15.
12. Чернова О.В., Безуглова О.С. Принципы и особенности создания Красных книг почв степных регионов (на примере Ростовской области) // Аридные экосистемы. 2018. Т. 24, № 1 (74). С. 40–51.
13. Безуглова О.С., Хырхырова М.М. Почвы Ростовской области. Ростов н/Д.: Изд-во Южного фед. ун-та, 2008. 352 с.

14. МВК №1.5.2(45)-11. Методика контроля удельной активности грунта (почвы) с применением пробоотбора. 2011. Свидетельство № 45090.1К196.
15. Bodrov I.V., Buraeva E.A., Davydov M.G., Mareskin S.A. Instrumentational Determination of uranium and thorium in natural objects // *Atomic Energy*. 2004. Vol. 96, № 4. P. 246–249.
16. Хелаль А.А., Арида Х.А., Ризк Х.Е., Халифа С.М. Взаимодействие цезия с гумусовым веществом: исследование методами радиометрии и ионометрии // *Радиохимия*. 2007. Т. 49, № 5. С. 458–463.
17. El-Arabi A.M. ^{226}Ra , ^{232}Th , and ^{40}K concentrations in igneous rocks from eastern desert, Egypt and its radiological implications // *Radiation Measurements*. 2007. Vol. 42, iss. 1. P. 94–100.
18. Санжарова Н.И., Фесенко С.В., Шубина О.А., Исамов Н.Н., Санжаров А.И. Пересмотр параметров миграции радионуклидов в агроэкосистемах // *Радиационная биология. Радиоэкология*. 2009. Т. 49, № 3. С. 268–276.
19. Clemenza M., Fiorini E., Previtali E., Sala E. Measurement of airborne ^{131}I , ^{134}Cs and ^{137}Cs due to the Fukushima reactor incident in Milan (Italy). // *J. of Environmental Radioactivity*. 2012. Vol. 114. P. 113–118.
20. Stoulos S., Ioannidou A., Vagena E., Koseoglou P., Manolopoulou M. Post-Chernobyl ^{137}Cs in the atmosphere of Thessaloniki: a consequence of the financial crisis in Greece // *J. Environ. Radioactivity*. 2014. Vol. 128. P. 68–74.

References

1. Quindos L.S., Fernandez P.L., Rodenas C., Gomez-Arozamena J., Artech J. Conversion factors for external gamma dose derived from natural radionuclides in soils. *J. Environ. Radioactivity*. 2004;71(2):139-145.
2. Alatise O.O., Babalola I.A., Olowofela J.A. Distribution of some natural gamma-emitting radionuclides in the soils of the coastal areas of Nigeria. *J. Environ. Radioactivity*. 2008;99(11):1746-1749.
3. Dowdall M., O'Dea J. $^{226}\text{Ra}/^{238}\text{U}$ disequilibrium in an upland organic soil exhibiting elevated natural radioactivity. *J. Environ. Radioactivity*. 2002;59(1):91-104.
4. Gennadiev A.N., Golosov V.N., Chermiansky S.S., Markelov M.V., Kovach R.G., Belyaev V.R., Ivanova N.N. Comparative assessment of the content of magnetic spherules, ^{137}Cs and ^{210}Pb in soils for the purpose of indicating erosion-accumulative processes. *Pochvovedenie = Eurasian Soil Science*. 2006;(10):1218-1234. (In Russ.).
5. Doering C., Akber R., Heijnis H. Vertical distributions of ^{210}Pb excess, ^7Be and ^{137}Cs in selected grass covered soil in Southeast Queensland, Australia. *J. Environ. Radioactivity*. 2006;87(2):135-147.
6. Paramonova T.A., Shamshurina E.N., Belyaev V.R., Komissarova O.L. Comparative analysis of the ^{137}Cs input into meadow vegetation of the regions of the chernozem zone, in varying degrees of contamination as a result of the accident at the Chernobyl nuclear power plant. *Radiatsionnaya biologiya. Radioekologiya = Radiation Biology. Radioecology*. 2017;57(4):429-439. (In Russ.).
7. Paramonova T.A., Mamikhin S.V. Root uptake of ^{137}Cs and its distribution between aboveground and underground plant organs: Analysis of the literature. *Radiatsionnaya biologiya. Radioekologiya = Radiation Biology. Radioecology*. 2017;57(6):646-662. (In Russ.).
8. Minkina T.M., Fedorov Yu.A., Nevidomskaya D.G., Mandzhieva S.S., Kozlova M.N. Features of the content and mobility of heavy metals in the soils of the Don River floodplain. *Aridnye ekosistemy = Arid Ecosystems*. 2016;22(1):86-98. (In Russ.).
9. Chernova O.V., Bezuglova O.S. Experience of using data of background concentrations of heavy metals in regional monitoring of soil pollution. *Pochvovedenie = Eurasian Soil Science*. 2019;(8):1015-1026. (In Russ.).
10. Buraeva E.A., Bezuglova O.S., Stasov V.V., Nefedov V.S., Dergacheva E.V., Goncharenko A.A., Martynenko S.V., Goncharova L.Yu., Gorbov S.N., Malyshevsky V.S., Varduny T.V. Features of ^{137}Cs distribution and dynamics in the main soils of the steppe zone in the southern European Russia. *Geoderma*. 2015;(259-260):259-270.
11. Bezuglova O.S., Nazarenko O.G., Ilyinskaya I.N. Dynamics of land degradation in the Rostov region. *Aridnye ekosistemy = Arid Ecosystems*. 2020;26(2):10-15. (In Russ.).
12. Chernova O. V., Bezuglova O.S. Principles and features of the creation of Red Data Books of soils of steppe regions (on the example of the Rostov region). *Aridnye ekosistemy = Arid Ecosystems*. 2018;24(1):40-51. (In Russ.).
13. Bezuglova O.S., Khirkhrova M.M. *Soils of the Rostov region*. Rostov-on-Don: Southern Federal University Press; 2008. 352 p. (In Russ.).
14. МВК № 1.5.2 (45) -11. Methodology for controlling the specific activity of soil (soil) using sampling. 2011. Certificate No. 45090.1K196. (In Russ.).
15. Bodrov I.V., Buraeva E.A., Davydov M.G., Mareskin S.A. Instrumentational Determination of uranium and thorium in natural objects. *Atomic Energy*. 2004;96(4):246-249.
16. Helal A.A., Arida H.A., Rizk H.E., Khalifa S.M. Interaction of cesium with humic substance: research by methods of radiometry and ionometry. *Radiokhimiya = Radiochemistry*. 2007;49(5):458-463. (In Russ.).
17. El-Arabi A.M. ^{226}Ra , ^{232}Th , and ^{40}K concentrations in igneous rocks from eastern desert, Egypt and its radiological implications. *Radiation Measurements*. 2007;42(1):94-100.

18. Sanzharova N.I., Fesenko S.V., Shubina O.A., Isamov N.N., Sanzharov A.I. Revision of the parameters of migration of radionuclides in agroecosystems. *Radiatsionnaya biologiya. Radioekologiya = Radiation Biology. Radioecology*. 2009;49(3):268-276. (In Russ.).

19. Clemenza M., Fiorini E., Previtali E., Sala E. Measurement of airborne ^{131}I , ^{134}Cs and ^{137}Cs due to the Fukushima reactor incident in Milan (Italy). *Journal of Environmental Radioactivity*. 2012;114:113-118.

20. Stoulos S., Ioannidou A., Vagen E., Koseoglou P., Manolopoulou M. Post-Chernobyl ^{137}Cs in the atmosphere of Thessaloniki: a consequence of the financial crisis in Greece. *J. Environ. Radioactivity*. 2014;128:68-74.

Информация об авторах

Бураева Елена Анатольевна – кандидат химических наук, доцент, ведущий научный сотрудник, Научно-исследовательский институт физики.

Безуглова Ольга Степановна – доктор биологических наук, профессор, кафедра почвоведения и оценки земельных ресурсов, Академия биологии и биотехнологии им. Д.И. Ивановского.

Горбов Сергей Николаевич – доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник, Академия биологии и биотехнологии им. Д.И. Ивановского.

Иванков Дмитрий Васильевич – аспирант, кафедра почвоведения и оценки земельных ресурсов, Академия биологии и биотехнологии им. Д.И. Ивановского.

Михайлова Татьяна Андреевна – научный сотрудник, Научно-исследовательский институт физики.

Кацаева Елизавета Александровна – аспирант, кафедра физики наносистем и спектроскопии, физический факультет.

Маломыжева Наталья Владимировна – магистрант, кафедра физики наносистем и спектроскопии, физический факультет.

Швецова Дарья Алексеевна – магистрант, кафедра физики наносистем и спектроскопии, физический факультет.

Ширяева Анастасия Андреевна – магистрант, кафедра физики наносистем и спектроскопии, физический факультет.

Information about the authors

Elena A. Buraeva - Candidate of Science (Chemistry), Associate Professor, Leading Researcher, Scientific Research Institute of Physics.

Olga S. Bezuglova - Doctor of Science (Biology), Professor, Department of Soil Science and Evaluation of Land Resources, Ivanovsky Academy of Biology and Biotechnology.

Sergey N. Gorbov - Doctor of Science (Biology), Associate Professor, Ivanovsky Academy of Biology and Biotechnology.

Dmitry V. Ivankov - Postgraduate, Department of Soil Science and Evaluation of Land Resources, Ivanovsky Academy of Biology and Biotechnology.

Tatyana A. Mikhailova - Researcher, Scientific Research Institute of Physics.

Elizaveta A. Kashchayeva - Postgraduate, Department of Physics of Nanosystems and Spectroscopy, Faculty of Physics.

Natalya V. Malomyzheva - Master Student, Department of Physics of Nanosystems and Spectroscopy, Faculty of Physics.

Daria A. Shvetsova - Master Student, Department of Physics of Nanosystems and Spectroscopy, Faculty of Physics.

Anastasia A. Shiryaeva - Master Student, Department of Physics of Nanosystems and Spectroscopy, Faculty of Physics.

Статья поступила в редакцию 30.09.2021; одобрена после рецензирования 10.10.2021; принята к публикации 26.11.2021.

The article was submitted 30.09.2021; approved after reviewing 10.10.2021; accepted for publication 26.11.2021.

Научная статья

УДК 631.416.9

doi: 10.18522/1026-2237-2021-4-45-52

ФОРМИРОВАНИЕ МИКРОЭЛЕМЕНТНОГО СОСТАВА ТЁМНО-СЕРЫХ ЛЕСНЫХ ПОЧВ СТАВРОПОЛЬСКОЙ ВОЗВЫШЕННОСТИ

Татьяна Васильевна Дегтярева

Северо-Кавказский федеральный университет, Ставрополь, Россия,

dtb.70@mail.ru

Аннотация. Рассматриваются основные закономерности формирования микроэлементного состава тёмно-серых лесных почв Ставропольской возвышенности. Установлено, что микроэлементный состав почв формируется в особых условиях протекания почвообразовательных процессов: при периодически промывном типе водного режима, окислительной обстановке в почвенном профиле, поступлении органических остатков с высоким содержанием оснований, преобладании гуминовых кислот в составе гумуса. Развитие системы почвенных соединений микроэлементов происходит на фоне гумусообразования, гумусонакопления, оглинивания, ослабленного выщелачивания карбонатов до нижней части почвенного профиля, частичного лессиважа, иллювиирования. В почвенном профиле тёмно-серых лесных почв формируются геохимические барьеры, на которых происходит закрепление микроэлементов: биогеохимический, щелочной и сорбционный. Основными фазами – носителями микроэлементов в тёмно-серых лесных почвах служат органоминеральные комплексы, вторичные алюмосиликаты монтмориллонитовой группы. Роль железистых минералов в закреплении микроэлементов ослаблена в силу малой интенсивности процессов оксидогенеза.

Ключевые слова: тёмно-серые лесные почвы, микроэлементы, почвенные соединения, химический состав, миграция

Для цитирования: Дегтярева Т.В. Формирование микроэлементного состава тёмно-серых лесных почв Ставропольской возвышенности // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. 2021. № 4. С. 45–52.

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

Original article

FORMATION OF MICROELEMENTAL COMPOSITION OF DARK GRAY FOREST SOILS OF THE STAVROPOL HILL

Tatyana V. Degtyareva

North-Caucasus Federal University, Stavropol, Russia

dtb.70@mail.ru

Abstract. The article discusses the main regularities of the formation of the microelement composition of the dark gray forest soils of the Stavropol Hill. It has been established that the microelement composition of soils is formed under special conditions of the course of soil-forming processes: with a periodically flushed type of water regime, an oxidizing environment in the soil profile, the influx of organic residues with a high content of bases, and the predominance of humic acids in the humus composition. The development of a system of soil compounds of microelements occurs against the background of humus formation, humus accumulation, clay formation, weakened carbonate leaching to the lower part of the soil profile, partial loessage, illuviation. In the soil profile of dark gray forest soils, several geochemical barriers are formed, on which microelements are fixed: biogeochemical, alkaline, and sorption. The main phases-carriers of microelements in dark gray forest soils are organomineral complexes, secondary aluminosilicates of the montmorillonite group. The role of ferruginous minerals in fixing trace elements is weakened due to the low intensity of oxidogenesis processes.

Keywords: dark gray forest soils, trace elements, soil compounds, chemical composition, migration

For citation: Degtyareva T.V. Formation of Microelemental Composition of Dark Gray Forest Soils of the Stavropol Hill. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science*. 2021;(4):45-52.

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

Введение

Формирование микроэлементного состава почв представляет собой важную научную проблему, от решения которой зависит возможность адекватно и вовремя реагировать на негативные процессы, развивающиеся в почвенном покрове на фоне интенсивного антропогенного воздействия. Тёмно-серые лесные почвы в пределах Ставропольской возвышенности развиваются в плакорных условиях рельефа под массивами широколиственных лесов. Специфическими являются климатические характеристики, дающие возможность протекать почвообразованию по тёмно-серому лесному типу – периодически промывной водный режим, преобладание осадков в весенне-летний период, непродолжительная зима с незначительным промерзанием почвенного покрова. Климатические показатели отличаются суммой положительных температур за вегетационный период от 2800 до 3200 °С, температурой воздуха в январе –5 °С, температурой воздуха в июле – +20 °С, годовым количеством осадков – 550–600 мм. Расчлененный эродированный рельеф способствует хорошему дренажу и преимущественному развитию окислительных условий в почвенном профиле. Почвообразующими породами являются продукты разрушения неогеновых отложений – сарматских известняков, песчаников, глин. На крутых и покатых склонах они представлены элювиально-делювиальными суглинками, на выровненных платообразных поверхностях – элювием. Эти отложения карбонатны – содержание карбонатов достигает 13,4 % [1]. Актуальность изучения микроэлементного состава тёмно-серых лесных почв Ставропольской возвышенности определяется важной средозащитной и средоформирующей ролью, которую выполняют эти почвы в современных экологических условиях существования биоценозов.

Цель исследования – определить основные закономерности формирования микроэлементного состава тёмно-серых лесных почв Ставропольской возвышенности на основе анализа литературных данных и материалов собственных полевых исследований. Выявление общих особенностей формирования микроэлементного состава почв под широколиственными лесами имеет как теоретическое, так и практическое значение для территорий с аналогичными физико-географическими условиями развития почвенного покрова.

Материалы и методы исследования

Полевые исследования микроэлементного состава тёмно-серых лесных почв проводились в пределах Верхнегорлыкского лесостепного ландшафта, выделенного В.А. Шальневым [2] в юго-западной части Ставропольской возвышенности, в окрестностях г. Ставрополя. Леса здесь преимущественно дубово-грабово-ясеневые с хорошим травянистым покровом на опушках и его ослаблением в глубине древостоя [3]. Породный состав представлен дубом черешчатым (*Quercus robur*), ясенем обыкновенным (*Fraxinus excelsior*), грабом кавказским (*Carpinus caucasicus*), изредка встречается бук восточный (*Fagus orientalis*). В составе травянистого покрова – аронник восточный (*Arum orientale*), купырь лесной (*Anthriscus sylvestris*), звездчатка средняя (*Stellaria media*), яснотка пурпурная (*Lamium purpureum*), купена гладкая (*Polygonatum humile*).

Опорные почвенные разрезы закладывались в основных морфологических единицах Верхнегорлыкского лесостепного ландшафта: плакорах верхнесарматской поверхности выравнивания, склонах структурно-денудационных плато, верховьях речных долин и балок. Изучались отдельные показатели физико-химических свойств почв (рН водной вытяжки, содержание гумуса, гранулометрический состав), а также содержание ряда микроэлементов (Pb, Cu, Zn и Cd). Лабораторные анализы осуществлялись в аттестованной лаборатории: рН водной вытяжки – потенциометрическим методом (ГОСТ 26423-85); гумус почвы – методом мокрого озоления по И.В. Тюрину (ГОСТ 26213-91); гранулометрический состав – методом Н.А. Качинского. Валовые формы микроэлементов определялись в сухой пробе на рентген-флуоресцентном спектрометре (Хенеметрикс EX-Calibur), подвижные формы (обменные) экстрагировались ацетатно-аммонийным буферным раствором с рН 4,8 при соотношении почва:раствор 1:5 [4] и последующим определением содержания микроэлементов на атомно-абсорбционном спектрометре «Квант-АФА». Статистическая обработка осуществлялась в программе Excel.

Характеристика микроэлементного состава почв Верхнегорлыкского лесостепного ландшафта выполнена на основе сравнения с мировыми почвенными кларками [5]. Несмотря на то что более традиционным считается проводить определение кларков концентрации (КК) и кларков рассеяния (КР) по отношению к кларкам земной коры, тем не менее в работах ряда авторов [6–8] применяются для расчета данных показателей и мировые почвенные кларки. На наш взгляд, сопоставление результатов исследования микроэлементного состава почв определенного регионального уровня развития с мировыми почвенными кларками более правомерно, так как в данном случае сравниваются между собой природные образования одного характера. Расчет КК проводился в работе как отношение содержания химического элемента в почвах Верхнегорлыкского ландшафта к мировому почвенному кларку данного элемента по [5]; КР – как отношение значения мирового почвенного кларка химического элемента к его содержанию в почвах Верхнегорлыкского лесостепного ландшафта.

В качественном отношении микроэлементный состав почв Верхнегорлыкского лесостепного ландшафта характеризовался как последовательность уменьшения концентраций рассматриваемых химических элементов в гумусовом горизонте. При определении особенностей радиального распределения микроэлементов использован коэффициент радиальной дифференциации (R), равный отношению содержания химического элемента в генетическом горизонте почв к его содержанию в почвообразующей породе.

Важная составляющая исследования – анализ имеющейся научной информации по физико-химической характеристике тёмно-серых лесных почв района исследования [1, 9] и микроэлементному составу аналогичных почв других регионов страны [10–12]. Это дало возможность восполнить недостающий материал по комплексному описанию свойств почв и более аргументированно делать выводы исследования. Использованные научные материалы позволили установить общие закономерности формирования микроэлементного состава почв под широколиственными лесами, свойственные не только изучаемому Верхнегорлыкскому лесостепному ландшафту, так как в них прослеживается аналогичный характер природных почвенно-геохимических процессов.

Полученные результаты и их обсуждение

Для Верхнегорлыкского лесостепного ландшафта условия развития тёмно-серых лесных почв характеризуются близким залеганием подстилающих пород. В силу этого почвы отличаются незначительной мощностью (80–90 см), карбонатностью в нижней части почвенного профиля. Щелочно-кислотные условия контрастны: верхние гумусовые горизонты имеют слабокислую реакцию ($pH\ 6,26 \pm 0,05$), нижние – слабощелочную с $pH\ 7,96 \pm 0,11$ (табл. 1). Содержание гумуса в верхних горизонтах составляет $6,3 \pm 0,75\ %$, с глубиной происходит его резкое падение до $0,43 \pm 0,05$. Установлена статистически значимая ($p < 0,05$) обратная зависимость между величиной pH и содержанием гумуса ($r = -0,89$), что является характерным для тёмно-серых лесных почв [10]. Гранулометрический состав – среднесуглинистый, содержание фракции физической глины составляет $42,6 \pm 1,7\ %$. В средней части почвенного профиля на глубине 50–60 см отмечается увеличение фракции физической глины на 2–3 %, которое сопровождается уплотнением.

Отличительной особенностью тёмно-серых лесных почв является фульватно-гуматный тип гумуса в верхних горизонтах, в составе которого находится большое количество гуминовых кислот [7]. Степень насыщенности основаниями достаточно высокая – 85 %, в составе оснований преобладает Са. Емкость поглощения – 32–39 мг-экв. [9].

Формирование микроэлементного состава тёмно-серых лесных почв происходит на фоне основных почвообразовательных процессов: гумусообразования, гумусонакопления, биогенной аккумуляции химических элементов в верхней части профиля, иллювиирования и оглинивания, ослабленного лесосиважа [7]. В качественном отношении микроэлементный состав тёмно-серых лесных почв основных морфологических единиц Верхнегорлыкского лесостепного ландшафта одинаков – $Zn > Pb > Cu > Cd$ (табл. 2). По сравнению с мировыми почвенными кларками [5] в большинстве случаев микроэлементный состав изученных тёмно-серых лесных почв характеризуется обогащением химическими элементами. Более низкие значения накопления Zn, Pb, Cu и обеднение Cd характерны для почв склонов структурно-денудационных плато, вероятно, в связи с усилением внутripочвенного бокового стока в условиях склонового рельефа.

Таблица 1 / Table 1

**Физико-химические свойства и содержание микроэлементов в тёмно-серых лесных почвах
Верхнегорлыкского лесостепного ландшафта / Physicochemical properties and trace element content
in dark gray forest soils of the Upper Egorlyk forest-steppe landscape**

Место за- ложения разреза	Горизонт/ глубина, см	Гумус, %	pH водн.	Ил <0,001 мм, %	Физ. глина <0,01 мм, %	Содержание микроэлементов ± погрешность, мг/кг (в числителе – валовые формы, в знаменателе – обменные)			
						Cu	Zn	Pb	Cd
Плакор	A1/10	7,1	6,3	20,6	43	$\frac{33,6 \pm 3,2}{1,44 \pm 0,13}$	$\frac{72,8 \pm 7,2}{3,46 \pm 0,3}$	$\frac{44,6 \pm 4,4}{2,79 \pm 0,3}$	$\frac{0,57 \pm 0,05}{<0,05}$
	A1A2/30	3,2	6,7	19,3	43	$\frac{32,4 \pm 3,1}{1,16 \pm 0,11}$	$\frac{70,4 \pm 7,1}{2,89 \pm 0,3}$	$\frac{36,8 \pm 3,5}{2,67 \pm 0,2}$	$\frac{0,54 \pm 0,05}{<0,05}$
	B/48	1,1	7,2	23,2	44	$\frac{28,6 \pm 2,7}{1,04 \pm 0,1}$	$\frac{66,1 \pm 6,3}{2,77 \pm 0,2}$	$\frac{43,4 \pm 4,2}{3,12 \pm 0,3}$	$\frac{0,55 \pm 0,05}{0,13 \pm 0,01}$
	BC/77	0,6	7,7	21,4	46	$\frac{24,3 \pm 2,3}{0,89 \pm 0,08}$	$\frac{43,1 \pm 4,2}{1,44 \pm 0,14}$	$\frac{41,6 \pm 4,1}{3,01 \pm 0,3}$	$\frac{0,53 \pm 0,05}{0,11 \pm 0,01}$
	C/84	0,4	7,9	16,6	45	$\frac{22,8 \pm 2,5}{0,59 \pm 0,05}$	$\frac{29,6 \pm 3,0}{1,05 \pm 0,1}$	$\frac{25,4 \pm 2,4}{2,88 \pm 0,2}$	$\frac{0,54 \pm 0,05}{0,11 \pm 0,01}$
Склон	A1/10	5,6	6,3	18,6	41	$\frac{31,6 \pm 3,1}{1,22 \pm 0,12}$	$\frac{69,8 \pm 6,8}{4,02 \pm 0,4}$	$\frac{36,6 \pm 3,5}{2,44 \pm 0,2}$	$\frac{0,49 \pm 0,05}{<0,05}$
	A1A2/30	2,7	6,5	20,5	42	$\frac{24,3 \pm 2,5}{1,14 \pm 0,11}$	$\frac{55,4 \pm 5,3}{3,58 \pm 0,3}$	$\frac{38,4 \pm 3,7}{2,59 \pm 0,2}$	$\frac{0,52 \pm 0,05}{<0,05}$
	B/52	1,4	7,0	22,6	46	$\frac{24,5 \pm 2,3}{1,09 \pm 0,1}$	$\frac{67,8 \pm 6,5}{3,11 \pm 0,3}$	$\frac{40,1 \pm 4,0}{2,98 \pm 0,3}$	$\frac{0,59 \pm 0,05}{<0,05}$
	BC/78	0,6	7,7	19,8	44	$\frac{21,3 \pm 3,2}{1,03 \pm 0,1}$	$\frac{44,8 \pm 4,3}{2,57 \pm 0,2}$	$\frac{38,9 \pm 3,8}{2,80 \pm 0,2}$	$\frac{0,47 \pm 0,04}{<0,05}$
	C/94	0,4	7,9	17,4	40	$\frac{21,9 \pm 2,1}{0,78 \pm 0,07}$	$\frac{36,6 \pm 3,2}{1,48 \pm 0,1}$	$\frac{24,1 \pm 2,3}{2,66 \pm 0,2}$	$\frac{0,23 \pm 0,02}{<0,05}$
Верховье долины	A1/10	6,4	6,2	22,0	44	$\frac{34,5 \pm 3,3}{2,03 \pm 0,2}$	$\frac{73,6 \pm 7,4}{4,61 \pm 0,4}$	$\frac{44,1 \pm 4,4}{3,2 \pm 0,3}$	$\frac{0,58 \pm 0,05}{0,07 \pm 0,01}$
	A1A2/30	5,2	6,8	21,4	44	$\frac{32,4 \pm 3,4}{1,77 \pm 0,2}$	$\frac{63,1 \pm 6,2}{3,92 \pm 0,4}$	$\frac{39,6 \pm 3,8}{3,14 \pm 0,3}$	$\frac{0,52 \pm 0,05}{0,12 \pm 0,01}$
	B/52	2,1	7,2	24,9	45	$\frac{24,5 \pm 2,3}{1,69 \pm 0,15}$	$\frac{43,4 \pm 4,2}{3,48 \pm 0,3}$	$\frac{42,7 \pm 4,3}{3,34 \pm 0,3}$	$\frac{0,59 \pm 0,05}{0,14 \pm 0,01}$
	BC/82	0,7	7,8	23,5	45	$\frac{23,4 \pm 2,1}{1,45 \pm 0,14}$	$\frac{39,8 \pm 3,8}{3,12 \pm 0,3}$	$\frac{31,5 \pm 3,1}{3,39 \pm 0,3}$	$\frac{0,48 \pm 0,05}{0,11 \pm 0,01}$
	C/94	0,5	8,1	22,7	43	$\frac{23,5 \pm 2,4}{1,22 \pm 0,11}$	$\frac{38,6 \pm 3,9}{2,54 \pm 0,2}$	$\frac{24,3 \pm 2,3}{3,35 \pm 0,3}$	$\frac{0,46 \pm 0,02}{<0,05}$

Таблица 2 / Table 2

**Микроэлементный состав тёмно-серых лесных почв Верхнегорлыкского лесостепного ландшафта
/ Microelement composition of dark gray forest soils of the Upper Egorlyk forest-steppe landscape**

Место заложения разреза	Качественный состав	Сравнение с кларком почв [5]		Внутрипрофильное распределение (валовые формы)	
		КК	КР	Горизонт	R
Плакор	Zn>Pb>Cu>Cd	Pb _{4,46} Cu _{1,68} Zn _{1,46} Cd _{1,14}	–	A1	Zn _{2,46} Pb _{1,75} Cu _{1,47} Cd _{1,07}
				A1A2	Zn _{2,38} Pb _{1,44} Cu _{1,42} Cd _{1,0}
				B	Zn _{2,23} Pb _{1,71} Cu _{1,25} Cd _{1,02}
				BC	Zn _{1,45} Pb _{1,36} Cu _{1,06} Cd _{0,98}
Склон	Zn>Pb>Cu>Cd	Pb _{3,66} Cu _{1,58} Zn _{1,46}	Cd _{1,02}	A1	Cd _{2,10} Zn _{1,91} Pb _{1,52} Cu _{1,44}
				A1A2	Cd _{2,26} Pb _{1,59} Zn _{1,51} Cu _{1,11}
				B	Cd _{2,56} Zn _{1,85} Pb _{1,66} Cu _{1,11}
				BC	Cd _{2,04} Pb _{1,61} Zn _{1,22} Cu _{0,97}
Верховье балок	Zn>Pb>Cu>Cd	Pb _{4,41} Cu _{1,73} Zn _{1,48} Cd _{1,16}	–	A1	Zn _{1,91} Pb _{1,81} Cu _{1,50} Cd _{1,26}
				A1A2	Zn _{1,63} Pb _{1,63} Cu _{1,38} Cd _{1,13}
				B	Pb _{1,75} Cd _{1,28} Zn _{1,12} Cu _{1,04}
				BC	Pb _{1,29} Cd _{1,04} Zn _{1,03} Cu _{0,99}

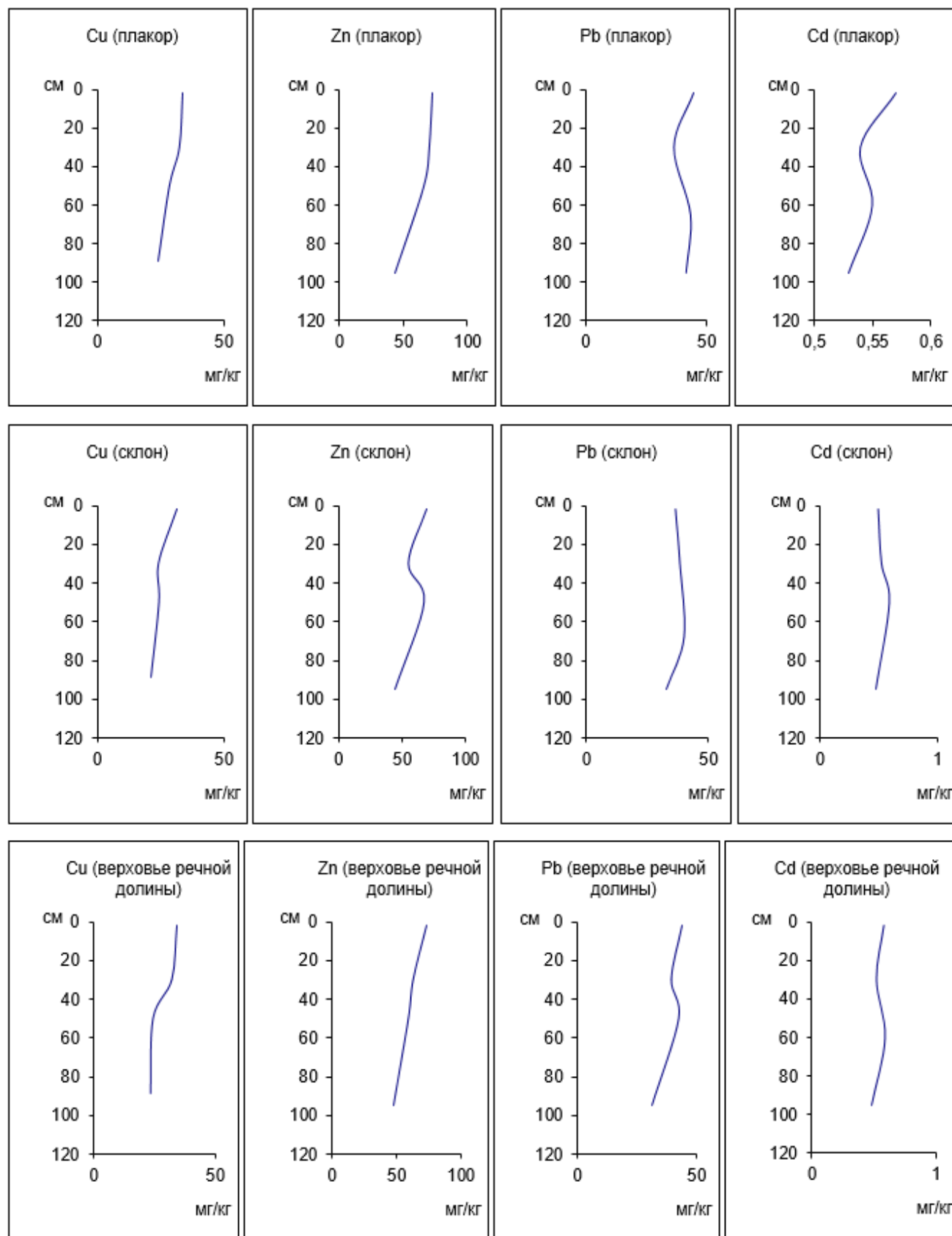
Развитие системы почвенных соединений микроэлементов лимитируется количеством и составом органических остатков, поступающих с растительным опадом в почву [13]. Установлено [14], что опад широколиственных лесов насыщен основаниями Ca и Mg, содержит большое количество азота, зольных элементов. Его поступление в почву способствует образованию значительного объема гуматов Ca, связывающих многие микроэлементы в неподвижные органоминеральные комплексы [13]. По данным, приведенным в работе [7], в сформированных на лессовидных суглинках под дубовыми лесами темно-серых лесных почвах с органической частью связано 54 % Cu, 45,5 % Zn. Взаимодействие микроэлементов с органическим веществом приводит к формированию в верхнем гумусовом горизонте темно-серых лесных почв зоны накопления биогенных микроэлементов, прежде всего из рассматриваемых – Cu и Zn, что подтверждается наличием значимой корреляционной связи ($p < 0,05$) с содержанием гумуса ($r = 0,90$ и $r = 0,77$ соответственно). Также об этом свидетельствуют более высокие значения R Cu и Zn в гумусовых горизонтах (1,47–1,5 и 2,46–1,91 соответственно). В меньшей степени биогенное накопление в гумусовом горизонте темно-серых лесных почв свойственно Cd и Pb, проявляясь в условиях плакора и верховья речной долины (рисунок).

Контрастная смена щелочно-кислотных условий в пределах почвенного профиля (от слабокислой среды в гумусовом горизонте до слабощелочной среды в нижнем горизонте) способствует формированию щелочного геохимического барьера, для которого, по данным работы [15], свойственно осаждение катионогенных элементов. Радиальное накопление Pb и Cd на щелочном геохимическом барьере в средней части почвенного профиля подтверждается повышенными значениями R (1,75–1,85 и 1,28 соответственно) и наглядно демонстрируется на рисунке. Это согласуется со свойственной для данных химических элементов способностью выпадать из почвенных растворов при смене реакции среды в сторону подщелачивания [16]. Такие процессы установлены в серых лесных почвах Среднерусской возвышенности [11], Центрального Черноземья [7], Владимирского ополья [12].

Процессы иллювиирования, т.е. вымывания высокодисперсных частиц из гумусового горизонта темно-серых лесных почв, относительно ослаблены в силу вхождения в их состав малоподвижных органоминеральных комплексов. На это обстоятельство указывают в своих работах Б.П. Ахтырцев, Н.А. Протасова и другие. По данным из работы [17], при относительном обогащении верхней части почвенного профиля темно-серых лесных почв иллитам и каолинитом в составе глинистых минералов иллювиального горизонта преимущественно образуются монтмориллонит и вермикулит, что способствует удержанию в поглощенном состоянии микроэлементов [16]. Железистые соединения (оксиды и гидроксиды Fe) также участвуют в закреплении микроэлементов в профиле темно-серых лесных почв. Согласно [11], на их долю в серых лесных почвах приходится 17 % удержания Zn, 48,5 % Pb.

Важное значение в распределении микроэлементов в профиле почв имеет гранулометрический состав, в первую очередь профильная дифференциация илистой фракции [8]. Илистые частицы состоят из первичных и вторичных глинистых минералов, органоминеральных комплексов, оксидов и гидроксидов Fe, Mn. Связанные с ними микроэлементы в процессе иллювиирования перемещаются по профилю почв. Наибольшее количество илистых частиц в темно-серых лесных почвах Верхнегорлыкского ландшафта приходится на среднюю часть почвенного профиля на глубинах 40–70 см (табл. 1). В этой части почвенного профиля происходит наложение двух внутрипочвенных геохимических барьеров – щелочного и сорбционного с адсорбированием соединений микроэлементов на илистых частицах. Их действие приводит к формированию в средней части почвенного профиля темно-серых лесных почв зоны накопления микроэлементов – Pb и Cd, частично Zn (рисунок).

Подвижные (обменные) формы микроэлементов также в своем распределении повторяют приуроченность к зонам аккумуляции, обусловленным действием внутрипочвенных геохимических барьеров. На биогеохимическом барьере в верхней части почвенного профиля темно-серых лесных почв накапливаются подвижные формы Cu и Zn, что во многом связано с их поступлением из лесной подстилки и подтверждается значимым ($p < 0,05$) коэффициентом корреляции с содержанием гумуса ($r = 0,66$ и $r = 0,76$ соответственно). Элювиально-иллювиальный характер распределения обменных форм Pb связан с его высвобождением из состава почвенных растворов на щелочном барьере в средней части почвенного профиля и частичном адсорбировании на поверхности почвенных частиц. Об этом косвенно свидетельствует установленная значимая ($p < 0,05$) корреляционная связь содержания обменных форм Pb с илистой фракцией ($r = 0,60$). Для подвижных форм Cd также частично характерен элювиально-иллювиальный тип распределения, определяемый способностью химического элемента накапливаться в поглощенном состоянии в илистой фракции почв при повышении pH среды.



Распределение микроэлементов (валовые формы) в профиле тёмно-серых лесных почв Верхнеегорлыкского лесостепного ландшафта / Distribution of trace elements (gross forms) in the profile of dark gray forest soils of the Upper Egorlyk forest-steppe landscape

Особенности латеральной миграции микроэлементов обусловлены во многом геоморфологическим строением территории, характеристиками потоков вещества, перемещаемого в пределах местных ландшафтно-геохимических катен от водораздельных местоположений к днищам речных долин и балок. Наличие крутых склонов вызывает более интенсивные процессы перераспределения масс химических элементов с поверхностным склоновым, внутрипочвенным боковым стоком. Это приводит к усилению контрастности в латеральном перераспределении микроэлементов, их валовых и подвижных форм.

Заключение

Основные закономерности формирования микроэлементного состава тёмно-серых лесных почв определяются особыми условиями их развития. Для них характерны периодически промывной тип водного режима, окислительные условия в почвенном профиле, наличие щелочного геохимического барьера при смене слабокислой обстановки на слабощелочную, преобладание в составе гумуса гуминовых кислот, высокая насыщенность основаниями.

Закрепление микроэлементов в почвенном профиле контролируется процессами образования органоминеральных комплексов, внутрипочвенного выветривания с образованием вторичных глинистых минералов (преобладают алюмосиликаты монтмориллонитовой группы), слабого накопления гидроксидов Fe и Mn. Распределение илстых частиц, содержащих в своем составе фазы – носители микроэлементов, по почвенному профилю приводит к перераспределению связанных с ними микроэлементов. Преимущественное накопление илстой фракции в средней части почвенного профиля обусловило наличие здесь сорбционного геохимического барьера для микроэлементов. Смена щелочно-кислотных условий с образованием щелочного геохимического барьера для катионогенных элементов также характерна для этой части почвенного профиля. Таким образом, для тёмно-серых лесных почв свойственно несколько внутрипочвенных геохимических барьеров, на которых происходит концентрация микроэлементов: биогеохимического – в верхней части почвенного профиля, сорбционного и щелочного – в средней.

Изученные особенности формирования микроэлементного состава тёмно-серых лесных почв под широколиственными лесами Ставропольской возвышенности служат основой проведения мониторинговых исследований экологического состояния этих почв. Важность их осуществления заключается в необходимости отслеживать изменения в химических свойствах почв, происходящие в условиях усиления антропогенного воздействия.

Список источников

1. Куприченков М.Т., Антонова Т.Н., Симбирев Н.Ф., Цыганков А.С. Земельные ресурсы Ставрополя и их плодородие. Ставрополь: Ставропольская краевая тип., 2002. 320 с.
2. Шальнев В.А. Эволюция ландшафтов Северного Кавказа. Ставрополь: Изд-во СГУ, 2007. 310 с.
3. Дзыбов Д.С. Растительность Ставропольского края. Ставрополь: АГРУС, 2018. 492 с.
4. Садовникова Л.К. Использование почвенных вытяжек при изучении соединений тяжелых металлов // Химия в сельском хозяйстве. 1997. № 2. С. 37–40.
5. Виноградов А.П. Геохимия редких и рассеянных химических элементов в почвах. М.: Изд-во АН СССР, 1957. 238 с.
6. Закруткин В.Е., Шишкина Д.Ю., Романюк О.Л., Заболотная О.Н. Особенности распределения тяжелых металлов в почвах агроландшафтов малых водосборов (на примере рек Кундрючья и Кагальник Ростовской области) // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2005. № 2. С. 98–102.
7. Протасова Н. А., Щербаков А.П. Особенности формирования микроэлементного состава зональных почв Центрального Черноземья // Почвоведение. 2004. № 1. С. 50–59.
8. Минкина Т.М., Мотузова Г.В., Назаренко О.Г. Состав соединений тяжелых металлов в почвах. Ростов н/Д.: Эверест, 2009. 208 с.
9. Побединцева И.Г., Дианова Т.М. Микроэлементы в почвах и растениях ландшафтов широколиственных лесов (на примере Ставропольской возвышенности) // Почвоведение. 1988. № 10. С. 37–47.
10. Семенков И.Н. Формы нахождения металлов в суглинистых тундровых, таежных, подтаежных и лесостепных почвенно-геохимических катенах : дис. ... канд. геогр. наук. М., 2016. 175 с.
11. Переломов Л.В., Пинский Д.Л. Формы Mn, Pb и Zn в серых лесных почвах Среднерусской возвышенности // Почвоведение. 2003. № 6. С. 682–691.

