

ISSN 0321–3005

DOI 10.23683/0321-3005

*ИЗВЕСТИЯ
ВЫСШИХ
УЧЕБНЫХ
ЗАВЕДЕНИЙ*

45
лет

*Северо-Кавказский
регион*

ЕСТЕСТВЕННЫЕ

НАУКИ

2018

2

Журнал основан в 1972 г. Ю.А. Ждановым

Главная редакция:

В.И. Колесников (главный редактор)
В.Е. Закруткин, В.С. Золотарев, А.В. Павленко (заместители главного редактора),
Е.А. Шинкаренко (отв. секретарь)

Редакционная коллегия:

В.И. Колесников – главный редактор, академик РАН, доктор техн. наук, профессор, Ростовский государственный университет путей сообщения, 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
Ю.Ф. Коробейник – доктор физ.-мат. наук, профессор, Южный федеральный университет, 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, 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
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
В.В. Внуков – доктор биол. наук, профессор, Южный федеральный университет, 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
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
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
А.К. Сагателян – доктор геол.-мин. наук, Центр эколого-ноосферных исследований НАН РА, Армения
Э.С. Сианисян – доктор геол.-мин. наук, профессор, Южный федеральный университет, Россия
Ю.А. Устинов – доктор физ.-мат. наук, профессор, Южный федеральный университет, Россия
П. Фатгаль – доктор наук, профессор, Университет Нанта, Франция
Ю.А. Федоров – доктор геогр. наук, профессор, Южный федеральный университет, Россия
А.Д. Хованский – кандидат геол.-мин. наук, доктор геогр. наук, профессор, Южный федеральный университет, Россия
С.П. Чернышева – кандидат физ.-мат. наук, доцент Южный федеральный университет, Россия

Учредители:

Министерство образования и науки Российской Федерации, Дагестанский государственный технический университет, Дагестанский государственный университет, Донской государственный технический университет, Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова, Кубанский государственный университет, Кубанский государственный технологический университет, Пятигорский государственный университет, Ростовский государственный университет путей сообщения, Ростовский государственный экономический университет, Северо-Осетинский государственный университет им. К.Л. Хетагурова, Северо-Кавказский федеральный университет, Южно-Российский государственный политехнический университет им. М.И. Платова, Южно-Российский институт управления РАНХ и ГС при Президенте РФ, Южный федеральный университет

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

Подписано в печать 22.06.2018. Выход в свет 27.06.2018. Формат 60×84 1/8. Бумага офсетная.
Шрифт Times. Усл. печ. л. 14,65. Уч.-изд. л. 16,63. Тираж 250 экз. Заказ № 6461

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», e-mail: izvestiya@sfedu.ru
Адрес в Интернете: www.izvestiya.sfedu.ru

Адрес редколлегии серии «Естественные науки»: 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:

V.I. Kolesnikov (Editor-in-Chief)
V.E. Zakrutkin, V.S. Zolotarev, A.V. Pavlenko (Deputy Editor-in-Chief),
E.A. Shinkarenko (Assistant Editor)

Editorial Board:

V.I. Kolesnikov - Editor-in-Chief, Academician, Russian Academy of Sciences, Doctor of Technical Sciences, Professor, Rostov State Transport University, Russia
V.E. Zakrutkin - Chair 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
Yu.F. Korobeinik - Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Southern Federal University, Russia
A.G. Kusraev - Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Southern Mathematical Institute, Vladikavkaz Scientific Center, Russian Academy of Sciences, Russia
G.G. Matishov - Academician, Russian Academy of Sciences, Doctor of Geology and Mineralogy, Professor, 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 Biology, Professor, Southern Federal University, Russia
V.N. Trufanov - Deputy Chair 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
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
V.V. Vnukov - Doctor of Biology, Professor, Southern Federal University, Russia
L.S. Vorovich - Candidate of Physics and Mathematics, Associate Professor, Southern Federal University, Russia
O.N. Dyomina - Doctor of Biology, Professor, Aliev Karachay-Cherkess State University, Russia
A.G. Zakharov - Doctor of Technical Sciences, Professor, Southern Federal University, Russia
Ya.M. Erusalimsky - Deputy Chair 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
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 Science, 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 Science, 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
A.K. Saghatlyan - Doctor of Geology and Mineralogy, Center for Ecological and Noospheric Studies, National Academy of Sciences of Armenia, Armenia
E.S. Sianisyan - Doctor of Geology and Mineralogy, Professor, Southern Federal University, Russia
Yu.A. Ustinov - Doctor of Physics and Mathematics, 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
S.P. Chernysheva - Candidate of Physics and Mathematics, Southern Federal University, Russia

The Founders

Ministry of Education and Science of the Russian Federation, Dagestan State Technical University, Dagestan State University, Don State Technical University, Berbekov Kabardino-Balkarian State University, Kuban State University, Kuban State Technological University, Pyatigorsk State University, Rostov State Transport University, Rostov State University of Economics, Khetagurov North Ossetian State University, North Caucasus Federal University, Platov South Russian State Technical University, South Russian Institute of Management, Russian Academy of National Economy and Public Administration of the President of the Russian Federation, Southern Federal University

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

Signed print 22.06.2018. The publication 27.06.2018. Format 60×84 1/8. Offset paper. Font Times.
Conv. print. sheets 14,65. Publ. sign. 16,63. Edition 250 copies. Order number 6461.

Address of Editorial Board and the publisher (for correspondence): 344006, Rostov-on-Don, Bolshaya Sadovaya St., 105/42, SFU, journal "Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Severo-Kavkazskii region", e-mail: izvestiya@sfedu.ru
Web Address: www.izvestiya.sfedu.ru

Address of Editorial Board of the series "Natural Science": 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

IZVESTIYA VUZOV. SEVERO-KAVKAZSKII REGION

DOI 10.23683/0321-3005-2018-2

Регистрационный номер 011019
Комитета Российской Федерации по печати
Научно-образовательный и прикладной журнал
Издается с 1973 г.
Периодичность серии 4 номера в год
№ 2 (198) 2018 г.

Reg. No. 011019
Of the Committee of the Press of the Russian Federation
Scientifically educational and applied magazine
Was founded in 1973.
Period is 4 numbers per a year
No. 2 (198) 2018.

ЕСТЕСТВЕННЫЕ НАУКИ

NATURAL SCIENCE

СОДЕРЖАНИЕ

CONTENTS

Обращение к читателям.....4

To Readers..... 4

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ

PHYSICAL AND MATHEMATICAL SCIENCES

Алдашев С.А. Корректность задачи Дирихле для одного класса вырождающихся многомерных эллипτικο-параболических уравнений6
Вагабов А.И. Регулярная краевая задача для дифференциального пучка порядка 15 с пятикратными характеристиками.....12
Ватulyan А.О., Гущина К.В. О реконструкции характеристик включения на основе модели Тимошенко.....16
Ляпин А.А. Анализ контактного взаимодействия пьезоактуатора и упругого слоя в режиме установившихся колебаний на основе метода сосредоточенных усилий.....23
Малиева Ф.Ф., Бейбалаев В.Д. О сходимости разностного метода решения задачи Коши для обыкновенного дифференциального уравнения с оператором дробного дифференцирования Римана – Лиувилля..... 30
Морозов Н.Ф., Индейцев Д.А., Лукин А.В., Попов И.А., Привалова О.В., Штукин Л.В. Динамика и устойчивость электростатического преобразователя под действием теплового импульса.....35