12. Карпова Д.В., Балабко П.Н., Чижикина Н.П., Бескин Л.В., Колобова Н.А., Хуснетдинова Т.И., Цымбарович П.Р., Беляева М.В. Микроморфология и минералогия серых лесных почв Владимирского ополья // Бюл. Почв. ин-та им. В.В. Докучаева. 2018. Вып. 94. С. 101–123.

13. Мотузова Г.В. Соединения микроэлементов в почвах: системная организация, экологическое значение, мониторинг. М.: Либроком, 2009. 168 с.

14. Безуглова О.С., Орлов Д.С. Биогеохимия. Ростов н/Д.: Феникс, 2000. 320 с.

15. Перельман А.И., Касимов Н.С. Геохимия ландшафта. М.: Астрей-2000, 1999. 768 с.

16. Путилина В.С., Галицкая И.В., Юганова Т.И. Адсорбция тяжелых металлов почвами и горными породами. Характеристики сорбента, условия, параметры и механизмы адсорбции: аналитический обзор. Новосибирск: ГПНТБ СО РАН, 2009. 155 с.

17. Соколова Т.А., Дронова Т.Я., Толпешта И.И. Глинистые минералы в почвах. Тула: Гриф и К, 2005. 336 с.

References

1. Kuprichenkov M.T., Antonova T.N., Simbirev N.F., Tsygankov A.S. *Land resources of the Stavropol region and their fertility*. Stavropol: Stavropol Regional Printing House; 2002. 320 p. (In Russ.).

2. Shalnev V.A. *Evolution of the landscapes of the North Caucasus*. Stavropol: SSU Press; 2007. 310 p. (In Russ.).

3. Dzybov D.S. *Vegetation of the Stavropol Territory*. Stavropol: AGRUS Publ.; 2018. 492 p. (In Russ.).

4. Sadovnikova L.K. The use of soil extracts in the study of compounds of heavy metals. *Khimiya v sel'skom khozyaistve = Agrochemical Herald*. 1997;(2):37-40. (In Russ.).

5. Vinogradov A.P. *Geochemistry of rare and trace chemical elements in soils*. Moscow: Academy of Sciences of the USSR Press, 1957. 238 p. (In Russ.).

6. Zakrutkin V.E., Shishkina D.Yu., Romanyuk O.L., Zabolotnaya O.N. Peculiarities of the distribution of heavy metals in the soils of agricultural landscapes of small catchments (by the example of the rivers Kundryuchya and Kagalnik of the Rostov region). *Izv. vuzov. Sev.-Kavk. region. Estestv. nauki = Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science*. 2005;(2):98-102. (In Russ.).

7. Protasova N.A., Shcherbakov A.P. Features of the formation of microelement composition of zonal soils of the Central Chernozem region. *Pochvovedenie = Eurasian Soil Science*. 2004;(1):50-59. (In Russ.).

8. 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.).

9. Pobedintseva I.G., Dianova T.M. Trace elements in soils and plants of landscapes of broad-leaved forests (on the example of the Stavropol Upland). *Pochvovedenie = Eurasian Soil Science*. 1988;(10):37-47. (In Russ.).

10. Semenov I.N. *Forms of finding metals in loamy tundra, taiga, subtaiga and forest-steppe soil-geochemical catenas*. Dissertation Thesis. Moscow, 2016. 175 p. (In Russ.).

11. Perelomov L.V., Pinsky D.L. Forms of Mn, Pb and Zn in gray forest soils of the Central Russian Upland. *Pochvovedenie = Eurasian Soil Science*. 2003;(6):682-691. (In Russ.).

12. Karpova D.V., Balabko P.N., Chizhikova N.P., Beskin L.V., Kolobova N.A., Khusnetdinova T.I., Tsymbarevich P.R., Belyaeva M.V. Micromorphology and mineralogy of gray forest soils of the Vladimir opolje. *Byul. Pochv.in-ta im. V.V. Dokuchaeva = Dokuchaev Soil Bulletin*. 2018;(94):101-123. (In Russ.).

13. Motuzova G.V. *Compounds of trace elements in soils: systemic organization, ecological significance, monitoring*. Moscow: Librokom Publ.; 2009. 168 p. (In Russ.).

14. Bezuglova O.S., Orlov D.S. *Biogeochemistry*. Rostov-on-Don: Feniks Publ.; 2000. 320 p. (In Russ.).

15. Perelman A.I., Kasimov N.S. *Geochemistry of the landscape*. Moscow: Astreya-2000 Publ.; 1999. 768 p. (In Russ.).

16. Putilina V.S., Galitskaya I.V., Yuganova T.I. *Adsorption of heavy metals by soils and rocks. Sorbent characteristics, conditions, parameters and mechanisms of adsorption: an analytical review*. Novosibirsk: GPNTB SB RAS Press; 2009. 155 p. (In Russ.).

17. Sokolova T.A., Dronova T.Ya., Tolpeshta I.I. *Clay minerals in soils*. Tula: Grif i K Publ.; 2005. 336 p. (In Russ.).

Информация об авторе

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

Information about the author

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

Статья поступила в редакцию 21.09.2021; одобрена после рецензирования 08.10.2021; принята к публикации 26.11.2021.

The article was submitted 21.09.2021; approved after reviewing 08.10.2021; accepted for publication 26.11.2021.

Научная статья

УДК 631.861

doi: 10.18522/1026-2237-2021-4-53-60

ПРИМЕНЕНИЕ ГУМИНОВЫХ ПРЕПАРАТОВ НА ПОСЕВАХ ОЗИМОЙ ПШЕНИЦЫ В УСЛОВИЯХ ПОЛЕВОГО ОПЫТА НА ЧЕРНОЗЁМЕ ОБЫКНОВЕННОМ КАРБОНАТНОМ

Владислав Александрович Матюгин¹, Артем Евгеньевич Попов², Ольга Степановна Безуглова³
Федеральный Ростовский аграрный научный центр, пос. Рассвет, Ростовская область, Россия

¹vlad.matyugin@mail.ru

²artp94@yandex.ru

³lola314@mail.ru

Аннотация. Представлены результаты исследования эффективности обработок посевов озимой пшеницы жидкими гуминовыми препаратами «ЭКОСС» и «БИО-Дон». Концентрация рабочего раствора 0,002 % (по углероду). Схема опыта предусматривала однократное (фаза кущения) и двукратное (фазы кущения и колошения) применение фоллиарных обработок. Контролем являлся вариант без внесения гуминовых препаратов. Исследования вели на базе стационара ФГБНУ ФРАНЦ в Аксайском районе Ростовской области. Отбор почвенных образцов проводили 4 раза: после возобновления весенней вегетации, через две недели после каждой из фоллиарных обработок посевов и после уборки урожая. Применение гуминовых препаратов сопровождалось ростом активности уреазы и фосфатазы, увеличением доступности соединений фосфора и азота. Результаты исследования установили связь между активностью фосфатазы и динамикой подвижного фосфора. Подсчет биологической урожайности показал, что оба гуминовых препарата обеспечивают увеличение урожайности, но прибавка от применения препарата «ЭКОСС» является статистически значимой и составляет 23–26 % относительно контрольного варианта. Анализ качества зерна не выявил существенной разницы между вариантами, однако на уровне тенденции можно отметить положительные изменения в качестве зерна в варианте с двукратной обработкой посевов гуминовым препаратом «ЭКОСС».

Ключевые слова: гуминовый препарат «БИО-Дон», гуминовый препарат «ЭКОСС», чернозём обыкновенный карбонатный, озимая пшеница, почвенное плодородие, ферментативная активность

Для цитирования: Матюгин В.А., Попов А.Е., Безуглова О.С. Применение гуминовых препаратов на посевах озимой пшеницы в условиях полевого опыта на чернозёме обыкновенном карбонатном // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. 2021. № 4. С. 53–60.

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

Original article

THE APPLICATION OF HUMIC PREPARATIONS ON WINTER WHEAT IN A FIELD EXPERIMENT ON CALCIC CHERNOZEM

Vladislav A. Matyugin¹, Artem E. Popov², Olga S. Bezuglova³

Federal Rostov Agrarian Scientific Center, settl. Rassvet, Rostov region, Russia

¹vlad.matyugin@mail.ru

²artp94@yandex.ru

³lola314@mail.ru

Abstract. The results of the study of the winter wheat treatment with liquid humic preparations "EKOSS" and "BIO-Don" effectiveness are presented. The final concentration of the solution used is 0.002 %. The experimental layout is provided for a single (tillering phase) and double (tillering and heading phases) application of foliar treat-

© Матюгин В.А., Попов А.Е., Безуглова О.С., 2021

ments. The control was the variant without the application of humic preparations. The research was carried out in a field experiment in the Federal State Budgetary Scientific Institution FRANTS in the Aksai district of the Rostov region. Soil samples were taken 4 times: after the resumption of spring vegetation, two weeks after each foliar treatment of crops, and after harvesting. The use of humic preparations was accompanied by an increase in the activity of urease and phosphatase, an increase in the availability of phosphorus and nitrogen compounds. The results of the study showed a good relationship between the activity of phosphatase and the dynamics of mobile phosphorus. The calculation of the biological yield showed that both humic preparations provide an increase in yield, but the increase from the use of the "EKOSS" preparation is statistically significant and amounts to 23–26 % relative to the control variant. The analysis of grain quality did not reveal a significant difference between the options, however, at the level of the trend, positive changes in the quality of grain can be noted in the option with the double treatment of crops with the humic preparation "EKOSS".

Keywords: humic preparation "BIO-Don", humic preparation "EKOSS", Calcic Chernozem, winter wheat, soil fertility, enzymatic activity

For citation: Matyugin V.A., Popov A.E., Bezuglova O.S. The Application of Humic Preparations on Winter Wheat in a Field Experiment on Calcic Chernozem. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science*. 2021;(4):53-60. (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

Увеличение объемов и ассортимента применяемых средств химизации, внедрение новых технологий и средств механизации в земледелие дают значительную прибавку урожайности, но дальнейшая интенсификация неблагоприятно сказывается на окружающей среде. Поэтому важной задачей является поиск путей, позволяющих смягчить последствия интенсификации и сохранить плодородие почвы.

Органические удобрения и биологически активные вещества, в том числе гуминовые препараты, играют важную роль в решении данной задачи. Гуматы, активизируя микроорганизмы ризосферной зоны, изменяют условия питания растений, почвенные питательные вещества мобилизуются в доступной для растений форме [1]. Полнее усваиваются и элементы питания из минеральных удобрений, что позволяет снизить их дозы. При этом особенно увеличивается подвижность фосфора, усиливается нитратообразование, поступление аммиачных и амидных форм азота. Как результат, происходит их вынос из почвы и трансформация в формирующемся и плодоносящем растении [2]. Также гуминовые вещества препаратов проявляют ауксиноподобный эффект. Поэтому на ранних стадиях развития растений они используются в качестве стимулятора роста [3].

Особое внимание стоит уделить почвенной энзимологии, изучающей активность ферментов в почве и влияние трансформации органического вещества при образовании подвижных соединений – основных элементов питания для растений. Ферменты играют важную роль в обмене веществ, влияя на биохимические почвенные процессы. Их ведущая роль в процессе трансформации органического вещества делает их индикаторами воздействия различных факторов [4]. При множестве биологических критериев оценки экологического состояния почв наиболее показательной является активность почвенных ферментов [5]. Например, усиление деятельности фосфатазы свидетельствует об увеличении доступности растениям почвенных запасов фосфора, а рост активности уреазы – об улучшении азотного режима.

Цель исследования – сравнение эффективности различных гуминовых препаратов при возделывании озимой пшеницы в условиях полевого опыта на чернозёме обыкновенном карбонатном.

Объекты и методы исследования

Исследования проводились на базе стационара ФГБНУ ФРАНЦ в Аксайском районе Ростовской области. Изучаемые биологически активные гуминовые препараты – «ВЮ-Дон» и «ЭКОСС» (табл. 1). Органическое биоудобрение «ЭКОСС» получено путем технологического преобразования органических остатков, в том числе навоза крупного рогатого скота, посредством полезных микроорганизмов. Определение общего микробного числа (ОМЧ) показало содержание 12,0 млн КОЕ/мл, и

по этому показателю препарат значительно превосходит «БИО-Дон». Для улучшения свойств препарата «ЭКОСС» использовано многочасовое аэрирование, благодаря которому отмечено трехкратное увеличение ОМЧ. Содержание общего органического вещества составляет 0,45–0,50 %, на долю гуминовых кислот приходится примерно 0,35 %, повышено и содержание фульвокислот.

Гуминовый препарат «БИО-Дон» получен путем щелочной экстракции из вермикомпоста. В его составе – гуминовые кислоты, сумма которых составляет в среднем 2,2 г/л. В нём, как и в препарате «ЭКОСС», обнаружены способные расти за счет следовых количеств азота олигонитрофильные микроорганизмы и ценные с агрономической точки зрения бактериальные культуры (бактерии *p. Bacillus* входят в состав многих микробиологических удобрений).

Таблица 1 / Table 1

**Результаты химического анализа гуминовых препаратов
/ Results of chemical analysis of the humic preparations**

Гуминовый препарат	pH	C _{орг.} , %	C _{тк} , г/л	C _{фк} , г/л	Σ C _{тк} , C _{фк} , г/л	ОМЧ, КОЕ/мл
«БИО-Дон»	8,5–8,6	0,20–0,25	1,70–1,86	0,4–0,5	2,1–2,3	2,75×10 ⁴
«ЭКОСС»	8,5–8,7	0,45–0,50	3,44–3,48	1,40–1,52	4,84–5,00	1,2×10 ⁷

Препараты разбавляют до оптимальной концентрации 0,002 % по органическому углероду и производят обработку почвы или растений. Технологически эффективно применение препарата в баковых смесях с пестицидами в следующей пропорции: 2 л препарата на 200 л воды [6, 7]. Однако в данном полевом опыте, ввиду того что эксперимент был мелкоделяночный, гуминовые препараты использовались самостоятельно. Препарат «БИО-Дон» рекомендован к применению в условиях производства и неоднократно апробирован на различных культурах. Эффективность его подтверждена различными полевыми и лабораторными исследованиями [8–11]. Действие препарата «ЭКОСС» испытано в условиях лабораторного опыта при проращивании гороха [12] и в условиях полевого опыта при возделывании озимой пшеницы на чернозёме выщелоченном [13].

Схема опыта представлена в табл. 2 и включает варианты с одно- и двукратным применением жидких биологически активных гуминовых препаратов «БИО-Дон» и «ЭКОСС», внесение – фолиарное (по вегетирующему растению) в виде рабочего 0,002%-го раствора. Контролем является вариант без внесения гуминовых препаратов.

Каждый вариант представлен в трех повторностях, расположение повторностей случайное. Посевная площадь делянки (повторности) – 6 м².

Возделываемая культура – озимая пшеница Золушка. Сорт полукарликовый, интенсивного типа. Относится к группе среднеспелых сортов. Высокоадаптивен к различным стрессорам. Жарозасухоустойчивость выше стандарта. Зимо- и морозостойкость высокая. Обладает высокой устойчивостью к желтой и бурой ржавчине. Устойчив к поражению снежной плесенью и корневыми гнилями, вирусной желтой карликовостью ячменя. Качество зерна хорошее, соответствует ценной, реже сильной пшенице. Включен в Госреестр в 2012 г. по 6 и 8 регионам [14].

Почва – чернозём обыкновенный карбонатный (миграционно-сегрегационный), по уровню плодородия является лучшим среди зональных почв Ростовской области. Содержание гумуса в пахотном слое составляет 4,4–4,7 %, а общие запасы его в гумусовых горизонтах (мощность 73–76 см) – 270–290 т/га. Содержание подвижной фосфорной кислоты преимущественно низкое и

Таблица 2 / Table 2

Схема опыта / Scheme of experience

Номер варианта	Биологически активный гуминовый препарат / количество обработок / доза внесения	Фаза внесения препарата	
		Кущение	Колошение
1	Без внесения препаратов	–	–
2	«БИО-Дон» / 1 / 2,0 л/га	+	–
3	«БИО-Дон» / 2 / 2,0 л/га	+	+
4	«ЭКОСС» / 1 / 2,0 л/га	+	–
5	«ЭКОСС» / 2 / 2,0 л/га	+	+

очень низкое (в пахотном слое – 0,6–1,5 мг на 100 г почвы), обменного калия – повышенное (30,0–47,0 мг на 100 г почвы). Обеспеченность легкогидролизуемым азотом непостоянна: при неблагоприятных для микробиологических процессов гидротермических условиях количество усвояемых форм азота недостаточно для нормального развития сельскохозяйственных культур. Реакция почвенной среды в верхней части профиля нейтральная и слабощелочная (рН 7,0–8,0), в нижней – среднещелочная (рН 8,0–8,5). Физические свойства почв, сформированных на лессовидных глинах и суглинках, вполне благоприятные. Они характеризуются высокими значениями водо- и воздухопроницаемости. Для этого вида чернозёмов характерно благоприятное сложение, высокая полевая влагемкость и довольно значительные возможные запасы продуктивной влаги [15].

В ходе эксперимента были отобраны образцы почвы для исследования динамики элементов питания, изменения ферментативной активности, образцы зерна озимой пшеницы – для определения товарных и посевных характеристик. Проведён учёт биологической урожайности. Выполнен статистический анализ.

Почвенные образцы были исследованы на количество обменного аммония (ГОСТ 26489-85), нитратов (ионометрическим методом, ГОСТ 26951-86), подвижных соединений фосфора (ГОСТ 26205-91). Определение активности фосфатазы проводилось по методу А.Ш. Галстяна и Э.А. Арутюнян, определение уреазы – по модифицированному методу А.Ш. Галстяна. Образцы зерна исследованы на количество и качество клейковины и ИДК (ГОСТ 54478-2011), на содержание белка (ГОСТ 10846-91) и на массу 1000 зерен (ГОСТ 10842-89). Проведена статистическая обработка результатов [16].

Отбор почвенных образцов проводился 4 раза – после возобновления весенней вегетации, дважды через две недели после foliarных обработок посевов и после уборки урожая.

Результаты исследований и их обсуждение

Влияние на растения доступных форм основных элементов питания очень велико, оно напрямую связано с динамикой ферментативной активности. Фосфор – необходимый для полноценного развития растения элемент питания. Чернозёмы богаты валовыми запасами фосфора, однако карбонаты, содержание которых в этом подтипе чернозёмов велико, обуславливают низкую подвижность фосфора. В таких условиях особо важную роль играет фосфатаза, которая отвечает за его минерализацию. На рис. 1 видно, что к фазе колошения (2-й отбор) происходит аккумуляция подвижных соединений фосфора. Далее во всех вариантах, за исключением варианта с применением «ЭКОСС» при двукратной обработке, наблюдается резкое снижение содержания элемента. При этом активность фосфатазы растёт в первых трех отборах во всех вариантах, кроме «ВЮ-Дон»-2. Имеются различия в действии самих препаратов при разном количестве обработок. Так, «ВЮ-Дон» при однократной обработке показывает резкое снижение содержания фосфора, а его количество даже ниже, чем в контроле, что свидетельствует о повышенном выносе элемента в данном варианте. Дополнительная обработка посевов препаратом «ВЮ-Дон» в фазу колошения способствовала увеличению подвижности фосфора. При однократном применении «ЭКОСС» динамика содержания фосфора такая же, как и в варианте с двукратной обработкой препаратом «ВЮ-Дон». Но в варианте «ЭКОСС»-2 количество доступного фосфора резко возрастает по сравнению с другими вариантами. По уровню активности фосфатазы можно судить об активности процессов биохимической мобилизации фосфора. В данном случае закономерность выражена слабо, так как почва оценивается по этому показателю как среднеобогатённая на протяжении всего эксперимента, хотя и приближается в наиболее активные фазы роста растений – кущения и особенно колошения – к верхней границе этой градации.

На рис. 2 показано, что во всех вариантах происходит активное поглощение азота в фазу колошения и, как следствие, его количественное уменьшение. В контрольном варианте между фазой кущения и колошения (отборы 1 и 2) уменьшение небольшое, что может быть связано с низкой микробиологической активностью. На стадии кущения, когда потребность растений в азоте максимальна, его поглощение в контроле возрастает. По сравнению с контролем в вариантах с «ВЮ-Доном» в этой фазе развития растений наблюдается увеличение суммарного количества азота, прежде всего за счет усиления нитратообразования. Несмотря на вынос азота растением, его содержание в почве снижается не так значительно, как в контроле. Гуминовый препарат «ЭКОСС», у которого увеличенное ОМЧ, вызывает активное поглощение азота, превышающее скорость образования доступных форм азота в почве. В последующих отборах (3-й и 4-й) на всех вариантах наблюдается примерно одинаковый уровень содержания азота в почве.

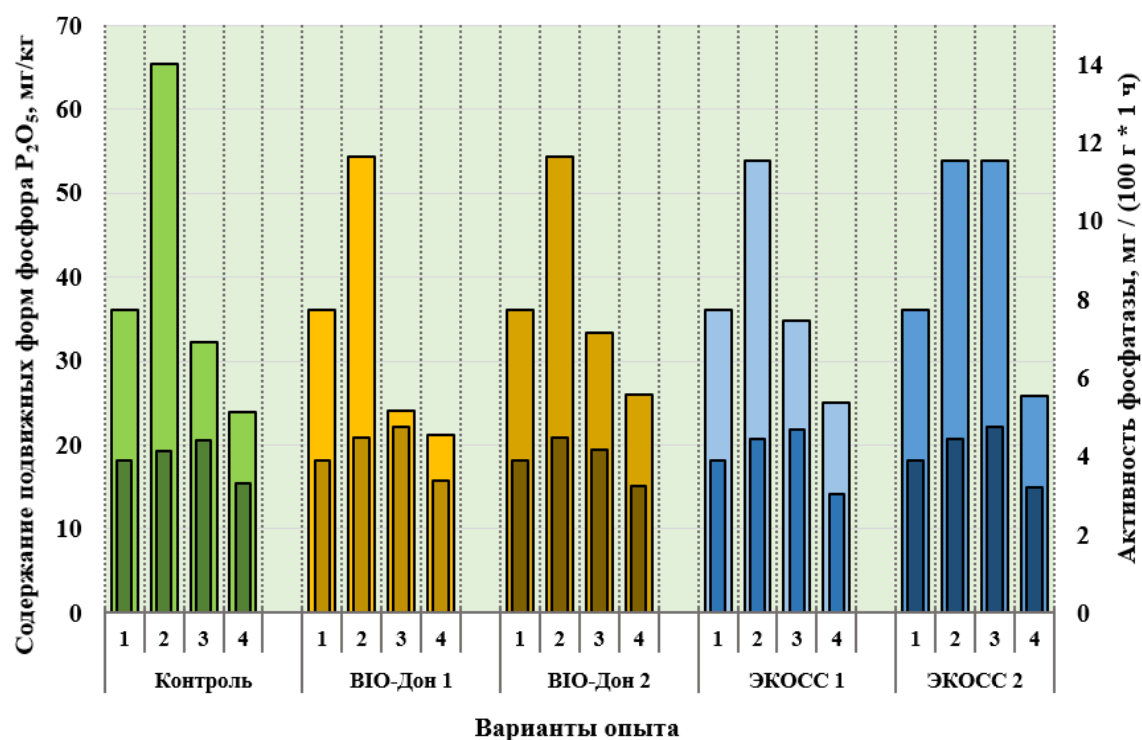


Рис. 1. Динамика подвижных соединений фосфора и активности фосфатазы (более темные столбики) по вариантам опыта в течение вегетационного периода 2020–2021 гг. Сроки отбора: 1 – возобновление весенней вегетации; 2 – через 2 недели после первой обработки; 3 – через 2 недели после второй обработки; 4 – после уборки / Fig. 1. Dynamics of mobile phosphorus compounds and phosphatase activity (darker columns) by variants of the experiment during the growing season 2020–2021. Selection terms: 1 - resumption of spring vegetation; 2 - 2 weeks after the first treatment; 3 - 2 weeks after the second treatment; 4 - after cleaning

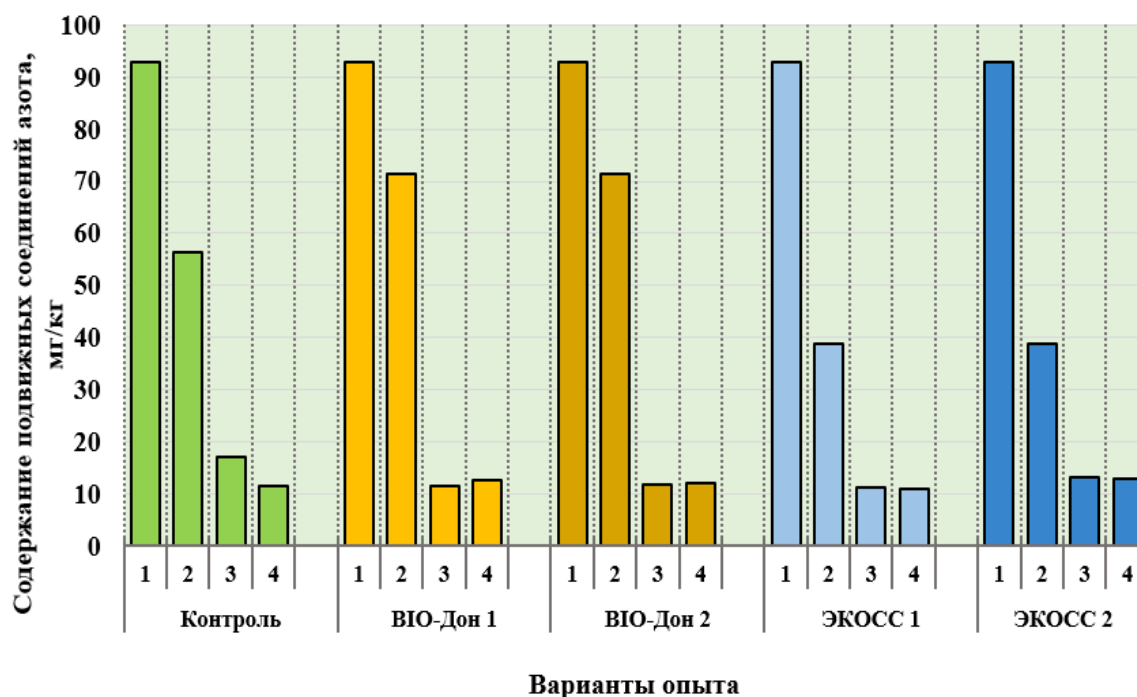


Рис. 2. Динамика суммарного количества подвижных соединений азота по вариантам опыта в течение вегетационного периода 2020–2021 гг. / Fig. 2. Dynamics of the total amount of mobile nitrogen compounds according to the variants of the experiment during the growing season 2020–2021

При рассмотрении активности уреазы (рис. 3) в варианте с однократной обработкой «БИО-Доном» не наблюдается роста ее активности по сравнению с контролем, однако «БИО-Дон» препятствует снижению активности этого фермента в дальнейшем. Повторная обработка растений «БИО-Доном» способствовала некоторому росту активности уреазы. В то же время обработка препаратом «ЭКОСС» сопровождается увеличением активности уреазы в фазу кущения и заметным снижением в дальнейшем. Это связано со своевременным выносом азота растениями пшеницы, что следует из диаграмм динамики на рис. 2 и 3, где рост активности уреазы сопровождается активным поглощением азота растениями.

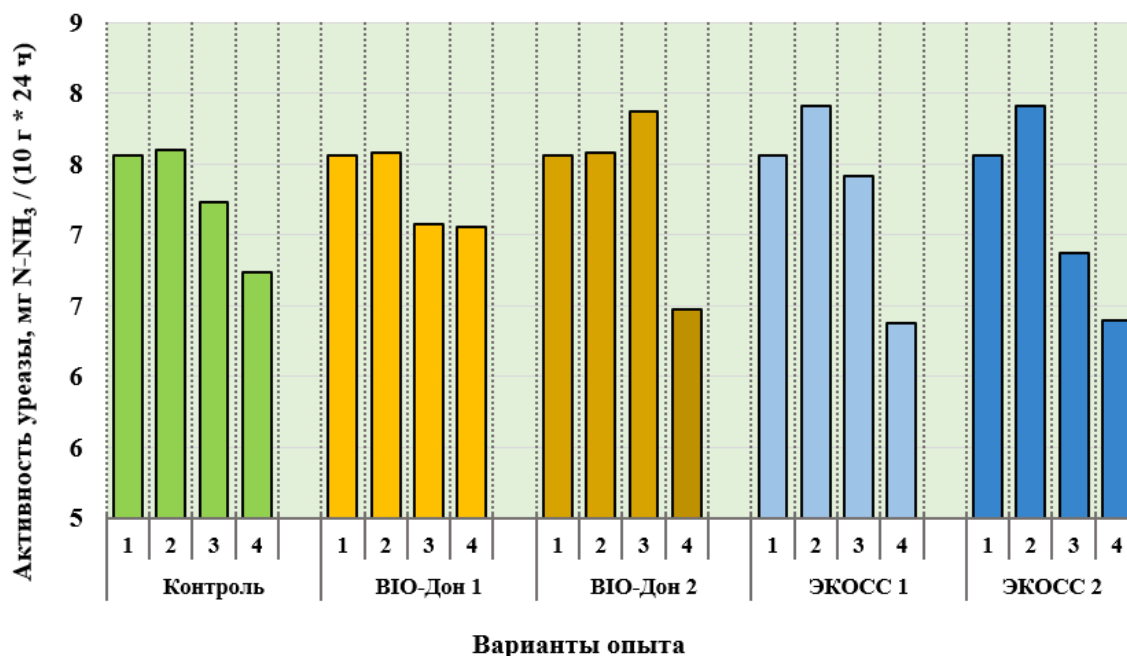


Рис. 3. Динамика активности уреазы по вариантам опыта в течение вегетационного периода 2020–2021 гг.
/ Fig. 3. Dynamics of urease activity by variants of the experiment during the growing season 2020–2021

Оценка биологической урожайности озимой пшеницы показала, что урожайность контрольного варианта составила 33,8 ц/га. Все варианты с использованием гуминовых препаратов (табл. 3) демонстрируют прибавку по сравнению с контролем от 4,79 до 8,92 ц/га, что в относительном выражении составляет 14–26 %, причем прибавки в вариантах с препаратом «ЭКОСС» являются максимальными и статистически значимыми.

При оценке качества зерна (табл. 4) существенной разницы по вариантам опыта нет, однако на уровне тенденции заметно более высокое качество зерна в варианте с двукратной обработкой гуминовым препаратом «ЭКОСС»: массовая доля белка и масса 1000 зерен на этом варианте максимальная.

Таблица 3 / Table 3

Таблица 4 / Table 4

Урожайность озимой пшеницы по вариантам опыта / Winter wheat yield by options of experience

Урожайность, ц/га				
Контроль	«БИО-Дон»-1	«БИО-Дон»-2	«ЭКОСС»-1	«ЭКОСС»-2
33,88	38,67	40,77	41,68	42,80
Увеличение урожайности				
Абс., ц/га	4,79	6,89	7,80	8,92
Отн., %	14,14	20,34	23,01	26,03

Качество зерна озимой пшеницы / Quality of winter wheat grain

Вариант	Массовая доля белка, %	Масса 1000 зерен, г	Клейковина, %	ИДК, ед.
Контроль	12,79	36,99	31,09	97
«БИО-Дон»-1	12,05	37,94	30,96	96
«БИО-Дон»-2	12,54	37,65	30,44	93
«ЭКОСС»-1	12,45	35,97	31,04	95
«ЭКОСС»-2	13,20	38,53	30,53	92

Примечание. НСР₀₅=6,91.

Заключение

По результатам проведенного полевого эксперимента можно сделать предварительный вывод об эффективности применения биологически активного препарата «ЭКОСС» на посевах озимой пшеницы при одно- и двукратном фолиарном использовании, что подтверждается исследованиями динамики ферментативной активности почвы и элементов питания, а также количественной прибавкой к урожайности 23–26 %.

Список источников

1. Bezuglova O.S., Gorovtsov A.V., Polienko E.A., Zinchenko V.E., Grinko A.V., Lykhman V.A., Dubinina M.N., Demidov A. Effect of humic preparation on winter wheat productivity and rhizosphere microbial community under herbicide-induced stress // *J. Soils Sediments*. 2019. Vol. 19, iss. 6. P. 2665–2675. <https://doi.org/10.1007/s11368-018-02240-z>.
2. Навольнева Е.В., Ступаков А.Г., Куликова М.А., Дмитриенко С.А. Система удобрения как фактор сохранения гумуса в почве // *Вестн. Курской гос. с/х академии*. 2015. № 5. С. 55–57.
3. Максимов И.В. Иммунитет растений и способы его повышения // *Вестн. Акад. наук Республики Башкортостан*. 2010. Т. 15, № 3. С. 60–68.
4. Куликова А.Х., Антонова С.А., Козлов А.В. Ферментативная активность почвы в зависимости от системы удобрения // *Вестн. Ульяновской гос. с/х академии*. 2017. № 4. С. 36–43. Doi 10.18286/1816-45-2017-4-36
5. Горянин О.И. Ферментативная активность чернозёмов при разных технологических системах обработки почвы и посева в степном Заволжье // *Изв. Оренбургского гос. аграрного ун-та*. 2017. № 4 (66). С. 196–199.
6. Гринько А.В., Радевич Е.В., Востровой В.Г., Пасько Т.И. Приемы использования новых биопрепаратов «Планриз», «Геостим», «Алирин» и «ВЮ-Дон» на озимой пшенице, горохе, нуте и кукурузе. *Рассвет: ДЗНИИСХ*, 2014. 18 с.
7. Bezuglova O.S., Polienko E.A., Gorovtsov A.V., Lykhman V.A., Dubinina M.N. Приемы комплексного использования средств химизации и гуминового препарата «ВЮ-Дон» при возделывании озимой пшеницы. *Рассвет: ДЗНИИСХ*, 2017. 36 с.
8. Лыхман В.А., Bezuglova O.S., Polienko E.A., Dubinina M.N., Наими О.И. Влияние совместного применения пестицидов и гуминовых препаратов на плодородие и структурные свойства чернозёмных почв // *Вестн. Воронежского гос. аграр. ун-та*. 2020. Т. 13, № 3 (66). С. 97–107.
9. Наими О.И., Bezuglova O.S., Lykhman V.A., Dubinina M.N., Polienko E.A. Воздействие пестицидов и гуминового препарата на ферментативную активность чернозёма // *Земледелие*. 2021. № 5. С. 26–31.
10. Dubinina M.N., Lykhman V.A., Bezuglova O.S., Naimi O.I., Polienko E.A. Dynamics of the structural state and enzymatic activity of calcic chernozem under the influence of biologically active drugs // *State and Prospects for the Development of Agribusiness - INTERAGROMASH 2021 : E3S Web of Conferences. XIV Intern. Scientific and Practical Conf. Rostov-on-Don*, 2021. Vol. 273, 05004. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202127305004>
11. Gorovtsov A.V., Bezuglova O.S., Polienko E.A., Naimi O.I., Lyhman V.A., Dubinina M.N. Humic substances and their influence on soil biological activity for sustainable agriculture // *Sustainable Soil Fertility Management / Eds. H.S. Jatav, S.K. Singh, V.D. Rajput, T.M. Minkina. Hauppauge; New York: Nova Science Publishers, Inc.*, 2021. P. 33–71.
12. Матюгин В.А. Оптимизация свойств жидких гуминовых удобрений на примере биоудобрения «ЭКОСС» // *Генетическая и агрономическая оценка почв : сб. тр. Междунар. молодежной науч. конф. «V Вильямсовские чтения»*. М., 2020. С. 15–18.
13. Хут А.Р. Эффективность применения биогумата «ЭКОСС» на посевах озимой пшеницы, выращенной на выщелоченном чернозёме в сельскохозяйственном производстве в условиях Краснодарского края // *Политематический сетевой электронный науч. журн. Кубанского гос. аграрного ун-та*. 2021. № 168. С. 334–342.
14. Зинченко В.Е., Грабовец А.И., Фоменко М.А., Крохмаль А.В., Кадушкина В.П., Коробова Н.А. Сорты полевых культур: каталог. Ростов н/Д.: АРТАртель, 2017. 156 с.
15. Bezuglova O.S., Хырхырова М.М. Почвы Ростовской области: учеб. пособие. Ростов н/Д.: Изд-во ЮФУ, 2008. 352 с.
16. Доспехов Б.А. Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследований). М.: Агропромиздат, 1985. 351 с.

References

1. Bezuglova O.S., Gorovtsov A.V., Polienko E.A., Zinchenko V.E., Grinko A.V., Lykhman V.A., Dubinina M.N., Demidov A. Effect of humic preparation on winter wheat productivity and rhizosphere microbial community under herbicide-induced stress. *J. Soils Sediments*. 2019;19(6):2665-2675, <https://doi.org/10.1007/s11368-018-02240-z>.

2. Navolneva E.V., Stupakov A.G., Kulikova M.A., Dmitrienko S.A. Fertilization system as a factor in the preservation of humus in the soil. *Vestn. Kurskoi gos. s/kh akademii = Bulletin of the Kursk State Agricultural Academy*. 2015;(5):55-57. (In Russ.).
3. Maksimov I.V. Plant immunity and ways to improve it. *Vestn. Akademii nauk Respubliki Bashkortostan = Herald of the Academy of Sciences of the Republic of Bashkortostan*. 2010;15(3):60-68. (In Russ.).
4. Kulikova A.Kh., Antonova S.A., Kozlov A.V. Soil enzymatic activity depending on the fertilization system. *Vestn. Ul'yanovskoi gos. s/kh akademii = Vestnik of Ulyanovsk State Agricultural Academy*. 2017;(4):36-43, doi: 10.18286/1816-45-2017-4-36. (In Russ.).
5. Goryanin O.I. Enzymatic activity of chernozems in different technological systems of soil cultivation and sowing in the steppe Trans-Volga region. *Izv. Orenburgskogo gos. agrarnogo un-ta = Izvestia of the Orenburg State Agrarian University*. 2017;(4):196-199. (In Russ.).
6. Grinko A.V., Radevich E.V., Vostrova V.G., Pasko T. *Techniques for using new biological products "Planriz", "Geostim", "Alirin" and "BIO-Don" on winter wheat, peas, chickpeas and corn*. Rassvet: DZNIISH Press; 2014. 18 p. (In Russ.).
7. Bezuglova O.S., Polienko E.A., Gorovtsov A.V., Lykhman V.A., Dubinina M.N. *Methods for the integrated use of chemicals and humic preparation "BIO-Don" in the cultivation of winter wheat*. Rassvet: DZNIISH Press; 2017. 36 p. (In Russ.).
8. Lykhman V.A., Bezuglova O.S., Polienko E.A., Dubinina M.N., Naimi O.I. The influence of the combined use of pesticides and humic preparations on the fertility and structural properties of chernozem soils. *Vestn. Voronezhskogo gos. agrar. un-ta = Vestnik of Voronezh State Agrarian University*. 2020;13(3):97-107. (In Russ.).
9. Naimi O.I., Bezuglova O.S., Lykhman V.A., Dubinina M.N., Polienko E.A. The impact of pesticides and a humic preparation on the enzymatic activity of chernozem. *Zemledelie = Agriculture*. 2021;(5):26-31. (In Russ.).
10. Dubinina M.N., Lykhman V.A., Bezuglova O.S., Naimi O.I., Polienko E.A. Dynamics of the structural state and enzymatic activity of calcic chernozem under the influence of biologically active drugs. *State and Prospects for the Development of Agribusiness - INTERAGROMASH 2021. E3S Web of Conferences. XIV International Scientific and Practical Conference*. Rostov-on-Don, 2021;273:05004. (In Russ.).
11. Gorovtsov A.V., Bezuglova O.S., Polienko E.A., Naimi O.I., Lyhman V.A., Dubinina M.N. Humic substances and their influence on soil biological activity for sustainable agriculture. *Sustainable Soil Fertility Management*. H. S. Jatav, S. K. Singh, V. D. Rajput, T.M. Minkina, eds. Hauppauge, New York: Nova Science Publ.; 2021:33-71.
12. Matyugin V.A. Optimization of the properties of liquid humic fertilizers by the example of "EKOSS" biofertilizer. *Genetic and Agronomic Assessment of Soils. Proceedings of the International Youth Scientific Conference. V Williams Readings*. Moscow, 2020:15-18. (In Russ.).
13. Hut A.R. The effectiveness of the use of biohumate "EKOSS" on crops of winter wheat grown on leached chernozem in agricultural production in the Krasnodar Territory. *Politematicheskii setevoi elektronnyi nauch. zhurn. Kubanskogo gos. agrarnogo un-ta = Polythematic Online Scientific Journal of Kuban State Agrarian University*. 2021;(168):334-342. (In Russ.).
14. Zinchenko V.Ye., Grabovets A.I., Fomenko M.A., Krokhmal A.V., Kadushkina V.P., Korobova N.A. *Varieties of field crops*. Catalog. Rostov-on-Don: ARTArtel Publ.; 2017. 156 p. (In Russ.).
15. Bezuglova O.S., Khirkhirova M.M. *Soils of the Rostov region*. Textbook. Rostov-on-Don: SFedU Press; 2008. 352 p. (In Russ.).
16. Dospekhov B.A. *Field experiment technique (with the basics of statistical processing of research results)*. Moscow: Agropromizdat Publ.; 1985. 351 p. (In Russ.).