Aldashev S.A. The Correctness of the Dirichlet Problem for One Class of Degenerate Multidimensional Elliptic-Parabolic Equations 6
Vagabov A.I. Regular Boundary Value Problem for the Differential Beam About with Fivefold Characteristics..... 12
Vatulyan A.O., Guschina K.V. On the Reconstruction of Characteristics of Inclusion Based on the Timoshenko Model 16
Lyapin A.A. Analysis Of Contact Interaction of Piezoelectric Actuator and Elastic Layer in Terms of Steady Oscillations on Basis of Pin-forced Method 23
Malieva F.F., Beybalaev V.D. On the Convergence of the Difference Method for Solving the Cauchy Problem for an Ordinary Differential Equation with the Riemann-Liouville Fractional Differentiation Operator 30
Morozov N.F., Indeitsev D.A., Lukin A.V., Popov I.A., Privalova O.V., Shtukin L.V. Dynamics and Stability of Electrostatic Transducer under the Influence of Heat Impulse 35

НАУКИ О ЗЕМЛЕ

SCIENCE OF EARTH

Бабаев М.П., Рамазанова Ф.М., Мирза-заде Р.И. Влияние промежуточных посевов на микроагрегатный состав почв сухостепной и полупустынной зон Азербайджана45

Babaev M.P., Ramazanova F.M., Mirza-zade R.I. The Influence of the Intermediate Sowings on Microaggregate Composition Soils in the Dry Steppe and Semi-desert Zone of Azerbaijan..... 45

<i>Дедова И.С., Селезнева А.В.</i> Геолого-геоморфологические условия Большой излучины Дона как факторы исторического расселения человека в ее границах	59
<i>Жуланова В.Н., Жарова Т.Ф.</i> Сидеральные пары в условиях лесостепи Улуг-Хемской котловины Тувы.....	69
<i>Закруткин В.Е., Гибков Е.В., Складенко Г.Ю., Решетняк О.С.</i> Угледобывающие районы как очаг экологической напряженности.....	75
<i>Куповых Г.В., Клово А.Г., Тимошенко Д.В., Свидельский С.С.</i> Приближенное аналитическое решение задачи об электродинамическом состоянии приземной атмосферы в условиях аэрозольного загрязнения.....	84
<i>Сианисян Э.С., Бочкарев А.В., Бочкарев В.А., Сианисян С.Э.</i> Развитие представлений о возобновляемости углеводородов в разрабатываемых залежах и пути рациональной добычи нефти и газа.....	90
<i>Шкура В.Н., Островская Е.Е.</i> Классификация речных бассейнов по их рыбохозяйственной ценности	95

БИОЛОГИЧЕСКИЕ НАУКИ

<i>Водолажский Д.И., Назаралиева Н.А., Моисеенко Т.И., Франциянц Е.М., Потемкин Д.С., Васильченко Н.Г., Меньшенина А.П.</i> Усиление цитотоксического действия 5-фторурацила при сочетанном применении с ультразвуком	100
<i>Котиева И.М., Кит О.И., Франциянц Е.М., Бандовкина В.А., Каплиева И.В., Трепитакки Л.К., Черярина Н.Д., Позорева Ю.А., Бликян М.В.</i> Влияние хронической боли на уровень половых гормонов, пролактина и гонадотропных гормонов в сыворотке крови и патологически измененной коже у самок мышей в динамике роста злокачественной меланомы	106
<i>Мельник В.А., Мельник С.Н.</i> Динамика функциональных показателей городских школьников Беларуси (с конца 1980-х до 2010–2012 гг.).....	117

НАУЧНАЯ ЖИЗНЬ

<i>Миноранский В.А.</i> VII Донской экологический фестиваль «Воспетая степь» (20–23 апреля 2018 г.)	123
<i>Ватulyan А.О., Карякин М.И., Соловьев А.Н.</i> Всероссийская конференция «Биомеханика-2018» (Дивноморское, 28 мая – 1 июня 2018 г.).....	125
<i>Карапетынц А.Н.</i> VIII Международная конференция «Современные методы и проблемы теории операторов и гармонического анализа и их приложения VIII (ОТНА 2018)» (Ростов-на-Дону, 22–27 апреля 2018 г.)	126

<i>Dedova I.S., Seleznyova A.V.</i> Geological and Geomorphological Conditions of the Big Bend of Don as Factors of Historical Resettlement of the Person in Her Borders.....	59
<i>Zhulanova V.N., Zharova T.F.</i> Green Manure Vapor under Forest-steppe of Ulug-Hem Hollow of Tyva.....	69
<i>Zakrutkin V.E., Gibkov E.V., Sklyarenko G.Yu., Reshetnyak O.S.</i> Coal-Mining Areas as Seats of Ecological Tension	75
<i>Kupovykh G.V., Klovo A.G., Timoshenko D.V., Svidelsky S.S.</i> Approximate Analytical Solution of the Problem of the Electrodynamic State of the Surface Atmosphere in the Conditions of Aerosol Pollution	84
<i>Sianisyan E.S., Bochkarev A.V., Bochkarev V.A., Sianisyan S.E.</i> The Development of Ideas about the Sustainability of Hydrocarbons in Existing Reservoirs, and the Sustainable Production of Oil and Gas.....	90
<i>Shkura V.N., Ostrovskaya E.E.</i> Classification of Rivers Basins According to Their Fishery Value	95

BIOLOGICAL SCIENCES

<i>Vodolazhsky D.I., Nazaralievа N.A., Moiseenko T.I., Frantsiyants E.M., Potemkin D.S., Vasilchenko N.G., Menshenina A.P.</i> Intensification of Cytotoxic Activity of 5-Fluorouracil in Combined Use with Ultrasound.....	100
<i>Kotieva I.M., Kit O.I., Frantsiyants E.M., Bandovkina V.A., Kaplieva I.V., Trepitaki L.K., Cheryarina N.D., Pogorelova Yu.A., Blikjan M.V.</i> Effect of Chronic Pain on the Level of Sex Hormones, Prolactin and Gonadotropins in Serum and Pathologically Changed Skin of Female Mice in Dynamics of Malignant Melanoma Growth	106
<i>Melnik V.A., Melnik S.N.</i> The Dynamics of Functional Parameters of City School Children of Belarus (from the End of the 1980s till 2010–2012)	117

SCIENCE LIVE

<i>Minoranskii V.A.</i> 7th Don Ecological Festival "Sung Steppe" (April 20-23, 2018).....	123
<i>Vatulyan A.O., Karjakin M.I., Solovjev A.N.</i> All-Russian Conference «Biomechanics-2018» (Divnomorskoe, May 28 - June 1, 2018).....	125
<i>Karapetyants A.N.</i> 8th International Conference "Modern Methods, Problems and Applications of Operator Theory and Harmonic Analysis, 8 (OTHA 2018)" (Rostov-on-Don, April 22-28, 2018).....	126

ОБРАЩЕНИЕ К ЧИТАТЕЛЯМ



Дорогие друзья! Нашему журналу в этом году исполняется 45 лет. Учрежден он был в 1972 г. под названием «Известия СКНЦ ВШ» (первые номера вышли в 1973 г.). В тот период необходимость в издании, в котором были бы отражены идеи и концепции научно-технической и образовательной политики в регионе, с точки зрения государства, приобрела особую актуальность. По замыслу учредителей и чл.-кор. РАН Ю.А. Жданова, бессменного руководителя журнала (1972–2006 гг.), главной задачей издания было освещение достижений фундаментальных и прикладных исследований в области общественных, естественных и технических наук. Основные научные направления и тематика исследований впервые на страницах трех серий журнала были соотнесены с общей картиной развития науки и экономики Северного Кавказа.

За 45 лет журнал прошел непростой путь. 90-е гг. XX в. потребовали огромных усилий в преодолении вызовов времени. Изменилась не только деятельность журнала, но и его название, несколько раз менялась периодичность. Редакция из-за финансовых трудностей вынуждена была перейти к системе платных публика-

ций, изменить число и состав учредителей. Благодаря моральной и материальной поддержке Министерства образования, вузов Северного Кавказа, Южного федерального университета, Южно-Российского государственного технического университета им. М.И. Платова журнал выстоял. Редакционный портфель по-прежнему наполняется материалами, охватывающими широкий спектр проблем современной науки. В журнале публикуются работы авторов не только Северо-Кавказского региона, но и Москвы, Санкт-Петербурга, Дальнего Востока, Алтая, ближнего и дальнего зарубежья. Ученые откликаются на наиболее актуальные проблемы науки и вузовского образования. Сохраняется заложенная еще Ю.А. Ждановым традиция бережного отношения к авторам, обратной связи с ними. Как и раньше, мы открыты для широкого научного сотрудничества и дискуссий по различным проблемам.

Сегодня стратегия развития журнала направлена на совершенствование редакционно-издательской политики, повышение качества публикаций, выход на международный уровень, достижение максимальной степени интеграции в международное научно-образовательное пространство в соответствии с мировыми стандартами и требованиями. Журнал включен в Перечень изданий, рекомендуемых ВАК для публикаций основных результатов диссертаций на соискание ученой степени кандидата и доктора

наук. Опубликованные статьи индексируются в российских и международных электронных библиотеках и наукометрических базах данных: РИНЦ (RSCI), «Киберленинка», «Рукопт», ЭБС «Университетская библиотека онлайн», Ulrich, EBSCO.

Отметим, что многие годы члены редакционной коллегии добросовестно и совершенно бескорыстно участвуют в жизни журнала, оказывая ему помощь и тщательно рецензируя статьи и другие материалы, повышая качество публикаций и способствуя в конечном счете повышению научного уровня журнала. Их имена вы можете увидеть на обложке, но хочется особо отметить деятельность руководителей серии И.И. Воровича (1973–2001), А.В. Белокопя (2001–2013), нынешнего главы редколлегии В.Е. Закруткина, заместителей главного редактора О.Д. Пряхиной (1997–2001), Е.Г. Гежи (2001–2015), ответственного секретаря Н.И. Безверхой (1993–2001), членов редколлегии А.В. Абанина, В.В. Внукова, Я.М. Ерусалимского, М.И. Карякина, С.И. Колесникова, Г.В. Куповых, В.А. Миноранского, В.Н. Труфанова, Ю.А. Устинова, Ю.А. Федорова, Э.З. Эмирбекова, рецензентов и постоянных авторов О.Г. Авсянкина, Л.А. Беспаловой, А.О. Ватульяна, В.В. Латун, Т.М. Минкиной, М.В. Морозова, А.В. Наседкина, М.А. Сумбатяна, М.И. Чебакова, Д.Ю. Шишкиной.

Поздравляю авторов, читателей и почитателей журнала, членов редколлегии, рецензентов, сотрудников редакции и всех, кто имел и имеет отношение к деятельности нашего издания, со знаменательной датой – 45-летием журнала! От всей души желаю всем здоровья и процветания, а журналу – дальнейшего развития на благо российской науки!

*Главный редактор журнала
Владимир Иванович Колесников,
доктор технических наук, профессор, академик РАН*

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ
PHYSICAL AND MATHEMATICAL SCIENCES

УДК 517.956

DOI 10.23683/0321-3005-2018-2-6-11

**КОРРЕКТНОСТЬ ЗАДАЧИ ДИРИХЛЕ ДЛЯ ОДНОГО КЛАССА ВЫРОЖДАЮЩИХСЯ
МНОГОМЕРНЫХ ЭЛЛИПТИКО-ПАРАБОЛИЧЕСКИХ УРАВНЕНИЙ**

© 2018 г. С.А. Алдашев¹

¹Казахский национальный педагогический университет им. Абая, Алматы, Казахстан

**THE CORRECTNESS OF THE DIRICHLET PROBLEM FOR ONE CLASS
OF DEGENERATE MULTIDIMENSIONAL ELLIPTIC-PARABOLIC EQUATIONS**

S.A. Aldashev¹

¹Abay Kazakh Pedagogical National University, Almaty, Kazakhstan

Алдашев Серик Аймурзаевич – доктор физико-математических наук, профессор, кафедра математики и математического моделирования, Институт математики, физики и информатики, Казахский национальный педагогический университет им. Абая, ул. Толе би 86, г. Алматы, 050012, Казахстан, e-mail: aldash51@mail.ru

Serik A. Aldashev - Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Department of Mathematics and Mathematical Modeling, Institute of Mathematics, Physics and Informatics, Abay Kazakh National Pedagogical University, Tole bi St., 86, Almaty, 050012, Kazakhstan, e-mail: aldash51@mail.ru

Корректность решения краевых задач на плоскости для эллиптических уравнений методом теории аналитических функций комплексного переменного хорошо изучена. При исследовании аналогичных вопросов, когда число независимых переменных больше двух, возникают трудности принципиального характера. Весьма привлекательный и удобный метод сингулярных интегральных уравнений теряет свою силу из-за отсутствия сколько-нибудь полной теории многомерных сингулярных интегральных уравнений. Краевые задачи для эллиптических уравнений второго порядка в областях с ребрами подробно изучены.

В ранее опубликованных работах автора найдены явные виды классических решений задач Дирихле в цилиндрических областях для многомерных эллиптических уравнений. В данной статье показана однозначная разрешимость и получен явный вид классического решения задачи Дирихле в цилиндрических областях для одного класса вырождающихся многомерных эллипτικο-параболических уравнений.

Ключевые слова: корректность, многомерные вырождающиеся уравнения, задача Дирихле, сферические функции, функция Бесселя.

The correctness of boundary value problems on the plane for elliptic equations by the method of the theory of analytic functions of a complex variable has been well studied. When investigating similar questions, when the number of independent variables is greater than two, problems of a fundamental nature arise. A very attractive and convenient method of singular integral equations loses their validity due to the absence of any full theory of multidimensional singular integral equations. Boundary value problems for second-order elliptic equations in domains with edges have been studied in detail.

In the author's papers explicit forms of classical solutions of Dirichlet problems in cylindrical domains for multidimensional elliptic equations are found. In this paper we use the method proposed in the author's works, we show the unique solvability and obtain an explicit form of the classical solution of the Dirichlet problem in a cylindrical domain for one class of degenerate multidimensional elliptic-parabolic equations.

Keywords: correctness, multidimensional degenerate equations, Dirichlet problem, spherical functions, Bessel function.

Постановка задачи и результат

Для общих эллипτικο-параболических уравнений 2-го порядка постановку 1-й краевой задачи (или задачи Дирихле) впервые осуществил Г. Фикера [1]. Дальнейшее изучение этой задачи приведено в [2].

В данной работе для одного класса вырождающихся многомерных эллипτικο-параболических уравнений доказана однозначная разрешимость и получен явный вид классического решения задачи Дирихле в цилиндрической области. В статье используется метод, предложенный в работах [3–6].

Пусть $\Omega_{\alpha\beta}$ – цилиндрическая область евклидова пространства E_{m+1} точки (x_1, \dots, x_m, t) , ограниченная цилиндром $\Gamma = \{(x, t) : |x| = 1\}$, плоскостями $t = \alpha > 0$ и $t = \beta < 0$, где $|x|$ – длина вектора $\mathbf{x} = (x_1, \dots, x_m)$.

Обозначим через Ω_α и Ω_β части области $\Omega_{\alpha\beta}$, а через $\Gamma_\alpha, \Gamma_\beta$ – части поверхности Γ , лежащие в полупространствах $t > 0$ и $t < 0$; $\sigma_\alpha, \sigma_\beta$ – верхнее и нижнее основания области $\Omega_{\alpha\beta}$.