Информация об авторах

Матюгин В.А. – младший научный сотрудник.

Попов А.Е. – младший научный сотрудник

Безуглова О.С. – доктор биологических наук, профессор, главный научный сотрудник.

Information about the authors

Matyugin V.A. - Junior Researcher.

Popov A.E. - Junior Researcher.

Bezuglova O.S. - Doctor of Science (Biology), Professor, Main Researcher.

Статья поступила в редакцию 16.08.2021; одобрена после рецензирования 30.08.2021; принята к публикации 26.11.2021.

The article was submitted 16.08.2021; approved after reviewing 30.08.2021; accepted for publication 26.11.2021.

Научная статья

УДК 551.582

doi: 10.18522/1026-2237-2021-4-61-68

АНАЛИЗ ИЗМЕНЧИВОСТИ ОСАДКОВ В ПРОВИНЦИИ ОЛЬГИН (КУБА) ЗА ПЕРИОД 1970–2020 годы

Олеся Владимировна Назаренко^{1✉}, Ямарис Сваби Куао²

¹Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, Россия

² Университет Ольгин, Ольгин, Куба

¹ovnazarenko@sfedu.ru✉

²yamaris@uho.edu.cu

Аннотация. Изучение изменений метеорологических показателей является важной задачей, которой уделяется большое внимание в настоящее время. Проанализированы изменения увлажнения на востоке острова Куба, в г. Ольгин, за период с 1970 по 2020 г. Исследование основано на статистическом анализе климатических данных для установления тенденций изменения особенностей увлажнения территории. Определялись тренды изменения осадков, рассчитаны коэффициенты вариации и изменчивости, выявлялось наличие изменений в количестве дней с осадками. Изучено изменение увлажнения и выявлено, что оно в провинции умеренное и неравномерное. Рассчитаны коэффициент и баланс увлажнения по многолетним данным. Проведен анализ изменения количества осадков и дней с осадками. Рассчитан коэффициент увлажнения для территории. Выявлены наиболее влажный (1981–1985) и сухой (1991–1995) периоды. Показано, что количество дней с осадками увеличивается с 39 (1970 г.) до 150 (2007 г.). Выявлен их планомерный рост. Максимальное значение дней с осадками приходится на 2006–2010 гг. В период 2016–2020 гг. отмечается изменение в структуре осадков и смещение максимальных суточных осадков на начало года.

Ключевые слова: изменение климата, осадки, увлажнение, Куба, Ольгин

Для цитирования: Назаренко О.В., Куао Я.С. Анализ изменчивости осадков в провинции Ольгин (Куба) за период 1970–2020 // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. 2021. № 4. С. 61–68.

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

Original article

ANALYSIS OF MOISTURE VARIABILITY IN THE PROVINCE OF HOLGUIN (CUBA) FROM 1970 TO 2020

Olesya V. Nazarenko^{1✉}, Yamaris S. Quao²

¹Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia

²University of Holguin, Holguin, Cuba

¹ovnazarenko@sfedu.ru✉

²yamaris@uho.edu.cu

Abstract. The study of trends in meteorological indicators is an important task that has received much attention at present. The study analyses changes in humidification in the eastern part of the island of Cuba (Holguin) for the period from 1970 to 2020. The study is based on a statistical analysis of climatic data to establish trends in moisture features in the area. Trends in precipitation were determined, coefficients of variation and variability were calculated, and changes in the number of days with precipitation were identified. Moisture changes were studied and it was revealed that moistening in the province is moderate and not uniform. The coefficient and balance of humidification were calculated according to long-term data. Analysis of data of change of the quantity of precipitation and

© Назаренко О.В., Куао Я.С., 2021

days with precipitation is carried out. The moisture coefficient for the territory was calculated. The wettest (1981-1985) and the driest (1991-1995) periods have been revealed. The number of days with precipitation increased from 39 days (1970) to 150 days (2007). A systematic increase in the number of days with precipitation was detected. The maximum number of days with precipitation is in the period 2006-2010. In 2016-2020, there is a change in the structure of precipitation and a shift of maximum daily precipitation to the beginning of the year.

Keywords: climate change, precipitation, humidification, Holguin, Cuba

For citation: Nazarenko O.V., Quao Y.S. Analysis of precipitation variability in the Province of Holguin (Cuba) from 1970 to 2020. Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science. 2021;(4):61-68 (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

Температура воздуха и увлажнение территории являются важными показателями глобальных изменений климата. Такие трансформации происходят на разных территориях. Значительные величины отмечаются в высоких широтах [1–16], однако в ряде работ [17–22] показано, что глобальное потепление затронуло и тропические области, где температура поднялась на 0,2–1 °С, и прогнозируется её рост на 2 °С в дальнейшем [17, 22]. Данная работа посвящена анализу изменений увлажнения на территории г. Ольгин (Куба). Цель исследования – изучение изменения увлажнения на востоке Кубы, оценка тренда изменения осадков и коэффициента увлажнения.

Первые исследования климата Кубы включали в себя анализ температуры воздуха и давления. Наблюдения за метеорологическими показателями начали проводиться в г. Гаване с 1800 г. Были опубликованы работы о траекториях ураганов в Карибском море, климате Кубы, но основные исследования приурочены ко второй половине XX в. Были составлены карты температуры воздуха, распределения осадков, изучался климат отдельных районов [23–26].

Материалы и методы

Остров Куба относится к тропическим островам Вест-Индии, группе Больших Антильских островов. Относительно небольшая территория острова отличается существенным разнообразием. Это Антильско-Карибская область складчатого пояса Кордильер, для которой характерно распространение молодых известняков. Равнинный рельеф с небольшими возвышенностями преобладает на данной территории, широко развиты карстовые процессы [18]. Растительный покров отличается высоким эндемизмом, богатством и разнообразием. На территории преобладают типичные саванны [25].

Куба расположена южнее северного тропика и получает значительное количество солнечного тепла, что приводит к несущественным колебаниям температур. Это пассатная атлантическая зона. Остров расположен в западной периферии динамических антициклонов. Наибольшие изменения в течение года происходят с осадками. Год делится на два сезона: сухой и дождливый. Сезон дождей длится с мая по октябрь, сухой – с ноября по апрель [25, 26].

В работе рассматриваются условия увлажнения в г. Ольгин, который расположен на востоке острова Куба, на 147 м над уровнем моря. Климат тропический, влажно-засушливый, осадков в летний период больше, чем в зимний.

В условиях трансформации климата наиболее важно оценить тенденцию изменения количества и режима выпадения осадков на востоке острова. Средние месячные осадки в г. Ольгин изучены за период с 1963 по 2019 г. Рассмотрены следующие данные: относительная влажность, осадки среднемесячные, годовые, максимальные суточные, количество дней с осадками. Методика исследований включала в себя статистический анализ режима осадков по данным метеостанции.

Для оценки степени увлажнения территории был рассчитан коэффициент увлажнения (K_u), который представляет собой отношение количества выпадающих атмосферных осадков за определенный период к величине испаряемости. Коэффициент увлажнения рассчитывается по формуле: $K_u = \Sigma P / E$, где ΣP – сумма осадков за период, мм; E – испаряемость, мм/мес. Испаряемость рассчитывается по формуле Н.Н. Иванова [27]: $E = 0,0018(25+t)^2(100-f)$, где t – средняя месячная температура воздуха, °С; f – относительная влажность воздуха, %.

Результаты исследований

Температура воздуха в течение года варьирует слабо – от 23,3 (январь) до 28,0 °С (август) (табл. 1). Средняя температура составляет 25,6 °С. Среднее количество осадков – 1008 мм. Самый сухой месяц – февраль (29 мм), максимальное количество осадков выпадает в октябре (149 мм). Относительная влажность изменяется незначительно в течение года – от 67 (март) до 82 % (октябрь).

Увлажнение в провинции Ольгин умеренное ($K_u=0,61$), однако в течение года неравномерное: скудное 3 месяца, январь – март (0,13–0,29); недостаточное 4 месяца, апрель, июль, август, декабрь (0,3–0,59); умеренное 3 месяца, май, июнь, ноябрь (0,6–0,99), и достаточное 2 месяца, сентябрь, октябрь (1,0–1,49). Выделяется сухой (февраль, март) и влажный (сентябрь, октябрь) сезоны.

Таблица 1 / Table 1

Метеорологические показатели / Meteorological indicators

Месяц	T, °C	O, мм	ОВ, %	И, мм	K _у	БУ
Январь	23,3	34	74	129	0,26	–95
Февраль	23,8	29	70	155	0,19	–126
Март	24,3	43	67	176	0,24	–133
Апрель	25,3	66	69	171	0,39	–105
Май	26,0	139	74	145	0,96	+6
Июнь	27,1	119	78	127	0,94	–8
Июль	27,8	69	74	155	0,44	–86
Август	28,0	92	74	156	0,59	–64
Сентябрь	27,2	145	79	122	1,19	+23
Октябрь	26,0	149	82	98	1,5	+51
Ноябрь	24,5	78	78	112	0,7	–34
Декабрь	23,9	45	77	115	0,39	–70

Примечание. Т – температура; О – осадки; ОВ – относительная влажность; И – испаряемость; K_у – коэффициент увлажнения; БУ – баланс увлажнения.

Баланс увлажнения рассчитывается по разнице поступивших осадков и испаряемости и показывает неоднородность условий увлажнения территории, когда максимальный дефицит влаги приходится на февраль – апрель (рис. 1). В этот период выпадает мало осадков при высоких значениях испаряемости. Минимальный дефицит баланса увлажнения приходится на июнь. В течение трех месяцев баланс увлажнения города положительный (май, сентябрь, октябрь). Годовой баланс увлажнения составил 653 мм, т.е. территория испытывает недостаток увлажнения.

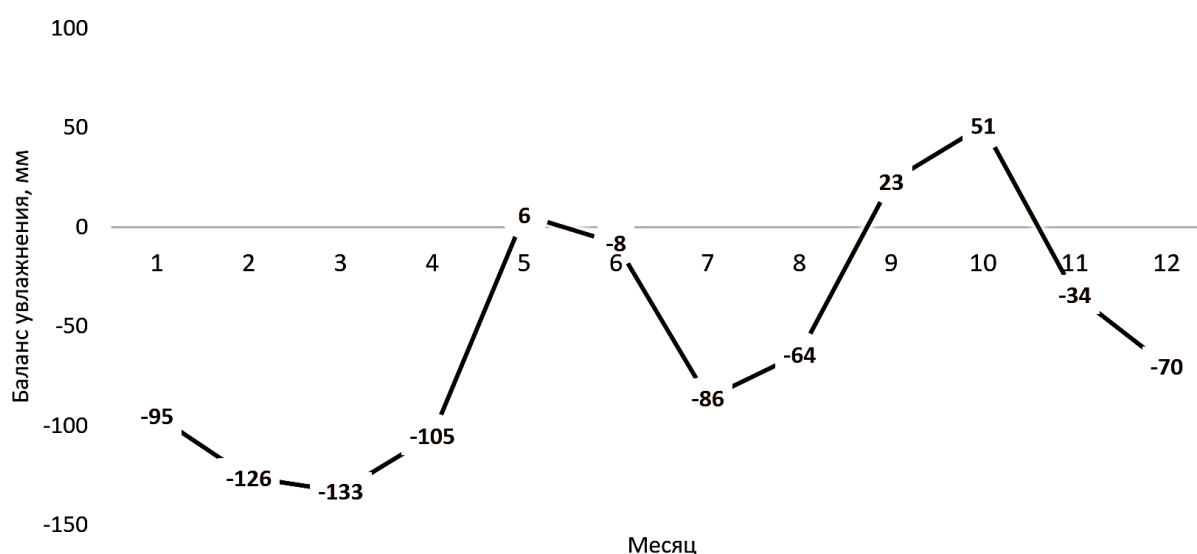


Рис. 1. Баланс увлажнения по многолетним данным / Fig. 1. The moisture balance according to long-term data

Анализ многолетних данных показывает, что отмечается незначительное повышение температуры, но в целом она характеризуется низкой изменчивостью.

Куба относится к району Карибского бассейна, который получает меньшее количество осадков. Анализ количества выпавших осадков за период с 1900 по 2015 г. демонстрирует их незначительное снижение, однако тренд статистически незначимый [19]. В работах [18, 21] отмечается, что для всего бассейна Карибского моря выделяются периоды засухи, которые частично совпадают с таковыми в провинции Ольгин. Например, такие периоды были в 1974–1977, 1997–1998, 2009–2010, 2013–2016 гг.

В данной работе проанализировано изменение количества осадков по данным метеостанции г. Ольгин за период с 1963 по 2019 г. Рассмотрены суточные и средние месячные данные наблюдений. Количество атмосферных осадков за разные периоды (месяц, сезон, год) определялось как сумма суточного количества за необходимые временные периоды. Выявлено, что годы с осадками выше и ниже нормы распределены поровну (~24) и 2 года соответствуют норме (1988, 2014 гг.) (рис. 2).

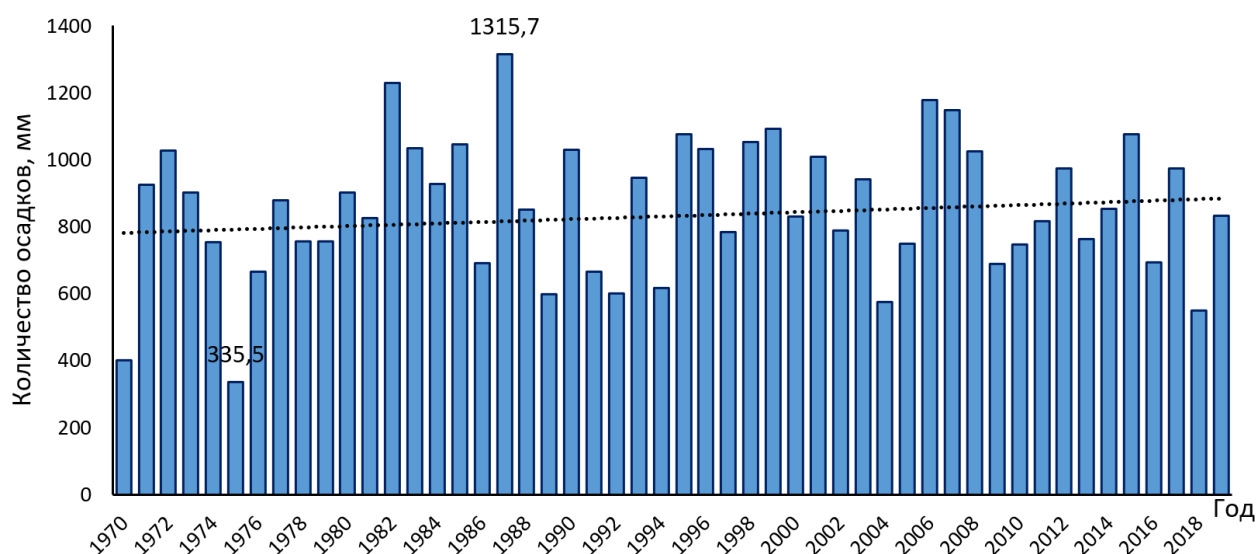


Рис. 2. Динамика изменения осадков за период с 1970 по 2018 г.

/ Fig. 2. Dynamics of average annual precipitation, 1970-2018

Наиболее влажный период был выделен в 1981–1985 гг., когда среднее количество выпавших осадков составило 1012,7 мм, наименьшее приходилось на начало периода 1991–1995 гг. (781 мм). Период после 2000-х гг. характеризуется меньшим количеством осадков, чем в среднем (рис. 3).

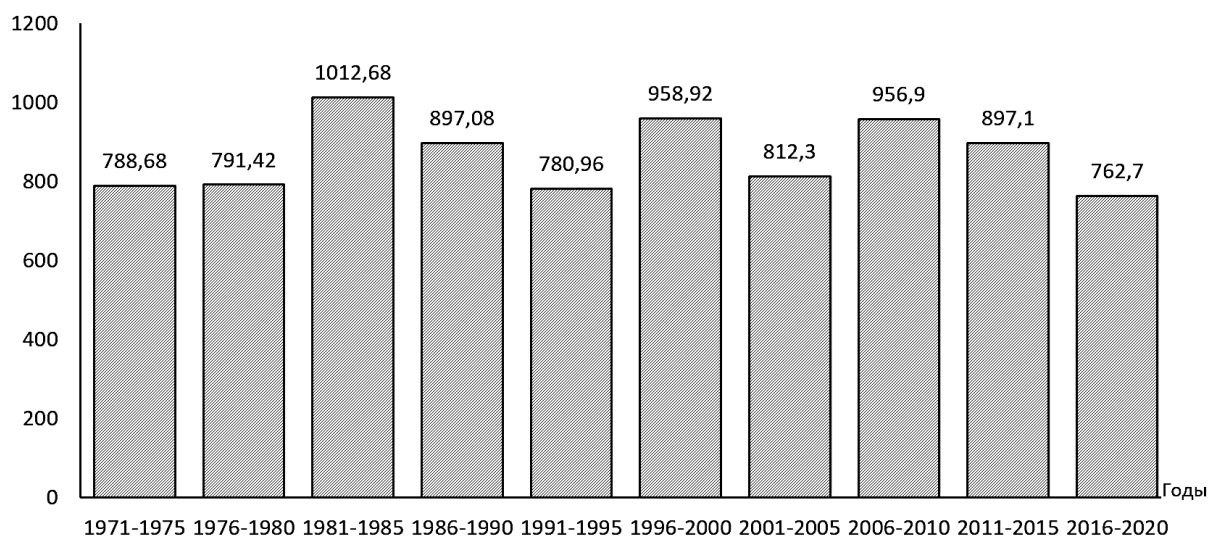


Рис. 3. Динамика изменения осадков за период с 1971 по 2020 г. / Fig. 3. Dynamics of average precipitation, 1971-2020

Статистический анализ многолетних изменений количества осадков показал, что наибольшее значение стандартного отклонения (δ , мм) отмечается в последнее десятилетие (287 мм). Наименьший коэффициент вариации W (10 %) характерен для периода 1971–2020 гг., наибольший (97 %) – для 2018 г. (табл. 2). Сравнительный анализ годовой изменчивости в 2007 и 2018 гг. показал, что изменчивость повысилась с 65 до 97 %.

Экстремальными годами по количеству осадков за последние 20 лет являются 2007-й (1147 мм) и 2018-й (550 мм) (рис. 4).

Таблица 2 / Table 2

**Статистический анализ изменения осадков
/ Statistical analysis of precipitation changes**

Период	М, мм	W, %	δ , мм
1971–2020	866	10	83
2010–2019	742	39	287
2007	96	65	62
2018	46	97	45

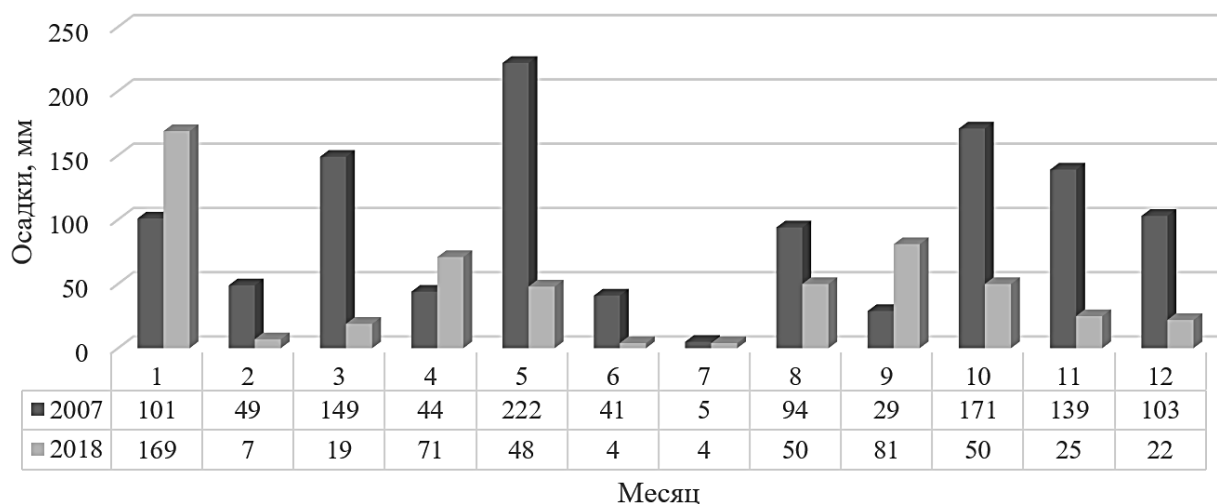


Рис. 4. Количество осадков в экстремальные годы (2007, 2018 гг.)
/ Fig. 4. The precipitation in extreme years (2007, 2018)

Количество дней с осадками (рис. 5) постепенно нарастало от минимального (39) в 1970 г. до максимального (150) в 2007 г. С 1977 г. количество дней с осадками превысило 100 дней в год и за рассматриваемый период не опускалось ниже. Минимальное количество дождливых дней было в 1998 г. (108 дней) и в 2019 г. (111 дней).

Максимальное суточное количество осадков выпадает в мае, октябре (9 случаев), ноябре (7), феврале (6), декабре (5), минимальное повторение – март, июнь, июль. В холодный период повторяемость максимальных осадков составляет 59, в теплый – 41 %.

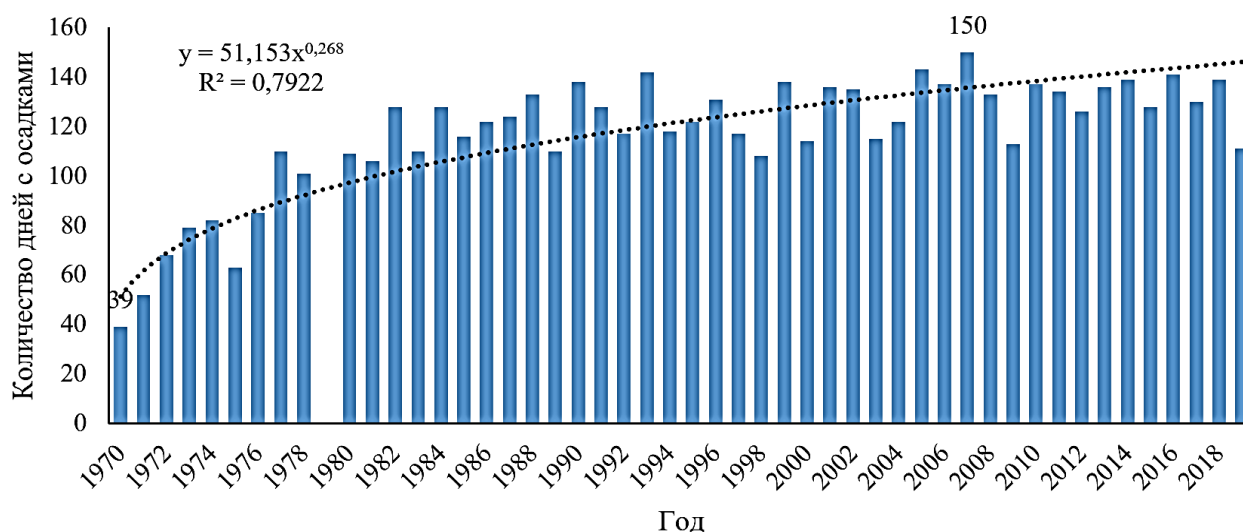


Рис. 5. Количество дней с осадками за 1970–2018 гг. / Fig. 5. Changing the number of days with precipitation (1970-2018)

Осреднённое количество осадков по пятилеткам также показывает планомерный рост (рис. 6). Максимальное количество дней с осадками приходится на период 2006–2010 гг.

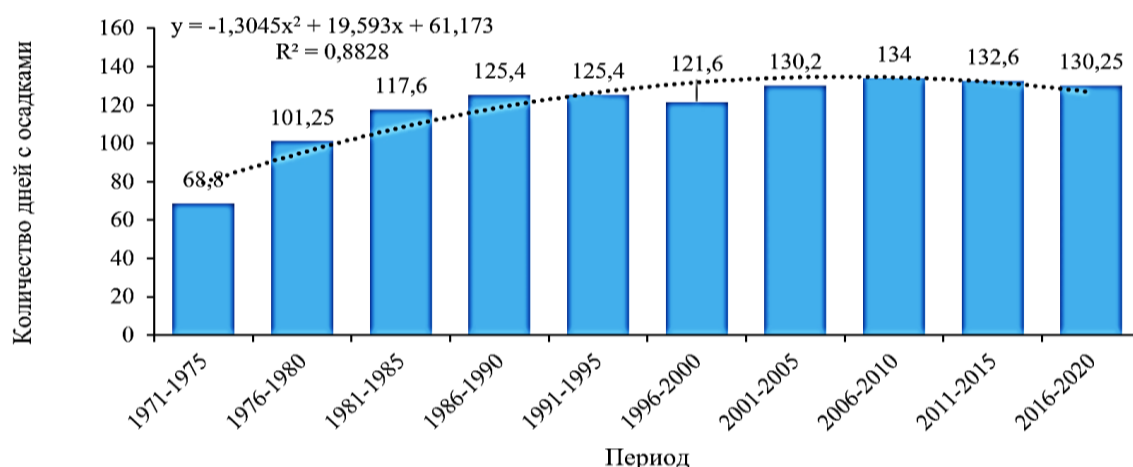


Рис. 6. Количество дней с осадками по периодам / Fig. 6. The number of days with precipitation by period

Следует отметить, что в период 2016–2020 гг. отмечается изменение в структуре осадков и смещение максимальных суточных осадков на начало года, что проявляется и в значительном снижении среднегодовых осадков.

Заключение

Анализ выпадения осадков по метеостанции Ольгин за период с 1970 по 2019 г. показал достаточно высокую степень их изменения, однако не прослеживается однозначной тенденции. Выделяется пик осадков, после чего следует 5–10-летний спад, следом за которым опять выделяется увеличение количества осадков. Во второй половине XX в. наблюдается тенденция к увеличению количества суточных осадков, что особенно хорошо видно при рассмотрении пятилетних периодов. Похожие тенденции проявляются не только в странах Карибского бассейна, но и в степных районах Юга России.

Климатические изменения происходят повсеместно, необходимо отслеживать их и оценивать влияние на экосистему. На основании фондовых данных и собственного анализа изменения осадков по метеостанции г. Ольгин за период с 1970 по 2019 г. показана достаточно высокая степень изменения количества дней с осадками. Несмотря на незначительные трансформации в режиме выпадения осадков, уже на настоящий момент произошли изменения в количестве и качестве опасных метеорологических явлений на территории острова, в частности увеличились интенсивность и количество дней с туманами, ливнями и штормами.

Список источников

1. Винников К.Я., Лемешко Н.А., Сперанская Н.А. Влагосодержание почвы и сток внетропической части Северного полушария при глобальном потеплении // Метеорология и гидрология. 1990. № 3. С. 5–10.
2. Дмитриева В.А., Маскайкина С.В. Изменчивость водного режима в верховье Донского бассейна в современный климатический период // Вестн. ВГУ. География. Геоэкология. 2013. № 1. С. 17–21.
3. Золотокрылин А. Н., Черенкова Е. А. Динамика зон увлажнения суббореальных ландшафтов России в XX–XXI вв. // Изв. РАН. Серия геогр. 2011. № 4. С. 33–41.
4. Оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. М., 2008. Т. 2. 288 с. URL: <http://climate2008.igce.ru/v2008/htm/2.htm> (дата обращения: 15.03.2021).
5. Лурье П.М. Особенности гидрометеорологического режима внутригорных котловин западной и центральной частей Большого Кавказа // Устойчивое развитие горных территорий. 2016. Т. 8, № 2. С. 150–160.
6. Лурье П.М., Панов В.Д. Влияние изменений климата на гидрологический режим р. Дон в начале XXI столетия // Метеорология и гидрология. 1999. № 4. С. 90–97.
7. Обзор состояния и тенденций изменения климата России. М., 2008–2019. URL: <http://climatechange.igce.ru/> (дата обращения: 19.04.2021).
8. Панов В.Д., Лурье П.М., Ларионов Ю.А. Климат Ростовской области: вчера, сегодня, завтра. Ростов н/Д.: Донской изд. дом, 2006. 487 с.

9. Сухова М.Г., Журавлева О.В. Динамика изменения температуры воздуха и осадков в Чуйской котловине // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2017. № 1. С. 124–129.
10. Черенкова Е.А. Анализ особенностей обширных атмосферных засух на юге Европейской России // Аридные экосистемы. 2012. Т. 18, № 4 (53). С. 13–21.
11. Назаренко О.В. К вопросу о влиянии климатических факторов на грунтовые воды Доно-Донецкого бассейна во второй половине XX столетия // Водные ресурсы. 2006. Т. 33, № 4. С. 504–510.
12. Назаренко О.В. Оценка региональных изменений метеорологических показателей и их влияния на уровень грунтовых вод (на примере г. Ростова-на-Дону) // Современные проблемы науки и образования. 2013. № 5. С. 549.
13. Назаренко О.В. Изменение некоторых метеорологических показателей в условиях засушливой степи // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2019. № 4 (204). С. 84–90.
14. Назаренко О.В. Динамика изменения температуры воздуха и осадков в бассейне реки Средний Егорлык // Глобальные климатические изменения: региональные эффекты, модели, прогнозы. Воронеж: Цифровая полиграфия, 2019. Т. 1. С. 235–239.
15. Nazarenko O.V. Temporal and spatial variability in air temperature and precipitation in the basin of Azov sea over the period 1966–2015 // 20th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2020. P. 483–491. Doi: 10.5593/sgem2020/4.1/s19.060.
16. Новикова Н.М., Волкова Н.А., Уланова С.С., Шаповалова И.Б., Вышивкин А.А. Ответные реакции экосистем на изменение водного режима территорий в степной зоне // Аридные экосистемы. 2011. Т. 17, № 3 (48). С. 38–48.
17. IPCC, 2007. Solomon S., Qin D., Manning M., Chen Z., Marquis M., Averyt K.B., Miller H.L. Climate change 2007: the physical science basis. Contribution of Working Group I to the fourth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. URL: <https://www.ipcc.ch/report/ar4/wg1/> (дата обращения: 20.04.2021).
18. Enfield D.B., Mestas-Nunez A.M., Trimble P.J. The Atlantic multidecadal oscillation and its relation to rainfall and river flows in the continental U.S. // Geophysical Research Letters. 2001. Vol. 28. P. 2077–2080.
19. Jones P.D., Harpham C., Harris I., Goodess C.M., Burton A., Centella-Artola A., Taylor M.A., Bezanilla-Morlot A., Martinez-Castro D., Campbell J.D., Stephenson T.S., Joslyn O., Nicholls K., Baur T. Long-term trends in precipitation and temperature across the Caribbean // Int. J. of Climatol. 2015. Doi: 10.1002/JOC.4557.
20. Planos E., Rivero R.E., Guevara V. Impacto del cambio climático y medidas de adaptación en Cuba. Habana, Cuba: Agencia de Medio Ambiente, 2013. 429 p.
21. Taylor M.A., Enfield D.B., Chen, A.A. Influence of the Tropical Atlantic versus the Tropical Pacific on Caribbean rainfall // J. of Geophysical Research: Oceans. 2002. Vol. 107. P. 3127.
22. Taylor M., Stephenson T., Clarke L., Charlton C., Stephenson K., Brown P., Rankine D., Campbell J., Stennett-Brown R., Whyte F., et al. The State of the Caribbean Climate Report. Kingston, Jamaica: The University of the West Indies, 2020. URL: <https://www.caribank.org/sites/default/files/publication-resources/The%20State%20of%20the%20Caribbean%20Climate%20Report.pdf> (дата обращения: 20.04.2021).
23. Леча Л. Б. Основные особенности климата центральной части Кубы: дис. .. канд. геогр. наук. М., 1984. 154 с.
24. Lecha L.B., Paz L.R., Lapinel B. El clima de Cuba. Habana, Cuba: Editorial Academia, 1994. 82 p.
25. Atlas Nacional de Cuba. Habana; Moscu: ACC-AC DRSS, 1970. 132 p.
26. Davitaya F.F., Trusov I.I. Los recursos climaticos de Cuba. Habana: Academia de Ciencias de Cuba, Instituto de Geografía, and Instituto Nacional de Recursos Hidraulicos, 1965. 68 p.
27. Иванов Н.Н. Атмосферное увлажнение тропических и сопредельных стран земного шара. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1958. 311 с.

References

1. Vinnikov K. Ya., Lemeshko N.A., Speranskaya N.A. Soil moisture content and runoff in the extratropical part of the Northern hemisphere under global warming. *Meteorologiya i gidrologiya Russian = Meteorology and Hydrology*. 1990;(3):5-10. (In Russ.).
2. Dmitrieva V.A., Maskaikina S.V. Variability of the water regime in the Upper Don basin in the modern climatic period. *Vestn. VGU. Geografiya. Geoekologiya = Proceedings of Voronezh State University. Series: Geography. Geoecology*. 2013;(1):17-21. (In Russ.).
3. Zolotokrylin A.N., Cherenkova E.A. Dynamics aridity zones of subboreal landscapes of Russia in 20th-21st centuries. *Izv. RAS. Geografiya = Izvestiya Rossiiskoi Akademii Nauk. Seriya Geograficheskaya*. 2011;(4): 33-41. (In Russ.).
4. *Assessment report on climate change and its consequences on the territory of the Russian Federation*. Vol. 2. Moscow, 2008. 288 p. Available from: <http://climate2008.igce.ru/v2008/htm/2.htm> [Accessed 15th March 2014]. (In Russ.).
5. Lur'e P.M. Peculiarities of the hydrometeorological regime of the intra-mountain hollows in the Western and Central parts of the Greater Caucasus. *Ustoichivoe razvitie gornih territoriy = Sustainable Development of Mountain Territories*. 2016;8(2):150-160. (In Russ.).
6. Lur'e P.M., Panov V.D. The influence of climate change on the hydrological regime of the Don river at the beginning of the 21st century. *Meteorologiya i gidrologiya Russian = Meteorology and Hydrology*. 1999;(4):90-97. (In Russ.).
7. *Overview of the state and trends of climate change in Russia*. Moscow, 2008-2019. Available from: <http://climatechange.igce.ru/> [Accessed 19th April 2014]. (In Russ.).

8. Panov V.D., Lur'e P.M., Larionov Yu.A. *Climate of the Rostov region: yesterday, today, tomorrow*. Rostov-on-Don: Don Publishing House, 2006. 487 p. (In Russ.).
9. Sukhova M.G., Zhuravleva O.V. Dynamics of changes in air temperature and precipitation in the Chui basin. *Izv. vuzov. Sev.-Kavk. region. Estestv. nauki = Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science*. 2017;(1):124-129. (In Russ.).
10. Cherenkova E.A. Analysis of the features of extensive atmospheric droughts in the South of European Russia. *Aridnye ekosistemy = Arid Ecosystems*. 2012;18(4):13-21. (In Russ.).
11. Nazarenko O.V. On the influence of climatic factors on the groundwater of the Don-Donets basin in the second half of the 20th century. *Vodnye resursy = Water Resources*, 2006;33(4):504-510. (In Russ.).
12. Nazarenko O.V. Assessment of regional changes in meteorological indicators and their impact on the groundwater level (on the example of Rostov-on-Don). *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya = Modern Problems of Science and Education*. 2013;(5):549. (In Russ.).
13. Nazarenko O.V. Variability of some meteorological parameters in the arid steppe. *Izv. vuzov. Sev.-Kavk. region. Estestv. nauki = Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science*. 2019;(4):84-90. (In Russ.).
14. Nazarenko O.V. Dynamics of changes in air temperature and precipitation in the Middle Egorlyk river basin. *Global Climate Changes: Regional Effects, Models, Forecasts*. Voronezh: Tsifrovaya poligrafiya Publ.; 2019;1:235-239. (In Russ.).
15. Nazarenko O.V. Temporal and spatial variability in air temperature and precipitation in the basin of Azov sea over the period 1966-2015. *20th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2020*. 2020:483-491, doi: 10.5593/sgem2020/4.1/s19.060.
16. Novikova N.M., Volkova N.A., Shapovalova I.B., Vyshivkin A.A., Ulanova S.S. Ecosystem responses to hydrological regime changes in the steppe zone. *Aridnye ekosistemy = Arid Ecosystems*. 2011;17(3):38-48. (In Russ.).
17. IPCC, 2007. Solomon S., Qin D., Manning M., Chen Z., Marquis M., Averyt K.B., Miller H.L. *Climate Change 2007: the Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the fourth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. 2007. URL: <https://www.ipcc.ch/report/ar4/wg1/> [Accessed 20th April 2021].
18. Enfield D.B., Mestas-Nunez A.M., Trimble P.J. The Atlantic multidecadal oscillation and its relation to rainfall and river flows in the continental U.S. *Geophysical Research Letters*. 2001;28:2077-2080.
19. Jones P.D., Harpham C., Harris I., Goodess C.M., Burton A., Centella-Artola A., Taylor M.A., Bezanilla-Morlot A., Martinez-Castro D., Campbell J.D., Stephenson T.S., Joslyn O., Nicholls K., Baur T. Long-term trends in precipitation and temperature across the Caribbean. *Int. J. of Climatology*. 2015, doi: 10.1002/joc.4557.
20. Planos E., Rivero R. E., Guevara V. *Impacto del Cambio Climático y Medidas de Adaptación en Cuba*. Habana, Cuba: Agencia de Medio Ambiente; 2013. 429 p.
21. Taylor M.A., Enfield D.B., Chen A.A. Influence of the Tropical Atlantic versus the Tropical Pacific on Caribbean rainfall. *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2002;107:3127.
22. Taylor M., Stephenson T., Clarke L., Charlton C., Stephenson K., Brown P., Rankine D., Campbell J., Stennett-Brown R., Whyte F., et al. *The State of the Caribbean Climate Report*. Kingston, Jamaica: The University of the West Indies Press, 2020. Available from: <https://www.caribank.org/sites/default/files/publication-resources/The%20State%20of%20the%20Caribbean%20Climate%20Report.pdf> [Accessed 20th April 2021].
23. Lecha L. B. *Main features of the climate in central Cuba*. Dissertation. Moscow, 1984. 154 p. (In Russ.).
24. Lecha L.B., Paz L.R., Lapinel B. *El clima de Cuba*. Habana, Cuba: Editorial Academia Press, 1994. 82 p.
25. *Atlas Nacional de Cuba*. Habana, Moscu: ACC-AC DRSS Publ., 1970. 132 p.
26. Davitaya F.F., Trusov I.I. *Los recursos climaticos de Cuba*. Habana: Academia de Ciencias de Cuba, Instituto de Geografia, and Instituto Nacional de Recursos Hidraulicos Press, 1965. 68 p.
27. Ivanov N.N. *Atmospheric moisture in the tropics and adjacent countries of the globe*. Moscow, Leningrad: Russian Academy of Sciences Press, 1958. 311 p. (In Russ.).

Информация об авторах

Назаренко О.В. – кандидат географических наук, доцент, кафедра физической географии, экологии и охраны природы, Институт наук о Земле.

Куао Я.С. – доцент, исследователь, Центр изучения аридных экосистем.

Information about the authors

Nazarenko O.V. - Candidate of Science (Geography), Associate Professor, Department of Physical Geography, Ecology and Environment Protection, Institute of Earth Sciences.

Quao Y.S. - Associate Professor, Researcher, Center of the Research of Arid Agroecosystems.

Статья поступила в редакцию 25.07.2021; одобрена после рецензирования 10.08.2021; принята к публикации 26.11.2021.
The article was submitted 25.07.2021; approved after reviewing 10.08.2021; accepted for publication 26.11.2021.