Пусть S – общая часть границ областей Ω_α и Ω_β , представляющая множество $\{t = 0, 0 < |x| < 1\}$ в E_m .

В области $\Omega_{\alpha\beta}$ рассмотрим вырождающиеся многомерные эллипτικο-параболические уравнения

$$0 = \begin{cases} t^q \Delta_x u - u_t + \sum_{i=1}^m d_i(x, t) u_{x_i} + e(x, t) u, & t > 0, \\ |t|^p \Delta_x v + u_{tt} + \sum_{i=1}^m a_i(x, t) u_{x_i} + b(x, t) u_t + c(x, t) u, & t < 0, \end{cases} \quad (1)$$

где $p, q = const; q \geq 0; p > 0; \Delta_x$ – оператор Лапласа по переменным $x_1, \dots, x_m, m \geq 2$.

В дальнейшем нам удобно перейти от декартовых координат x_1, \dots, x_m, t к сферическим $r, \theta_1, \dots, \theta_{m-1}, t, r \geq 0; 0 \leq \theta_i \leq \pi, i = 2, 3, \dots, m-2; 0 \leq \theta_{m-1} < 2\pi, \theta = (\theta_1, \dots, \theta_{m-1})$.

Задача 1 (Дирихле). Найти решение уравнения (1) в области $\Omega_{\alpha\beta}$ при $t \neq 0$ из класса $C(\overline{\Omega_{\alpha\beta}}) \cap C^2(\Omega_{\alpha\beta})$, удовлетворяющее краевым условиям

$$u|_{\sigma_\alpha} = \varphi_1(r, \theta), \quad u|_{\Gamma_\alpha} = \psi_1(t, \theta), \quad (2)$$

$$u|_{\Gamma_\beta} = \psi_2(t, \theta), \quad u|_{\sigma_\beta} = \varphi_2(t, \theta). \quad (3)$$

При этом $\varphi_1(1, \theta) = \psi_1(\alpha, \theta), \varphi_2(1, \theta) = \psi_2(\beta, \theta), \psi_1(0, \theta) = \psi_2(0, \theta)$.

Пусть $\{Y_{n,m}^k(\theta)\}$ – система линейно независимых сферических функций порядка $n; 1 \leq k \leq k_n;$

$$(m-2)!n!k_n = (n+m-3)!(2n+m-2).$$

Имеет место [7]

Лемма 1. Пусть $f(r, \theta) \in W_2^l(S)$. Если $l \geq m-1$, то ряд

$$f(r, \theta) = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{k=1}^{k_n} f_n^k(r) Y_{n,m}^k(\theta), \quad (4)$$

а также ряды, полученные из него дифференцированием до порядка $p \leq l - m + 1$, сходятся абсолютно и равномерно.

Лемма 2. Для того чтобы $f(r, \theta) \in W_2^l(S)$, необходимо и достаточно, чтобы коэффициенты ряда (4) удовлетворяли неравенствам

$$|f_0^1(r)| \leq c_1, \quad \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{k=1}^{k_n} n^{2l} |f_n^k(r)|^2 \leq c_2, \quad c_1, c_2 = const;$$

$W_2^l(S), l = 0, 1, \dots$ – пространства Соболева.

Через $\tilde{d}_{in}^k(r, t), d_{in}^k(r, t), \tilde{e}_{in}^k(r, t), \tilde{d}_n^k(r, t), \rho_n^k, \bar{\varphi}_{1n}^k(r), \bar{\varphi}_{2n}^k(r), \psi_{1n}^k(r), \psi_{2n}^k(t)$ обозначим коэффициенты разложения функций $d_i(r, \theta, t) \rho, d_i \frac{x_i}{r} \rho, e(r, \theta, t) \rho, d(r, \theta, t) \rho, \rho(\theta), i = 1, \dots, m, \varphi_1(r, \theta), \varphi_2(r, \theta), \psi_1(t, \theta), \psi_2(t, \theta)$ ряда (4) в $\rho(\theta) \in C^\infty(H); H$ – единичная сфера в E_m .

Пусть $d_i(r, \theta, t), e(r, \theta, t) \in W_2^l(\Omega_\alpha) \subset C(\overline{\Omega_\alpha}), a_i(r, \theta, t), b(r, \theta, t), c(r, \theta, t) \in W_2^l(\Omega_\beta), i = 1, \dots, m, l \geq m+1, e(r, \theta, t) \leq 0, \forall (r, \theta, t) \in \Omega_\alpha, c(r, \theta, t) \leq 0, \forall (r, \theta, t) \in \Omega_\beta$.

Тогда справедлива

Теорема. Если $\varphi_1(r, \theta), \varphi_2(r, \theta) \in W_2^p(S), \psi_1(t, \theta) \in W_2^p(\Gamma_\alpha), \psi_2(t, \theta) \in W_2^p(\Gamma_\beta), p > \frac{3m}{2}$, то задача 1 однозначно разрешима.

Разрешимость задачи 1

Сначала покажем разрешимость задачи (1), (3). В сферических координатах уравнение (1) в области Ω_β имеет вид

$$L_1 u \equiv t^p \left(u_{rr} + \frac{m-1}{r} u_r - \frac{1}{r^2} \delta u \right) - u_t + \sum_{i=1}^m d_i(r, \theta, t) u_{x_i} + e(r, \theta, t) u = 0, \quad (5)$$

$$\delta \equiv - \sum_{j=1}^{m-1} \frac{1}{g_j \sin^{m-j-1} \theta_j} \frac{\partial}{\partial \theta_j} \left(\sin^{m-j-1} \theta_j \frac{\partial}{\partial \theta_j} \right),$$

$$g_1 = 1, \quad g_j = (\sin \theta_1 \dots \sin \theta_{j-1})^2, \quad j > 1.$$

Известно, что спектр оператора δ состоит из собственных чисел $\lambda_n = n(n+m-2)$, $n=0,1,\dots$, каждому из которых соответствует k_n ортонормированных собственных функций $Y_{n,m}^k(\theta)$ [7].

Искомое решение задачи 1 в области Ω_β будем искать в виде

$$u(r, \theta, t) = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{k=1}^{k_n} \bar{u}_n^k(r, t) Y_{n,m}^k(\theta), \quad (6)$$

где $\bar{u}_n^k(r, t)$ – функции, подлежащие определению.

Подставив (6) в (5), умножив полученное выражение на $\rho(\theta) \neq 0$ и проинтегрировав по сфере H , для \bar{u}_n^k получим [8, 9]

$$\begin{aligned} & t^q \rho_0^1 \bar{u}_{0rr}^1 - \rho_0^1 \bar{u}_{0t}^1 + \left(\frac{m-1}{r} t^q \rho_0^1 + \sum_{i=1}^m d_{i0}^1 \right) \bar{u}_{0r}^1 + \tilde{e}_0^1 \bar{u}_0^1 + \\ & + \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{k=1}^{k_n} \left\{ t^q \rho_n^k \bar{u}_{nrr}^k - \rho_n^k \bar{u}_{nt}^k + \left(\frac{m-1}{r} t^q \rho_n^k + \sum_{i=1}^m d_{in}^k \right) \bar{u}_{nr}^k + \right. \\ & \left. + \left[\tilde{e}_n^k - \lambda_n \frac{\rho_n^k}{r^2} t^q + \sum_{i=1}^m (\tilde{d}_{in-1}^k - n d_{in}^k) \right] \bar{u}_n^k \right\} = 0. \quad (7) \end{aligned}$$

Рассмотрим бесконечную систему дифференциальных уравнений

$$t^q \rho_0^1 \bar{u}_{0rr}^1 - \rho_0^1 \bar{u}_{0t}^1 + \frac{m-1}{r} t^q \rho_0^1 \bar{u}_{0r}^1 = 0, \quad (8)$$

$$\begin{aligned} & t^q \rho_1^k \bar{u}_{1rr}^k - \rho_1^k \bar{u}_{1t}^k + \frac{m-1}{r} t^q \rho_1^k \bar{u}_{1r}^k - \frac{\lambda_1}{r^2} t^q \rho_1^k \bar{u}_1^k = \\ & = -\frac{1}{k_1} \left(\sum_{i=1}^m \tilde{d}_{i0}^k \bar{u}_{0r}^1 + \tilde{e}_0^1 \bar{u}_0^1 \right), \quad n=1, \quad k = \overline{1, k_1}, \quad (9) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & t^q \rho_n^k \bar{u}_{nrr}^k - \rho_n^k \bar{u}_{nt}^k + \frac{m-1}{r} t^q \rho_n^k \bar{u}_{nr}^k - \frac{\lambda_n}{r^2} t^q \rho_n^k \bar{u}_n^k = \\ & = -\frac{1}{k_n} \sum_{k=1}^{k_{n-1}} \left\{ \sum_{i=1}^m \tilde{d}_{in-1}^k \bar{u}_{n-1r}^1 + \right. \\ & \left. + \left[\tilde{e}_{n-1}^k + \sum_{i=1}^m (\tilde{d}_{in-2}^k - (n-1) d_{in-1}^k) \bar{u}_{n-1}^k \right] \right\}, \end{aligned} \quad (10)$$

$$k = \overline{1, k_n}, \quad n = 2, 3, \dots$$

Суммируя уравнение (9) от 1 до k_1 , (10) – от 1 до k_n , затем сложив полученные выражения вместе с (8), приходим к уравнению (7).

Отсюда следует, что если $\left\{ \bar{u}_n^k \right\}, k = \overline{1, k_n}, n=0,1,\dots$ – решение системы (8)–(10), то оно является решением уравнения (7).

Нетрудно заметить, что каждое уравнение системы (8)–(10) можно представить в виде

$$t^q \left(\bar{u}_{nrr}^k + \frac{(m-1)}{r} \bar{u}_{nr}^k - \frac{\lambda_n}{r^2} \bar{u}_n^k \right) - \bar{u}_{nt}^k = \bar{f}_n^k(r, t), \quad (11)$$

где $\bar{f}_n^k(r, t)$ определяются из предыдущих уравнений этой системы, причем $\bar{f}_0^1(r, t) \equiv 0$.

$$\begin{aligned} & \text{Далее из краевого условия (2) в силу (6)} \\ & \bar{u}_n^k(r, \alpha) = \bar{\varphi}_{1n}^k(r), \quad \bar{u}_n^k(1, t) = \bar{\psi}_{1n}^k(t), \quad (12) \\ & k = \overline{1, k_n}, \quad n = 0, 1, \dots \end{aligned}$$

Произведём замену $\bar{v}_n^k(r, t) = \bar{u}_n^k(r, t) - \psi_{1n}^k(t)$ в (11), (12). Получим

$$t^q \left(\bar{v}_{nrr}^k + \frac{(m-1)}{r} \bar{v}_{nr}^k - \frac{\lambda_n}{r^2} \bar{v}_n^k \right) - \bar{v}_{nt}^k = \bar{f}_n^k(r, t), \quad (13)$$

$$\begin{aligned} & \bar{v}_n^k(r, \alpha) = \bar{\varphi}_{1n}^k(t), \quad \bar{v}_n^k(1, t) = 0, \quad (14) \\ & k = \overline{1, k_n}, \quad n = 0, 1, \dots, \end{aligned}$$

$$\bar{f}_n^k(r, t) = \bar{f}_n^k(r, t) + \psi_{1nt}^k + \frac{\lambda_n t^q}{r^2} \psi_{1n}^k,$$

$$\bar{\varphi}_{1n}^k(r) = \bar{\varphi}_{1n}^k(r) - \psi_{1n}^k(\alpha).$$

Произведя замену $\bar{v}_n^k(r, t) = r^{\frac{(1-m)}{2}} v_n^k(r, t)$, задачу (13), (14) приведем к виду

$$L v_n^k \equiv t^q \left(v_{nrr}^k + \frac{\bar{\lambda}_n}{r^2} v_n^k \right) - v_{nt}^k = \tilde{f}_n^k(r, t), \quad (15)$$

$$\begin{aligned} & v_n^k(r, \alpha) = \tilde{\varphi}_{1n}^k(r), \quad v_n^k(1, t) = 0, \\ & \bar{\lambda}_n = \frac{(m-1)(3-m) - 4\lambda_n}{4}, \quad \tilde{f}_n^k(r, t) = r^{\frac{(m-1)}{2}} \bar{f}_n^k(r, t), \end{aligned}$$

$$\tilde{\varphi}_{1n}^k(r) = r^{\frac{(m-1)}{2}} \bar{\varphi}_{1n}^k(r).$$

Решение задачи (15) ищем в виде

$$v_n^k(r, t) = v_{1n}^k(r, t) + v_{2n}^k(r, t), \quad (16)$$

где $v_{1n}^k(r, t)$ – решение задачи

$$L v_{1n}^k = \tilde{f}_n^k(r, t), \quad (17)$$

$$v_{1n}^k(r, \alpha) = 0, \quad v_{1n}^k(1, t) = 0; \quad (18)$$

$v_{2n}^k(r, t)$ – решение задачи

$$L v_{2n}^k = 0, \quad (19)$$

$$v_{2n}^k(r, \alpha) = \tilde{\varphi}_{1n}^k(r), \quad v_{2n}^k(1, t) = 0. \quad (20)$$

Решение вышеуказанных задач представим в виде

$$v_n^k(r, t) = \sum_{s=1}^{\infty} R_s(r) T_s(t); \quad (21)$$

$$\bar{f}_n^k(r, t) = \sum_{s=1}^{\infty} a_{s,n}(t) R_s(r), \quad \bar{\tau}_n(r, t) = \sum_{s=1}^{\infty} e_{s,n}(t) R_s(r),$$

$$\bar{\varphi}_n^k(r, t) = \sum_{s=1}^{\infty} b_{s,n}(t) R_s(r). \quad (22)$$

Подставляя (21) в (17), (18), с учетом (22) получим

$$R_{sr} + \frac{\tilde{\lambda}_n}{r^2} R_s + \mu R_s = 0, \quad 0 < r < 1, \\ R_s(1) = 0, \quad |R_s(0)| < \infty. \quad (23)$$

$$T_{st} + \mu t^q T_s(t) = 0, \quad 0 < t < \alpha, \quad (24)$$

$$T_s(\alpha) = 0. \quad (25)$$

Ограниченным решением задачи (23) является [10]

$$R_s(r) = \sqrt{r} J_\nu(\mu_{s,n} r), \quad (26)$$

где $\nu = n + \frac{(m-2)}{2}$; $\mu_{s,n}$ – нули функций Бесселя 1-го рода $J_\nu(z)$; $\mu = \mu_{s,n}^2$.