Научная статья

УДК 551.576.001.57

doi: 10.18522/1026-2237-2021-4-69-73

ИССЛЕДОВАНИЕ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ЛЬДООБРАЗУЮЩИХ СРЕДСТВ АКТИВНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ В РЕАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ ПРИМЕНЕНИЯ

Алексей Геннадьевич Шилин

НПО «Тайфун», Обнинск, Россия

a@metal-profi.ru

Аннотация. Статья посвящена исследованию процессов функционирования пиротехнических генераторов льдообразующего аэрозоля в условиях, максимально приближенных к условиям реального воздействия. Изучено влияние внешнего давления на работу пиротехнического генератора в габаритах патрона ПВ-26, снаряженного составом по патенту РФ № 2551343 (содержит 15 % активного реагента), в условиях функционирования до давления 267 мм рт.ст. (соответствует предельной высоте применения генераторов данного типа – 8 км). Эксперименты проводились в термобарокамерах ФГБУ «НПО «Тайфун». В результате определена зависимость скорости горения пиротехнической композиции, изменение содержания активных льдообразующих реагентов, спектральные характеристики образованного аэрозоля от внешнего давления. В качестве предельного случая отмечается значительная вероятность затухания пиротехнической композиции при использовании патронов ПВ-26 при давлении менее 405 мм рт.ст. (соответствует высоте 5 км).

Ключевые слова: льдообразующий аэрозоль, льдообразующие реагенты, активные воздействия, противораковые средства

Для цитирования: Шилин А.Г. Исследование функционирования льдообразующих средств активных воздействий в реальных условиях применения // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. 2021. № 4. С. 69–73.

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

Original article

RESEARCH OF FUNCTIONING OF ICE-FORMING MEANS OF ACTIVE IMPACT IN REAL CONDITIONS OF APPLICATION

Alexey G. Shilin

Research and Production Association "Typhoon", Obninsk, Russia

a@metal-profi.ru

Abstract. The article is devoted to the study of the processes of functioning of pyrotechnic generators of ice-forming aerosol under conditions as close as possible to the conditions of real cloud-seeding operations. The influence of external pressure on the functioning of a pyrotechnic generator in the dimensions of a PV-26 ejectable flare equipped with a composition according to RU patent No. 2551343 (containing 15 % of an active reagent) under conditions a pressure to 267 mm Hg (corresponds to the maximum height of the use of generators of this type - 8 km). The experiments were carried out in thermal vacuum chambers of the RPA "Typhoon". As a result of the experiments were determined the dependences of the burning rate of the pyrotechnic composition, the change in the content of active ice-forming reagents, and the spectral characteristics of the generated aerosol on external pressure. As a extreme case, there is a significant probability of a stop burning of the pyrotechnic composition when using PV-26 ejectable flare at pressures less than 405 mm Hg (corresponds to an altitude of 5 km).

Keywords: ice-forming aerosol, ice-forming reagents, active influences, anti-hail agents

© Шилин А.Г., 2021

For citation: Shilin A.G. Research of Functioning of Ice-Forming Means of Active Impact in Real Conditions of Application. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science*. 2021;(4):69-73. (In Russ.).

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

Введение

В работе рассматриваются процессы генерации льдообразующего аэрозоля при горении пиротехнического состава, содержащего 15 % льдообразующего реагента (патент РФ № 2551343) [1], которым снаряжается стандартный генератор аэрозоля в корпусе патрона ПВ-26 без диафрагмирования горячей поверхности. Вес пиросостава 33 г, массовый расход $1 \pm 0,2$ г/с. Штатные нормативы применения патрона: высота до 8 км (давление до 267 мм рт. ст.), температура до -37 °С, установившаяся скорость падения 60 м/с. Поскольку в результате сгорания исследуемого пиротехнического состава в газовую фазу переходит от 83 до 86 % от исходной массы пиротехнической смеси, процесс горения в значительной степени определяется внешним давлением, так как при понижении давления:

- расширяющаяся зона горения уменьшает тепловой поток, направленный на прогрев следующей порции пиросостава;
- большее количество энергии отводится образующейся газовой фазой.

Например, горение дымного пороха, при котором в газовую фазу переходит 61 % исходной массы состава, замедляется с высотой, а при давлении 350 мм рт. ст. (соответствует высоте 6,5 км) вероятность затухания пиротехнического заряда приближается к 100 % [2].

Столь значительное изменение параметров горения пиротехнической рецептуры позволяет предположить кардинальные изменения как в химическом составе, так и в структуре льдообразующего аэрозоля, образуемого пиротехническим генератором. Также следует отметить невозможность учета этих процессов при проведении наземных испытаний генераторов в условиях испытательной лаборатории.

Оборудование и методика проведения экспериментов

Эксперименты проводились в здании специализированного комплекса модельных установок для геофизических исследований ФГБУ «НПО «Тайфун». Использовалось следующее оборудование: стенд на базе горизонтальной аэродинамической трубы, сопряжённый с камерами переохлаждённого тумана, термобарокамеры объёмом 100 и 0,5 м³. Оборудование позволяет исследовать полноразмерные генераторы льдообразующего аэрозоля в ситуации моделирования их движения в целевой среде при давлении до 120 мм рт. ст. (соответствует высоте 10 км) и скорости движения до 100 м/с. В процессе исследований определялась как льдообразующая активность образованного аэрозоля, так и его спектр посредством электростатического классификатора аэрозолей TSI 3080.

Испытания пиротехнических составов в термобарокамере

Результаты измерения зависимости скорости горения льдообразующей пиротехнической композиции от внешнего давления проводились в термобарокамере объёмом 0,5 м³ для образцов диаметром 8 мм и приведены в табл. 1. С достоверностью аппроксимации 0,9975 эта зависимость может быть описана следующим соотношением: $v = -0,00004P^2 + 0,0062P - 1,523$.

Поскольку испытания полноразмерных генераторов в большой термобарокамере при отрицательной температуре сопряжены со значительным загрязнением оборудования, исследовался только сам факт воспламенения генератора на предельной высоте применения в момент срабатывания заряда, отстреливающего генератор. В условиях, соответствующих предельным при применении патронов ПВ-26 (давление 267 мм рт. ст, температура -38 °С), происходит до 10–30 % отказов в воспламенении патрона с открытой поверхностью заряда.

Таблица 1 / Table 1

Скорость горения пиротехнической рецептуры патента РФ № 2551343, мм/с, в зависимости от давления среды и процент затухших образцов / Burning speed of the pyrotechnic composition of the patent No. 2551343, mm/s, depending on the pressure and the percentage of the stop burning samples

№	Давление, мм рт.ст. / Высота, км						
	760/0	596/2	462/4	405/5	345/6	308/7	267/8
1	0,824	0,714	Затухание	0,338	–	–	–
2	0,848	0,681	0,449	–	–	–	–
3	0,838	0,763	0,453	0,357	0,128	–	–
4	0,814	0,712	0,455	–	–	–	–
5	0,817	0,698	0,469	0,371	–	–	–
6	0,813	0,717	0,485	–	–	–	–
Среднее	0,8256	0,7142	0,4622	0,3553	0,128	–	–
%	0	0	16,7	50	83,3	100	100

Изменение количества активных соединений серебра при понижении давления

Изменение термодинамических условий горения состава с высотой приводит к уменьшению скорости горения заряда более чем в два раза с одновременным понижением температуры горения, что в значительной степени изменяет количество активных йодопроизводных серебра, переходящих в фазу аэрозоля без разложения. Расчеты, проведенные с использованием программного комплекса «Астра-4» [3], показывают снижение содержания йодистого серебра в паровой фазе примерно на 40 %, снижение температуры горения на 50 °С и трехкратное увеличение объема газовой фазы (табл. 2). Последнее обстоятельство также косвенным образом влияет на свойства образованного аэрозоля, поскольку больший объем газовой фазы при сравнимых прочих условиях приводит к большей скорости выхода газового потока, быстрому процессу конденсации, и способствует сдвигу спектра аэрозоля в сторону более малого размера частиц и уменьшению льдообразующей активности [4].

Таблица 2 / Table 2

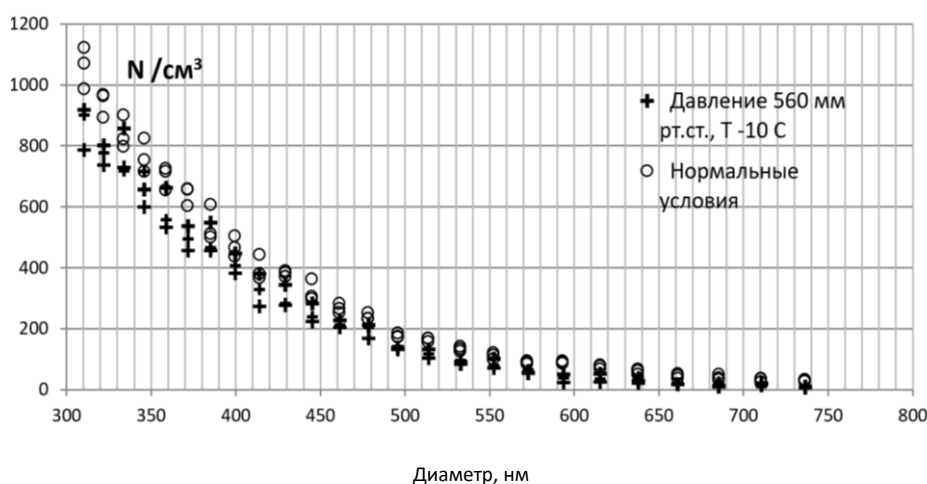
Расчетные параметры горения 1 кг рецептуры патента РФ № 2551343 при давлениях от 1 до 0,3 атмосферы и температуре 273 К / The calculated parameters of combustion of 1 kg of pyro-mixture of the patent No. 2551343 at pressures from 1 to 0.3 atmospheres and a temperature of 273 K

Давление, атм	Высота, км	Температура, К	% AgI в паре	Объем газовой фазы, л
1	0	1860	47,9	6 554,290
0,9	0,9	1857	46,3	7 270,790
0,8	1,9	1854	44,5	8 166,430
0,7	3,0	1851	42,6	9 317,960
0,6	4,3	1847	40,3	10 847,460
0,5	5,8	1843	37,6	12 988,760
0,4	7,7	1837	34,3	16 183,100
0,3	10,1	1831	30,2	21 506,980

Данные по зависимости параметров горения пиротехнических смесей от внешнего давления относятся к генераторам с открытой поверхностью или к ситуации, когда коэффициент диафрагмирования (отношение площади горящей поверхности пиросостава к площади критического сечения сопла) не позволяет рассматривать условия горения внутри корпуса генератора вне зависимости от внешнего давления.

Спектральные характеристики аэрозоля, образованного на реальных высотах и температурах применения

В связи с нерешенными в настоящее время трудностями измерения льдообразующей активности аэрозоля в условиях пониженного давления, на данный момент возможно получение только косвенной информации, основанной на измерениях спектра аэрозоля, образующегося при работе генератора в этих условиях. Эксперименты проводились с использованием микронавески пиросостава 100 мг в термобарокамере объемом 100 м³. Для измерения спектров аэрозоля в области размеров выше 300 нм при пониженных давлении и температуре использовался анализатор аэрозоля телевизионный «ПОТОК-М» [5]. Результаты измерения спектров представлены на рисунке.



Спектры льдообразующего аэрозоля при горении в нормальных условиях и при давлении 560 мм рт. ст. / Spectra of ice-forming aerosol during combustion under normal conditions and at a pressure of 560 mm Hg

применения. При этом, как следует из [4], размер аэрозоля 30 нм в диаметре является критическим для образования зародышей льда в целевой области воздействия.

Следует отметить несколько дополнительных факторов, позволяющих сделать вывод об изменении льдообразующей активности аэрозоля пиротехнического генератора, работающего в реальных условиях полета:

- увеличение объема газовой фазы приводит к увеличению скорости истечения газовой струи из генератора, что ведет к более быстрому охлаждению и сдвигу спектра аэрозоля в область меньших размеров;

- понижение температуры воздуха на реальных высотах применения дополнительно ускоряет процесс конденсации и способствует появлению частиц меньшего размера.

Если учесть снижение содержания йодистого серебра в продуктах горения пиросостава (табл. 2), следует сделать вывод о значительном снижении льдообразующей активности аэрозоля, образованного в реальных условиях воздействия.

Выводы

Эффективность генераторов льдообразующего аэрозоля в реальных условиях применения может значительно отличаться от получаемой во время наземных испытаний. В качестве предельного случая следует упомянуть некоторую вероятность затухания генератора, отстреливаемого с борта самолета на предельной высоте применения. Поскольку в большинстве случаев затухание генератора происходит через 2–3 с после отстрела, данный процесс не может быть обнаружен наблюдателем, находящимся на самолете. Таким образом, при разработке пиротехнических генераторов льдообразующего аэрозоля следует учитывать следующее:

1. Необходимость проверки срабатывания генераторов в термобарокамерах в условиях, соответствующих как по давлению, так и по температуре предельной высоте применения.

Как следует из приведенной информации, даже при давлении 560 мм рт. ст. (что соответствует высоте около 3000 м) имеет место уменьшение содержания крупных частиц в спектре. Так как спектр аэрозоля, генерируемого патроном ПВ-26 при нормальных условиях и обдуве со скоростью 60 м/с, характеризуется модальным размером в диапазоне от 50 до 60 нм (в диаметре), возможно ожидать сдвиг спектра в зону меньших размеров при срабатывании патрона на реальной высоте

2. По возможности проводить тестовые испытания генераторов льдообразующего аэрозоля с использованием аэродинамических стенов при скорости потока, максимально соответствующей реальной скорости движения генераторов.

Список источников

1. Савченко А.В., Шилин А.Г., Иванов В.Н., Федоренко А.И. Пиротехнический состав для активного воздействия на переохлажденные облака и туманы. Патент RU 2 551 343 C1 от 26.11.2013.
2. Шиллинг Н.А. Курс дымных порохов. М.: Оборонгиз, 1940. 280 с.
3. Трусов Б.Г. Моделирование химических и фазовых равновесий при высоких температурах (АСТРА.4/pc). М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1994. 50 с.
4. Marcolli C., Nagare B., Welti A., Lohmann U. Ice nucleation efficiency of AgI: review and new insights // *Atmos. Chem. Phys.* 2016. Vol. 16. P. 8915–8937.
5. Яскевич Г.Ф. Технические средства мониторинга природной среды и автоматизации научного эксперимента // Альманах научн. тр. к 60-летию НПО «Тайфун» / под ред. В.М. Шершакова, А.Ф. Нерушева. М.: Информполиграф, 2018. С. 139–158.

References

1. Savchenko A.V., Shilin A.G., Ivanov V.N., Fedorenko A.I. *Pyrotechnic composition for active influence on supercooled clouds and fogs*. Certificate, No. RU 2 551 343 C1, 26th November 2013. (In Russ.).
2. Shilling N.A. *Black Powder Course*. Moscow: Oborongiz Publ.; 1940. 280 p. (In Russ.).
3. Trusov B.G. *Simulation of chemical and phase equilibria at high temperatures (ASTRA.4/pc)*. Moscow: Bauman Moscow State Technical University Press; 1994. 50 p. (In Russ.).
4. Marcolli C., Nagare B., Welti A., Lohmann U. Ice nucleation efficiency of AgI: review and new insights. *Atmos. Chem. Phys.* 2016;16:8915-8937.
5. Yaskevich G.F. Technical means for monitoring the natural environment and automating a scientific experiment. *Almanac of scientific works dedicated to the 60th anniversary of NPO "Typhoon"*. V.M. Shershakov, A.F. Nerushev, eds. Moscow: Informpoligraf Publ.; 2018:139-158. (In Russ.).

Информация об авторе

Шилин А.Г. – кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник.

Information about the author

Shilin A.G. - Candidate of Science (Physics and Mathematics), Leading Researcher.

Статья поступила в редакцию 03.09.2021; одобрена после рецензирования 20.09.2021; принята к публикации 26.11.2021.
The article was submitted 03.09.2021; approved after reviewing 20.09.2021; accepted for publication 26.11.2021.

Original article

УДК 556.18+631.67.03

doi: 10.18522/1026-2237-2021-4-74-80

ASSESSMENT OF GROUNDWATER EFFICIENCY ON IRRIGATION IN THE AREA BETWEEN TURYANCHAY-GIRDIMANCHAY RIVERS

Jale V. Jafarli

Baku State University, Baku, Azerbaijan

j.gzade@hotmail.com

Summary. The article is devoted to determining the possibility of using groundwater with different degrees of mineralization and chemical composition for irrigation, which is spread in the area between the Turyanchay-Girdimanchay rivers. The efficiency of groundwater for irrigation, whose mineralization rate varies from 0.5 to 10 g/l, was assessed according to the methods and criteria adopted in the world countries. The suitability of groundwater for irrigation, which varies from 0.5 to 10 g/l, depends on the methods and criteria adopted in the world, including the degree of mineralization of water, irrigation coefficient, salinity hazard, sodium sorption coefficient, percentage of magnesium, rated for potential salinity and sodium carbonate residue. It has been determined that groundwater with a salinity of up to 3 g/l is fully suitable for irrigation according to all assessment criteria, water with a salinity of up to 5 g/l is suitable for irrigation, water with a salinity of 5-7 g/l is less efficient for irrigation. It is suitable in terms of irrigation coefficient, sodium sorption coefficient, salinity hazard and sodium carbonate residue, and according to three indicators it is not suitable for irrigation. Water with a salinity of 7-10 g/l is not suitable for irrigation according to all assessment criteria. However, these waters have a favorable chemical composition, neutral and balanced salt content, and in years of acute water shortage, groundwater with a salinity of 7-10 g/l can be used for irrigation of crops using special irrigation methods and technologies. At the same time, it was found that the groundwater is not contaminated. The content of pollutants and heavy metals in these waters does not exceed the permissible limits. The content of nitrite in groundwater was 0.012-0.019 mg/l, nitrates - 1.10-1.72 mg/l, and the amount of ammonium - 0.07-0.08 mg/l. The amount of iron in heavy metals was 0.05-0.06, aluminum - 0.09-0.19, zinc - 0.004-0.005 mg/l. Metals copper and lead, as well as oil products were not found in the water. Biochemical oxygen consumption ranged from 1 to 5 mg/l.

Keywords: groundwater, different mineralization rate, quality, irrigation, efficiency, assessment, criteria

For citation: Jafarli J.V. Assessment of Groundwater Efficiency on Irrigation in the Area Between Turyanchay-Girdimanchay Rivers. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2021;(4):74-80.

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

Научная статья

ОЦЕНКА ПРИГОДНОСТИ ПОДЗЕМНЫХ ВОД ТУРИАНЧАЙ-ГИРДИМАНЧАЙСКОГО МЕЖДУРЕЧЬЯ ДЛЯ ОРОШЕНИЯ

Жаля Видади Джафарли

Бакинский государственный университет, Баку, Азербайджан

j.gzade@hotmail.com

Аннотация. Статья посвящена вопросу установления возможности использования подземных вод Турианчай-Гирдиманчайского междуречья для орошения. Пригодность подземных вод с минерализацией от 0,5 до 11 г/л для орошения оценена по критериям, применяемым различными странами мира, включая минерализацию воды, коэффициент орошения, коэффициент сорбции натрия, процентное содержание магния, потенциальную соленость и остаток карбоната натрия. Определено, что грунтовые воды с минерализацией до 3 г/л полностью пригодны для орошения по всем критериям оценки, вода с минерализацией до 5 г/л пригодна для полива, вода с минерализацией 5–7 г/л ограничено пригодна. Она подходит по коэффициенту орошения, коэффициенту сорбции натрия, опасности засоления и остатку карбоната натрия, а по трем показателям непригодна для полива. Вода

с минерализацией 7–10 г/л не подходит для полива по всем критериям оценки. Однако эти воды имеют благоприятный химический состав, нейтральное и сбалансированное содержание солей, а в годы острой нехватки воды грунтовые воды с минерализацией 7–10 г/л могут использоваться для орошения сельскохозяйственных культур с использованием специальных методов и технологий полива. При этом установлено, что грунтовые воды не загрязнены. Содержание загрязняющих веществ и тяжелых металлов в этих водах не превышает допустимых пределов. Содержание нитритов в подземных водах составляло 0,012–0,019 мг/л, нитратов – 1,10–1,72, аммония – 0,07–0,08 мг/л. Количество железа в тяжелых металлах составляло 0,05–0,06, алюминия – 0,09–0,19, цинка – 0,004–0,005 мг/л. Медь и свинец, а также нефтепродукты в воде не обнаружены. Биохимическое потребление кислорода составляло от 1 до 5 мг/л.

Ключевые слова: подземные воды, разная степень минерализации, качество, орошение, эффективность, оценка, критерии

Для цитирования: Jafarli J.V. Assessment of Groundwater Efficiency on Irrigation in the Area Between Turyanchay-Girdimanchay Rivers // Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science. 2021;(4):74-80.

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

Introduction

Azerbaijan is located in an arid zone, and here the amount of precipitation is 3-4 times less than evaporation, so it is impossible to produce agricultural products without irrigation. Also, the country's freshwater resources are very limited and they are unevenly shared across regions. During drought years, the resources of all river waters are 23.2 billion m³/year (about 70 %) and 14.7 billion m³/year of it come from neighboring countries [1].

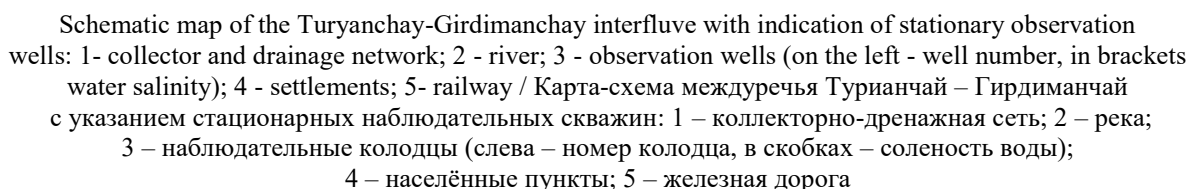
Population growth, the development of irrigation agriculture, the steady growth of the industry, energy, fisheries, and other sectors of the economy create tension in the balance of water resources. On the other hand, global climate change in recent years (warming, drought, decreasing of rainfall, etc.) has led to a sharp decline in water resources. During the vegetation period, in the water economy balance of the country short of water about 4 billion m³ exists. In such a situation, there is a need to use various water sources, including groundwater, for irrigation and water supply. However, the quality and quantity of groundwater vary depending on the hydrogeological conditions in the regions. Therefore, it assumes great practical importance to determine the possibility of using groundwater with different rates of mineralization and chemical composition for irrigation.

The purpose of the study consists of determining the possibility of using groundwater with different rates of mineralization and chemical composition for irrigation in the Turyanchay-Girdimanchay inter-river area.

The object of study is groundwater spread in the Turyanchay-Girdimanchay inter-river area in the Shirvan region.

The methodology of the study. To determine the chemical composition of groundwater, water samples were taken from 29 stationary observation wells drilled in the initial, central, and discharge zones of the supply cones of the Turyanchay, Goychay, and Girdimanchay rivers and the samples were fully chemically analyzed. During the analysis, the rate of mineralization and ionic composition of water (HCO₃⁻, Cl⁻, and cations Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺+ K⁺) were determined. According to the results obtained, the chemical composition of water was divided into 12 groups according to the rate of mineralization and ionic composition. The classification includes groundwater with a mineralization rate ranging from 0.5 to 10 g/l. The efficiency of water with different mineralization rate and ionic composition for irrigation has been determined based on assessment methods and criteria widely used in the world, including the former Soviet Union and the United States [2–7]. Most of the assessment methods and criteria are systematized in [8].

The groundwater has been studied according to the suitability for irrigation, and also contaminants, heavy metals, oil products and sanitary instructions. For this purpose, in the summer of 2019-2020, water samples were taken from the Main Shirvan collector which receives groundwater and water from the entire drainage network in the area and flows into the Caspian Sea, and has been involved in chemical analysis in the special analytical laboratory in Department for water quality control in the field of water economy in the Republic of Azerbaijan. Under the analysis, the contaminant ions, nitrite, nitrate, ammonium, heavy metals, iron (Fe³⁺), copper (Cu²⁺), zinc (Zn²⁺), aluminum (Al³⁺), lead (Pb²⁺), oil products and biological oxygen consumption (BPC5) were determined in the water.



If the mineralization rate of the water is more than 5g/l, then it is dangerous to irrigate with such water, or irrigation should be carried out with special technologies, taking into account the soil-climate and the degree of area drainage. The efficiency of groundwater with different chemical composition for irrigation is defined by the following formulas proposed by O.A. Alyokin and N. Stebler [2]:

$$K = \frac{288}{5Cl^-} . \quad (1)$$
$$K = \frac{288}{Na^+ + 4Cl^-} \quad . \quad (2)$$

- When there is $Na^+ - Cl^- - SO_4^{2-} > 0$ in the irrigation water, the irrigation coefficient is determined as following:

$$K = \frac{288}{10 Na^+ + 5 Cl^- + 9 SO_4^{2-}}. \quad (3)$$

In these formulas, Na^+ , Cl^- and ions are expressed in mg-ekv/l. In the case of $K > 18$, the water is considered fully efficient for irrigation, in the case of $K = 6$, the water is considered efficient for irrigation, and in the case of $K < 1,2$, the water is considered inefficient for irrigation.

The efficiency of water for irrigation due to the risk of salinity in the soil was determined by the formula proposed by A.M. Mojeyko and T.K. Vorotnik [6]:

$$Na = \frac{Na^+ 100}{Ca^{2+} + Mg^{2+} + Na^+}. \quad (4)$$

Here, Na is the percentage of Natrium, %. Na^+ , Ca^{2+} , and Mg^{2+} cations are expressed in mg-ekv/l. In case of $Na \leq 60\%$, the water is considered fully efficient for irrigation, in case of $Na = 60 \div 80\%$, the water is considered partially efficient for irrigation, in case of $Na > 80\%$ the water is considered inefficient for irrigation.

The efficiency of groundwater with different chemical compositions for irrigation was determined according to the adsorption coefficient using the Richards-Gapon formula, which is widely used in the US Department of Agriculture [5].

$$SAR = \frac{Na^+}{\sqrt{0,5 (Ca^{2+} + Mg^{2+})}}, \quad (5)$$

here SAR is the sorption coefficient of Natrium. In this formula, cations are expressed in mg-ekv/l.

In the case of $SAR < 10$, the water is considered fully efficient for irrigation, in the case of $SAR = 10 \div 18$, the water is considered efficient for irrigation, in the case of $SAR = 18 \div 26$, the water is considered less efficient for irrigation, and in the case of $SAR > 26$, the water is considered inefficient for irrigation. The efficiency of groundwater for irrigation has been determined by J. Sobolch-K. Draba with the formula used by the US Department of Agriculture [7]:

$$Mg = \frac{Mg^{2+} 100}{Ca^{2+} Mg^{2+}}, \quad (6)$$

here Mg is the quantity that determines the danger of magnesium salinity in the soil, %.

In the formula, cations are expressed in mg-ekv/l. In the case of $Mg > 50\%$, the water is not considered efficient for irrigation. The efficiency of groundwater for irrigation has also been determined by the Dansen formula, which is widely used in the US Department of Agriculture [5].

$$PD = Cl^- + 0,5 SO_4^{2-}, \quad (7)$$

here PD is the potential salinity of the water, mg-ekv/l.

In the formula, the anions are expressed in mg-ekv/l.

$PD = 3 \div 15$ mg-ekv/l water is considered completely efficient for irrigation, water with $PD = 15 \div 20$ mg-ekv/l is considered efficient for irrigation, and water with $PD > 20$ mg-ekv/l is considered inefficient for irrigation. The efficiency of groundwater for irrigation and the danger of their ability to create alkalinity in the soil were also tested by the formula proposed by V.A. Kovda [9] and N.M. Antipov-Karatayev - G.M. Kader [3]:

$$OKH = (CO_3^{2-} + HCO_3^-) - (Ca^{2+} + Mg^{2+}), \quad (8)$$

here OKH is residual sodium carbonate, mg-ekv/l.

In the formula anions and cations are expressed in mg-ekv/l.

In the case of $OKH < 2.5$ mg-ekv/l, the water is considered completely efficient for irrigation, and in the case of $OKH > 2.5$ mg-eq/l, the water is considered inefficient for irrigation.

Analysis and discussions

The rate of mineralization and chemical composition of groundwater (pressurized and non-pressurized) water spread in the Turyanchay-Girdimanchay inter-river area are shown in Table 1.

When assessing the efficiency of groundwater for irrigation, water with mineralization rate of 0.5 to 10 g/l was accepted. This is due to the fact that irrigation in arid zones with water with a mineralization rate of more than 10 g/l is generally not considered relevant. Thus, the amount of precipitation in arid zones is low, and the amount of evaporation is very high. Therefore, when irrigating with water with a high mineralization rate, the process of re-salinization of soil intensifies, and in a short time, the soils get out of the crop rotation. Calculations show that 10 tones of harmful salt with 1000 m³ of irrigation water enter the soil layer water with a mineralization rate of 10 g/l. If this amount of salt is not removed from the soil layer, then the salinity rate in the 0.25 m layer of soil will increase by 0.31 %. In this case, non-saline soils change into moderately saline soils [10].

Table 1 / Таблица 1

**Mineralization rate of groundwater, g/l (numerator), and chemical composition, mg-ekv/l (denominator)
/ Минерализация грунтовых вод, г/л (числитель), и химический состав, мг-экв/л (знаменатель)**

Mineralization rate, g/l	Anions			Cations		
	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺ +K ⁺
0,5	329 / 5,40	27 / 0,76	86 / 1,79	46 / 2,29	6 / 0,49	119 / 5,17
1,0	232 / 3,80	76 / 2,14	442 / 9,21	51 / 2,54	33 / 2,79	244 / 10,62
1,5	275 / 4,51	275 / 7,75	584 / 12,17	100 / 5,00	84 / 7,00	297 / 12,93
2,0	262 / 4,30	262 / 7,39	936 / 19,5	175 / 8,73	47 / 3,95	426 / 18,52
2,5	275 / 4,51	657 / 18,51	823 / 17,15	80 / 3,00	174 / 14,50	521 / 22,65
3,0	366 / 6,00	763 / 21,49	739 / 15,40	190 / 9,50	174 / 14,50	435 / 18,91
4,0	232 / 3,80	124 / 3,50	2348 / 48,92	402 / 20,10	230 / 19,15	389 / 16,91
5,0	573 / 9,40	7502 / 42,30	1626 / 33,88	464 / 23,21	77 / 6,41	1069 / 46,46
6,0	464 / 7,60	25 / 0,70	7337 / 77,85	91 / 4,56	34 / 2,87	1824 / 79,32
7,4	153 / 2,51	6940 / 195,49	4479 / 93,31	56 / 2,80	384 / 32,00	1274 / 55,39
8,4	2074 / 34,0	4022 / 113,30	344 / 7,17	40 / 2,00	312 / 26,00	2909 / 126,48
10,0	104 / 1,70	3124 / 88,0	3398 / 70,79	240 / 12,00	336 / 28,00	2772 / 120,52

The mineralization rate of groundwater in the area studied is lower in the upper parts of the supply cones of the rivers, relatively higher in the middle part, and higher in the discharge zone. As the mineralization rate of water increases, their ionic composition and type also change. The results of chemical analysis of groundwater show that as the mineralization rate of water increases, water with hydrocarbonate-sulfate type turns into type with sulfate-chlorine or chloride-sulfate due to the anion composition.

According to the cationic composition, groundwater with mineralization rate up to 1 g/l is characterized by the sodium-calcium type, and water with mineralization rate more than 1 g/l is characterized by the sodium-magnesium type (Table 1).

The efficiency of groundwater for irrigation with different mineralization rates, ionic composition, and type was determined according to the assessment methods and criteria described in the "Methodology of the Study" section of the Study. The results are shown in Table 2.

Analysis of the data in Table 2 shows that groundwater with mineralization rate up to 2 g/l is fully efficient for irrigation according to all quality indicators. Water with mineralization rate up to 3 g/l can be used for irrigation, except for potential salinity. Water with mineralization rate of 3 to 5 g/l is efficient for irrigation according to all assessment criteria, except for the potential salinity of the water. Groundwater with mineralization rate of 5 to 7 g/l is considered efficient for irrigation due to irrigation coefficient, absorption coefficient, and residual sodium carbonate, and it is considered partially inefficient for irrigation according to other indicators. That is, special irrigation techniques and technologies must be used for irrigation with groundwater with a mineralization rate ranging from 5 to 7 g/l. Groundwater with a mineralization rate of more than 7 g/l is considered completely inefficient for irrigation.

Assessment of water quality according to various criteria shows that if irrigation is carried out with groundwater with a mineralization rate of 7-10 g/l, then the process of salinization in the soil can occur. However, the process of soda formation in the soil is not expected during irrigation with this water. More interesting fact is that the amount of hydrocarbonate in groundwater with a mineralization rate of 0.5 g/l is 2-10 times higher than the amount of hydrocarbonate in the other water (Table 1). Irrigation for a long

time with such water increases the possibility of the soda formation (sodium carbonate Na_2CO_3 salt) in the soil [2, 3, 9, 11].

Regardless of the mineralization rate, the chemical composition of groundwater in the area that studied consists of neutral salts and is efficient for irrigation. One of the positive qualities of groundwater in the studied area is that water with mineralization rate up to 7 g/l is considered efficient for irrigation in terms of alkalinity indicators, adsorption coefficient, percentage of magnesium, and irrigation coefficient (Table 2). During irrigation with water of this quality, the soil structure is not damaged and does not pose a risk of soda formation. It should be noted that when the amount of sodium and magnesium ions in the irrigation water exceeds the permissible level, the structure of the soil is destroyed, salinity is formed on it and it swells under the influence of water [9, 10].

Table 2 / Таблица 2

The efficiency of groundwater in the Turyanchay-Girdimanchay inter-river area for irrigation according to various assessment criteria / Эффективность использования подземных вод в Турианчай-Гирдиманчайском междуречье для орошения по различным критериям оценки

According to the mineralization rate of water M, g/l	According to the irrigation coefficient K	According to the absorption coefficient SAR	According to the potential salinity of water PD, mg-ekv/l	According to the amount of sodium by percentage Na, %	According to the amount of magnesium by percentage Mg, %	According to the sodium-carbonate residue OKH, mg-ekv/l
0,5 / TY	35 / TY	4 / TY	2 / TY	65 / TY	18 / TY	2,6 / AY
1,0 / Y	15 / Y	6,5 / TY	7 / TY	56 / TY	52 / Y	-2 / TY
1,5 / Y	5 / Y	4 / TY	14 / TY	59 / TY	58 / Y	-7 / TY
2,0 / Y	6 / Y	7 / TY	17 / TY	56 / TY	31 / TY	-18 / TY
2,5 / AY	3 / Y	8 / TY	27 / YZ	56 / TY	82 / YZ	-32 / TY
3,0 / AY	3 / Y	5 / TY	29 / YZ	44 / TY	64 / YZ	-18 / TY
4,0 / AY	9 / Y	4 / TY	28 / YZ	30 / TY	48 / TY	-35 / TY
5,0 / AY	2,4 / Y	1 / TY	59 / YZ	56 / TY	18 / TY	-26 / TY
6,0 / YZ	4 / Y	4 / TY	39 / YZ	91 / AY	38 / YZ	0,2 / Y
7,4 / YZ	0,3 / YZ	13 / Y	49 / YZ	61 / Y	92 / YZ	-32 / TY
8,4 / YZ	0,5 / YZ	33 / YZ	111 / YZ	1 / TY	9 / TY	6 / YZ
10,0 / YZ	0,6 / YZ	27 / YZ	123 / YZ	75 / AY	70 / YZ	-4 / TY

Note: the value of the assessment criteria in numerator; efficiency of water in the denominator; Y - efficient; TA - fully efficient; AY - less efficient; YZ - inefficient.

The quantity of nitrite in groundwater was 0.012-0.019 mg/l, nitrate was 1.10-1.72 mg/l, and ammonium was 0.07-0.08 mg/l. The quantity of iron in heavy metals was 0.05-0.06, aluminum - 0.09-0.19, and zinc - 0.004-0.005. Copper and lead metals, as well as oil products were not found in the water. The value of biochemical oxygen consumption ranged from 1 to 5 mg/l. In general, the quantity of contaminants and heavy metals in groundwater was even lower than allowed limit in drinking water.

Discussion and conclusion

Thus, the determination of the quality of groundwater in the Turyanchay-Girdimanchay inter-river area, which has different mineralization rate, chemical composition, and type, allows us to obtain the following results:

1. Groundwater with a mineralization rate up to 5 g/l is efficient for irrigation and can be used to irrigate agricultural plants.

2. Groundwater with a mineralization rate of 5-7 g/l is considered efficient for irrigation due to irrigation coefficient, absorption coefficient, and residual sodium carbonate, and inefficient for irrigation due to the potential salinity of the water. However, since the studied groundwater has a neutral and balanced salt composition (favorable chemical composition), it can be used to irrigate agricultural plants during drought years.

3. The quality of groundwater with a mineralization rate of more than 7 g/l does not fully meet the accepted quality indicators and can not be used for direct irrigation. However, in years of extreme drought, and in cases of acute water shortages, it can be used for irrigation of well-drained, highly permeable soils using special irrigation techniques and technologies.

References

1. Rustamov S.G., Kashkai Z.M. *Water Resources of the Azerbaijan SSR*. Baku: Elm Publ.; 1989. 181 p. (In Russ.).
2. Alekin O.A. *Fundamentals of Hydrochemistry*. Leningrad: Hydrometeoizdat Publ.; 1970. 272 p. (In Russ.).
3. Antipov-Karataev N.N., Kader G.M. To the reclamation assessment of irrigation water having an alkaline reaction. *Pochvovedenie = Eurasian Soil Science*. 1961;(3):62-63. (In Russ.).
4. Kostyakov A.N. *Fundamentals of Land Reclamation*. Moscow: Selkhozgiz Publ.; 1960. 622 p. (In Russ.).
5. *Water quality criteria for US agriculture*. Overview information. Moscow: Central Research Institute, Ministry of Water Resources of the USSR Press, 1983. 40 p. (In Russ.).
6. Mozheyko A.M., Collar T.K. Gypsum of saline chestnut soils of the Ukrainian SSR, irrigated with mineralized waters, as a method of combating salinity of these soils. *Tr. UkrNII pochvovedeniya = Proceedings of the Ukrainian Research Institute of Soil Science*. 1958;III:31-35. (In Russ.).
7. Sraolcs J., Darab R. Irrigation water quality and problems of soil salinity. *Acta Agronomica Academical Scientiarum Hungaricae*. 1982;XXXI(1-2):73-194.
8. Hasanov S.T., Danyalov Ş.D., Zeynalova O.A., Seyidov M.M. *Principles of using non-traditional water for irrigation*. Baku: Memar Publishing and Printing LLC; 2006. 99 p.
9. Kovda V.A. The quality of irrigation water. *Soils of the arid zone as an object of irrigation*. Moscow: Nauka Publ.; 1968:51-58. (In Russ.).
10. Mammadov G.Sh., Hashimov A.C., Hasanov S.T. *Melioration: diagnosis and classification of saline soils*. Baku: Elm Publ.; 2017. 308 p.
11. Isgandarov M.Y. *Melioration of saline soils and environment*. Baku: AFPoliqrAF Publ.; 2018. 369 p.

Список источников

1. Рустамов С.Г., Кашкай З.М. Водные ресурсы Азербайджанской ССР. Баку: Элм, 1989. 181 с.
2. Алёкин О.А. Основы гидрохимии. Л.: Гидрометеиздат, 1970. 272 с.
3. Антипов-Каратаев Н.Н., Кадер Г.М. К мелиоративной оценке поливной воды, имеющей щелочную реакцию // Почвоведение. 1961. № 3. С. 62–63.
4. Костяков А.Н. Основы мелиорации. М.: Сельхозгиз, 1960. 622 с.
5. Критерии качества вод для сельского хозяйства США : обзорная информация. М.: ЦБНТИ Минводхоза СССР, 1983. 40 с.
6. Можейко А.М., Вороник Т.К. Гипсование солонцеватых каштановых почв УССР, орошаемых минерализованными водами, как метод борьбы с солонцеванием этих почв // Тр. УкрНИИ почвоведения. 1958. Т. III. С. 31–35.
7. Sraolcs J., Darab R. Irrigation water quality and problems of soil salinity // Acta Agronomica Academical Scientiarum Hungaricae. 1982. Т. XXXI (1-2). Р. 173–194.
8. Hasanov S.T., Danyalov Ş.D., Zeynalova O.A., Seyidov M.M. Principles of using non-traditional water for irrigation. Baku: Memar Publishing and Printing LLC, 2006. 99 p.
9. Ковда В.А. Качество оросительной воды // Почвы аридной зоны как объект орошения. М.: Наука, 1968. С. 51–58.
10. Mammadov G.Sh., Hashimov A.C., Hasanov S.T. Melioration: diagnosis and classification of saline soils. Baku: Elm, 2017. 308 p.
11. Isgandarov M.Y. Melioration of saline soils and environment. Baku: AFPoliqrAF, 2018. 369 p.

Information about the author

Jafarli J.V. - Candidate for a Degree.

Информация об авторе

Джафарли Ж.В. – диссертант.

Статья поступила в редакцию 25.03.2021; одобрена после рецензирования 31.08.2021; принята к публикации 26.11.2021.
The article was submitted 25.03.2021; approved after reviewing 31.08.2021; accepted for publication 26.11.2021.