Решение задачи (24), (25) –

$$T_{s,n}(t) = \left(\exp\left(-\frac{\mu_{s,n}^2 t^{q+1}}{q+1}\right) \int_t^\alpha a_{s,n}^k(\xi) \exp\left(\frac{\mu_{s,n}^2 \xi^{q+1}}{q+1}\right) d\xi \right) \quad (27)$$

Подставляя (26) в (22), получим

$$r^{-\frac{1}{2}} \tilde{f}_n^k(r, t) = \sum_{s=1}^{\infty} a_{s,n}^k(t) J_\nu(\mu_{s,n} r), \\ r^{-\frac{1}{2}} \tilde{\varphi}_{1n}^k(r) = \sum_{s=1}^{\infty} b_{s,n}^k(t) J_\nu(\mu_{s,n} r), \quad 0 < r < 1. \quad (28)$$

Соотношения (28) – разложения в ряды Фурье – Бесселя, если

$$a_{s,n}^k(t) = 2 \left[J_{\nu+1}(\mu_{s,n}) \right]^{-2} \int_0^1 \sqrt{\xi} \tilde{f}_n^k(\xi, t) J_\nu(\mu_{s,n} \xi) d\xi, \quad (29)$$

$$b_{s,n}^k(t) = 2 \left[J_{\nu+1}(\mu_{s,n}) \right]^{-2} \int_0^1 \sqrt{\xi} \tilde{\varphi}_{1n}^k(\xi) J_\nu(\mu_{s,n} \xi) d\xi, \quad (30)$$

где $\mu_{s,n}, s=1, 2, \dots$ – положительные нули функций Бесселя $J_\nu(z)$, расположенные в порядке возрастания их величины [11].

Из (21), (26), (27) получим решение задачи (17), (18)

$$v_{1n}^k(r, t) = \sum_{s=1}^{\infty} \sqrt{r} T_{s,n}(t) J_\nu(\mu_{s,n} r), \quad (31)$$

где $a_{s,n}^k(t)$ определяется из (29).

Далее, подставляя (21) в (19), (20), с учетом (22) получим уравнение $T_{st} + \mu_{s,n}^2 t^q T_s = 0, \quad 0 < t < \alpha,$

$$T_s(\alpha) = b_{s,n}^k, \text{ решение которого}$$

$$T_s(t) = b_{s,n} \exp\left(\frac{\mu_{s,n}^2}{q+1} (\alpha^{q+1} - t^{q+1})\right) J_\nu(\mu_{s,n} r). \quad (32)$$

Из (26), (32) получим

$$v_{2n}^k(r, t) = \sum_{s=1}^{\infty} b_{s,n} \sqrt{r} \left(\exp\left(\frac{\mu_{s,n}^2}{q+1} (\alpha^{q+1} - t^{q+1})\right) \right) J_\nu(\mu_{s,n} r), \quad (33)$$

где $b_{s,n}^k(t)$ находятся из (30).

Следовательно, решив сначала задачу (8), (12) ($n=0$), а затем (9), (12) ($n=1$) и т.д., найдем последовательно все $v_n^k(r, t)$ из (16), где $v_{1n}^k(r, t), v_{2n}^k(r, t)$ определяются из (31) и (33).

Итак, в области Ω_α имеет место равенство

$$\int_H \rho(\theta) L_1 u dH = 0.$$

Пусть $f(r, \theta, t) = R(r)\rho(\theta)T(t)$, причем $R(r) = V_0$; функция V_0 плотна в $L_2((0,1))$, $\rho(\theta) \in C^\infty(H)$ – в $L_2(H)$, $T(t) \in V_1, V_1$ – в $L_2((0, \alpha))$. Тогда $f(r, \theta, t) \in V$, $V = V_0 \otimes (0, 2\pi) \otimes V_1$ плотна в $L_2(\Omega_\alpha)$ [12].

Отсюда и из (13) следует, что

$$\int_{\Omega_\alpha} f(r, \theta, t) L_1 u d\Omega_\alpha = 0, \quad L_1 u = 0, \quad \forall (r, \theta, t) \in \Omega_\alpha.$$

Таким образом, решением задач (1), (2) в области Ω_α является функция

$$u(r, \theta, t) = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{k=1}^{k_n} \left\{ \psi_{1n}^k(t) + r^{\frac{(1-m)}{2}} \left[v_{1n}^k(r, t) + v_{2n}^k(r, t) \right] \right\} Y_{n,m}^k(\theta), \quad (34)$$

где $v_{1n}^k(r, t), v_{2n}^k(r, t)$ находятся из (31), (33).

Учитывая формулу $2J'_\nu(z) = J_{\nu-1}(z) - J_{\nu+1}(z)$ [11], оценки [7, 13], получим

$$J_\nu(z) = \sqrt{\frac{2}{\pi z}} \cos\left(z - \frac{\pi}{2}\nu - \frac{\pi}{4}\right) + O\left(\frac{1}{z^{3/2}}\right), \quad \nu \geq 0, \quad (35)$$

$$|k_n| \leq c_1 n^{m-2}, \quad \left| \frac{\partial^l}{\partial \theta_j^l} Y_{n,m}^k(\theta) \right| \leq c_2 n^{\frac{m}{2}-1+l},$$

$$j = \overline{1, m-1}, \quad l = 0, 1, \dots,$$

а также леммы, ограничения на коэффициенты уравнения (1) и на заданные функции $\psi_1(t, \theta), \varphi_2(r, \theta)$, можно доказать [4], что полученное решение (34) принадлежит классу $C(\overline{\Omega_\alpha}) \cap C^2(\overline{\Omega_\alpha})$

Далее из (31), (33), (34) при $t \rightarrow +0$ имеем

$$u(r, \theta, 0) = \tau(r, \theta) = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{k=1}^{k_n} \tau_n^k(r) Y_{n,m}^k(\theta),$$

$$\tau_n^k(r) = \psi_{1n}^k(0) + \sum_{s=1}^{\infty} r^{\frac{(2-m)}{2}} \left[\int_0^\alpha a_{s,n}^k(\xi) \exp\left(\frac{\mu_{s,n}^2 \xi^{q+1}}{q+1}\right) d\xi + b_{s,n}^k \left(\exp\left(\frac{\mu_{s,n}^2}{q+1} \alpha^{q+1}\right) \right) \right] J_{\frac{n+(m-2)}{2}}(\mu_{s,n} r). \quad (36)$$

Из (29)–(31), (33), а также из леммы 2 вытекает, что $\tau(r, \theta) \in W_2^1(S)$, $l > \frac{3m}{2}$.

Таким образом, учитывая краевые условия (3) и (36), приходим к задаче Дирихле для эллиптического уравнения в области Ω_β

$$L_2 u = |t|^p \Delta_x u + u_{tt} + \sum_{i=1}^m a_i(r, \theta, t) u_{x_i} + b(r, \theta, t) u_t + c(r, \theta, t) u = 0, \quad (37)$$

$$u|_S = \tau(r, \theta), \quad u|_{\Gamma_\beta} = \psi_2(t, \theta), \quad u|_{\sigma_\beta} = \varphi_2(t, \theta),$$

имеющего единственное решение [4].

Следовательно, разрешимость задачи 1 доказана.

Единственность решения задачи 1

Рассмотрим задачу (1), (2) в области Ω_α и докажем единственность решения. Для этого построим решение первой краевой задачи для уравнения

$$L_1 v \equiv t^p \Delta_x v - v_t - \sum_{i=1}^m d_i v_{x_i} + d v = 0 \quad (*)$$

с краевым условием

$$v|_S = \tau(r, \theta) = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{k=1}^{k_n} \bar{\tau}_n^k(r) Y_{n,m}^k(\theta), \quad (38)$$

где $d(x, t) = e - \sum_{i=1}^m d_{ix_i}$, $\bar{\tau}_n^k(r) \in G$, G – множество

функций $\tau(r)$ из класса $C([0,1]) \cap C^1((0,1))$. Множество G плотно всюду в $L_2(0,1)$ [12]. Решение задачи

(*), (38) будем искать в виде (6), где функции $\bar{v}_n^k(r, t)$

будут определены ниже. Тогда функции $\bar{v}_n^k(r, t)$ удовлетворяют системе уравнений вида (8)–(10), где $\tilde{d}_{in}^k, d_{in}^k$ заменены соответственно на $-\tilde{d}_{in}^k, -d_{in}^k$, а \tilde{e}_n^k на \tilde{d}_n^k , $i = 1, \dots, m$, $k = \overline{1, k_n}$, $n = 0, 1, \dots$

Далее из краевого условия (38) в силу (6) получим $\bar{v}_n^k(r, 0) = \bar{\tau}_n^k(r)$, $\bar{v}_n^k(1, t) = 0$, $k = \overline{1, k_n}$, $n = 0, 1, \dots$ (39)

Каждое уравнение системы (8)–(10) представимо в виде (11). Задачу (11), (39) приведем к виду

$$L v_n^k \equiv t^q \left(v_{nrr}^k + \frac{\tilde{\lambda}_n}{r^2} v_n^k \right) + v_{nt}^k = \tilde{f}_n^k(r, t), \quad (40)$$

$$v_n^k(r, 0) = \tau_n^k(r), \quad v_n^k(1, t) = 0, \quad v_n^k(r, t) = r^{\frac{(m-1)}{2}} \bar{v}_n^k(r, t),$$

$$\tilde{f}_n^k(r, t) = r^{\frac{(m-1)}{2}} \bar{f}_n^k(r, t), \quad \tau_n^k(r) = r^{\frac{(m-1)}{2}} \bar{\tau}_n^k(r).$$

Решение задачи (40) будем искать в виде (16), где

$v_{1n}^k(r, t)$ – решение задачи для уравнения (17) с условиями

$$v_{1n}^k(r, 0) = 0, \quad v_{1n}^k(1, t) = 0, \quad (41)$$

а $v_{2n}^k(r, t)$ – решение задачи для уравнения (19) с условием

$$v_{2n}^k(r, 0) = \tau_n^k(r), \quad v_{2n}^k(1, t) = 0. \quad (42)$$

Решения задач (17), (41) и (19), (42) имеют вид

$$v_{1n}^k(r, t) = \sum_{s=1}^{\infty} \sqrt{r} \left[\exp \left(\frac{\mu_{s,n}^2}{q+1} t^{q+1} \right) \right] \times \\ \times \int_0^t a_{s,n}^k(\xi) \left[\exp \left(-\frac{\mu_{s,n}^2}{q+1} \xi^{q+1} \right) \right] d\xi \left[J_{n+\frac{(m-2)}{2}}(\mu_{s,n} r), \right. \\ \left. v_{2n}^k(r, t) = \sum_{s=1}^{\infty} \tau_{s,n} \sqrt{r} \left[\exp \left(\frac{\mu_{s,n}^2}{q+1} t^{q+1} \right) \right] J_{n+\frac{(m-2)}{2}}(\mu_{s,n} r), \right.$$

$$\left. \text{где } \tau_{s,n}(t) = 2 \left[J_{\nu+1}(\mu_{s,n}) \right]^{-2} \int_0^1 \sqrt{\xi} \tau_n^k(\xi) J_{n+\frac{(m-2)}{2}}(\mu_{s,n} r) d\xi. \right.$$

Таким образом, решение задачи (*), (38) в виде

$$\text{ряда } u(r, \theta, t) = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{k=1}^{k_n} r^{\frac{(1-m)}{2}} \left[v_{1n}^k(r, t) + v_{2n}^k(r, t) \right] Y_{n,m}^k(\theta)$$

построено. В силу (35) оно принадлежит классу $C(\bar{\Omega}_\alpha) \cap C^2(\bar{\Omega}_\alpha)$.

В результате интегрирования по области Ω_β

тождества $v L_1 u - u L_1 v = -v P(u) + u P(v) - u v Q$ [14],

$$\text{где } P(u) = t^q \sum_{i=1}^m u_{x_i} \cos(N^\perp, x_i),$$

$Q = \cos(N^\perp, t) - \sum_{i=1}^m d_i \cos(N^\perp, x_i)$, а N^\perp – внутренняя нормаль к границе, по формуле Грина получим

$$\int_S \tau(r, \theta) u(r, \theta, 0) ds = 0. \quad (43)$$

Поскольку линейная оболочка системы функций $\{\bar{\tau}_n^k(r) Y_{n,m}^k(\theta)\}$ плотна $L_2(S)$ [12], то из (43) заключаем, что $u(r, \theta, 0) = 0$, $\forall (r, \theta) \in S$. Стало быть, по

принципу экстремума для параболического уравнения (5) $u \equiv 0$ в $\bar{\Omega}_\alpha$ [15].

Из принципа Хопфа $u \equiv 0$ в $\bar{\Omega}_\beta$ [16].

В (4) приводится явный вид решения задачи (37), поэтому можно записать представление решения и для задачи 1.

Отметим, что в случае, когда $a_i(x, t) = b(x, t) = c(x, t) = d_i(x, t) = e(x, t) \equiv 0$, для задачи 1 теорема получена в [17].

Литература

1. Фикера Г. К единой теории краевых задач для эллипτικο-параболических уравнений второго порядка // Математика. 1963. Т. 7, № 6. С. 99–121.

2. Олейник О.А., Радкевич Е. В. Уравнения с неотрицательной характеристической формой. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2010. 360 с.

3. Алдашев С.А. Корректность задачи Дирихле в цилиндрической области для одного класса многомерных эллиптических уравнений // Вестн. НГУ. Сер. мат., мех., инф. 2012. Т. 12, вып. 1. С. 7–13.

4. Алдашев С.А. Корректность задачи Дирихле в цилиндрической области для вырождающихся многомерных эллиптических уравнений // Мат. заметки. 2013. Т. 94, вып. 6. С. 936–939.

5. Алдашев С.А. Корректность задачи Дирихле в цилиндрической области для многомерного эллиптико-параболического уравнения // Изв. Саратов. ун-та. Сер. мат., мех., инф. 2014. Т. 14, вып. 1. С. 5–10.

6. Алдашев С.А. Корректность задачи Дирихле для одного класса многомерных эллиптико-параболических уравнений // Изв. Саратов. ун-та. Сер. мат., мех., инф. 2016. Т. 16, вып. 2. С. 125–132.

7. Михлин С.Г. Многомерные сингулярные интегралы и интегральные уравнения. М.: Физматгиз, 1962. 254 с.

8. Алдашев С.А. Краевые задачи для многомерных гиперболических и смешанных уравнений. Алматы: Гылым, 1994. 170 с.

9. Алдашев С.А. Вырождающиеся многомерные гиперболические уравнения. Орал: ЗКАТУ, 2007. 139 с.

10. Камке Э. Справочник по обыкновенным дифференциальным уравнениям. М.: Наука, 1965. 703 с.

11. Бейтмен Г., Эрдейи А. Высшие трансцендентные функции : в 2 т. Т. 2. М.: Наука, 1974. 297 с.

12. Колмогоров А.Н., Фомин С.В. Элементы теории функций и функционального анализа. М.: Наука, 1976. 543 с.

13. Тихонов А.Н., Самарский А.А. Уравнения математической физики. М.: Наука, 1966. 724 с.

14. Смирнов В.И. Курс высшей математики. Т. 4. М.: Наука, 1981. 550 с.

15. Фридман А. Уравнения с частными производными параболического типа. М.: Мир, 1968. 527 с.

16. Берс Л., Джон Ф., Шехтер М. Уравнения с частными производными. М.: Мир, 1966. 352 с.

17. Алдашев С.А. Корректность задачи Дирихле в цилиндрической области для вырождающегося многомерного эллиптико-параболического уравнения // Журн. вычисл. и прикл. математики. КНУим. Т. Шевченко. 2014. № 3 (117). С.17–22.

References

1. Fikera G. K edinoi teorii kraevykh zadach dlya elliptiko-parabolicheskikh uravnenii vtorogo poryadka [On a unified theory of boundary-value problems for second-order elliptic-parabolic equations]. *Matematika*. 1963, vol. 7, No. 6, pp. 99-121.