БИОЛОГИЧЕСКИЕ НАУКИ

Научная статья

УДК 631.4: 911.2

doi: 10.18522/1026-2237-2021-4-81-89

ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ ВЕГЕТАЦИОННОГО ИНДЕКСА В ДИСТАНЦИОННЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ ДИНАМИКИ ПРОДУКТИВНОСТИ ПОЧВЕННОГО ПОКРОВА ТЕРСКО-КУМСКОЙ НИЗМЕННОСТИ

А.Б. Биарсланов^{1✉}, З.Г. Залибеков², З.У. Гасанова³, М.Х.-М. Магомедова⁴, И.Р. Гаджиев⁵

^{1,3,4}Прикаспийский институт биологических ресурсов Дагестанского федерального исследовательского центра РАН, Махачкала, Республика Дагестан, Россия

²Институт геологии ДФИЦ РАН, Махачкала, Республика Дагестан, Россия

⁵Лаборатория комплексных исследований природных ресурсов Западно-Каспийского региона, ДФИЦ РАН, Махачкала, Республика Дагестан, Россия

¹ab.biarslanov@mail.ru✉

²bio@doc.dgu.ru

³zgasanova@list.ru

⁴milan-rom@mail.ru

⁵gislam@bk.ru

Аннотация. Рассматривается опыт применения онлайн-сервисов для определения значений вегетационного индекса (ВИ) в дистанционном исследовании состояния почвенного и растительного покровов на примере аридных территорий Северного Дагестана. В качестве инструмента определения ВИ использован онлайн-сервис OneSoil (<https://app.onesoil.ai>) на ключевых участках с различными по гранулометрическому составу, степени засоления, растительному покрову типами почв. В результате на основе 45 разновременных и разнотемпературных космических снимков с заданным временным разрешением получена картина динамики изменения значений ВИ. Установлено, что растительность, являясь индикатором состояния почвенного покрова, выступает достаточно достоверным идентификатором показателей ВИ. Выявлено, что за пятилетний период, наряду со снижением показателей среднегодовых значений ВИ, в 2,5 раза снизилась продуктивность эфемерной растительности на фоне повышения среднегодовых значений температуры окружающей среды и понижения количества выпадающих осадков. Высокая антропогенная нагрузка, климатические изменения и крайне засушливое лето 2020 г. на Юге России привели к деградации пастбищных угодий и близлежащих территорий, что проявляется в виде песчаных (пыльных) бурь.

Ключевые слова: дистанционные исследования, космические снимки, вегетационный индекс, количество осадков, почвенный покров, биологическая продуктивность, температура воздуха

Благодарности: работа выполнена по темам госзаданий: ПИБР ДФИЦ РАН (№ 0172-2019-0014) «Динамика почвенного покрова и биопродуктивности экосистем Северо-Западного Прикаспия и Восточного Кавказа», Института геологии ДФИЦ РАН (№ НИОКТР АААА-А17-117021310199-9) «Ландшафтно-геохимическое районирование Прикаспийской низменности», Лаборатории КИПР ДФИЦ РАН (№ 0172-2019-0002) «Изучение сохранение и воспроизводство биологических ресурсов экосистем Западного Прикаспия».

Для цитирования: Биарсланов А.Б., Залибеков З.Г., Гасанова З.У., Магомедова М.Х.-М., Гаджиев И.Р. Опыт применения вегетационного индекса в дистанционных исследованиях динамики продуктивности почвенного покрова Терско-Кумской низменности // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. 2021. № 4. С. 81–89.

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

© Биарсланов А.Б., Залибеков З.Г., Гасанова З.У., Магомедова М.Х.-М., Гаджиев И.Р., 2021

BIOLOGICAL SCIENCES

Original article

APPLICATION EXPERIENCE OF THE VEGETATION INDEX
IN REMOTE SENSING RESEARCH OF SOIL COVER
PRODUCTIVITY DYNAMICS IN THE TEREK-KUMA LOWLANDA.B. Biarslanov^{1✉}, Z.G. Zalibekov², Z.U. Gasanova³, M.H.-M. Magomedova⁴, I.R. Gadzhiev⁵^{1,3,4}Precaspian Institute of Biological Resources, Dagestan Scientific Center, Russian Academy of Sciences, Makhachkala, Republic of Dagestan, Russia²Institute of Geology, Dagestan Federal Research Center, Russian Academy of Science, Makhachkala, Republic of Dagestan, Russia⁵Laboratory of Integrated Natural Resources Research of the West Caspian Region, Dagestan Federal Research Center, Russian Academy of Science, Makhachkala, Republic of Dagestan, Russia¹ab.biarslanov@mail.ru✉²bio@doc.dgu.ru³zgasanova@list.ru⁴milan-rom@mail.ru⁵gislam@bk.ru

Abstract. The possibility of a remote approach to investigate soil and vegetation covers dynamics over a long-term period has been considered. The paper presents the experience of using the vegetation index (VI), reflecting the state of vegetation. For VI determining the OneSoil online service (<https://app.onesoil.ai>) was used as a tool. Previously, key areas with different types of soil cover by texture, salinization degree, and vegetation cover were identified. Based on 45 different and multi-season satellite images with a given time resolution, a picture of the dynamics of changes in the values of VI scale limits by the degree of projected vegetation coverage was obtained. It's well known that vegetation is an indirect indicator of soil cover condition, which identifies soil cover condition with high accuracy. High anthropogenic pressing, climatic changes and extremely dry summer 2020 promoted intensive landscape degradation in the South of Russia. As a result, it was revealed that during the five-year period, negative changes in the annual values of the growing index decreased by almost 2.5 times.

Keywords: remote studying, satellite images, vegetation index, precipitation, soil cover, biological productivity, temperature of air

Acknowledgments: the work was carried out on the topics of the State Assignment: PIBR DPRC RAS (No. 0172-2019-0014) "Dynamics of soil cover and bioproductivity of ecosystems of the North-Western Pre-Caspian and Eastern Caucasus", Institute of Geology, DFRC RAS (No. NIOKTR AAAA-A17-117021310199-9) "Landscape-geochemical zoning of the Caspian lowland", Laboratory of Integrated Natural Resources Research DPRC RAS (No. 0172-2019-0002) "Study of the conservation and reproduction of biological resources of the ecosystems of the Western Caspian region".

For citation: Biarslanov A.B., Zalibekov Z.G., Gasanova Z.U., Magomedova M.H.M., Gadzhiev I.R. Application Experience of the Vegetation Index in Remote Sensing Research of Soil Cover Productivity Dynamics in the Terek-Kuma Lowland. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science*. 2021;(4):81-89. (In Russ.).

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

Введение

Исследования почвенного покрова (ПП) территорий Северного Дагестана, затрагивающие вопросы биологической продуктивности Терско-Кумской низменности, берут свое начало в 70-х гг. прошлого столетия. Результаты исследований отражены в тематических сборниках 1976–1988 гг., где приводится обоснование обобщающей концепции формирования общей биомассы и составляющих ее элементов в

системе почва – растение – животный мир [1, 2]. Резкое увеличение антропогенной нагрузки на единицу площади с повышением потребности человека в масштабном производстве продуктов рассматривалось как глобальная проблема.

Несмотря на все негативные последствия антропогенного воздействия, отгонное животноводство ввиду своей прибыльности и окупаемости продолжает быть одним из основных видов хозяйственной деятельности. Последствия антропогенного воздействия как основного фактора деградации ПП равнинной зоны Дагестана [3–5] являются объектом исследования современных ученых и исследователей.

Оценке экологических последствий антропогенной нагрузки, исследованию путей совершенствования агропроизводства для получения более качественной продовольственной продукции и сохранению состояния окружающей среды посвящены труды [6–10].

Помимо антропогенной нагрузки причиной деградации ПП является климатический фактор, приводящий к опустыниванию и аридизации. ПП Терско-Кумской низменности, несмотря на кажущуюся стационарную устойчивость и стабильность в условиях высокой антропогенной нагрузки и климатических изменений, достаточно динамичен. Данный факт находит свое отражение на состоянии ландшафтов аридных регионов, хрупких и отзывчивых к антропогенной деятельности человека. Последствием таких воздействий, как правило, является деградация, а в дальнейшем – потеря плодородного ПП и возникновение процессов опустынивания. Успешность почвозащитных мероприятий во многом зависит от оперативности реагирования на негативные изменения в ПП. Одним из современных направлений исследований растительного покрова является применение дистанционных методов при помощи различных вегетационных индексов (ВИ), основанных, как правило, на сканировании больших площадей со спутника или самолета [11]. Дистанционные методы исследования позволяют анализировать динамику состояния обширных территорий ПП в краткосрочном и многолетнем аспектах, что позволяет решать вопросы охраны природных ресурсов с достаточно высокой скоростью отклика на процессы деградации ПП.

Цель настоящего исследования – выявление динамики ВИ по данным космической съемки Земли, установление связей с усредненными годовыми значениями наземных (полевые и гидрометеорологические) исследований. Основными этапами реализации поставленной цели являются: анализ исследований прошлых лет, мероприятий по сохранению ПП, применение современных информационных ресурсов в решении вопросов оценки состояния почвенного и растительного покровов территорий отгонного животноводства в условиях аридного климата и высокой антропогенной нагрузки. Материалы исследования могут найти свое практическое применение при разработке цифровых систем мониторинга состояния ПП и рационального использования почвенных ресурсов для нужд агропромышленного комплекса.

Объект исследования

Климатические условия Терско-Кумской низменности характеризуются выраженной континентальностью: летний максимум достигает температуры 40–45 °С, нижний минимум – 20–25 °С ниже нуля. Среднегодовая скорость ветра достигает 10–15 м/с и более [12]. Средняя годовая температура составляет 10–13 °С выше нуля. Статистикой данных среднегодовых показателей температуры и количества атмосферных осадков за последние 15 лет выявлена динамика повышения значений температуры и снижения количества осадков. Установлено, что за последние пять лет, согласно данным онлайн-сервиса <https://rp5.ru/>, среднегодовая температура за 2016–2020 гг. повысилась с +12,6 до +13,6 °С.

Годовая сумма осадков составляет 200–300 мм. Вместе с тем среднегодовое количество осадков, по данным Кочубейской метеостанции Республики Дагестан, за 2016–2020 гг. заметно снизилось с 377 до 147 мм [13].

Исследования проводились на территории Кочубейской биосферной станции (КБС) общей площадью 3000 га, расположенной в центральной части Терско-Кумской низменности. Рельеф территории представлен слабонаклонной на север и северо-восток равниной с небольшими повышениями, направленными с востока на запад, прерываемыми местами остаточными следами сухоречий старого русла реки Кума. Рассматриваемая территория по характеру физико-географических условий относится к низменной зоне.

ПП представлен преимущественно светло-каштановыми, лугово-каштановыми карбонатными слабо-среднезасоленными разновидностями, луговыми разной степени засоления и солончаками типичными, корковыми, пухлыми. По величине площади второе место занимают солончаки типичные средне-тяжелосуглинистые. Минимальная площадь приходится на долю песков, закрепленных в разной степени. Экспериментальные работы проводились на светло-каштановых карбонатных легкосуглинистых почвах и солончаках типичных средне-тяжелосуглинистых.

Материалы и методы

Динамика ВИ изучалась по данным космической съемки Земли посредством выявления связей усредненных годовых значений наземных полевых и гидрометеорологических исследований.

ВИ рассчитывается в результате операций с разными спектральными диапазонами (каналами) данных дистанционного зондирования и имеет отношение к параметрам растительности в определенном пикселе снимка [14]. Определение ВИ выполнялось методом NDVI (normalized difference vegetation index – нормализованный вегетационный индекс). Этот числовой показатель качества и количества растительности на участке поля рассчитывался по спутниковым снимкам вычислением отношения между разностью интенсивностей отраженного света в красном (Red) и инфракрасном диапазоне (Nir) и их суммой $NDVI = (Nir - Red) / (Nir + Red)$ [15].

Полученные значения ВИ сопоставлялись с полевыми данными исследований. Достоверность данных уточнялась в соответствии с показателями NDVI (рис. 1).

Расчет ВИ по ключевым участкам проведен автоматизированным онлайн-сервисом OneSoil <https://app.onesoil.ai>. Для этой цели проанализированы разновременные и разносезонные снимки с заданным временным разрешением: ежегодно в течение девяти месяцев с охватом трех сезонов – весна – лето – осень (с марта по ноябрь включительно). Были проанализированы показатели ПП (влажность, засоление), растительности (масса эфемеров, урожайность) и определена степень их корреляции со значениями ВИ.

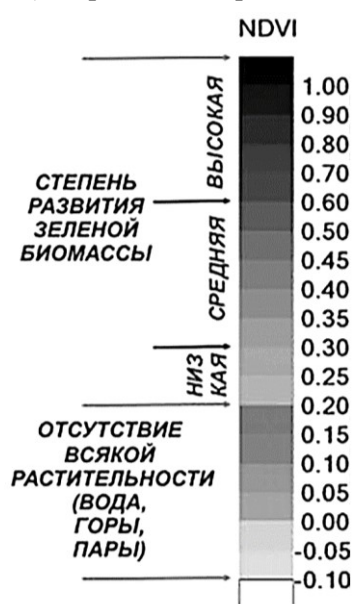


Рис. 1. NDVI и соответствующая ему степень развития зеленой биомассы / Fig. 1. NDVI and the corresponding degree of development of green biomass

Полевые исследования. Почвенно-геоботанические исследования проводились в Ногайском административном районе. В качестве ключевых выделены четыре участка с различными типами ПП, отличающиеся характеристиками гранулометрического состава, степенью засоления, растительным покровом. На ключевых площадках заложены разрезы (географические координаты фиксировались GPS-навигатором), даны морфологические описания почвенных профилей. Проведены геоботанические описания численности видов и величины надземной фитомассы для определения видового состава. Физико-химические исследования проведены по общепринятым методикам.

Состояние растительных сообществ изучалось путем оценки проективного покрытия, видового разнообразия, численности видов и величины надземной части растительности, а также фиксации высоты растительного покрова и фаз вегетации.

Учет надземной фитомассы проводили общепринятыми методами. Обилие растений в травостоях определяли по пятибалльной шкале Друде, где 5 – густые заросли вида; 4 – полное доминирование растения; 3 – доминант или субдоминант; 2 – субдоминант или сопутствующее растение; 1 – сопутствующие и единичные виды, представленные несколькими экземплярами.

Результаты исследования и их обсуждение

Участок I (N44°41'24,0942" E46°24'32,5361") – лесополоса, расположенная в северо-восточной части КБС (рис. 2).

Лесополоса была заложена в 1992 г. вблизи искусственного озера в условиях повышенного доступа почвенной влаги. Тип почвы – светло-каштановая карбонатная, супесчаная, непрочная глыбистая, слабозасоленная, среднетяжелая. Древесная растительность представлена в основном такими породами,

как вяз мелколистный (*Ulmus pumila*), акация белая (*Robinia pseudoacacia*) и лох узколистный (*Elaeagnus angustifolia*). Ход роста деревьев соответствует особенностям жизни древесных растений в экстремальных условиях сухой степи и полупустыни. Согласно [16], первые десять лет наблюдался интенсивный рост древесной растительности в высоту и по диаметру ствола, а в последующие десять лет рост замедлился. К 20-летнему возрасту состояние большинства исследованных видов древесных пород ухудшилось. Проведенный анализ NDVI за пятилетний период (2016–2020 гг.) выявил снижение среднегодового значения NDVI от 0,34 до 0,24 (таблица).

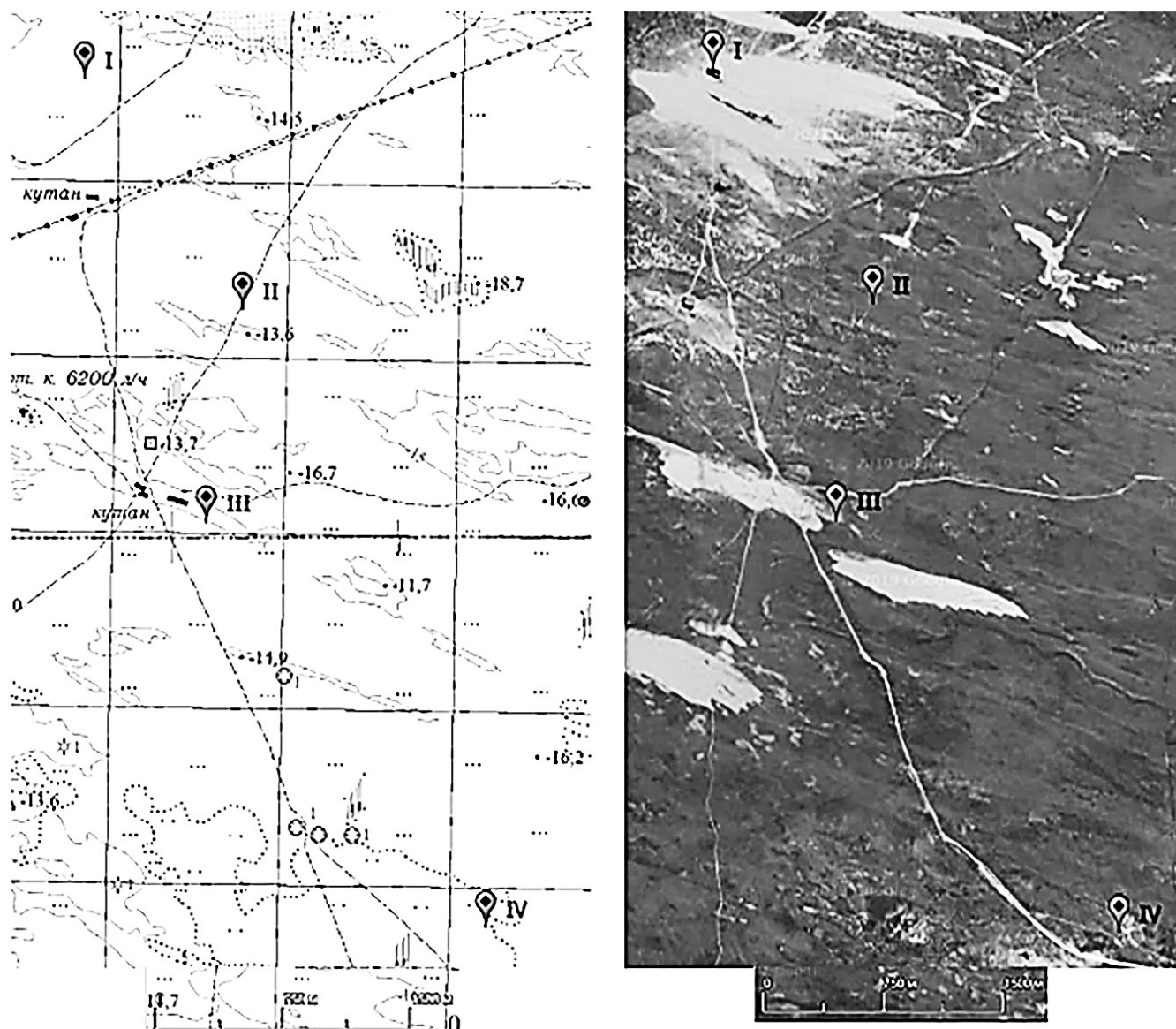


Рис. 2. Картографическое отображение ключевых площадок средствами программы «SAS.Планета»
/ Fig. 2. Mapping of key plots by means of SAS.Planet program

Негативная динамика NDVI древесных насаждений свидетельствует об ухудшении водного режима деревьев, который возникает в связи с освоением корневой системой растений площади питания, снижением количества доступной почвенной влаги из-за иссушения озера.

Аналогично проанализирован NDVI для остальных трех ключевых участков (II, III, IV), используемых в качестве пастбищ. Высокие показатели NDVI приходятся на весенний период вегетационного сезона (март, апрель, май). В этот период отмечается максимальный рост эфемеров. Разброс в значениях NDVI связан с особенностями микрорельефа.

Участки II–IV (рис. 2) расположены юго-восточнее участка I с интервалом 1,6; 1,2; 2,8 км соответственно и используются в качестве пастбищ:

- участок II (N44°40'41,4954" E46°25'14,3461") представлен светло-каштановой легкосуглинистой среднемошной солончаковой почвой. Растительный покров участка – полынно-злаковые группировки;
- участок III (N44°40'02,3000" E46°25'04,7601") представлен светло-каштановой супесчаной мощной солончаковой почвой. Растительный покров участка – полынно-злаковые группировки;
- участок IV (N44°38'47,4477" E46°26'18,4927") представлен солончаком типичным. Растительность участка – полынные сообщества с солянковыми группировками.

Основные показатели, формирующие значения ВИ
/ The main indicators that form the values of the vegetation index

Год	Средне-годовой NDVI	Суммарная годовая урожайность эфемеров, ц/га	Суммарная влажность корнеобитаемого слоя, %	Степень развития зеленой биомассы	Среднегодовая урожайность, ц/га	Осадки, мм	Среднегодовая температура, °C
Ключевой участок I							
2016	0,34	–	–	Средняя	–	377	12,6
2017	0,31	–	–	»	–	195	12,9
2018	0,3	–	–	»	–	217	13,2
2019	0,27	–	–	Низкая	–	183	13,4
2020	0,24	–	–	»	–	147	13,6
Ключевой участок II							
2016	0,26	Нет данных	Нет данных	Низкая	Нет данных	377	12,6
2017	0,23	7,0	10,9	»	1,4	195	12,9
2018	0,22	5,14	8,72	»	2,1	217	13,2
2019	0,21	1,54	4,7	»	1,5	183	13,4
2020	0,16	0,79	9,59	Отсутствует	0,15	147	13,6
Ключевой участок III							
2016	0,29	Нет данных	Нет данных	Низкая	Нет данных	377	12,6
2017	0,26	22,14	7,34	»	2,0	195	12,9
2018	0,24	6,87	6,71	»	2,0	217	13,2
2019	0,24	1,1	10,12	»	1,0	183	13,4
2020	0,15	0,53	11,28	Отсутствует	0,1	147	13,6
Ключевой участок IV							
2016	0,25	Нет данных	Нет данных	Низкая	Нет данных	377	12,6
2017	0,18	1,37	29,53	»	2,0	195	12,9
2018	0,15	0,56	37,06	Отсутствует	4,0	217	13,2
2019	0,13	0,5	24,89	»	4,0	183	13,4
2020	0,10	0,46	32,12	»	0,09	147	13,6

ВИ на ключевых участках II и III меняется в пределах 0,10–0,29 (таблица), что соответствует низкой степени развития зеленой биомассы или ее полному отсутствию (рис. 1). Основную биомассу разнотравья составляют злаки и эфемеры: ковыль волосатик (*Stipa capillata*), костер кровельный (*Anisantha tectorum*), бурачок пустынный (*Alyssum desertorum*), мятлик луковичный (*Poa bulbosa*), мортук восточный (*Eremopyrum orientale*). Корреляция значений урожайности зеленой биомассы и NDVI достаточно достоверна.

Снижение среднегодовых значений атмосферных осадков и увеличение температур за период 2017–2020 гг. повлияли на вес зеленой биомассы (уменьшился) по всем ключевым участкам. Урожайность снизилась с 22,14 до 0,46 ц/га (таблица), что впоследствии отразилось в негативной динамике NDVI.

Урожайность в целом характеризует общее количество биомассы на земной поверхности с учетом высохших остатков злаковых растений, полыни и прочих видов, не влияющих на значение NDVI. Урожайность и разреженность растительного покрова не согласуются с показателями NDVI, но достаточно достоверно коррелируют с количеством выпадающих осадков (таблица).

Содержание влаги в корнеобитаемом почвенном слое является суммарным значением показателей влажности генетических горизонтов верхнего слоя до 50–60 см. Здесь закономерностей корреляции с NDVI выявить не удалось, но необходимо отметить факт повышения влажности в 2020 г. Этот период характеризовался низким выпадением осадков, растительность практически отсутствовала, а земная поверхность была покрыта развеваемыми песками, что и способствовало повышенной влажности относительно предыдущих лет.

Отрицательная динамика растительного покрова и NDVI являются следствием уменьшения количества выпадающих осадков и увеличения среднегодовых значений температур. Анализируя данные, приведенные в таблице, следует отметить, что значения ВИ отражают высокую степень корреляции с суммарными значениями годовой массы эфемеров, но не согласуются с данными урожайности и содержанием влаги корнеобитаемого почвенного слоя.

Выводы

Установлено, что на ключевом участке I за период 2016–2020 гг. негативная динамика NDVI отражает состояние древесных насаждений, что является следствием ухудшения водного режима деревьев, который возникает в связи с уменьшением количества доступной почвенной влаги.

Выявлено, что ключевые участки II, III и IV схожи по своим значениям, имеют менее выраженную динамику уменьшения NDVI, и это достаточно достоверно отражается в показателях зеленой биомассы (эфемеры, злаковые).

При анализе значений почвенной влаги и урожайности установлена их достоверная корреляция и отсутствие связей с показателями ВИ.

В результате установлено, что за пятилетний период среднегодовые значения NDVI по ключевым участкам снизились почти в 1,5–2,5 раза.

Список источников

1. Залибеков З.Г., Яруллина Н.А. Первичная биологическая продуктивность экосистем Терско-Кумской низменности Кавказа // Биологическая продуктивность дельтовых экосистем Прикаспийской низменности Кавказа. Махачкала: Изд-во Даг. ФАН СССР, 1978. С. 31–35.
2. Савич В.И., Саидов А.К., Шнее Т.В., Рами Каба. Дигрессия, падение плодородия и техногенные нагрузки как факторы опустынивания почв // Изв. Тимирязевской с.-х. академии. 2011. № 2. С. 123–133.
3. Добровольский Г.В., Федоров К.Н., Стасюк Н.В., Можарова Н.В., Быкова Е.П. Типизация структур почвенного покрова равнинного Дагестана и его антропогенная устойчивость // Почвоведение. 1991. № 3. С. 5–13.
4. Гасанова З.У., Абдурашидова П.А., Желновакова В.А., Исламгереева З.А. Почвы аридных регионов Северо-Западного Прикаспия разновременных режимов заповедования // Вестн. Даг. науч. центра. 2013. № 48. С. 38–44.
5. Седых В.А., Котенко М.Е., Садуакасов Н.М., Савич К.В. Бонитировка почв предгорных равнин сухостепной зоны // Плодородие. 2018. № 2 (101). С. 39–42.
6. Залибеков З.Г., Мамаев С.А., Биарсланов А.Б., Магомедов Р.А., Асгерова Д.Б., Галимова У.М. Об использовании пресных подземных вод засушливых регионов мира в борьбе с опустыниванием земель // Аридные экосистемы. 2019. Т. 25, № 2 (79). С. 3–12.
7. Гасанов Г.Н., Асадулаев З.М., Асварова Т.А., Гасанова З.У., Гаджиев К.М., Баширов Р.Р., Абдулаева А.С., Ахмедова З.Н., Мусаев М.Р., Магомедов Н.Р., Айтеемиров А.А., Десинов С.Л. Экологические аспекты формирования солончака реградированного в Терско-Кумской низменности Прикаспия // Юг России: экология, развитие. 2019. Т. 14, № 4. С. 86–97.
8. Кулик К.Н., Петров В.И., Рулев А.С., Кошелева О.Ю., Шинкаренко С.С. К 30-летию «генеральной схемы по борьбе с опустыниванием Черных земель и Кизлярских пастбищ» // Аридные экосистемы. 2018. Т. 24, № 1 (74). С. 5–12.
9. Магомедов Ш.М., Садыков М.М. Экологические последствия нерационального использования Черных земель и Кизлярских пастбищ // Научный фактор интенсификации и повышения конкурентоспособности отраслей АПК. Махачкала, 2017. С. 217–222.

10. Стальмакова В.П., Ашурбекова Т.Н. Система ведения сельского хозяйства – экологические аспекты // Проблемы развития АПК региона. 2016. Т. 28, № 4 (28). С. 62–66.
11. Гунин П.Д., Дедков В.П., Данжалова Е.В., Бажа С.Н., Золотокрылин А.Н., Казанцева Т.И. О применении NDVI для мониторинга состояния степных и пустынных экосистем Гоби // Аридные экосистемы. 2019. Т. 25, № 3 (80) С. 45–52.
12. Агроклиматический справочник Дагестана. Л.: Гидрометеорология, 1963. С. 10–41.
13. Погода в 243 странах мира. URL: <https://rp5.ru/> (дата обращения: 24.09.2021).
14. Вегетационные индексы. Основы, формулы, практическое использование. URL: <http://mapexpert.com.ua> (дата обращения: 16.09.2020).
15. Как свет показывает здоровье растений. URL: <https://blog.onesoil.ai/ru> (дата обращения: 16.09.2020).
16. Муратчаева П.М.-С. О результатах испытания некоторых древесных пород для защитного лесоразведения в засушливых условиях равнинного Дагестана // Тр. Ин-та геологии Даг. науч. центра РАН. 2016. № 67. С. 127–130.

References

1. Zalibekov Z.G., Yarullina N.A. Primary biological productivity of ecosystems of the Terek-Kuma lowland of the Caucasus. *Biological productivity of delta ecosystems of the Caspian lowland of the Caucasus*. Makhachkala: Dagestan branch of the USSR Press; 1978:31-35. (In Russ.).
2. Savich V.I., Saidov A.K., Shnee T.V., Rami Kaba. Digression, fertility decline and technogenic pressing as factors of soil desertification. *Izvestiya Timiryazevskoi sel'skokhozyaistvennoi akademii = Izvestiya of Timiryazev Agricultural Academy*. 2011;(2):123-133. (In Russ.).
3. Dobrovolskii G.V., Fedorov K.N., Stasyuk N.V., Mozharova N.V., Bykova E.P. Typification of the soil cover structures of Dagestan lowland and its anthropogenic stability. *Pochvovedenie = Eurasian Soil Science*. 1991;(3):5-13. (In Russ.).
4. Gasanova Z.U., Abdurashidova P.A., Zhelnovakova V.A., Islamgereeva Z.A. Soils of arid regions of the North-Western Caspian region with different conservation regimes. *Vestnik Dagestanskogo nauchnogo tsentra = Herald of Dagestan Scientific Center*. 2013;(48):38-44. (In Russ.).
5. Sedykh V.A., Kotenko M.E., Saduakasov N.M., Savich K.V. Soils' bonitization of the of the foothill plains of the dry-steppe zone. *Plodородie*. 2018;(2):39-42. (In Russ.).
6. Zalibekov Z.G., Mamaev S.A., Biarslanov A.B., Magomedov R.A., Asgerova D.B., Galimova U.M. The use of fresh groundwater from arid regions of the world in the fight against land desertification. *Aridnye ekosistemy = Arid Ecosystems*. 2019;25(2):3-12. (In Russ.).
7. Gasanov G.N., Asadulaev Z.M., Asvarova T.A., Gasanova Z.U., Gadzhiev K.M., Bashirov R.R., Abdulaeva A.S., Akhmedova Z.N., Musaev M.R., Magomedov N.R., Aitemirov A.A., Desinov S.L. Ecological Aspects of the Formation of Regraded Solonchak in the Terek-Kuma Lowland of the Caspiy. *Yug Rossii: ekologiya, razvitie = South of Russia: Ecology, Development*. 2019;14(4):86-97. (In Russ.).
8. Kulik K.N., Petrov V.I., Rulev A.S., Kosheleva O.Yu., Shinkarenko S.S. On the 30th anniversary of the "General scheme for desertification combating of Black lands and Kizlyar pastures". *Aridnye ekosistemy = Arid Ecosystems*. 2018; 24(1):5-12. (In Russ.).
9. Magomedov Sh.M., Sadykov M.M. Ecological consequences of irrational use of Black Lands and Kizlyar pastures. *The scientific factor of intensification and increase of competitiveness of agroindustrial complex branches*. Makhachkala, 2017:217-222. (In Russ.).
10. Stal'makova V.P., Ashurbekova T.N. Agricultural management system - environmental aspects. *Problemy razvitiya APK regiona = Development Problems of Regional Agro-Industrial Complex*. 2016;28(4):62-66. (In Russ.).
11. Gunin P.D., Dedkov V.P., Danzhalova E.V., Bazha S.N., Zolotokrylin A.N., Kazanceva T.I. NDVI for Monitoring of the State of Steppe and Desert Ecosystems of the Gobi. *Aridnye ekosistemy = Arid Ecosystems*. 2019;25(3):45-52. (In Russ.).
12. *Agroclimatic reference book of Dagestan*. Leningrad: Gidrometeorologiya Publ.; 1963:10-41. (In Russ.).
13. *Weather in 243 countries of the world*. Available from: <https://rp5.ru/> [Accessed 29th September 2021]. (In Russ.).
14. *Vegetation indices. Basics, formulas, practical use*. Available from: <http://mapexpert.com.ua> [Accessed 16th September 2020]. (In Russ.).
15. *How light shows the health of plants*. Available from: <https://blog.onesoil.ai/ru> [Accessed 16th September 2020]. (In Russ.).
16. Muratchaeva P.M.-S. On the results of testing some tree species for protective afforestation in arid conditions of lowland Dagestan. *Trudy Instituta geologii Dagestanskogo nauchnogo tsentra RAN = Proceedings of the Institute of Geology, Dagestan Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2016;(67):127-130. (In Russ.).

Информация об авторах

Биарсланов Ахмед Бийсолтанович – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, лаборатория почвенных и растительных ресурсов.

Залибеков Залибек Гаджиевич – доктор биологических наук, главный научный сотрудник, профессор, лаборатория региональной геологии и твердого минерального сырья.

Гасанова Зарема Улубиевна – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, лаборатория почвенных и растительных ресурсов.

Магомедова Милана Хан-Магомедовна – научный сотрудник, лаборатория экологической биофизики.

Гаджиев Ислам Русланович – лаборант-исследователь.

Information about the authors

Ahmed B. Biarslanov - Candidate of Science (Biology), Senior Researcher, Laboratory of Soil and Plant Resources.

Zalibek G. Zalibekov - Doctor of Science (Biology), Chief Researcher, Laboratory of Regional Geology and Solid Mineral Raw Materials.

Zarema Ul. Gasanova - Candidate of Science (Biology), Senior Researcher, Laboratory of Soil and Plant Resources.

Milana Kh.-M. Magomedova - Researcher, Laboratory of Ecological Biophysics.

Islam R. Gadzhiev - Laboratory Assistant, Researcher.

Статья поступила в редакцию 25.09.2021; одобрена после рецензирования 20.10.2021; принята к публикации 26.11.2021.

The article was submitted 25.09.2021; approved after reviewing 20.10.2021; accepted for publication 26.11.2021.

Научная статья

УДК 597.2/5:574.622

doi: 10.18522/1026-2237-2021-4-90-94

К ИЗУЧЕНИЮ БИОЛОГИИ ЛЕЩА ОБЫКНОВЕННОГО (ABRAMIS BRAMA L., 1758) ЮГО-ЗАПАДНОГО ШЕЛЬФА СЕВЕРНОГО КАСПИЯ

Каис Магомедович Гусейнов^{1✉}, Айша Шарапатиновна Гасанова²,
Марина Владимировна Хлопкова³

^{1,2,3}Прикаспийский институт биологических ресурсов ДФИЦ РАН, Махачкала, Республика Дагестан, Россия

²Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), Махачкалинский филиал, Махачкала, Республика Дагестан, Россия

^{1,2}kais61@mail.ru✉

³hlopkovam@mail.ru

Аннотация. Шельф юго-западной части Северного Каспия является одним из самых высокопродуктивных районов на Каспии. Основную долю уловов прибрежного комплекса в Республике Дагестан в настоящее время составляют ценные карповые виды рыб. Одним из наиболее многочисленных видов является лещ обыкновенный *Abramis brama* L., уступающий по численности только воле *Rutilus rutilus aspicus* (Jak.). Лещ составляет 11,3–32 % от численности уловов. В исследуемый период лещ был представлен особями 2–10 лет, 82 % составляли рыбы 3–6 лет. Средняя длина рыбы достигала 33,9 см, масса – 898,9 г.

Лещ характеризовался хорошим темпом роста и высокой упитанностью. Соотношение самок и самцов в уловах составляло 44,9 и 55,1 % соответственно, плодовитость – 121,1 тыс. икринок. Суточный ритм питания имеет ярко выраженную периодичность. Основу пищи взрослого леща составляют ракообразные и моллюски, молоди – амфиподы.

Ключевые слова: Северный Каспий, юго-западный шельф, лещ обыкновенный *Abramis brama* L., биомасса, плодовитость, упитанность, пищевой комок

Для цитирования: Гусейнов К.М., Гасанова А.Ш., Хлопкова М.В. К изучению биологии леща обыкновенного (*Abramis brama* L., 1758) юго-западного шельфа Северного Каспия // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. 2021. № 4. С. 90–94.

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

Original article

TO THE STUDY OF THE BIOLOGY OF ABRAMIS BRAMA L. (1758) OF THE SOUTHWESTERN SHELF OF THE NORTH CASPIAN

Kais M. Guseynov^{1✉}, Aysha Sh. Gasanova², Marina V. Khlopkova³

^{1,2,3}Precaspian Institute of Biological Resources, Dagestan Scientific Center, Russian Academy of Sciences, Makhachkala, Republic of Dagestan, Russia

²Moscow Automotive and Road State Technical University (MADI), Makhachkala Branch, Makhachkala, Republic of Dagestan, Russia

^{1,2}kais61@mail.ru✉

³hlopkovam@mail.ru

Abstract. Shelf of the southwestern part of the North Caspian is one of the most highly productive areas in the Caspian Sea. The main share of catches of the coastal complex in the Republic of Dagestan currently consists of valuable carp species. One of the most numerous species is the bream *Abramis brama* L., second in number only to the roach *Rutilus rutilus aspicus* (Jak.). Bream makes up 11.3–32 % of the number of catches. In the study period, bream was represented by individuals of the age group of 2–10 years, 82 % of which were fish of 3–6 years. The average length of the

© Гусейнов К.М., Гасанова А.Ш., Хлопкова М.В., 2021

fish was 33,9 cm, weight - 898,9 g. The bream was characterized by a good growth rate and high fatness. The ratio of females and males in the catches was 44.9 and 55.1 %, respectively, and the average fecundity was 121.1 thousand eggs. The daily rhythm of nutrition has a pronounced periodicity. The main food of adult bream is made up of crustaceans and mollusks, while juveniles are amphipods.

Keywords: North Caspian, southwestern shelf, *Abramis brama* L., biomass, fertility, fatness, food bed

For citation: Guseynov K.M., Gasanova A.Sh., Khlopkova M.V. To the Study of the Biology of *Abramis brama* L. (1758) of the Southwestern Shelf of the North Caspian. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science*. 2021;(4):90-94. (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

Шельф юго-западного района Северного Каспия (Крайновское побережье Каспийского моря) – один из самых высокопродуктивных районов на Каспии. Основную долю уловов составляют ценные карповые виды рыб. Одним из наиболее многочисленных видов является лещ *Abramis brama* L., уступающий по численности только вобле *Rutilus rutilus aspicus* (Jak.).

Между тем общеизвестно, что непостоянство уровня режима Каспия, биологические инвазии и антропогенное загрязнение привели к трансформации физико-химических свойств и экосистемной структуры моря, оказали существенное влияние на состояние биологических сообществ в целом и на запасы основных промысловых видов рыб Западно-Каспийского региона в частности. Это определяет актуальность представленной работы.

Материал и методика

Работы проводили с мая по сентябрь 2017, 2018 гг. Использовали 30-футовый трал с размером ячеи в кутце 8 мм и ставные сети с шагом ячеи от 32 до 60 мм. Из уловов отбирали среднюю пробу и обрабатывали по общепринятым методикам [1–7]. Для расчёта абсолютной индивидуальной плодовитости из середины ястыка брали навеску икры массой 1 г. Рост рыб изучали по уравнению Берта-ланфи, коэффициент упитанности находили по Фультону, стадию зрелости половых продуктов устанавливали по шкале Мейена, коэффициент зрелости – как отношение массы гонад к массе тела рыбы, выраженное в процентах [8, 9]. Пищевые организмы определяли по Атласу беспозвоночных Каспийского моря [10]. Обработку материала по питанию проводили количественно-весовым методом [11]. При вычислении индексов наполнения и процентного состава пищи использовали фактические веса кормовых организмов.

Результаты и обсуждение

Каспийское море занимает одно из ведущих мест по запасам таких ценных видов рыб, как вобла, лещ, сазан, судак, кутум, кефаль, килька, карп, окунь, лосось, обычная щука.

Лещ обыкновенный (*Abramis brama* L.) – пресноводная рыба, единственный представитель рода лещей (*Abramis*) из семейства карповых (Cyprinidae), отряда карпообразных (Cypriniformes). Обитает в Центральной и Северной Европе, в бассейнах Северного, Балтийского, Черного, Азовского, Аральского и Каспийского морей, в озере Балхаш, в низовье Сырдарьи, акклиматизирован в Сибири, в бассейнах рек Обь, Иртыш, Енисей и в Зауральских озёрах, в Северной Двине. В Закавказье встречается лишь у Ленкорани, в озере Палеостомы в Мингечаурском водохранилище [12, 13].

Лещ – ценная промысловая рыба. Максимальный отечественный вылов леща в конце 1930-х гг. составлял 120 тыс. т, в конце 1990-х – 25–32 тыс. т. Мировой вылов в 1999 г. достигал 62,9 тыс. т. С 2000 г. уловы леща стали снижаться, и к 2012 г. его вылов достиг минимального значения [14].

Уловы рыб прибрежного комплекса в Республике Дагестан достигают около 2 тыс. т. Основная доля в последнее время приходится на полупроходные и озерно-речные рыбы [15, 16]. При этом лещ составляет 11,3–32 % от численности уловов.

В исследуемый период лещ представлен особями в возрасте от 2 до 10 лет. Основу улова составляли рыбы от 3 до 6 лет. Их доля – около 82 %. Удельный вес двухлеток крайне незначителен. Средняя длина леща – 33,9 см, масса – 898,9 г (табл. 1).

В исследуемой акватории лещ характеризовался хорошим темпом роста (значения уравнения Бергаланфи: $L = 47,2$ см, $K = 0,16$, $t_0 = -2,25$) и высокой упитанностью (1,57–3,02 %, в среднем 1,94 %). В мае средняя упитанность составляла 2,04 %, изменяясь от 1,98 до 2,13 %, в сентябре – 2,14 %, колеблясь от 2,1 до 2,25 %. Количество самок и самцов в уловах 44,9 и 55,1 % соответственно. Плодовитость леща колеблется от 33,7 до 181,2 тыс. икринок, в среднем 121,1 тыс. (табл. 2).

Коэффициент зрелости гонад более высокий весной, снижается к лету и несколько возрастает к осени (табл. 3). Подобные колебания коэффициента зрелости характерны для рыб, нерестящихся в весенний период, и связаны с особенностями развития половых продуктов.

Основу пищи взрослого леща составляют ракообразные и моллюски (табл. 4).

Таблица 1 / Table 1

Размерно-весовые показатели *Abramis brama*: масса, m, абсолютная длина, l
/ **Size and weight parameters of *Abramis brama*: weight, m, length, l**

Возраст, лет	l, см	m, г
2	23,1	258
3	26,6	340
4	29,6	495
5	32,5	555
6	36,5	967
7	38,4	1030
8	39,7	1261
9	39,4	1479
10	40,1	1700
Средняя	33,9	898,9

Таблица 2 / Table 2

Абсолютная плодовитость *Abramis brama* (n – количество рыб) / Fertility of *Abramis brama* (n - number of fish)

l, см	m, г	n	Плодовитость, тыс. шт. икринок		
			min	max	Средняя
26,1–27,0	223	8	32,0	80,3	56,8
27,1–28,0	405	6	50,8	134,6	110,0
28,1–29,0	477	8	35,8	167,4	139,9
29,1–30,0	540	8	70,0	180,8	148,8
26,1–30,0	411,25	30	–	–	121,1

Таблица 3 / Table 3

Коэффициент зрелости, % / Absolute individual fertility, %

Время года	min	max	Среднее
Весна	2,1	11,2	9,4
Лето	1,3	6,6	3,1
Осень	1,7	8,5	4,6

Примечание. Количество рыб $n=33$.

Таблица 4 / Table 4

Состав пищевого комка / Composition of the food lump

Компонент пищи, %	l, см						
	2–4	4,1–6	6,1–8	8,1–10	10,1–15	15,1–20	Более 20
<i>Черви</i>							
Нереис	–	6,5	6,6	6,1	6,2	16,9	11,3
<i>Ракообразные</i>							
Астракода	–	–	–	–	–	5,3	5,5
Амфиподы	–	79,4	76,0	62,3	20,0	41,0	18,9
Кумацеи	–	14,1	4,0	–	3,0	4,9	9,3
Мизиды	–	–	13,4	21,6	–	4,3	2,4
<i>Моллюски</i>							
Абра	–	–	–	–	30,2	12,8	15,7
Церастодерма	–	–	–	–	23,0	4,7	13,1
Хипанис	–	–	–	–	–	0,1	–
Монодакна	–	–	–	–	–	–	0,3
Дрейсена	–	–	–	–	8,2	–	6,8
Насекомые	100	–	–	10,0	2,1	–	2,6
Растительность	–	–	–	–	1,0	6,2	2,1
Грунт	–	–	–	–	5,1	2,6	8,3
Прочее	–	–	–	–	1,2	1,2	3,7
Кол-во рыб, экз.	8	30	18	10	14	11	11
Индекс наполнения кишечника, %	20,0	27,3	37,3	34,2	26,3	18,3	20,1

Из ракообразных наиболее интенсивно потребляются амфиподы и кумацеи, из моллюсков – абра и церастодерма. Черви устойчиво сохраняются в рационе леща всех размерных групп, тогда как доля моллюсков варьирует.

Общеизвестно, что лещ питается только в светлое время суток, тогда как ночью интенсивность нагула молоди леща равна нулю. Суточный ритм питания имеет ярко выраженную периодичность: два максимума – утренний и вечерний и два минимума – слабо выраженный дневной и ярко выраженный ночной. Главной пищей молоди леща длиной от 2 до 10 см являются амфиподы.

Заключение

Лещ *Abramis brama* L. Крайновского побережья дагестанского района Каспия в исследуемый период был представлен особями возрастной группы 2–10 лет, 82 % которой составляли особи 3–6 лет. Средняя длина рыбы достигала 33,9 см, масса – 898,9 г. Лещ характеризовался хорошим темпом роста и высокой упитанностью. Соотношение самок и самцов составляло 44,9 и 55,1 %, плодовитость – 121,1 тыс. икринок. Суточный ритм питания имеет ярко выраженную периодичность. Основу пищи взрослого леща составляют ракообразные и моллюски, молоди – амфиподы.

В исследуемой акватории сложились благоприятные условия для развития ихтиофауны.

Список источников

1. Шорыгин А.А. Питание и пищевые взаимоотношения рыб Каспийского моря. М.: Пищепромиздат, 1952. 268 с.
2. Чугунов Н.И. Методика изучения возраста и роста рыб. М.: Сов. наука, 1959. С. 6–33.
3. Правдин И.Ф. Руководство по изучению рыб. М., 1966. 375 с.
4. Коблицкая А.Ф. Определение нереста пресноводных рыб. М.: Легкая и пищевая промышленность. 1966. 110 с.
5. Коблицкая А.Ф. Изучение молоди пресноводных рыб. М.: Легкая и пищевая промышленность, 1981. 189 с.
6. Шихибабеков М.М. Методические указания по определению стадий зрелости гонад и половых продуктов некоторых промысловых рыб. М.: ВАСХНИЛ, 1980. 123 с.
7. Петлина А.П. Определитель плодовитости в стадии зрелости рыб. Томск: Изд-во Томск. гос. ун-та, 1987. 106 с.
8. Мина М.В., Клевезаль Г.А. Рост животных. Анализ на уровне организма. М.: Наука, 1976. 291 с.
9. Мейен В.А. К вопросу о годовом цикле изменения яичников костистых рыб // Изв. АН СССР. Сер. биол. 1939. № 3. С. 389–420.
10. Атлас беспозвоночных Каспийского моря / под ред. Я.А. Бирштейна, Л.Г. Виноградова, Н.Н. Кондакова, М.С. Кун, Т.В. Астаховой, Н.Н. Романовой. М.: Пищевая промышленность, 1968. 416 с.
11. Методическое пособие по изучению питания и пищевых взаимоотношений рыб в естественных условиях. М.: Наука, 1974. 254 с.
12. Решетников Ю.С., Котляр А.Н., Расс Т.С., Шатуновский М.И. Пятиязычный словарь названий животных. Рыбы / под общ. ред. В.Е. Соколова. М.: Рус. язык, 1989. С. 133.
13. Смагин А.И. Экология водоемов зоны техногенной радиационной аномалии на Южном Урале: автореф. дис. ... д-ра биол. наук. Пермь, 2008. 50 с.
14. Промысловые рыбы России: в 2 т. / под ред. О.Ф. Гриценко, А.Н. Котляра, Б.Н. Котенёва. М.: Изд-во ВНИРО, 2006. Т. 1. 656 с.
15. Абдусаматов А.С. Современное состояние и эколого-экономические перспективы развития рыбного хозяйства Западно-Каспийского региона России: автореф. дис. ... д-ра биол. наук. Махачкала, 2004. 46 с.
16. Левашина Н.В., Иванов В.П. Промысловое использование популяции леща (*Abramis brama* L., 1758) в Волго-Каспийском районе // Вестн. АГТУ. Рыбное хозяйство. 2014. № 2. С. 37–42.

References

1. Shorygin A.A. *Nutrition and nutritional relationships of fish in the Caspian Sea*. Moscow: Pishchepromizdat Publ.; 1952. 268 p. (In Russ.).
2. Chugunov N.I. *Methodology for studying the age and growth of fish*. Moscow: Sovetskaya nauka Publ.; 1959:6-33. (In Russ.).
3. Pravdin I.F. *Guide to the study of fish*. Moscow, 1966. 375 p. (In Russ.).

4. Koblitskaya A.F. *Determination of spawning of freshwater fish*. Moscow: Legkaya i pishchevaya promyshlennost' Publ.; 1966. 110 p. (In Russ.).
5. Koblitskaya A.F. *Study of juvenile freshwater fish*. Moscow: Legkaya i pishchevaya promyshlennost' Publ.; 1981. 189 p. (In Russ.).
6. Shikhshabekov M.M. *Guidelines for determining the stages of maturity of gonads and reproductive products of some commercial fish*. Moscow: VASKHNIL Press; 1980. 123 p. (In Russ.).
7. Petlina A.P. *Determinant of fertility at the stage of fish maturity*. Tomsk: Tomsk State University Press, 1987. 106 p. (In Russ.).
8. Mina M.V., Klevezal G.A. *The growth of animals. Body-level analysis*. Moscow: Nauka Publ.; 1976. 291 p. (In Russ.).
9. Meyen V.A. To the question of the annual cycle of changes in the ovaries of teleost fishes. *Izv. AN SSSR. Ser. biol. = Proceedings of the USSR Academy of Sciences. Biological Series*. 1939;(3):389-420.
10. Birshstein Ya.A., Vinogradova L.G., Kondakova N.N., Kuhn M.S., Astakhova T.V., Romanova N.N., eds. *Atlas of invertebrates of the Caspian Sea*. Moscow: Pishchevaya promyshlennost' Publ.; 1968. 416 p. (In Russ.).
11. *Methodological manual for the study of nutrition and food relationships of fish in natural conditions*. Moscow: Nauka Publ.; 1974. 254 p. (In Russ.).
12. Reshetnikov Yu.S., Kotlyar A.N., Rass T.S., Shatunovsky M.I. *A five-language dictionary of animal names*. *Fish*. V.E. Sokolov, ed. Moscow: Russkii yazyk Publ.; 1989:133. (In Russ.).
13. Smagin A.I. *Ecology of reservoirs in the zone of technogenic radiation anomaly in the Southern Urals*. Dissertation Thesis. Moscow, 2008. 51 p. (In Russ.).
14. Gritsenko O.F., Kotlyar A.N., Kotenev B.N., eds. *Commercial fish of Russia*: 2 vol. Moscow: VNIRO Press; 2006. Vol. I. 656 p. (In Russ.).
15. Abdusamadov A.S. *Current state and ecological and economic prospects for the development of fisheries in the Western Caspian region of Russia*. Dissertation Thesis. Makhachkala, 2004. 46 p. (In Russ.).
16. Levashina N.V., Ivanov V.P. Commercial use of the bream population (*Abramis brama* L., 1758) in the Volga-Caspian region. *Vestnik AGTU. Ser.: Fish industry = Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Fishing Industry*. 2014;(2):37-42. (In Russ.).

Информация об авторах

Гусейнов К.М. – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник.

Гасанова А.Ш. – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, доцент.

Хлопкова М.В. – кандидат биологических наук, научный сотрудник.

Information about the authors

Guseynov K.M. - Candidate of Science (Biology), Senior Researcher.

Gasanova A.Sh. - Candidate of Science (Biology), Senior Researcher, Associate Professor.

Khlopkova M.V. - Candidate of Science (Biology), Researcher.

Статья поступила в редакцию 31.05.2021; одобрена после рецензирования 10.09.2021; принята к публикации 26.11.2021.

The article was submitted 31.05.2021; approved after reviewing 10.09.2021; accepted for publication 26.11.2021.

Научная статья

УДК 631.41: 631.416: 631.422

doi: 10.18522/1026-2237-2021-4-95-102

ПОДВИЖНОСТЬ И РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ФОСФОРА В ЧЕРНОЗЕМЕ ОБЫКНОВЕННОМ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ АГРОТЕХНОЛОГИЯХ

А.М. Медведева^{1✉}, О.А. Бирюкова², Т.М. Минкина³, Е.В. Кучменко⁴, С.С. Манджиева⁵

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

¹medvedeva.estelior@yandex.ru ✉

²olga_alexan@mail.ru

³tminkina@mail.ru

⁴ku4menko1997@mail.ru

⁵msaglara@mail.ru

Аннотация. Исследованы особенности содержания и профильного распределения валовых и подвижных фосфатов в зависимости от применяемых агротехнологий (традиционная, минимальная и No-till). Объект исследования – чернозем обыкновенный карбонатный южной зоны Ростовской области. Отмечено существенное влияние применяемой агротехнологии на фосфатное состояние агроценозов озимой пшеницы. Использование ресурсосберегающих технологий способствует накоплению потенциальных запасов фосфатов в верхних горизонтах почвы по сравнению с традиционной, основанной на отвальной вспашке. Вовлечение почвы в сельскохозяйственное производство приводит к росту количества подвижных фосфатов (на 28–64 % в горизонте А_п относительно целинной почвы). Интенсивность агротехнологии в разной степени влияет на подвижность фосфора в почве. На участках с отвальной вспашкой зафиксировано максимальное увеличение количества подвижных фосфатов как по сравнению с черноземом целинного участка, так и при внедрении ресурсосберегающих агротехнологий.

Ключевые слова: чернозем обыкновенный, агротехнологии, валовой фосфор, подвижный фосфор, вспашка, минимальная обработка почвы, No-till

Благодарности: исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания в сфере научной деятельности № 0852-2020-0029 и при государственной поддержке ведущей научной школы Российской Федерации (НШ-2511.2020.11).

Для цитирования: Медведева А.М., Бирюкова О.А., Минкина Т.М., Кучменко Е.В., Манджиева С.С. Подвижность и распределение фосфора в черноземе обыкновенном при различных агротехнологиях // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. 2021. № 4. С. 95–102.

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

Original article

PHOSPHORUS MOBILITY AND DISTRIBUTION IN HAPLIC CHERNOZEM UNDER VARIOUS AGROTECHNOLOGIES

А.М. Medvedeva^{1✉}, О.А. Biryukova², Т.М. Minkina³, Е.В. Kuchmenko⁴, S.S. Mandzhieva⁵

Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia

¹medvedeva.estelior@yandex.ru ✉

²olga_alexan@mail.ru

³tminkina@mail.ru

⁴ku4menko1997@mail.ru

⁵msaglara@mail.ru

Abstract. The study of the features of the content and profile distribution of total and available phosphates, depending on the applied agrotechnologies (traditional, minimal and No-till), was carried out. The object of the study was Haplic Chernozem carbonate of the southern zone of the Rostov region. The significant influence of the applied agricultural

© Медведева А.М., Бирюкова О.А., Минкина Т.М., Кучменко Е.В., Манджиева С.С., 2021

technology on the phosphate state of winter wheat agrocenoses was noted. The use of resource-saving technologies contributes to the accumulation of potential phosphate reserves in the upper horizons of the soil in comparison with the traditional technology with dump ploughing. The involvement of soil in agricultural production leads to an increase in the content of available phosphates (by 28-64 % in the Ap horizon, compared to virgin soil). The intensity of agricultural technology affects the mobility of phosphorus in the soil differently. In areas with dump ploughing, the maximum increase in the content of available phosphates was noted, both in comparison with the Chernozem of the virgin soil, and with the introduction of resource-saving agricultural technologies.

Keywords: Haplic Chernozem, agrotechnologies, total phosphorus, available phosphorus, plough, minimal tillage, No-till

Acknowledgments: the study was carried out with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of the state assignment in the field of scientific activity No. 0852-2020-0029 and with the state support of the leading scientific school of the Russian Federation (NSh-2511.2020.11).

For citation: Medvedeva A.M., Biryukova O.A., Minkina T.M., Kuchmenko E.V., Mandzhieva S.S. Phosphorus Mobility and Distribution in Haplic Chernozem under Various Agrotechnologies. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science*. 2021;(4):95-102. (In Russ.).

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

Введение

Фосфор является одним из наиболее дефицитных питательных веществ для сельскохозяйственных культур [1]. Его природные запасы в почвах и их распределение по профилю определяются содержанием фосфора в материнских породах, характером почвообразовательного процесса, гранулометрическим составом, кислотностью и количеством гумуса. В процессе формирования урожая растения в основном используют минеральный фосфор, различные формы и соединения которого отличаются по степени своей доступности для культур. Важнейшими факторами, определяющими доступность элемента, являются влажность почвы, ее кислотность, окислительно-восстановительные условия. Однако в наибольшей степени динамичность фосфора в агроценозе зависит от скорости и интенсивности микробиологических процессов и поглощения-переноса его сельскохозяйственными культурами [2, 3].

Чернозёмы Ростовской области характеризуются повышенным содержанием высокодисперсной формы карбонатов, которые связывают подвижные фосфаты в труднорастворимые и малодоступные трехзамещенные фосфаты кальция, снижая обеспеченность почв этим элементом [4]. Фосфор является главным лимитирующим фактором питания растений в зоне распространения карбонатных почв. По оценкам [5], полевые культуры могут эффективно использовать только около 16 % фосфорных удобрений. Из-за низкой доступности фосфора в почве и быстрорастущей стоимости минеральных удобрений существует потребность в сравнительном изучении различных агротехнологий, которые могут повысить эффективность использования фосфорных удобрений и устойчивость агроценозов [6].

В настоящее время исследователи влияния агротехнологий на фосфорный режим почв не пришли к единому мнению. Часть полученных результатов свидетельствует о накоплении подвижного фосфора при минимизации обработки почв [7, 8]. По данным [9], этот показатель существенно не зависит от применяемой агротехнологии. По мнению Ф.Я. Багаутдинова [10], минимизация обработки способствует снижению подвижности фосфора в почве. В [11] утверждается, что ресурсосберегающая обработка способствует закреплению валового фосфора в поверхностных слоях почвы. Напротив, подвижные соединения элемента могут интенсивнее выщелачиваться, чем при традиционной вспашке. В работе [12] показано увеличение количества подвижных фосфатов при прямом посеве в апреле-мае по сравнению с традиционной обработкой, однако в течение остальных месяцев вегетации культур различия были незначительными.

Цель исследования – изучение особенностей содержания и профильного распределения валового и подвижного фосфора в черноземе обыкновенном в зависимости от применяемой агротехнологии.

Материалы и методы

Объект исследования – чернозем обыкновенный карбонатный мощный тяжелосуглинистый на лесовидном суглинке ЗАО им. Кирова Песчанокопского района.

Изучаемая почва характеризуется следующими физико-химическими показателями: содержание гумуса – 4,0–4,7 %; общий азот – 0,20 – 0,22 %, валовой калий – 2,4–2,6 %; обменный калий – 350–

500 мг/кг; сумма обменных катионов ($\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$) – 33–34 мг-экв/100 г; CaCO_3 с поверхности – 1,8 %, с глубиной его количество увеличивается и достигает максимума в горизонте Вса – 12,1–12,3 %; количество физической глины – 55,8 %, ила – 32,0 %; pH в верхней части профиля – около 7,9–8,0, в нижней – 8,2–8,3 [13].

На территории хозяйства минимальная технология выращивания культур применяется с 2000 г. – поверхностная обработка на глубину 10–12 см (БДТ-3), а с 2008 г. – нулевая технология (No-till, или прямой посев). Отбор проб почвы, возделываемой по традиционной технологии с отвальной вспашкой на глубину 25–27 см (ПЛН-4-35), проводили в рядом расположенном фермерском хозяйстве.

В агроценозах озимой пшеницы за 5 лет исследования заложено 16 полнопрофильных разрезов при использовании различных агротехнологий (7 – нулевая обработка, 6 – минимальная, 3 – вспашка). Как эталон отобраны также образцы почвы целинных участков. Отбор образцов проводили по генетическим горизонтам после описания профиля по ГОСТ 28168-89.

Валовой фосфор определяли с помощью рентгенофлуоресцентного анализа (спектроскан МАКС-GV) [14], подвижный – по Мачигину [15]. Ранее было доказано, что метод Мачигина (1%-й раствор $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$) достаточно четко отражает зависимость продуктивности сельскохозяйственных культур от обеспеченности почвы подвижным фосфором [16].

Корреляционный и дисперсионный анализ, описательную статистику полученных результатов проводили в пакете программ STATISTICA 10–13 с 5-процентным уровнем значимости ($P < 0,05$).

Результаты и обсуждение

Содержание валового фосфора в почве является одним из показателей её потенциального плодородия. В результате исследований установлено, что чернозем обыкновенный карбонатный характеризуется довольно высокими потенциальными возможностями в отношении обеспечения растений фосфором. Валовые фосфаты по профилю почвы распределяются равномерно, с постепенным снижением и продвижением вниз, что характерно для почв дернового процесса почвообразования (таблица).

При использовании вспашки отмечено минимальное варьирование валового фосфора по всему профилю почвы (таблица). Коэффициент вариабельности ($V \%$) при этой обработке в верхних горизонтах чернозема составил 5 %. Минимальная обработка также способствует более стабильному распределению валового фосфора, V не превышает 6 %. При использовании No-till варьирование элемента находится в пределах 16–24 %. Однако с продвижением вниз по профилю (горизонт АВ и далее) варьирование фосфора и на участках с No-till становится незначительным.

Наибольшее накопление валовых фосфатов отмечено в верхнем (пахотном) горизонте почвы 0–20 см (0,15–0,19 %), что происходит, с одной стороны, в связи с концентрацией здесь растительных остатков, с другой – с внесением удобрений.

Максимальное количество валового P_2O_5 зафиксировано в почве с использованием нулевой и минимальной обработки, а минимальное – при вспашке, что свидетельствует о снижении потенциальных запасов фосфора при интенсификации основной обработки почвы. Дисперсионный анализ показал существенную зависимость содержания валового фосфора от применяемой агротехнологии (рис. 1).

Полученные результаты подтверждаются исследованиями [17], согласно которым нулевая и минимальная обработка по сравнению со вспашкой может увеличить количество валового фосфора в поверхностном слое за счет внесения удобрений при отсутствии перемешивания почвы. При этом автор отмечает, что указанная особенность справедлива для глинистой и песчаной почв. В работе [8] отмечена сходная тенденция: в глинистых и суглинистых почвах при прямом посеве накапливается значительно больше валового фосфора (слой 0–6 см), чем при традиционной обработке и глубокой вспашке с оборотом пласта (на 18 и 10 % соответственно).

Согласно полученным данным, распределение подвижного фосфора по профилю чернозема обыкновенного как на целинном участке, так и в производственных посевах озимой пшеницы при различных агротехнологиях имеет сходный характер (таблица). Наблюдается накопление этого элемента в верхних биологически активных горизонтах почвы. На глубине 50–60 см происходит снижение его содержания за счет увеличения карбонатов кальция, понижающих подвижность фосфора и доступность элемента растениям.

Содержание подвижного фосфора в почве целинного участка ниже, чем в агроценозах озимой пшеницы. Наибольшее содержание подвижного фосфора выявлено при использовании отвальной вспашки.

**Содержание валового и подвижного фосфора в профиле чернозема обыкновенного
при различных агротехнологиях, n=164 / The content of total and available phosphorus content
in the profile of the Haplic Chernozem with various agrotechnologies, n = 164**

Горизонт	P ₂ O ₅ вал., %		P ₂ O ₅ подв., мг/кг		
	M±m	V, %	M±m	V, %	Доля P ₂ O ₅ подв. от P ₂ O ₅ вал.
No-till					
Ап	0,19±0,02	24	20,76±1,54	20	1,13
А	0,17±0,01	16	18,66±1,46	21	1,12
АВ	0,17±0,004	7	16,13±1,03	17	0,97
Вса	0,16±0,004	6	14,89±0,98	17	0,92
ВС	0,14±0,003	6	13,73±1,01	19	0,93
С	0,15±0,004	5	12,72±1,08	22	0,85
Минимальная					
Ап	0,19±0,004	6	21,82±0,47	6	1,14
А	0,17±0,004	6	19,70±0,56	7	1,15
АВ	0,16±0,003	5	17,99±0,60	9	1,13
Вса	0,16±0,003	5	17,6±10,98	15	1,09
ВС	0,16±0,001	2	17,07±1,56	24	1,06
С	0,14±0,002	4	15,8±1,52	26	1,10
Вспашка					
Ап	0,15±0,003	5	26,48±1,33	13	1,77
А	0,15±0,004	5	22,5±1,47	17	1,48
АВ	0,14±0,003	8	17,91±0,66	10	1,21
Вса	0,14±0,004	5	14,71±1,46	26	1,03
ВС	0,14±0,005	5	14,51±1,55	28	1,02
С	0,14±0,006	7	12,78±1,65	34	0,88
Целина					
Ап	0,18±0,006	9	16,18±1,36	22	0,90
А	0,16±0,005	9	15,18±1,06	16	0,95
АВ	0,16±0,007	12	14,44±0,52	10	0,89
Вса	0,16±0,005	9	13,60±0,88	17	0,83
ВС	0,15±0,003	5	12,31±1,10	24	0,79
С	0,15±0,003	5	11,21±0,76	18	0,75

Примечание. М – среднее; m – ошибка среднего; V – коэффициент вариации.

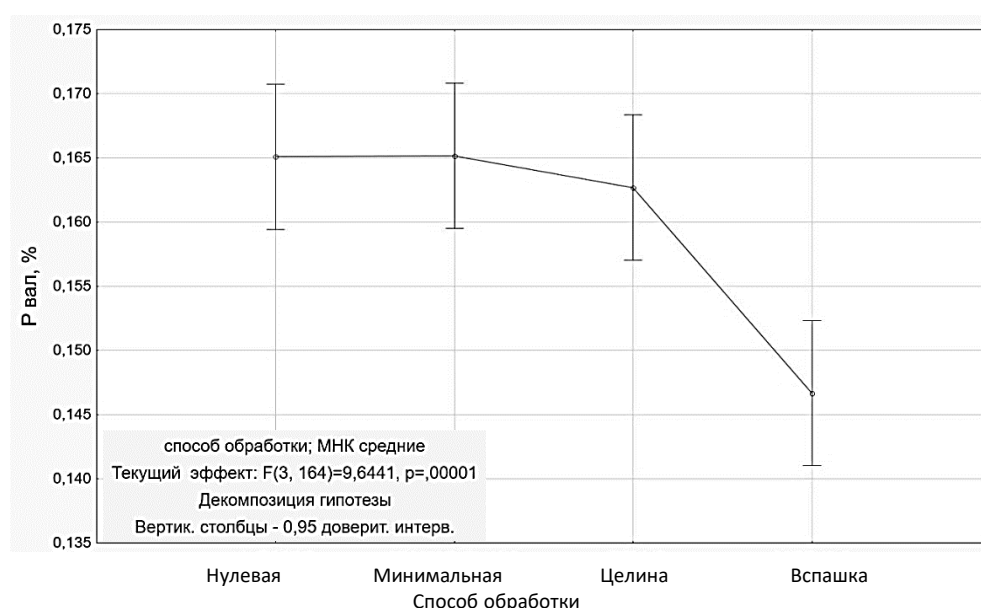


Рис. 1. Динамика валового фосфора под влиянием различных агротехнологий
/ Fig. 1. The dynamics of total phosphorus under the influence of various agrotechnologies

Однако степень обеспеченности на всех производственных посевах была одинакова и характеризуется как средняя. Аналогичная тенденция выявлена в работе [18], где отмечено, что использование ресурсосберегающих технологий при посеве яровой пшеницы на черноземе выщелоченном снижает содержание подвижных фосфатов в пахотном слое почвы. Автор связывает это со снижением интенсивности процессов минерализации органического вещества. Согласно нормативам плодородия почв земель сельскохозяйственного назначения Ростовской области [19], оптимальное содержание подвижного фосфора в пахотном горизонте (25,3–29,8 мг/кг) установлено при отвальной вспашке.

Установленные закономерности подтверждаются результатами дисперсионного анализа (рис. 2). Можно также отметить, что при рассмотрении отдельного верхнего слоя почвы (горизонты Ап+AB) влияние различных агротехнологий сказывается даже в большей степени (рис. 3).

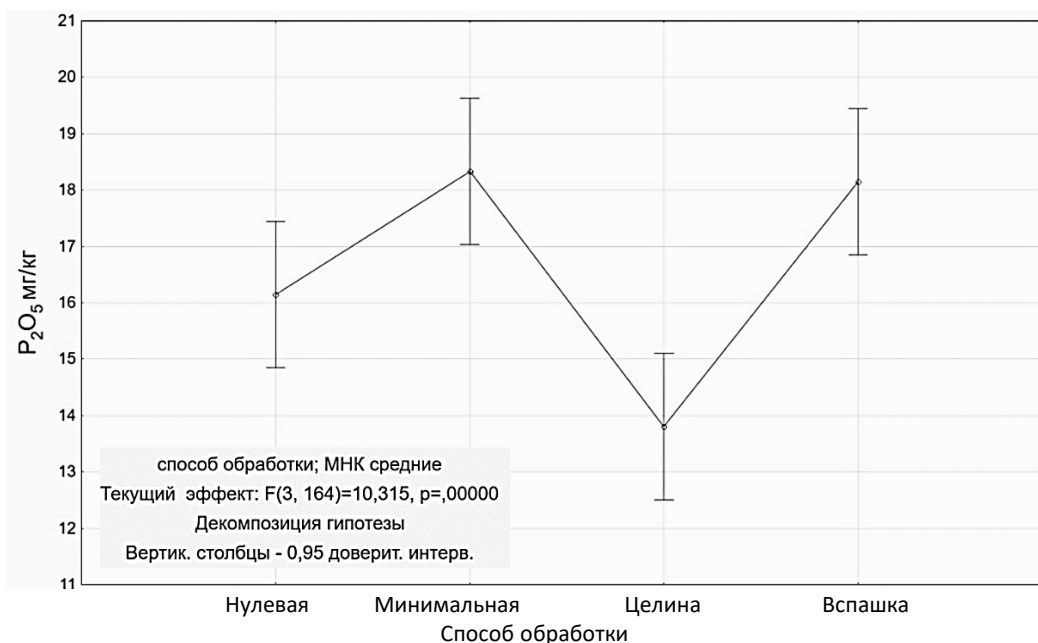


Рис. 2. Динамика подвижных соединений фосфора под влиянием различных агротехнологий (в среднем по профилю) / Fig. 2. The dynamics of available phosphorus compounds under the influence of various agrotechnologies (on average by profile)

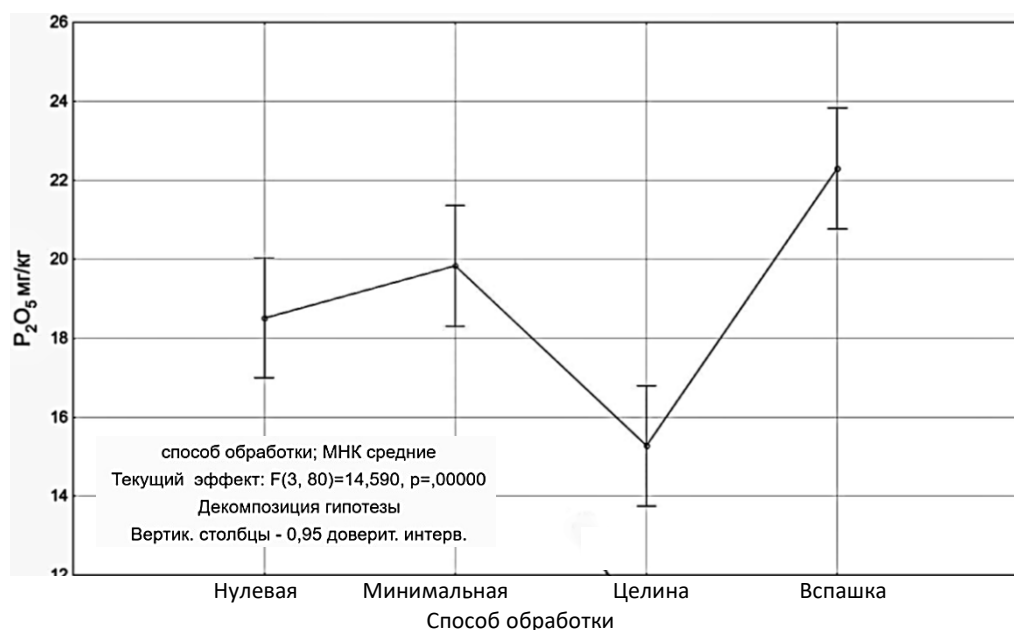


Рис. 3. Динамика подвижных соединений фосфора под влиянием различных агротехнологий (в горизонтах Ап+AB) / Fig. 3. The dynamics of available phosphorus compounds under the influence of various agrotechnologies (in Ap+AB horizon)

Неравномерное распределение растительных остатков в поверхностном горизонте при использовании No-till приводит к большему варьированию подвижного фосфора ($V=20-22\%$ в горизонте Ап), чем при вспашке и минимальной технологии (13 и 6 % соответственно).

Отмечено, что степень подвижности P_2O_5 , выраженная в процентном отношении подвижного фосфора от валового, выше (1,8 % в горизонте Ап) при традиционной технологии, чем при минимальной (1,1 %) и No-till (0,9 %). Однако, как известно, один из главных факторов, определяющих количество подвижных фосфатов, – вынос его урожаем сельскохозяйственных культур. Средние данные по урожайности озимой пшеницы (No-till – 4,3–6,5 т/га; минимальная обработка – 4,1 – 5,9 т/га; традиционная технология возделывания – 3,3–3,5 т/га) позволяют утверждать, что, вероятно, значительная часть подвижного фосфора была как раз использована растениями. Таким образом, по нашему мнению, отмеченное выше вряд ли свидетельствует о негативном влиянии ресурсосберегающих агротехнологий на подвижность фосфора в почве.

Заключение

Отвальная вспашка, создавая оптимальные условия для минерализации органических соединений в почве, способствует снижению потенциальных запасов фосфора с увеличением его подвижности по сравнению с ресурсосберегающими технологиями. Минимизация обработки позволяет стабилизировать фосфатное состояние почв агроценозов озимой пшеницы в зоне неустойчивого увлажнения.

Список источников

1. Singh G., Kaur G., Williard K., Schoonover J., Nelson K.A. Managing Phosphorus Loss from Agroecosystems of the Midwestern United States: A Review // *Agronomy*. 2020. № 10. P. 561. Doi: 10.3390/agronomy10040561.
2. Христенко А.А. Динамика содержания подвижных соединений фосфора в почвах // *Агрохимия*. 2001. № 10. С. 16–22.
3. Ильинская И.Н., Малько В.И., Игнашева Л.И., Тарадин С.А. Исследование содержания подвижного фосфора в почвах черноземов обыкновенных при различных способах обработки // *Агрономия и лесное хозяйство*. 2013. № 5 (43). С. 34–37.
4. Бирюкова О.А., Ельников И.И., Крыщенко В.С. Оперативная диагностика питания растений. Ростов н/Д.: Изд-во ЮФУ, 2010. 168 с.
5. Dhillon J.S., Torres G., Driver E., Figueiredo B., Raun W.R. World Phosphorus Use Efficiency in Cereal Crops // *Agron. J.* 2017. № 109. P. 1670–1677.
6. Aldrich S.R., Scott W.O., Hoefl R.G. Modern Corn Production. 3rd ed. Champaign, IL, USA: A & L Publications, 1986. 392 p.
7. Синецков В.Е., Ткаченко Г.И. Особенности динамики подвижного фосфора в почве при минимизации основной обработки // *Сиб. вестн. с.-х. науки*. 2014. № 6. С. 11–18.
8. Alam Md.K., Bell R.W., Salahin N., Pathan S., Mondol A.T.M.A.I., Alam M.J., Rashid M.H., Paul P.L.C., Hossain M.I., Shil N.C. Banding of Fertilizer Improves Phosphorus Acquisition and Yield of Zero Tillage Maize by Concentrating Phosphorus in Surface Soil // *Sustainability*. 2018. Vol. 10. P. 3234. Doi: 10.3390/su10093234.
9. Холмов В.Г. Минимальная обработка и плодородие почвы // *Земледелие*. 1986. № 4. С. 29–31.
10. Багаутдинов Ф.Я., Казыханова Г.Ш., Пермякова Н.В., Давлетишина М.Р. Влияние способов основной обработки почвы и удобрений на агрохимические показатели чернозема выщелоченного и урожайность зерновых культур в южной лесостепи Республики Башкортостан // *Вестн. ОГУ*. 2011. № 12 (31). С. 21–23.
11. Liang X.Q., Wang Z.B., Zhang Y.X., Zhu C.Y., Lin L.M., Xu L.X. No-tillage effects on N and P exports across a rice-planted watershed // *Environ. Sci. Pollut. Res.* 2016. Vol. 23. P. 8598–8609.
12. Минникова Т.В., Кравцова Н.Е., Мокриков Г.В., Казеев К.Ш., Колесников С.И. Влияние прямого посева озимой пшеницы на содержание в черноземе элементов питания // *Агрохимия*. 2019. № 10. С. 64–71. Doi: 10.1134/S0002188119100119
13. Medvedeva A.M., Biryukova O.A., Ilchenko Ya.I., Minkina T.M., Kucherenko A.V., Bauer T.V., Mandzhieva S.S., Mazarji M. Nitrogen state of Haplic Chernozem of the European part of Southern Russia in the implementation of resource-saving technologies // *J. of the Science of Food and Agriculture*. 2021. Vol. 101, № 6. P. 2312–2318. Doi: 10.1002/jsfa.10852.
14. Ширкин Л.А. Рентгенофлуоресцентный анализ объектов окружающей среды: учеб. пособие. Владимир, Изд-во Владим. гос. ун-та, 2009. 65 с.
15. Минеев В.Г. Практикум по агрохимии. М.: МГУ, 2001. 689 с.
16. Бирюкова О.А., Божков Д.В., Носов В.В. Сравнительная характеристика методов определения содержания подвижного фосфора в черноземе обыкновенном карбонатном // *Науч. журн. КубГАУ*. 2014. № 103 (09). С. 12.

17. Chivenge P.P., Murwira H.H., Giller K.E., Mapfumo P., Six J. Long-Term Impact of Reduced Tillage and Residue Management on Soil Carbon Stabilization: Implications for Conservation Agriculture on Contrasting Soils // *Soil Tillage Res.* 2007. Vol. 94. P. 328–337.

18. Иванова Т.Н., Багаутдинов Ф.Я., Пермякова Н.В. Показатели плодородия чернозема выщелоченного в зависимости от способов основной обработки почвы и применения удобрений в условиях в южной лесостепи Республики Башкортостан // *Сельскохозяйственные науки и агропромышленный комплекс на рубеже веков*. 2014. № 6. P. 53–56.

19. Назаренко О.Г., Пащковская Т.Г., Продан В.И., Чеботникова Е.А. Нормативы основных показателей плодородия почв земель сельскохозяйственного назначения Ростовской области. Рассвет: ГЦАС «Ростовский», 2011. 68 с.

References

1. Singh G., Kaur G., Williard K., Schoonover J., Nelson K.A. Managing Phosphorus Loss from Agroecosystems of the Midwestern United States: A Review. *Agronomy*. 2020;(10):561, doi: 10.3390/agronomy10040561.

2. Khristenko A.A. Dynamics of the content of available phosphorus compounds in soils. *Agrokhimiya = Agrochemistry*. 2001;(10):16-22. (In Russ.).

3. Ilyinskaya I.N., Malko V.I., Ignasheva L.I., Taradin S.A. The study of the content of available phosphorus in the Haplic Chernozems with various cultivation methods. *Agronomiya i lesnoe khozyaistvo = Agronomy and forestry*. 2013;(5):34-37. (In Russ.).

4. Biryukova O.A., Elnikov I.I., Kryshchenko V.S. *Rapid Diagnostics of Plant Nutrition*. Rostov-on-Don: Southern Federal University Press; 2010. 168 p. (In Russ.).

5. Dhillon J.S., Torres G., Driver E., Figueiredo B., Raun W.R. World Phosphorus Use Efficiency in Cereal Crops. *Agron. J.* 2017;(109):1670-1677.

6. Aldrich S.R., Scott W.O., Hoeft R.G. *Modern Corn Production*. 3rd ed. Champaign, IL, USA: A & L Publications; 1986. 392 p.

7. Sineshchekov V.E., Tkachenko G.I. Features of labile phosphorus dynamics in soil while minimizing tillage. *Sib. vestn. s.-kh. nauki = Siberian Herald of Agricultural Science*. 2014;(6):11-18. (In Russ.).

8. Alam Md.K., Bell R.W., Salahin N., Pathan S., Mondol A.T.M.A.I., Alam M.J., Rashid M.H., Paul P.L.C., Hossain M.I., Shil N.C. Banding of Fertilizer Improves Phosphorus Acquisition and Yield of Zero Tillage Maize by Concentrating Phosphorus in Surface Soil. *Sustainability*. 2018;10:3234, doi: 10.3390/su10093234.

9. Holmov V.G. Minimal soil cultivation and fertility of soil. *Zemledelie = Agriculture*. 1986;(4):29-31. (In Russ.).

10. Bagautdinov F.Ya., Kazyhanova G.Sh., Permakov N.V., Davletshina M.R. The influence of the methods of the soil cultivation and fertilizers on the agrochemical indicators of the Leached Chernozem and the yield of grain crops in the Southern forest-steppe of the Republic of Bashkortostan. *Vestn. OGU = Vestnik of the Orenburg State University*. 2011;(12):21-23. (In Russ.).

11. Liang X.Q., Wang Z.B., Zhang Y.X., Zhu C.Y., Lin L.M., Xu L.X. No-tillage effects on N and P exports across a rice-planted watershed. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 2016;23:8598-8609.

12. Minnikova T.V., Kravtsova N.E., Mokrikov G.V., Kazeev K.Sh., Kolesnikov S.I. Impact of direct seeding of winter wheat on nutrition elements in Black soil. *Agrokhimiya = Agrochemistry*. 2019;(10):64-71, doi: 10.1134/S0002188119100119. (In Russ.).

13. Medvedeva A.M., Biryukova O.A., Ilchenko Ya.I., Minkina T.M., Kucherenko A.V., Bauer T.V., Mandzhieva S.S., Mazarji M. Nitrogen state of Haplic Chernozem of the European part of Southern Russia in the implementation of resource-saving technologies. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 2021;101(6):2312-2318, doi: 10.1002/jsfa.10852.

14. Shirkin L.A. *X-ray fluorescent analysis of environmental objects*. Tutorial. Vladimir: Vladimir State University Press; 2009. 65 p. (In Russ.).

15. Mineev V.G. *Practicum on agrochemistry*. Moscow: Moscow State University Press; 2001. 689 p. (In Russ.).

16. Biryukova O.A., Bozhkov D.V., Nosov V.V. Comparison of soil test methods for available phosphorus in common calcareous black soil. *Nauch. zhurn. KubGAU = Scientific Journal of Kuban State Agrarian University*, 2014;(103):12. (In Russ.).

17. Chivenge P.P., Murwira H.H., Giller K.E., Mapfumo P., Six J. Long-term impact of reduced tillage and residue management on soil carbon stabilization: implications for conservation agriculture on contrasting soils. *Soil Tillage Res.* 2007;94:328-337.

18. Ivanova T.N., Bagautdinov F.Ya., Permakov N.V. Indicators of the fertility of the Chernozem Leached depending on the methods of cultivation of the soil and applying fertilizers in the Southern Forest Supplies of the Republic of Bashkortostan. *Sel'skokhozyaistvennye nauki i agropromyshlennyy kompleks na rubezhe vekov = Agricultural Sciences and Agro-Industrial Complex at the Turn of the Century*. 2014;(6):53-56. (In Russ.).

19. Nazarenko O.G., Pashkovskaya T.G., Prodан V.I., Chebotnikova E.A. *Standarts of the main indicators of the soil fertility of the agricultural land of the Rostov region*. pos. Rassvet, Rostovsky Publ.; 2011. 68 p. (In Russ.).

Информация об авторах

Медведева Анна Михайловна – младший научный сотрудник, научно-исследовательская лаборатория мониторинга биосферы, кафедра почвоведения и оценки земельных ресурсов.

Бирюкова Ольга Александровна – доктор сельскохозяйственных наук, профессор, кафедра почвоведения и оценки земельных ресурсов.

Минкина Татьяна Михайловна – доктор биологических наук, профессор, заведующая кафедрой почвоведения и оценки земельных ресурсов.

Кучменко Екатерина Вадимовна – аспирант, кафедра почвоведения и оценки земельных ресурсов.

Манджиева Саглар Сергеевна – кандидат биологических наук, главный научный сотрудник, научно-исследовательская лаборатория мониторинга биосферы, кафедра почвоведения и оценки земельных ресурсов.

Information about the authors

Anna M. Medvedeva - Junior Researcher, Research Laboratory of Monitoring of Biosphere, Department of Soil Science and Land Resources Assessment.

Olga A. Biryukova - Doctor of Science (Agricultural Sciences), Professor, Department of Soil Science and Land Resources Assessment.

Tatiana M. Minkina - Doctor of Science (Biology), Professor, Head of Department of Soil Science and Land Resources Assessment.

Ekaterina V. Kuchmenko - Postgraduate, Department of Soil Science and Land Resources Assessment.

Saglara S. Mandzhieva - Candidate of Science (Biology), Main Researcher, Research Laboratory of Monitoring of Biosphere, Department of Soil Science and Land Resources Assessment.

Статья поступила в редакцию 16.09.2021; одобрена после рецензирования 05.10.2021; принята к публикации 26.11.2021.

The article was submitted 16.09.2021; approved after reviewing 05.10.2021; accepted for publication 26.11.2021.

Научная статья

УДК 581.524.1/552:504.73

doi: 10.18522/1026-2237-2021-4-103-112

РЕКРЕАЦИОННЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ АЛЛЕЛОПАТИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ КОРНЕВЫХ СИСТЕМ ДРЕВОСТОЯ В ЛЕСНЫХ ЭКОСИСТЕМАХ

Виталий Георгиевич Щербина

Институт природно-технических систем, филиал, Сочи, Россия

v.g.scherbina@bk.ru

Аннотация. Исследовано влияние хронического рекреационного воздействия в лесных экосистемах на аллелопатическую активность корневых систем древесных видов. Показано, что с ростом рекреационного воздействия увеличивается трансформация аллелопатической активности корней, составляя в среднем от 27,3 % при II стадии рекреационной дигрессии до 83,4 % при V. Большие величины активности при II стадии регистрируются в насаждениях с меньшим числом видов в древостое. Повышение нагрузки, приводящей к III–V стадиям, сопровождается усилением корневых выделений и снижением биомассы мелких корней в сообществах с большим числом древесных видов (3–4 вида). Активные корневые окончания проявляют большую чувствительность к числу видов в древостое и к рекреационной плотности почвы на всем диапазоне рекреационной дигрессии, в большей степени реагируя на рекреационную нагрузку (уплотнение почвы) на этапах ее проявления (II стадия, 35,7 %), критического восстановления (III стадия, 2,9 %) и на пессимальной стадии (V, 90,4 %) лесного сообщества. Значительная реакция при пессимальных нагрузках, укладываемая в закономерности анаэробных почвенных условий, сопровождаемых самоотравлением растительных организмов в результате превращения корневых выделений в сильно восстановленные соединения, позволяет предположить, что в зоне сильно уплотненных троп корневые системы гибнут не только из-за недостатка кислорода для дыхания корней, но и от отравления токсическими соединениями, образуемыми при трансформации корневых выделений анаэробными гетеротрофами.

Ключевые слова: лесная экосистема, рекреационная дигрессия, состав древостоя, плотность почвы, корневая насыщенность, активные окончания, биомасса, аллелопатическая активность

Благодарности: работа выполнена в рамках государственного задания по теме № АААА-А16-116012510144-6 «Совершенствование механизма управления природопользованием с целью обеспечения эколого-экономической безопасности функционирования индустрии туризма».

Для цитирования: Щербина В.Г. Рекреационные изменения аллелопатической активности корневых систем древостоя в лесных экосистемах // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. 2021. № 4. С. 103–112.

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

Original article

RECREATIONAL CHANGES IN THE ALLELOPATHIC ACTIVITY OF THE ROOT SYSTEMS OF THE STAND IN FOREST ECOSYSTEMS

Vitaliy G. Scherbina

Branch of Institute of Natural and Technical Systems, Sochi, Russia

v.g.scherbina@bk.ru

Abstract. The study of the influence of chronic recreational impact in forest ecosystems on the allelopathic activity of the root systems of arboreal species was carried out. It was determined that with an increase in the recreational impact, the transformation of the allelopathic activity of roots increases, averaging from 27.3 %, at stage II of recreational digression, to 83.4 % at stage V. Large values of activity at stage II are recorded in plantations with a smaller number of

© Щербина В.Г., 2021

species in the stand. An increase in the load leading to stages III-V is accompanied by an increase in root exudates and a decrease in the biomass of small roots in communities with a large number of woody species (3-4 species). Active root ends are more sensitive to the number of species in the stand and to the recreational density of the soil throughout the entire range of recreational digression, reacting to a greater extent to the recreational load (soil compaction) at the stage of its manifestation (stage II, 35.7 %), the stage of critical recovery (stage III, 2.9 %) and at the highest stage (stage V, 90.4 %) of the forest community. A significant reaction at the highest loads, which fits into the regularities of anaerobic soil conditions, accompanied by self-poisoning of plant organisms as a result of the transformation of root exudates into highly reduced compounds, suggests that in the zone of highly compacted paths, root systems die not only due to a lack of oxygen for root respiration, but also from poisoning with toxic compounds formed during the transformation of root secretions by anaerobic heterotrophs.

Keywords: forest ecosystem, recreational digression, stand composition, soil density, root saturation, active endings, biomass, allelopathic activity

Acknowledgments: the work was carried out within the framework of the state assignment on the topic No. AAAA-A16-116012510144-6 "Improvement of the mechanism of environmental management in order to ensure the ecological and economic security of the functioning of the tourism industry".

For citation: Scherbina V.G. Recreational Changes in the Allelopathic Activity of the Root Systems of the Stand in Forest Ecosystems. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2021;(4):103-112. (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

Аллелопатию относят к экологическому явлению [1], регулирующему взаимосвязи и взаимодействия в сообществах через биологически активные вещества между растениями, микроорганизмами, вирусами и грибами [2, 3]. Аллелопатическая активность, определяющая интенсивность и направление действия вторичных метаболитов, наряду с прямым и опосредованным влиянием комплекса абиотических и биотических факторов среды [4], лежит в основе возникновения, развития и смены сообществ, участвуя в формировании доминирования, продуктивности и видового разнообразия экосистем [1, 5].

Основное взаимодействие происходит через корневую систему [6]. Различные метаболиты, выделяемые корнями [4, 7], трансформируясь в ризосфере, оказывают влияние на питание, рост, развитие и репродуктивный потенциал растений, развитие почвенных микроорганизмов и микоризы [8, 9].

На современном этапе развития общества особый интерес представляют исследования в антропогенно трансформированных сообществах. Концепция аллелопатии и отдельные механизмы действия преимущественно рассматриваются в природных сообществах [10, 11], агроценозах [12–19], в озеленении селитебных зон [20–22] и экологии инвазивных видов [7, 23–25]. Накоплен значительный материал, однако вопросы аллелопатии в условиях рекреационного нарушения лесных сообществ остаются открытыми. С общих позиций вероятность изменения биохимической среды, в частности, изменение аллелопатической активности корневой системы под воздействием рекреационной деятельности не вызывает сомнений, однако экспериментов, подтверждающих эти изменения, не проводилось.

Цель исследований – проверка предположения, что хроническое рекреационное воздействие на лесные экосистемы может отражаться на аллелопатической активности корневой системы древесных видов. При этом ставились 2 задачи:

- оценить при I–V стадиях рекреационной дигрессии корненасыщенность и долю активных окончаний при различном числе древесных видов в составе основного полога;
- определить величину аллелопатической активности корневых систем при рекреационной дигрессии лесных экосистем.

Материалы и методы

Исследования проводились на склонах юго-восточной экспозиции в 6 преобладающих лесных экосистемах влажных субтропиков Сочинского Причерноморья с эдификаторной ролью граба обыкновенного (*Carpinus betulus* L.), бука восточного (*Fagus orientalis* L.), дуба пушистого (*Quercus pubescens* Willd.), каштана посевного (*Castanea sativa* Mill.), самшита колхидского (*Buxus colchica* Rojark), тиса ягодного (*Taxus baccata* L.). Пробные площади (20×20 м) в 4-кратной повторности закладывались при

I–V стадиях рекреационной дигрессии в горизонтальных парцеллах с числом видов в древостое от одного (монодоминантный древостой) до четырёх (полидоминантный), с коэффициентным составом вида-эдификатора по доле участия запаса в общем запасе древостоя от 5 до 10. В парцеллах с полидоминантным древостоем среди кондоминантов (от 2 до 5 % запаса) встречались *Fagus orientalis*, *Carpinus betulus*, *Quercus pubescens*, клен остролистный (*Acer platanoides* L.), ясень обыкновенный (*Fraxinus excelsior* L.), дуб скальный (*Quercus petraea* Leibl.), граб восточный (*Carpinus orientalis* Mill.). Среди видов с долей участия менее 2 % запаса – вишня птичья (*Prunus avium* L.), ясень высокий (*Fraxinus excelsior* L.), липа бегониелистная (*Tilia caucasica* Rupr.), клен полевой (*Acer campestre* L.), клен красивый (*Acer laetum* C. A. Mey), клен ложноплатановый (*Acer pseudoplatanus* L.), груша обыкновенная (*Pyrus communis* L.), ольха черная (*Alnus glutinosa* (L.) Gaertn.), осина обыкновенная (*Populus tremula* L.). Контролем служили участки без визуальных признаков рекреационного повреждения напочвенного покрова и (или) средней плотностью верхнего горизонта почвы $\leq 0,85$ г/см³.

Стадии рекреационной дигрессии определялись по индикаторным величинам рекреационной трансформации объемной массы почвы [26].

Пробы корневых систем в 8-кратной повторности брались методом монолита [27] в верхнем горизонте почвы (0–10 см). Из отмытых на ситах корней взвешивались две фракции, включающие проводящие (меньше 3 мм) и физиологически активные корни (корневые окончания).

Аналитические пробы для определения аллелопатической активности корневых колинов готовились по А.М. Гродзинскому с использованием шкалы условных кумариновых единиц (УКЕ) [6, с. 304, 355]. Биотестом служили семена редьки посевной (*Raphanus sativus* var. *radicula* Pers.). Водная вытяжка готовилась в пропорции 1:100 (по рекомендациям [28]). Активность растворов определялась по индексу аллелопатической активности (А) [29, с. 274].

Статистическая обработка включала стандартные методы вариационных рядов выборочных совокупностей [30].

В каждой анализируемой парцелле на отдельном варианте рекреационной нагрузки проанализировано по 32 пробы.

Полученные результаты

В условиях отсутствующего и слабовыраженного рекреационного воздействия (плотность почвы 0,62–0,98 г/см³) максимальная корненасыщенность почвы ($\bar{x}$ = 19,9 г/пробу) отмечается в чистых насаждениях, т.е. с 10 единицами эдификатора в составе древостоя. Несколько меньшая – в сообществах с двумя доминирующими видами в древостое ($\bar{x}$ = 17,1 г/пробу). Самая низкая – в сообществах с тремя и четырьмя видами ($\bar{x}$ соответственно 14,6 и 14,9 г/пробу) (табл. 1).

Таблица 1 / Table 1

Средняя биомасса корневой системы (г) при различном числе видов в составе полога древостоя и рекреационном уплотнении почвы / Average biomass of the root system (g) with different numbers of species in the canopy and recreational soil compaction

Диапазон плотности почвы, г/см ³	Число видов					Снижение, %
	1	2	3	4	$\bar{x}$	
	Корненасыщенность					
0,62–0,98	19,90	17,07	14,59	14,85	16,60	–
0,99–1,13	16,09	12,53	10,25	9,83	12,17	27,3
1,14–1,19	13,36	11,74	10,71	10,74	11,64	29,6
1,20–1,44	6,73	7,10	7,99	8,89	7,68	52,5
1,45–1,70	1,45	2,10	3,03	3,88	2,62	83,4
	Активные окончания					
0,62–0,98	9,70	7,70	6,57	6,00	7,49	–
0,99–1,13	7,80	5,70	3,58	2,90	4,99	35,7
1,14–1,19	8,40	6,50	7,72	6,00	7,16	2,9
1,20–1,44	4,50	3,84	5,44	3,95	4,43	38,8
1,45–1,70	0,54	0,52	0,98	0,66	0,68	90,4

Проведенные расчёты разницы и ошибки разницы (S_d) по таблицам нормального интеграла вероятности [30, с. 312] указывают на наличие достоверных отличий как между диапазонами плотности почвы, соответствующими стадиям дигрессии [26] (нормированное отклонение выборочной совокупности – $t = 11,57–21,81$; при $p > 0,999$), так и между выборочными совокупностями при различном составе древостоя ($> t_{\text{табл}} = 2,75$ при $p = 0,01$) и генеральными совокупностями лесных экосистем ($> t_{\text{табл}} = 3,65$ при $p = 0,001$).

Обобщенные по всем сообществам характеристики величин аллелопатической активности корневых систем в статистически значимом пространстве совокупностей ($p = 0,04–0,01$) (табл. 2) дают возможность с высокой достоверностью интерпретировать рассчитанные статистические характеристики вариационных рядов.

Таблица 2 / Table 2

**Статистические показатели вариации аллелопатической активности корневых систем
при рекреационном уплотнении почвы / Statistical indicators of variation
of allelopathic activity of root systems during recreational soil compaction**

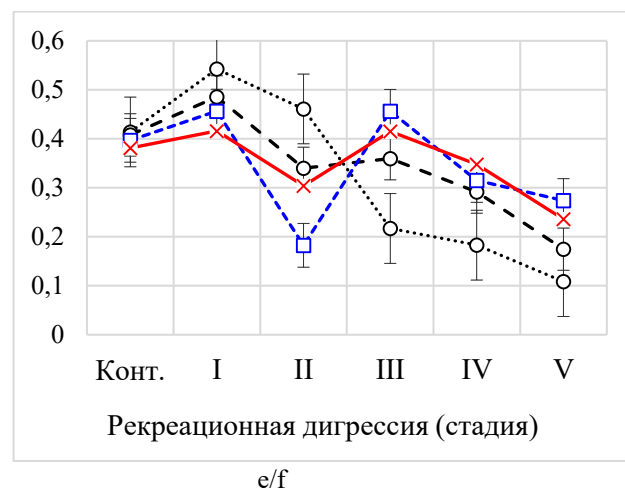
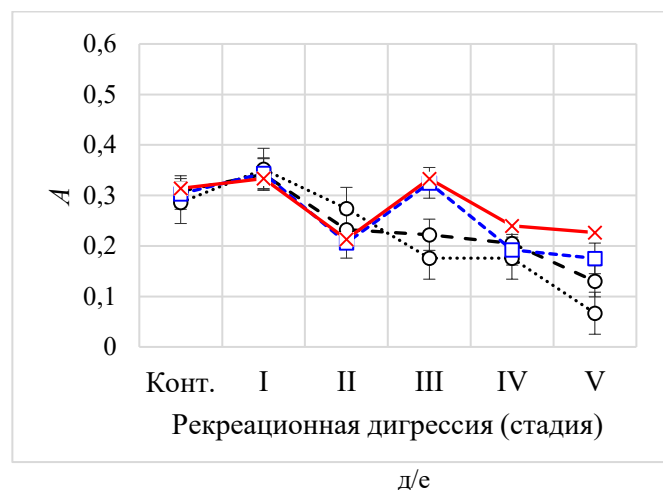
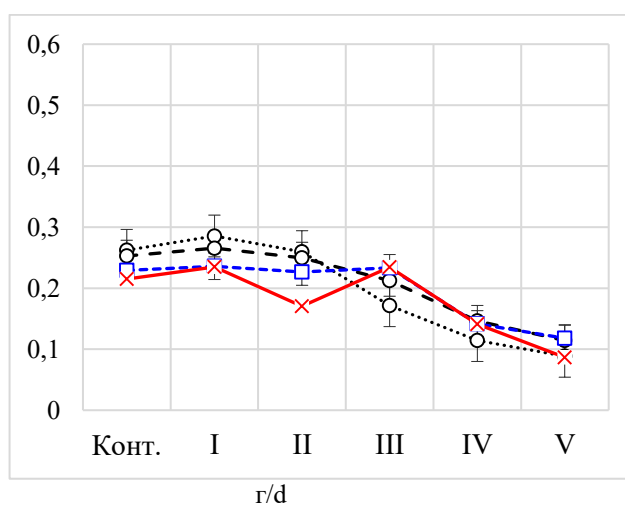
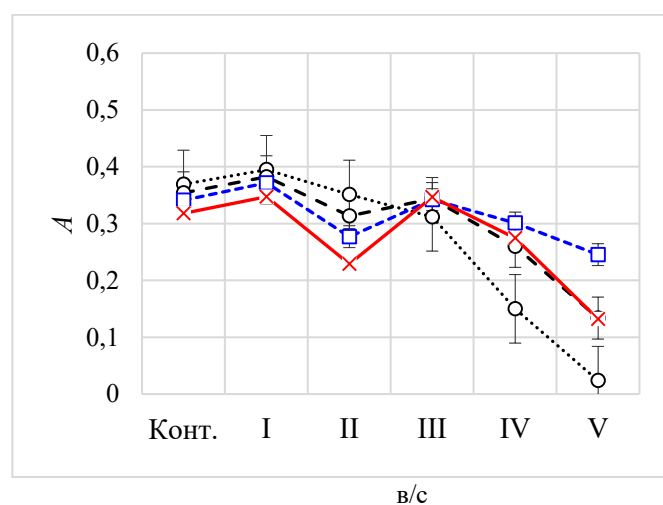
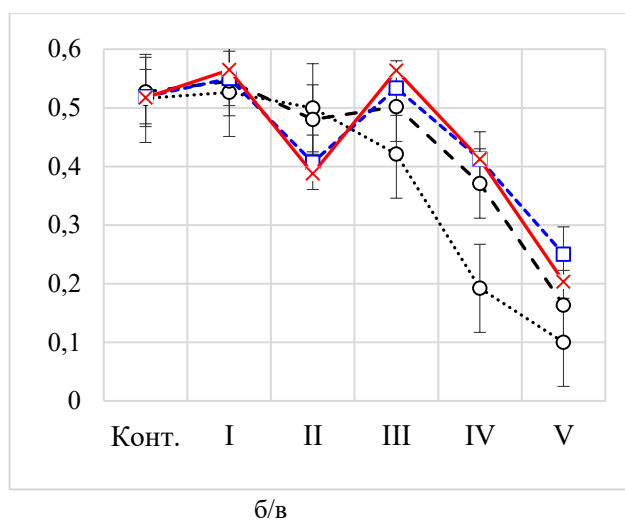
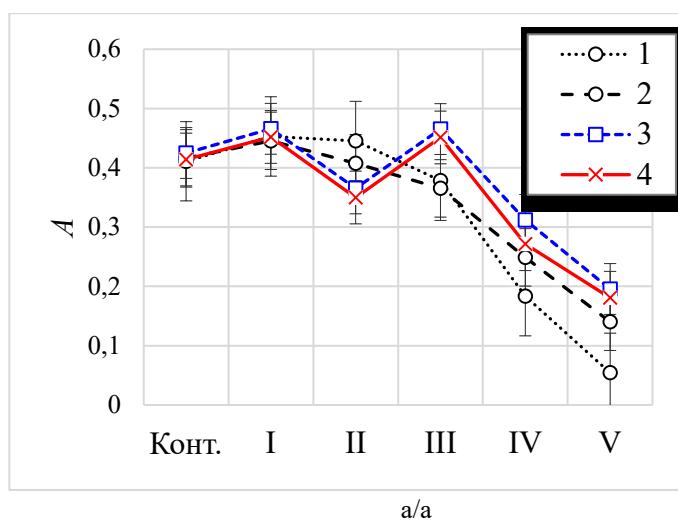
Диапазон плотности почвы, г/см ³	Среднее Значение $\bar{x}$	Дисперсия σ^2	Коэффициент вариации C_v	Среднеквадратичное отклонение σ	Стандартная ошибка $S_{\bar{x}}$
0,62–0,98	0,45	0,013	5,9	0,126	0,035
0,99–1,13	0,35	0,013	6,6	0,131	0,047
1,14–1,19	0,37	0,017	7,5	0,152	0,059
1,20–1,44	0,27	0,014	8,5	0,141	0,085
1,45–1,70	0,15	0,005	6,3	0,094	0,074

Размерность стандартных ошибок выборочности (0,04–0,09), величина дисперсии (0,01–0,02) и среднеквадратичные отклонения (0,094–0,152) указывают на группировку полученных результатов близко к центрам распределения генеральных совокупностей. Величины вариации совокупностей на отдельных диапазонах плотности почвы (5,9–8,5 %) не превышают допустимый уровень внутренней однородности и, следовательно, степень устойчивости проявления признака на отдельных диапазонах плотности, что позволяет проводить сравнительный анализ изменчивости аллелопатической активности корневых систем с I по V стадию рекреационной дигрессии.

Отличия от контрольных участков (рисунок) начинают проявляться уже при I стадии дигрессии (плотность почвы $\leq 0,98$ г/см³), но отражают только общую тенденцию, так как низкая достоверность ($p = 0,832$; $t = 1,38$) не позволяет сделать статистически достоверное заключение.

С возрастанием рекреационной нагрузки, приводящей ко II–V стадиям (плотность почвы 0,99–1,70 г/см³), отличия находятся в диапазоне высокой достоверности с вероятностью 0,999 ($t = 5,54–24,16$). Во всех экосистемах при II стадии регистрируется обратная связь аллелопатической активности с рекреационной плотностью почвы ($r = -0,746 – -0,963$). Большое снижение активности отмечается в сообществах с большим числом кондоминантов (22,6–65,0 %), т.е. в более сложно организованных сообществах. По мнению А.М. Гродзинского, при большем числе произрастающих растений возрастает вероятность быстрого усвоения образующихся колинов другими растениями [6].

III стадия дигрессии характеризуется усилением корневой активности как ответной реакции на физический стресс: втаптывание на данной стадии горизонта A_0 в горизонт A_1 , исчезновение подстилки на тропах – корни начинают воспринимать не косвенное, а уже прямое, непосредственное воздействие рекреантов [26]. Последующее повышение средней плотности почвы ($\geq 1,45$) и увеличение вытоптанной площади сопровождаются большим объемом почвы с анаэробными условиями. Активность корней снижается (на 18–34 %), проявляя достаточно высокую обратную связь ($r = -0,967 – -0,999$) с вариационными рядами плотности почвы. Большее снижение активности корней в лесных сообществах с меньшим числом видов в древостое можно объяснить с позиций концепции Р.Н. MacArthur [31], подтверждаемой слаборазвитым подлеском и травяным покровом, уменьшающими свою продукцию и присутствие по мере возрастания рекреационной нагрузки [26, 32].



Зависимость аллелопатической активности корневых систем от рекреационной дигрессии в лесных экосистемах (а – *Castanea sativa*; б – *Carpinus caucasica*; в – *Quercus pubescens*; г – *Buxus colchica*; д – *Taxus baccata*; е – *Fagus orientalis*) и числа древесных видов в составе основного полога насаждения: 1 – один вид; 2 – два вида; 3 – три вида; 4 – четыре вида / Dependence of the allelopathic activity of root systems on recreational digression in forest ecosystems (a - *Castanea sativa*; б - *Carpinus caucasica*; в - *Quercus pubescens*; д - *Buxus colchica*; е - *Taxus baccata*; ф - *Fagus orientalis*) and the number of tree species in the main canopy of the plantation: 1 - one species; 2 - two species; 3 - three species; 4 - four species

По мнению ряда авторов, в уплотненной, анаэробной почве биохимические процессы приводят к токсичным соединениям для высших растений [6, 33] с ингибирующими свойствами для корневой системы, вызывая самоотравление растений и сильное почвоутомление [34].

Изменения аллелопатического режима корневой системы в рекреационных условиях подтверждают трансформацию эдафических характеристик [27, 35–37] в зонах рекреационного лесопользования, которые, в свою очередь, непосредственно зависят от величины антропогенного воздействия, приводя к значительному уменьшению количества и длины активных корневых окончаний [38–40].

Уплотненная почва, оказывая сопротивление росту корней [41, 42], затрудняет проникновение корневых волосков в мелкие поры [27, 43, 44], что косвенно подтверждается фактом расположения основной массы корней в верхних слоях почвы [45]. В более глубокие горизонты почвы, имеющие плотность выше $1,5 \text{ г/см}^3$, корни проникают по старым корневым ходам, червоточинам, трещинам [44]. Уплотненная структура нарушает условия минерального питания растений, снижает доступное количество нитратов и ее нитрификационную способность [33, 46], активизируя аммонифицирующие и денитрифицирующие бактерии [47], что в целом негативно отражается на аллелопатическом фоне и общей продуктивности как отдельных растений и ценопопуляций, так и всей экосистемы [6, 28, 33, 35].

Заключение

В зоне влажных субтропиков России с ростом рекреационного воздействия регистрируется увеличение трансформации аллелопатической активности корневых систем в среднем от 27,3 % при II стадии до 83,4 % при V. Большие величины активности при II стадии дигрессии регистрируются в насаждениях с меньшим числом видов в древостое. Повышение нагрузки, приводящей к III–V стадиям, сопровождается усилением корневых выделений и снижением биомассы мелких корней в сообществах с большим числом кондоминантов (3–4 вида).

Активные корневые окончания проявляют большую чувствительность к величине биоразнообразия древостоя и к рекреационному воздействию на всем диапазоне рекреационной дигрессии, в большей степени реагируя на рекреационную нагрузку (уплотнение почвы) на этапе ее проявления (II стадия, 35,7 %), этапе критического восстановления (III стадия, 2,9 %) и на пессимальной стадии (V стадия, 90,4 %) лесного сообщества. Значительная реакция при пессимальных нагрузках, укладываемая в закономерности анаэробных почвенных условий, сопровождаемых самоотравлением растительных организмов в результате превращения корневых выделений в сильно восстановленные соединения, позволяет предположить, что в зоне сильно уплотненных троп корневые системы гибнут не только из-за недостатка кислорода для дыхания корней, но и от отравления токсическими соединениями, образуемыми при трансформации корневых выделений анаэробными гетеротрофами.

Список источников

1. Teixeira da Silva J.A., Karimi J., Mohsenzadeh S., Dobránszki J. Allelopathic Potential of Select Gymnospermous Trees // J. of Forest and Environmental Science. 2015. Vol. 31, № 2. P. 109–118. Doi: 10.7747/JFES.2015.31.2.109
2. Cipollini D., Rigsby C.M., Barto E.K. Microbes as Targets and Mediators of Allelopathy in Plants // J. of Chemical Ecology. 2012. Vol. 38, № 6. P. 714–727. Doi: 10.1007/s10886-012-0133-7.
3. Кондратьев М.Н., Ларинова Ю.С. Аллелопатия как механизм взаимодействия между растениями, растениями и насекомыми, растениями и микроорганизмами // Аграрная наука. 2019. № 2. С. 57–61. Doi: 10.32634/0869-8155-2019-326-2-57-6.
4. Лебедев В.М., Лебедев Е.В. Вопросы аллелопатии в лесных фитоценозах – состояние и перспективы // Агрохимия. 2015. № 4. С. 85–91.
5. Поляк Ю.М., Сухаревич В.И. Аллелопатические взаимоотношения растений и микроорганизмов в почвенных экосистемах // Успехи современной биологии. 2019. Т. 139, № 2. С. 147–160. Doi: 10.1134/S0042132419020066.
6. Гродзинский А.М. Аллелопатия растений и почвоутомление. Избр. тр. Киев: Наукова думка, 1991. 532 с.
7. Кондратьев М.Н., Ларинова Ю.С. Роль аллелопатии в инвазии растительных видов (обзор) // Изв. Тимирязевской сельскохозяйственной академии. 2018. № 2. С. 48–61. Doi: 10.26897/0021-342X-2018-2-48-61.
8. Gan H., Drinkwater L.E., Emmett B.D. Soil Management Legacy Alters Weed-Crop Competition Through Biotic and Abiotic Pathways // Plant and Soil. 2021. Vol. 462, № 1–2. P. 543–560. Doi: 10.1007/s11104-021-04891-3.

9. Cui Y., Fang L., Jiang M., Bing H. Extracellular Enzyme Stoichiometry Reveals the Carbon and Phosphorus Limitations of Microbial Metabolisms in the Rhizosphere and Bulk Soils in Alpine Ecosystems // *Plant and Soil*. 2021. Vol. 458, No 1–2. P. 7–20. Doi: 10.1007/s11104-019-04159-x.

10. Левченко П.В., Гетманец И.А., Викторов В.П. Результаты биотестирования эдафотопов некоторых видов широколиственных пород в Ашинском государственном природном биологическом заказнике (Челябинская область) // *Вестн. Тверского гос. ун-та. Биология и экология*. 2020. № 2 (58). С. 84–93. Doi: 10.26456/vtbio151.

11. Цандекова О.Л., Уфимцев В.И. Формирование подстилки пойменных лесных биогеоценозов с участием *Acer negundo* L. // *Лесной журн*. 2019. № 3. С. 73–81. Doi: 10.17238/issn0536-1036.2019.3.73.

12. Панасенко Н.Н., Володин В.В., Володченко Ю.С., Холенко М.С. Аллелопатические свойства *Acer negundo* // *Ежегодник НИИ фундаментальных и прикладных исследований*. 2018. № 1 (10). С. 34–36.

13. Цандекова О.Л. Роль аллелопатического влияния *Acer negundo* L. на рост травянистых растений // *Вестн. Нижневартковского гос. ун-та*. 2020. № 1. С. 15–18. Doi: 10.36906/2311-4444/20-1/03.

14. Гусев А.П., Шпилевская Н.С., Веселкин Д.В. Воздействие *Acer negundo* L. на восстановительную сукцессию в ландшафтах Беларуси // *Вестник Віцебскага дзяржаўнага ун-та*. 2017. № 1 (94). С. 47–53.

15. Воронцова Е.С. Оценка влияния экологических механизмов, вызываемых аллелопатией, на микроорганизмы и экологическую среду // *Меридиан*. 2020. № 6 (40). С. 3–5.

16. Федотов Г.Н., Шалаев В.С., Батырев Ю.П. Аллелотоксины в почвах и стимуляция развития семян // *Лесной вестн*. 2019. Т. 23, № 5. С. 62–70. Doi: 10.18698/2542-1468-2019-5-62-70.

17. Федотов Г.Н., Шоба С.А., Горепекин И.В. Аллелотоксичность почв и способы уменьшения ее негативного влияния на начальную стадию развития растений // *Почвоведение*. 2020. № 8. С. 1007–1015. Doi: 10.31857/S0032180X20080067.

18. Chen Y., Huang W., Zhang F., Xiangdong L., Hu B., Xie J. Metabolomic Profiling of Dongxiang Wild Rice Under Salinity Demonstrates the Significant Role of Amino Acids in Rice Salt Stress // *Frontiers in Plant Science*. 2021. 12:729004. Doi: 10.3389/fpls.2021.729004.

19. Yang M., Zhao Y., Qin Y., Xu R., Yang Z., Peng H. Untargeted Metabolomics and Targeted Quantitative Analysis of Temporal and Spatial Variations in Specialized Metabolites Accumulation in *Poria cocos* (Schw.) Wolf (Fushen) // *Frontiers in Plant Science*. 2021. 12:713490. Doi: 10.3389/fpls.2021.713490.

20. Довганюк А.И., Довганюк Е.С. Формирование устойчивых напочвенных покровов в условиях мегаполиса // *Лесной вестн*. 2019. Т. 23, № 3. С. 13–20. Doi: 10.18698/2542-1468-2019-3-13-20.

21. Довганюк А.И. Анализ состояния благоустройства и озеленения детских игровых площадок в городе Москве // *Успехи современного естествознания*. 2021. № 5. С. 7–12. Doi: 10.17513/use.37617.

22. Серекеева Г.А., Жумабаева Г.Р., Султанбаева Ж.А. Роль газона в улучшении экологических условий городской среды // *Теория и практика современной науки*. 2019. № 6 (48). С. 446–448.

23. Прохоров В.Н. Аллелопатический потенциал адвентивных видов с высокой инвазионной активностью во флоре Беларуси // *Изв. Нац. АНБ. Сер.: Биол. науки*. 2018. Т. 63, № 2. С. 163–170. Doi: 10.29235/1029-8940-2018-63-2-163-170.

24. Кондратьев М.Н., Евдокимова Д.П., Ларикова Ю.С. Роль инвазий чужеродных видов растений в лесные экосистемы // *Актуальные проблемы лесного комплекса*. 2017. № 47. С. 127–131.

25. Егошин А.В. Структура, состав и пространственное распределение чужеродного компонента флоры юга Черноморского побережья Краснодарского края // *Russian J. of Ecosystem Ecology*. 2021. Т. 6, № 1. С. 21–35. Doi: 10.21685/2500-0578-2021-1-2.

26. Щербина В.Г., Белюченко И.С. Мониторинг окружающей среды: методологические основы. Сочи: ИЭиВС, 2006. 356 с.

27. Колесников В.А. Методы изучения корневой системы древесных растений. М.: Лесная промышленность, 1972. 152 с.

28. Гродзинский А.М., Богдан Г.П., Головкин Э.Я. Аллелопатическое почвоутомление. Киев: Наукова думка, 1979. 248 с.

29. Симагина Н.О., Лысякова Н.Ю. Динамика аллелопатической активности *Bupleurum fruticosum* L. в течение вегетации и онтогенеза // *Ученые записки Таврического нац. ун-та им. В.И. Вернадского. Биология, химия*. 2011. Т. 24 (63), № 4. С. 273–281.

30. Рокицкий П.Ф. Биологическая статистика. Минск: Высшая школа, 1964. 328 с.

31. MacArthur R.H., Diamond J.M., Karr J.R. Density compensation in island faunas // *Ecology*. 1972. Vol. 53. P. 330–342.

32. Щербина В.Г. Экологические аспекты буковых экосистем. Кривой Рог: Минерал, 2005. 410 с.

33. Гродзинский А.М., Головкин Е.А., Горобец С.А. Экспериментальная аллелопатия. Киев: Наукова думка, 1975. 230 с.

34. Гринева Г.М., Брагина Т.В., Платонова А.В. Индуцированная этиленом активация гидролитических ферментов в придаточных корнях кукурузы в условиях прогрессирующего затопления // *Докл. Академии наук*. 2000. Т. 374. С. 393–405.

35. Матвеев Н.М. Аллелопатия как фактор экологической среды. Самара: Кн. изд-во, 1994. 206 с.

36. Юрчак Л.Д. Алелопатия в агробиоценозах ароматичных растений. К.: Фітосоціоцентр, 2005. 411 с.
37. Жукова Л.А., Богданова А.Г. Анализ взаимоотношений некоторых луговых растений аллелопатическим методом // Ценопопуляции растений. М.: Наука, 1977. С. 108–121.
38. Долгов С.И., Модина С.А. О некоторых закономерностях зависимости урожайности сельскохозяйственных культур от плотности почвы // Теоретические вопросы обработки почв. Л.: Гидрометеиздат, 1969. Вып. 2. С. 54–64.
39. Таран И.В., Спиридонов В.Н. Устойчивость рекреационных лесов. Новосибирск: Наука, 1977. 179 с.
40. Добрынин А.П. Влияние интенсивных рекреационных нагрузок на состояние корневой системы дуба монгольского // Экология. 1990. № 2. С. 74–77.
41. Иванов А., Стойнев К. Изучение влияния плотности почвы на ее плодородие и количество недоступной влаги в ней // Физика почв и приемы их обработки. 1967. Вып. 14. С. 193–203.
42. Воронов А.Г. Геоботаника. М.: Высшая школа, 1973. 384 с.
43. Калинин М.И. Формирование корневой системы деревьев. М.: Лесная промышленность, 1983. 152 с.
44. Ремезов Н.П., Погребняк П.С. Лесное почвоведение. М.: Лесная промышленность, 1965. 323 с.
45. Рахтеенко И.Н. Рост и взаимодействие корневых систем древесных растений. Минск: АН БССР, 1963. 254 с.
46. Прокушкин С.Г., Каверзина Л.Н. Корневые экзометаболиты и их роль в минеральном питании сосны // Лесоведение. 1993. № 6. С. 81–85.
47. Иванова Н.А. Влияние переувлажнения на микрофлору подзолисто-глеевых почв и использование ячменем азота и фосфора: автореф. дис. ... канд. биол. наук. Л., 1972. 26 с.

References

1. Teixeira da Silva J.A., Karimi J., Mohsenzadeh S., Dobránszki J. Allelopathic Potential of Select Gymnospermous Trees. *J. of Forest and Environmental Science*. 2015;31(2):109-118, doi: 10.7747/JFES.2015.31.2.109.
2. Cipollini D., Rigsby C. M., Barto E. K. Microbes as Targets and Mediators of Allelopathy in Plants. *Journal of Chemical Ecology*. 2012;38(6):714-727, doi: 10.1007/s10886-012-0133-7.
3. Kondratyev M.N., Larikova Yu.S. Allelopathy as a mechanism of interaction between plants, plants and insects, plants and microorganisms. *Agrarnaya nauka = Agrarian Science*. 2019;(2):57-61, doi: 10.32634/0869-8155-2019-326-2-57-6. (In Russ.).
4. Lebedev V.M., Lebedev E.V. Allelopathy issues in forest phytocenoses - state and prospects. *Agrokimiya = Agrochemistry*. 2015;(4):85-91. (In Russ.).
5. Polyak Yu.M., Sukharevich V.I. Allelopathic relationships between plants and microorganisms in soil ecosystems. *Uspekhi sovremennoi biologii = Advances in Modern Biology*. 2019;139(2):147-160, doi: 10.1134/S0042132419020066. (In Russ.).
6. Grodzinsky A.M. *Allelopathy of plants and soil fatigue. Selected works*. Kiev: Naukova dumka Publ.; 1991. 532 p. (In Russ.).
7. Kondratyev M.N., Larikova Yu.S. The role of allelopathy in the invasion of plant species (review). *Izvestiya Timiryazevskoi sel'skokhozyaistvennoi akademii = Izvestiya of Timiryazev Agricultural Academy*. 2018;(2):48-61, doi: 10.26897/0021-342X-2018-2-48-61. (In Russ.).
8. Gan H., Drinkwater L. E., Emmett B. D. Soil management legacy alters weed-crop competition through biotic and abiotic pathways. *Plant and Soil*. 2021;462(1-2):543-560, doi: 10.1007/s11104-021-04891-3.
9. Cui Y., Fang L., Jiang M., Bing H. Extracellular Enzyme Stoichiometry Reveals the Carbon and Phosphorus Limitations of Microbial Metabolisms in the Rhizosphere and Bulk Soils in Alpine Ecosystems. *Plant and Soil*. 2021; 458(1-2):7-20, doi: 10.1007/s11104-019-04159-x.
10. Levchenko P.V., Getmanets I.A., Viktorov V.P. Results of biotesting of edaphotopes of some species of broad-leaved species in the Ashinsky state natural biological reserve (Chelyabinsk region). *Vestn. Tverskogo gos. un-ta. Biologiya i ekologiya = Bulletin of Tver State University. Series: Biology and Ecology*. 2020;(2):84-93, doi: 10.26456/vtbiol151. (In Russ.).
11. Tsandekova O. L., Ufimtsev V. I. Formation of litter of floodplain forest biogeocenoses with the participation of *Acer negundo* L. *Lesnoi zhurn. = Russian Forestry Journal*. 2019;(3):73-81, doi: 10.17238/issn0536-1036.2019.3.73. (In Russ.).
12. Panasenko N.N., Volodin V.V., Volodchenko Yu.S., Kholenko M.S. Allelopathic properties of *Acer negundo*. *Ezhegodnik NII fundamental'nykh i prikladnykh issledovaniy = Research Institute of Basic and Applied Research Yearbook*. 2018;(1):34-36. (In Russ.).
13. Tsandekova O. L. The role of the allelopathic effect of *Acer negundo* L. on the growth of herbaceous plants. *Vestn. Nizhnevartovskogo gos. un-ta = Bulletin of Nizhnevartovsk State University*. 2020;(1):15-18, doi: 10.36906/2311-4444/20-1/03. (In Russ.).
14. Gusev A.P., Shpilevskaya N.S., Veselkin D.V. Impact of *Acer negundo* L. on the restoration succession in the landscapes of Belarus. *Vesnik Vitsebskaga dzyarzhaynaga un-ta = Bulletin of Vitebsk State University*. 2017;(1):47-53. (In Russ.).

15. Vorontsova E.S. Assessment of the impact of ecological mechanisms caused by allelopathy on microorganisms and the ecological environment. *Meridian*. 2020;(6):3-5. (In Russ.).
16. Fedotov G.N., Shalaev V.S., Batyrev Yu.P. Allelotoxins in soils and stimulation of seed development. *Lesnoi zhurn. = Russian Forestry Journal*. 2019;23(5):62-70, doi: 10.18698/2542-1468-2019-5-62-70. (In Russ.).
17. Fedotov G.N., Shoba S.A., Gorepekin I.V. Allelotoxicity of soils and ways to reduce its negative impact on the initial stage of plant development. *Pochvovedenie = Eurasian Soil Science*. 2020;(8):1007-1015, doi: 10.31857/S0032180X20080067. (In Russ.).
18. Chen Y., Huang W., Zhang F., Luo X., Hu B., Xie J. Metabolomic Profiling of Dongxiang Wild Rice Under Salinity Demonstrates the Significant Role of Amino Acids in Rice Salt Stress. *Frontiers in Plant Science*. 2021;12:729004, doi: 10.3389/fpls.2021.729004.
19. Yang M., Zhao Y., Qin Y., Xu R., Yang Z., Peng H. Untargeted Metabolomics and Targeted Quantitative Analysis of Temporal and Spatial Variations in Specialized Metabolites Accumulation in *Poria cocos* (Schw.) Wolf (Fushen). *Frontiers in Plant Science*. 2021;12:713490, doi: 10.3389/fpls.2021.713490.
20. Dovganyuk A.I., Dovganyuk E.S. Formation of stable ground covers in a megalopolis. *Lesnoi zhurn. = Russian Forestry Journal*. 2019;23(3):13-20, doi: 10.18698/2542-1468-2019-3-13-20. (In Russ.).
21. Dovganyuk A.I. Analysis of the state of improvement and gardening of children's playgrounds in the city of Moscow. *Uspekhi sovremennoi biologii = Advances in Modern Biology*. 2021;(5):7-12, doi: 10.17513/use.37617. (In Russ.).
22. Serekeeva G.A., Zhumabaeva G.R., Sultanbaeva Zh.A. The role of the lawn in improving the ecological conditions of the urban environment. *Teoriya i praktika sovremennoi nauki = Theory and Practice of Modern Science*. 2019;(6):446-448. (In Russ.).
23. Prokhorov V.N. Allelopathic potential of adventive species with high invasive activity in the flora of Belarus. *Izv. Nats. ANB. Ser.: Biol. nauki = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus, Biological Series*. 2018;63(2):163-170, doi: 10.29235/1029-8940-2018-63-2-163-170. (In Russ.).
24. Kondratyev M.N., Evdokimova D.P., Larikova Yu.S. The role of invasions of alien plant species in forest ecosystems. *Aktual'nye problemy lesnogo kompleksa = Actual Problems of the Forestry Complex*. 2017;(47):127-131. (In Russ.).
25. Egoshin A.V. Structure, composition and spatial distribution of the alien component of the flora of the South of the Black Sea coast of the Krasnodar Territory. *Russian Journal of Ecosystem Ecology*. 2021;6(1):21-35, doi: 10.21685/2500-0578-2021-1-2. (In Russ.).
26. Shcherbina V.G., Belyuchenko I.S. *Environmental Monitoring: Methodological Foundations*. Sochi: IEiVS Press; 2006. 356 p. (In Russ.).
27. Kolesnikov V.A. *Methods for studying the root system of woody plants*. Moscow: Lesnaya promyshlennost' Publ.; 1972. 152 p. (In Russ.).
28. Grodzinsky A.M., Bogdan G.P., Golovko E.Ya. *Allelopathic soil fatigue*. Kiev: Naukova dumka Publ.; 1979. 248 p. (In Russ.).
29. Simagina N.O., Lysyakova N.Yu. Dynamics of the allelopathic activity of *Bupleurum fruticosum* L. during the growing season and ontogenesis. *Uchenye zapiski Tavricheskogo nats. un-ta im. V.I. Vernadskogo. Biologiya, khimiya = Scientific Notes of V.I. Vernadsky Crimean Federal University. Biology. Chemistry*. 2011;24(4):273-281. (In Russ.).
30. Rokitsky P.F. *Biological statistics*. Minsk: Vysshaya shkola Publ.; 1964. 328 p. (In Russ.).
31. MacArthur R. H., Diamond J. M., Karr J. R. Density compensation in island faunas. *Ecology*. 1972;53:330-342. (In Russ.).
32. Shcherbina V.G. *Ecological aspects of beech ecosystems*. Krivoy Rog: Mineral Publ.; 2005. 410 p. (In Russ.).
33. Grodzinsky A.M., Golovko E.A., Gorobets S.A. *Experimental allelopathy*. Kiev: Naukova dumka Publ.; 1975. 230 p. (In Russ.).
34. Grineva G.M., Bragina T.V., Platonova A.V. Ethylene-induced activation of hydrolytic enzymes in the adventitious roots of maize under conditions of progressive flooding. *Dokl. Akademii nauk = Reports of the Academy of Sciences*. 2000;374:393-405. (In Russ.).
35. Matveev N.M. *Allelopathy as a factor of the ecological environment*. Samara, Book Publishing House; 1994. 206 p. (In Russ.).
36. Yurchak L.D. *Allelopathy in agrobiocenoses of aromatic dews*. Kiev: Fitosotsiotsentr Publ.; 2005. 411 p. (In Ukr.).
37. Zhukova L.A., Bogdanova A.G. Analysis of the relationship of some meadow plants by the allelopathic method. *Plant cenopopulations*. Moscow: Nauka Publ.; 1977:108-121. (In Russ.).
38. Dolgov S.I., Modina S.A. On some regularities of the dependence of the yield of agricultural crops on the density of the soil. *Theoretical issues of soil cultivation*. Leningrad: Gidrometeoizdat Publ.; 1969;2:54-64. (In Russ.).
39. Taran I.V., Spiridonov V.N. *Sustainability of recreational forests*. Novosibirsk: Nauka Publ.; 1977. 179 p. (In Russ.).
40. Dobrynin A.P. Influence of intensive recreational loads on the state of the root system of Mongolian oak. *Ekologiya = Ecology*. 1990;(2):74-77. (In Russ.).

41. Ivanov A., Stoinev K. Study of the influence of soil density on its fertility and the amount of inaccessible moisture in it. *Physics of Soils and Methods of Their Processing*. 1967;14:193-203. (In Russ.).
42. Voronov A.G. *Geobotany*. Moscow: Vysshaya shkola Publ.; 1973. 384 p. (In Russ.).
43. Kalinin M.I. *Formation of the root system of trees*. Moscow: Lesnaya promyshlennost' Publ.; 1983. 152 p. (In Russ.).
44. Remezov N.P., Pogrebnyak P.S. *Forest soil science*. Moscow: Lesnaya promyshlennost' Publ.; 1965. 323 p. (In Russ.).
45. Rakhtenko I.N. *Growth and interaction of root systems of woody plants*. Minsk: Academy of Sciences of the Belarusian Soviet Socialist Republic Press; 1963. 254 p. (In Russ.).
46. Prokushkin S.G., Kaverzina L.N. Root exometabolites and their role in pine mineral nutrition. *Lesovedenie = Russian Journal of Forest Science*. 1993;(6):81-85. (In Russ.).
47. Ivanova N.A. *Influence of waterlogging on the microflora of podzolic-gley soils and the use of nitrogen and phosphorus by barley*. Dissertation Thesis. Leningrad, 1972. 26 p. (In Russ.).

Информация об авторе

Щербина В.Г. – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник.

Information about the author

Scherbina V.G. - Candidate of Science (Biology), Senior Researcher.

Статья поступила в редакцию 17.09.2021; одобрена после рецензирования 13.10.2021; принята к публикации 26.11.2021.

The article was submitted 17.09.2021; approved after reviewing 13.10.2021; accepted for publication 26.11.2021.

НАШИ ЮБИЛЯРЫ

Персоналии

doi 10.18522/1026-2237-2021-4-113-115

ВЛАДИМИР ИВАНОВИЧ КОЛЕСНИКОВ (к 80-летию со дня рождения)

OUR PERSONS

Personalities

VLADIMIR IVANOVICH KOLESNIKOV (on the Occasion of His 80th Birthday)

Исполнилось 80 лет Владимиру Ивановичу Колесникову – академику РАН, доктору технических наук, профессору, президенту Ростовского государственного университета путей сообщения (РГУПС). Он окончил физмат Ростовского государственного университета и в дальнейшем прочно связал свою жизнь с наукой и образованием. Долгие годы, в очень сложный период развития отечественного образования, Владимир Иванович был ректором РГУПС – одного из системообразующих вузов Юга России, много сил отдал его реконструкции и обновлению.

В.И. Колесников является всемирно известным ученым и организатором науки в области технологии, физики и механики металлополимерных композиционных трибосистем. Основные направления его научной деятельности – разработка теоретических основ для создания принципиально новых износостойких композиционных материалов, совершенствование методик и теории синтеза высоких технологий и оптимизации сложных процессов в трибосистемах с целью повышения надежности и ресурса работы машин, механизмов и оборудования.

Им разработаны теоретические и экспериментальные методы определения структуры температурного поля в приграничной области фрикционного контакта, что позволило сформулировать принципы управления физико-химическими процессами при трении и создать целый класс новых высокоэффективных композиционных полимерных материалов фрикционного и антифрикционного назначения, конструкций из них, технологических процессов при их производстве. Полученные результаты научно-исследовательских работ являются универсальными, они используются как на предприятиях транспорта, так и в газовой и химической промышленности, в машиностроении.

В.И. Колесниковым в РГУПСе создана научная школа трибологов, успешно взаимодействующая с другими российскими и зарубежными учеными, работающими в этой области. Под его руководством



были выполнены фундаментальные работы по более чем десяти проектам Российского фонда фундаментальных исследований и проекту Министерства науки и высшего образования РФ «Повышение износостойкости и долговечности тяжело нагруженных узлов трения транспортных средств, машин и механизмов путем формирования антифрикционного слоя поверхностных наноструктур на трибоконтакте и обеспечения динамического контроля за техническим состоянием трибосистемы».

Владимир Иванович широко известен в научной среде не только в нашей стране, но и за ее пределами; он – автор более 760 научных трудов, в том числе 18 монографий, 70 патентов и авторских свидетельств, и ряда публикаций в ведущих зарубежных изданиях. Им подготовлены 12 докторов и 26 кандидатов наук. В 2003 г. В.И. Колесников был удостоен премии Президента РФ за цикл трудов для технических вузов «Научное, учебно-методическое и организационное обеспечение подготовки инженерных и научных кадров в области триботехники (трения, износа и смазки)». В 2017 г. Владимир Иванович награжден премией ОАО «РЖД» за вклад в развитие образования и науки в области железнодорожного транспорта.

В.И. Колесников является организатором научного центра инновационных технологий, оснащенного уникальной инновационной исследовательской аппаратурой. На его базе осуществляются исследования по актуальным проблемам нанотехнологий, транспорта и экологии.

По результатам конкурса 2021 г. по мероприятию «Проведение исследований научными лабораториями мирового уровня в рамках реализации приоритетов научно-технологического развития Российской Федерации» Президентской программы исследовательских проектов, реализуемых ведущими учеными, в том числе молодыми, руководимый В.И. Колесниковым коллектив выиграл грант на проведение исследований по теме «Создание триботехнических материалов и покрытий нового поколения на основе интеллектуальной (цифровой) технологии синтеза».

В.И. Колесников успешно совмещает научно-педагогическую работу с общественной и политической деятельностью. В 1989 г. он был избран народным депутатом – председателем подкомитета «Железнодорожный транспорт» Верховного Совета СССР. С 1998 по 2008 г. – депутат Законодательного собрания Ростовской области двух созывов. В настоящее время – член экспертного совета при Правительстве Российской Федерации и Президиума Высшей аттестационной комиссии при Министерстве высшего образования и науки Российской Федерации, главный редактор журнала «Вестник РГУПС», член редколлегий и редсоветов журналов «Транспортные системы и технологии», «Экологический вестник научных центров ЧЭС», «Мир транспорта» и других. Много лет Владимир Иванович был главным редактором журнала «Известия вузов. Северо-Кавказский регион», оставив этот пост, он по-прежнему присутствует в редколлегии серии «Естественные науки».

Владимир Иванович – инициатор и организатор проведения многих всероссийских и международных конференций. Под руководством и при непосредственном участии В.И. Колесникова в РГУПСе создана лаборатория «Нанотехнологии и новые материалы», где в рамках межвузовских и федеральных научно-технических программ «Ресурсосберегающие технологии» и «Новые материалы» созданы новые полимерные и смазочные материалы для узлов трения путевых, строительных, грузоподъемных, транспортных и сельскохозяйственных машин. Внедрение таких материалов в тяжело нагруженных узлах трения подвижного состава на предприятиях железнодорожного транспорта позволило снизить эксплуатационные расходы и ремонт трибосопряжений, вдвое уменьшить энергозатраты. Разработан принципиально новый способ смазки трибосистемы «колесо – рельс» путем нанесения на боковую грань головки рельса многослойного антифрикционного наноструктурированного покрытия.

В.И. Колесников награжден орденами Почета, «За заслуги перед Отечеством» IV степени, Дружбы Народов (Азербайджан) и медалями «Во славу Отечества», «За заслуги перед Чеченской Республикой», Павла Мельникова, Августина Бетанкура.

Наряду с выдающимися научно-исследовательскими и организаторскими качествами Владимир Иванович обладает потрясающей энергетикой, позволяющей ему на протяжении многих лет трудиться на благо Родины. Для окружающих он не только академик РАН, президент крупного вуза на Юге России, но и добрый и отзывчивый, простой в общении человек. Он и верный товарищ, и чуткий руководитель, помогающий решать различные проблемы окружающим сотрудникам и студентам, благодарный и внимательный ученый, помнящий о своих учителях и заботящийся о своих учениках.

Автор книги сказок «Война птиц и зверей и друг орла – охотник Тимофей».

Юбилей академика РАН В.И. Колесникова был отмечен в рамках Международной научной конференции «Механика и трибология транспортных систем – 2021». Конференция неизменно пользуется большим интересом широкого круга специалистов и традиционно собрала большое число участников при спонсорской поддержке компаний «Трансмашхолдинг», «Трансойл». Среди них – представители институтов РАН, Национальной академии наук Республики Беларусь, ведущих российских и зарубежных университетов, промышленных предприятий. Очное участие в обсуждении актуальных научных вопросов в области механики транспортных систем и контактного взаимодействия, проблем трения, износа и смазочных материалов, в области технологий производства новых износостойких материалов и упрочняющих технологий, проблем инновационного развития транспортного комплекса с докладами либо в качестве слушателей приняли около 250 человек.

В рамках конференции также была проведена школа молодых ученых «Актуальные проблемы трибологии, инженерии поверхности и искусственного интеллекта», собравшая большое число аспирантов, магистрантов и студентов. С докладами выступили академики и члены-корреспонденты РАН, ведущие ученые отечественных и зарубежных научных школ, молодые ученые. Итогами конференции стало обобщение наиболее важных достижений и определение основных приоритетов дальнейшего развития в области механики и трибологии транспортных систем. Конференция собрала как именитых, так и молодых ученых, которым представилась хорошая возможность заявить о себе и расширить горизонты научных изысканий.

Поздравительные телеграммы в адрес академика РАН В.И. Колесникова направили президент Российской Федерации В.В. Путин, президент Российской академии наук академик А.М. Сергеев, генеральный директор ОАО «РЖД» О.В. Белозеров, губернатор Ростовской области В.Ю. Голубев и многие другие государственные и общественные деятели РФ, коллеги – академики РАН, представители ведущих отечественных и зарубежных научных школ в области триботехники.

Поздравляем Владимира Ивановича с юбилеем, желаем здоровья, исполнения желаний, талантливых учеников!

А.О. Ватульян, П.Г. Иваночкин, М.И. Чебаков, О.А. Беляк

Редколлегия и редакция журнала поздравляют Владимира Ивановича с юбилеем, желают ему крепкого здоровья и благополучия, новых творческих успехов, благодарных учеников и последователей!

ПАМЯТИ УЧЕНОГО

Персоналии

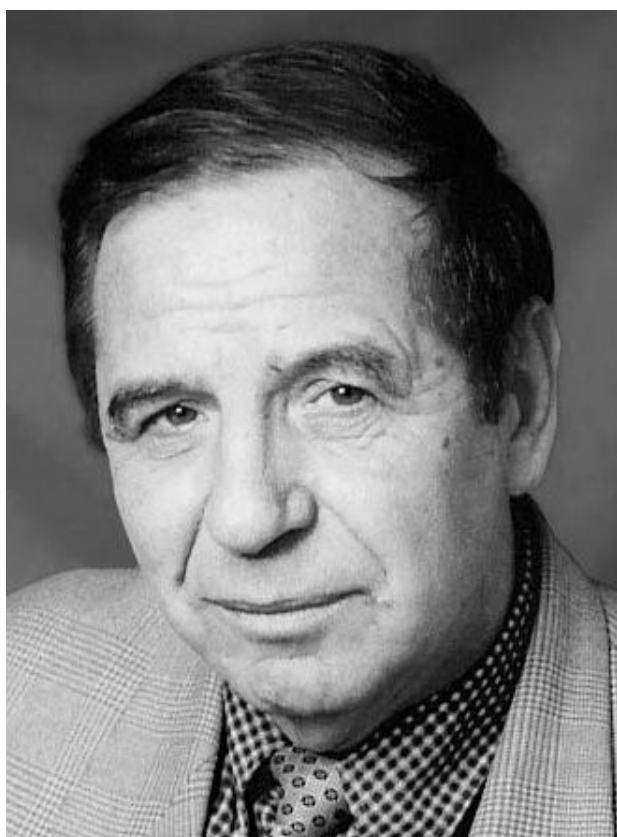
doi 10.18522/1026-2237-2021-4-116-117

АЛЕКСАНДР ВЛАДИМИРОВИЧ БЕЛОКОНЬ (1941–2013)

IN MEMORY OF SCIENTIST

Personalities

ALEXANDER VLADIMIROVICH BELOKON (1941-2013)



5 декабря 2021 г. исполнилось 80 лет со дня рождения известного российского ученого-механика, организатора образования и науки, доктора физико-математических наук, профессора Александра Владимировича Белоконя.

На протяжении более 30 лет А.В. Белоконь занимал ответственные руководящие посты в Ростовском государственном университете, а затем – в Южном федеральном университете. Так, в Ростовском государственном университете он был деканом механико-математического факультета (1981–1988), заведующим кафедрой математического моделирования (1988–2013), директором Научно-исследовательского института механики и прикладной математики им. И.И. Воровича (2002–2008), ректором (1988–2006). Он являлся также первым президентом Южного федерального университета (2008–2012).

Александр Владимирович был ректором РГУ в течение 18 лет, трижды переизбирался на этот пост. Руководя университетом в сложное постперестроечное время, он сумел сохранить потенциал родного университета, а затем существенно его развить и приумножить. Он являлся одним из инициаторов создания Южного федерального университета и разрабатывал первую программу его развития.

А.В. Белоконь много и плодотворно работал в различных областях механики деформируемого твердого тела и математического моделирования. Александр Владимирович – автор и соавтор более 200 научных работ и 4 монографий. Он подготовил 14 кандидатов и 5 докторов наук.

Работы А.В. Белоконя в области механики отличаются широким использованием сложного математического аппарата, в том числе методов функционального анализа, и глубоким проникновением в существо механических проблем. Такой подход был характерен для ученых Ростовской школы механики деформируемого твердого тела, созданной академиком РАН И.И. Воровичем.

Первые работы А.В. Белоконя были посвящены контактными задачам теории упругости. Для упругих тел цилиндрической формы им были получены новые граничные интегральные уравнения и разработаны

эффективные численные алгоритмы их решения, включающие метод асимптотического решения бесконечных систем линейных алгебраических уравнений. Под руководством проф. В.М. Александрова в 1969 г. он защитил кандидатскую диссертацию «Асимптотические методы решения контактных задач теории упругости для областей с цилиндрическими границами».

В дальнейшем А.В. Белоконь сочетал научную деятельность и преподавательскую работу. С 1968 г. он становится сотрудником кафедры теории упругости мехмата РГУ – ассистент, старший преподаватель, с 1970 г. – доцент. В научной сфере он обратился к исследованиям динамических задач теории упругости для анизотропных волноводов. Он первым начал изучать во взаимосвязи три типа динамических задач для полугограниченных упругих сред: классических задач об установившихся колебаниях, задач с подвижными нагрузками и задач с движущимися и одновременно осциллирующими источниками волн. Для этих задач им были сформулированы принципы соответствия, разработана методика анализа дисперсионных соотношений, установлены новые энергетические соотношения и изучены вопросы разрешимости и единственности решений в энергетических классах. Методы исследования задач с подвижными источниками им были распространены на контактные задачи с подвижными штампами и на задачи для вязкоупругих волноводов. Для последних А.В. Белоконем были сформулированы принципы соответствия между решениями упругих и вязкоупругих задач с подвижными и осциллирующими источниками волн. В 1988 г. Александр Владимирович защитил докторскую диссертацию «Колебания и волны в полугограниченных и ограниченных телах».

Вопросами распространения упругих волн в полугограниченных анизотропных упругих средах А.В. Белоконь занимался до конца своей жизни. Так, в последние годы им с помощью методов контурного интегрирования были получены новые результаты в задачах об исследовании волновых процессов для анизотропных слоистых упругих сред.

А.В. Белоконь внёс значительный вклад в разработку математических основ теории электроупругости. В соавторстве с И.И. Воровичем им изучены проблемы корректности постановок задач электроупругости, исследованы спектральные свойства пьезоэлектрических тел ограниченных размеров и обоснована применимость метода Бубнова – Галеркина. Ряд статей А.В. Белоконоя посвящен исследованию эффективных свойств композитов, состоящих из полимерной матрицы и пьезоэлектрических стержней. Итоги многолетних исследований по моделированию неоднородно поляризованных пьезоэлементов были подведены в монографии «Математическое моделирование необратимых процессов поляризации», написанной совместно с А.С. Скалиухом. В этой фундаментальной работе были рассмотрены модели необратимых процессов поляризации сегнетокерамической керамики и разработаны методы расчета остаточных полей поляризации и деформации.

По инициативе А.В. Белоконоя на кафедре математического моделирования была начата разработка программного комплекса ACELAN – первого в России конечно-элементного пакета, предназначенного для исследования пьезоэлектрических устройств, в том числе работающих во внешней акустической среде.

Большое число работ А.В. Белоконоя было посвящено решению конкретных инженерных задач. Так, им были выполнены исследования по расчету подшипников с полимерным покрытием, тензометрических датчиков давления, разнообразных пьезоэлектрических преобразователей, устройств акустических систем диагностики, а также построены различные прикладные инженерные теории и методы. Александр Владимирович Белоконь много лет являлся главным редактором журнала «Известия вузов. Северо-Кавказский регион» и возглавлял в этом журнале редколлегию серии «Естественные науки».

7 декабря состоялось расширенное заседание ученого совета Института математики, механики и компьютерных наук им. И.И. Воровича, посвященное 80-летию со дня рождения А.В. Белоконоя. В нём помимо членов совета приняли участие коллеги Александра Владимировича по университету и ректорату, близко знавшие его. Я.М. Ерусалимским была представлена презентация о жизненном пути этого замечательного человека, своими воспоминаниями поделились коллеги и ученики.

Уже восемь лет, как А.В. Белоконоя нет рядом с нами, однако память о нем живет – в его научных статьях и монографиях, в продолжающихся исследованиях его учеников, в друзьях, сотрудниках Южного федерального университета и многочисленных коллегам, работающих в разных организациях России.

А.В. Наседкин, М.И. Карякин, А.О. Ватульян

**Указатель материалов, опубликованных в журнале
«Известия высших учебных заведений.
Северо-Кавказский регион. Естественные науки» в 2021 г.**

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ

Бабаев А.Б., Кряквин В.Д. Матричное уравнение $AX+XB=C$ над конечным полем	4
Бондарчук А.А., Сумбатян М.А. Полуаналитический метод в задаче обтекания крылового профиля с острой задней кромкой потоком идеальной жидкости	3
Ватутлян А.О., Варченко А.А. Исследование колебаний балки из функционально-градиентного материала с учетом затухания	4
Величко В.Е., Мостовых П.С. Об осесимметричном нагружении пластины на локальной опоре в рамках теории Родиновой – Титаева – Черных	1
До Тхань Бинь Оптимизация пьезоэлектрического генератора изгибных колебаний с активным пьезомагнитным слоем на основе сочетания метода конечных элементов и генетического алгоритма	3
Долгих Т.Ф. Метод годографа для решения задачи о мелкой воде под твердой крышкой	1
Езаова А.Г., Канукова Л.В., Кунижев Б.И., Куповых Г.В. Нелокальная внутренняя краевая задача для смешанного уравнения третьего порядка	2
Езаова А.Г., Канукова Л.В., Куповых Г.В. Нелокальная краевая задача для одного смешанного уравнения третьего порядка	3
Казаков Е.А., Сумбатян М.А. Метод улучшения аналитических результатов для вращающейся лопасти в сравнении с прямым численным расчетом	4
Кудимова А.Б., Наседкин А.В. О предельных переходах в пространственных задачах гомогенизации двухкомпонентных диэлектрических композитов с экстремальными модулями одной из фаз	1
Лутай В.Н. Решение систем линейных алгебраических уравнений с использованием выборочной регуляризации	2
Мусина А.А. Об основных математических моделях и приближенном методе теории фильтрации	3
Норкин М.В. Медленные движения кругового цилиндра в жидкости после отрывного удара	2
Пожарский Д.А. Периодические контактные и смешанные задачи теории упругости (обзор)	2
Саранчук Ю.С., Татаркин А.А. Об одном обобщении оператора сдвига	3
Танирберген А.К. Смешанная задача для вырождающегося многомерного эллиптического уравнения	3
Татаркин А.А. О плотности многочленов в специальном пространстве целых функций экспоненциального типа	2
Хубежты Ш.С. Приближенное решение гиперсингулярного интегрального уравнения I рода, ограниченное на обоих концах отрезка интегрирования, с применением рядов Чебышева	1

НАУКИ О ЗЕМЛЕ

Баба-заде В.М., Исмаилова Н.Н., Имамвердиев Н.А., Абдуллаева Ш.Ф. Геохимические особенности Тулалларского золоторудного поля	1
Барышников Г.Я., Слажнева С.С., Максимова Н.Б., Сотников П.В. Влияние бора на качество подземных вод в Алтайском крае	2
Безуглова О.С., Попов А.Е., Дубинина М.Н., Скрипников П.Н. Влияние гуминового препарата «ВЮ-Дон» на содержание элементов питания в почве и качество черешни	1
Борисова Т.А., Бешенцев А.Н. Риски лесных пожаров в бассейне озера Байкал: статистическая оценка и картографирование	4
Бураева Е.А., Безуглова О.С., Горбов С.Н., Иванков Д.В., Михайлова Т.А., Кацаева Е.А., Маломыжева Н.В., Швецова Д.А., Ширяева А.А. Особенности распределения радионуклидов в наземных экосистемах каштановой зоны в условиях Ростовской области	4
Воробьев Н.В., Воробьев А.Н., Ипполитова Н.А. Байкало-монгольский транспортный коридор: взаимосвязь производства и населения	3

Дегтярева Т.В. Формирование микроэлементного состава тёмно-серых лесных почв Ставропольской возвышенности	4
Ерохин Ю.В., Иванов К.С., Захаров А.В., Хиллер В.В. Акцессорная и рудная минерализация сланцев из фундамента полуострова Ямал (Западно-Яротинский участок, Западная Сибирь).....	2
Зуев В.В., Павлинский А.В., Мордус Д.П., Нечепуренко О.Е., Ильин Г.Н., Быков В.Ю. Способ прогнозирования зон обледенения воздушных судов на основе радиометрических измерений параметров атмосферы	1
Ивлиева О.В., Беспалова Л.А., Глинка В.В., Сердюк Л.В., Чмыхов А.А. Использование беспилотных летательных аппаратов для оценки интенсивности проявления опасных береговых процессов водоохранной зоны Цимлянского водохранилища	2
Каменецкий Е.С., Радионов А.А., Тимченко В.Ю., Панаэтова О.С. Изменчивость аэрозольной оптической толщины в горных и предгорных районах Северной Осетии по данным спутниковых измерений	3
Козырев Д.А., Горбов С.Н., Безуглова О.С., Буряева Е.А., Тагивердиев С.С., Плахов Г.А., Сальник Н.В. Удельная активность радионуклидов и их взаимосвязь с валовым химическим составом почв.....	1
Косолапов А.Е., Скрипка Г.И., Беспалова Л.А., Глинка В.В., Ивлиева О.В., Сапрыгин В.В. Оценка горизонтальной и вертикальной эрозионной расчлененности водоохранной зоны Цимлянского водохранилища (на примере Дубовского района)	1
Крисак О.С., Попов Ю.В. Минеральные ассоциации жил с кварцем типа «диаманты Донбасса» Селезневского угленосного района (складчатый Донбасс)	2
Кураמיшина Н.Г., Елизарьев А.Н., Нафикова Э.В., Вдовина И.В., Смирнова Т.П., Кутлин Н.Г. Геоэкологическая оценка риска биологического загрязнения территории Республики Башкортостан по природно-очаговым факторам.....	3
Максимов Д.В., Жуликов А.А., Максимова А.Д. Особенности организации и размещения игорных зон в различных странах мира	2
Матюгин В.А., Попов А.Е., Безуглова О.С. Применение гуминовых препаратов на посевах озимой пшеницы в условиях полевого опыта на черноземе обыкновенном карбонатном	4
Назаренко О.В., Куао Я.С. Анализ изменчивости осадков в провинции Ольгин (Куба) за период 1970–2020 годы	4
Плотников И.В. Особенности радиального прироста кустарничков <i>Betula nana</i> и <i>Salix lanata</i> на различных элементах профиля рельефа в южной тундре Ямала	3
Решетняк О.С. Многолетняя изменчивость ионного стока крупных рек Арктической зоны России.....	3
Склярченко Г.Ю., Закруткин В.Е., Гибков Е.В. Особенности взаимодействия подземных и поверхностных вод в зонах дизъюнктивных тектонических нарушений (на примере Восточного Донбасса)	2
Ткаченко Ю.Ю., Латун В.В., Денисов В.И. Оценка методов расчета значений суммарной солнечной радиации для различных интервалов времени	1
Хлопкова М.В. Изучение раковинного вещества современных и плейстоценовых моллюсков рода <i>Didacna</i>	3
Чагарова Л.А. Проблема проведения границы между среднегорьем и высокогорьем на примере дешифрирования космоснимков Передового хребта Карачаево-Черкесии.....	1
Шилин А.Г. Исследование функционирования льдообразующих средств активных воздействий в реальных условиях применения	4
Jafarli J.V. Assessment of Groundwater Efficiency on Irrigation in the Area Between Turyanchay-Girdimanchay Rivers	4
Mansurov M.I., Galandarov B.H., Safari M.H., Karimov V.M., Karimli U.I. Geochemical Features of the Distribution of Ore Elements in the Polymetal Ores of Mehmanian Deposit (Azerbaijan Part of the Lesser Caucasus).....	2

БИОЛОГИЧЕСКИЕ НАУКИ

Афонин А.А. Сезонная динамика длины междоузлий <i>Salix triandra</i> L. (Salicaceae) на фоне кратковременной атмосферной засухи	1
Биарсланов А.Б., Залибеков З.Г., Гасанова З.У., Магомедова М.Х.-М., Гаджиев И.Р. Опыт применения вегетационного индекса в дистанционных исследованиях динамики продуктивности почвенного покрова Терско-Кумской низменности.....	4
Гасанова А.Ш., Гусейнов К.М., Бархалов Р.М., Хлопкова М.В. К изучению биологии воблы <i>Rutilus rutilus caspicus</i> (Jakowlev, 1870) крайновского побережья Каспийского моря.....	3
Голодная О.М., Жарикова Е.А. Гранулометрический состав почв заповедника «Ханкайский» (Приморский край).....	2

Гусейнов К.М., Гасанова А.Ш., Хлопкова М.В. К изучению биологии леща обыкновенного (<i>Abramis brama</i> L., 1758) юго-западного шельфа Северного Каспия	4
Гусейнов К.М., Гасанова А.Ш., Хлопкова М.В. К изучению биоэкологии креветок Каспия	3
Ермолаева О.Ю., Федяева В.В., Шмараева А.Н., Горовцов А.В. Биологическое разнообразие растений на территории охраняемого ландшафта «Раздорские склоны» (Ростовская область)	2
Исламагомедова Э.А., Халилова Э.А., Гасанов Р.З., Абакарова А.А., Аливердиева Д.А. Устойчивость дрожжей <i>Saccharomyces cerevisiae</i> к экстремальным условиям	2
Мазрухо А.Б., Каминский Д.И., Лобанов В.В., Соков Д.В., Архангельская И.В., Ежова М.И., Левченко Д.А., Сагакянц М.М. Дифференциация штаммов холерного вибриона от микроорганизмов – представителей рода <i>Aeromonas</i> с помощью питательной среды «Аргинин – железо – сахарозный агар»	2
Медведева А.М., Бирюкова О.А., Минкина Т.М., Кучменко Е.В., Манджиева С.С. Подвижность и распределение фосфора в черноземе обыкновенном при различных агротехнологиях	4
Миноранский В.А., Малиновская Ю.В., Даньков В.И., Колесников С.И. Мониторинг стрепета (<i>Tetrax tetrax</i> Linnaeus, 1758) на территории заповедника «Ростовский» с середины XX века до 2020 года	1
Миноранский В.А., Малиновская Ю.В., Тихонов А.В., Даньков В.И., Килякова В.С. Изменения в комплексе млекопитающих (Mammalia) на территории заповедника «Ростовский» с середины XX века ..	3
Полякова Н.В. Интродукция охраняемого вида сирени венгерской (<i>Syringa josikaea</i> Jacq.) на Южном Урале ..	1
Пуртова Л.Н. Показатели хемотреструкционного фракционирования органического вещества почв природных и антропогенно преобразованных ландшафтов юга Приморья	3
Судьина Л.В., Колесников С.И., Минникова Т.В., Тер-Мисакянц Т.А., Неведомая Е.Н., Казеев К.Ш. Оценка экотоксичности висмута по активности каталазы в зависимости от химического соединения и буферности почв	2
Щербина В.Г. Рекреационные изменения аллелопатической активности корневых систем древостоя в лесных экосистемах	4

НАШИ ЮБИЛЯРЫ

Ватульян А.О., Иваночкин П.Г., Чебаков М.И., Беляк О.А. Владимир Иванович Колесников (к 80-летию со дня рождения)	4
Ватульян А.О., Карякин М.И. Владимир Андреевич Бабешко (к 80-летию со дня рождения)	2
Карякин М.И., Карапетянц А.Н., Ватульян А.О. Стефан Григорьевич Самко (к 80-летию со дня рождения)	3

НАУЧНАЯ ЖИЗНЬ

Ватульян А.О., Карякин М.И., Наседкин А.В., Соловьев А.Н. Математическое моделирование и биомеханика в современном университете	2
Миноранский В.А. Весенний праздник природы и населения степей	2
Миноранский В.А., Кулиш А.В. II Международная научно-практическая конференция «Биологическое разнообразие: изучение, сохранение, восстановление, рациональное использование» (г. Керчь, 28–30 сентября 2020 г.)	1

ПАМЯТИ УЧЕНОГО

Абанин А.В., Ватульян А.О., Ерусалимский Я.М., Карякин М.И., Кирютенко Ю.А., Климентов С.Б., Курсаев А.Г., Мальцев И.М., Мелихов С.Н., Налбандян Ю.С., Устинов Ю.А. Памяти Юрия Фёдоровича Коробейника	2
Наседкин А.В., Карякин М.И., Ватульян А.О. Александр Владимирович Белоконов (1941–2013)	4

**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», ИБИС, Ulrich, EBSCO, Chemical Abstracts. Журнал включен в Russian Science Citation Index на платформе Web of Science.

Авторы, сохраняя за собой авторские права на работу и передавая журналу «Известия вузов. Северо-Кавказский регион» право первой публикации, автоматически принимают на себя обязательство не печатать её ни полностью, ни частично в каком-либо издании без указания ссылки на оригинальную публикацию в этом журнале.

Издательские услуги оплачиваются организацией или автором после утверждения статьи на редколлегии.

Оформление работ осуществляется согласно правилам:

1. Представляется статья в электронном виде. Перед заголовком указать индекс УДК.
2. Текст должен быть набран в редакторе Microsoft Office Word 2000, 2003, 2007, 2010, 2016 через 1,5 интервала, шрифтом Times New Roman, размером 14 пт, страницы пронумерованы.
3. Сведения об авторах с указанием автора, ответственного за переписку, на русском и английском языках. Экспертное заключение.
4. Полное название организации на русском и английском языках.
5. Название статьи и фамилии авторов на русском и английском языках.
6. Аннотация на русском и английском языках (1000–1500 знаков / 150–200 слов).
7. Ключевые слова на русском и английском языках (8–10 слов).

Журнал распространяется по подписке через объединённый каталог «Пресса России», интернет-каталог «Пресса по подписке». Подписной индекс – 70415 (подписка на полугодие). В неподписной период отдельные номера журнала за нынешний и прошлые годы можно приобрести в редакции.

Адрес для переписки: 344006, г. Ростов-на-Дону, ул. Б. Садовая, 105/42, ЮФУ, редакция журнала «Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки».

Тел./факс главной редакции (863) 218-40-00, добавочный 11-093, 11-094.

E-mail: izvestiya@sfedu.ru

Адрес в Интернете: www.izvestiya.sfedu.ru

ISSN 1026-2237. Doi 10.18522/1026-2237-2021-4. Известия высших учебных заведений.
Северо-Кавказский регион. Естественные науки.

2021. № 4