2. Oleinik O.A., Radkevich E.V. *Uravneniya s neotritsatel'noi kharakteristicheskoi formoi* [Equations with a nonnegative characteristic form]. Moscow: Mosk. un-ta, 2010, 360 p.

3. Aldashev S.A. Korrektnost' zadachi Dirikhle v tsilindricheskoi oblasti dlya odnogo klassa mnogomernykh ellipticheskikh uravnenii [Correctness of the Dirichlet

problem in a cylindrical domain for a class of multidimensional elliptic equations]. *Vestn. NGU. Ser. mat., mekh., inf.* 2012, vol. 12, iss. 1, pp. 7-13.

4. Aldashev S.A. Korrektnost' zadachi Dirikhle v tsilindricheskoi oblasti dlya vyrozhdaiushchikhsya mnogomernykh ellipticheskikh uravnenii [Correctness of the Dirichlet problem in a cylindrical domain for degenerate multidimensional elliptic equations]. *Mat. zametki*. 2013, vol. 94, iss. 6, pp. 936-939.

5. Aldashev S.A. Korrektnost' zadachi Dirikhle v tsilindricheskoi oblasti dlya mnogomernogo elliptiko-parabolicheskogo uravneniya [Correctness of the Dirichlet problem in a cylindrical domain for a multidimensional elliptic-parabolic equation]. *Izv. Sarat. un-ta. Ser. mat., mekh., inf.* 2014, vol. 14, iss. 1, pp. 5-10.

6. Aldashev S.A. Korrektnost' zadachi Dirikhle dlya odnogo klassa mnogomernykh elliptiko-parabolicheskikh uravnenii [Correctness of the Dirichlet problem for a class of multidimensional elliptic-parabolic equations]. *Izv. Sarat. un-ta. Ser. mat., mekh., inf.* 2016, vol. 16, iss. 2, pp. 125-132.

7. Mikhlin S.G. *Mnogomernye singulyarnye integraly i integral'nye uravneniya* [Multidimensional singular integrals and integral equations]. Moscow: Fizmatgiz, 1962, 254 p.

8. Aldashev S.A. *Kraevye zadachi dlya mnogomernykh giperbolicheskikh i smeshannykh uravnenii* [Boundary value problems for multidimensional hyperbolic and mixed equations]. Almaty: Gylym, 1994, 170 p.

9. Aldashev S.A. *Vyrozhdaiushchiesya mnogomernye giperbolicheskije uravneniya* [Degenerate multidimensional hyperbolic equations]. Oral: ZKATU, 2007, 139 p.

10. Kamke E. *Spravochnik po obyknovennym differentsial'nyim uravneniyam* [Handbook of ordinary differential equations]. Moscow: Nauka, 1965, 703 p.

11. Beitmen G., Erdeii A. *Vysshie transtsendentnye funktsii* [Higher transcendental functions]: in 2 vol. Moscow: Nauka, 1974, vol. 2, 297 p.

12. Kolmogorov A.N., Fomin S.V. *Elementy teorii funktsii i funktsional'nogo analiza* [Elements of the theory of functions and functional analysis]. Moscow: Nauka, 1976, 543 p.

13. Tikhonov A.N., Samarskii A.A. *Uravneniya matematicheskoi fiziki* [Equations of mathematical physics]. Moscow: Nauka, 1966, 724 p.

14. Smirnov V.I. *Kurs vysshei matematiki* [The course of higher mathematics]. Moscow: Nauka, 1981, vol. 4, 550 p.

15. Fridman A. *Uravneniya s chastnymi proizvodnymi parabolicheskogo tipa* [Partial differential equations of parabolic type]. Moscow: Mir, 1968, 527 p.

16. Bers L., Dzhon F., Shekhter M. *Uravneniya s chastnymi proizvodnymi* [Partial differential equations]. Moscow: Mir, 1966, 352 p.

17. Aldashev S.A. Korrektnost' zadachi Dirikhle v tsilindricheskoi oblasti dlya vyrozhdaiushchegosya mnogomernogo elliptiko-parabolicheskogo uravneniya [Correctness of the Dirichlet problem in a cylindrical domain for a degenerate multidimensional elliptic-parabolic equation]. *Zhurn. vychisl. i prikl. matematiki. KNUim. T. Shevchenko*. 2014, No. 3 (117), pp. 17-22.

УДК 517.941

DOI 10.23683/0321-3005-2018-2-12-15

РЕГУЛЯРНАЯ КРАЕВАЯ ЗАДАЧА ДЛЯ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО ПУЧКА ПОРЯДКА 15 С ПЯТИКРАТНЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

© 2018 г. А.И. Вагабов¹

¹Дагестанский государственный университет, Махачкала, Россия

REGULAR BOUNDARY VALUE PROBLEM FOR THE DIFFERENTIAL BEAM ABOUT 15 WITH FIVEFOLD CHARACTERISTICS

A.I. Vagabov¹

¹Dagestan State University, Makhachkala, Russia

Вагабов Абдулвагаб Исмаилович – доктор физико-математических наук, профессор, кафедра математического анализа, Дагестанский государственный университет, ул. Гаджиева, 43а, г. Махачкала, Республика Дагестан, 367000, Россия, e-mail: algebra-dgu@mail.ru

Abdulvagab I. Vagabov - Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Department of Mathematic Analysis, Dagestan State University, Gadzhieva St., 43a, Makhachkala, Republic Dagestan, 367000, Russia, e-mail: algebra-dgu@mail.ru

Статья является продолжением работ, относящихся к случаям двух дифференциальных пучков с одной n -кратной и, соответственно, с двумя трехкратными характеристиками. Установлена базисность корневых функций рассмотренных задач при произвольных распадающихся граничных условиях на концах заданного интервала. Проблематичным оставался вопрос о перенесении соответствующих теорем на случай пучков с тремя и более кратными характеристическими корнями. Нами дается положительный ответ в случае пучка порядка 15 с тремя различными характеристическими корнями. Заметим, что наш подход в решении этой задачи распространим на более широкие классы пучков с кратными характеристиками.

Отметим существенное различие рассматриваемой нами задачи от регулярных в смысле Г. Биркгофа и Я.Д. Тамаркина. С одной стороны, ранее требовалась различность характеристических корней основного дифференциального оператора. С другой – нами решена задача с распадающимися краевыми условиями, все из которых заданы на одном конце, за исключением двух относящихся ко второму концу. Дается построение резольвенты пучка как мероморфной функции параметра λ . В основной теореме доказано, что полный вычет по параметру от резольвенты, приложенной к дифференцируемой 15 раз функции (обращающейся в нуль с производными на концах интервала), равен этой функции. Указанный вычет представляет собой ряд Фурье по корневым функциям исходной задачи.

Ключевые слова: функция Коши, кратные корни, функция Грина, ряд Фурье.

The article is a continuation of works instances of two differential beams with the same n -fold and, respectively, with two three-time characteristics. The basis property of the root functions is considered for arbitrary decaying boundary conditions at the ends of the given interval. Problematic remains the question of the transfer of the corresponding theorems for the case of beams with three or more multiple characteristic roots. We are given a positive answer in the case of the beam 15 with three different characteristic roots. We note that our approach in this task will extend to broader classes of bundles with multiple characteristics.

We note the significant difference of the task from regular in the sense of G. Birkhoff and J.D. Tamarkin. On the one hand, significant differences of the characteristic roots of the primary differential operator are previously required. On the other, we have solved the problem with decaying boundary conditions, all of which is set at one end, with the exception of two related to the second end. Given the construction of the resolvent of the beam as meromorphic functions of the parameter λ . In the main theorem is proved that the full deduction option from the resolvent applied to 15 times differentiable functions (the derivative zero at the ends of the interval) is equal to this function. The specified deduction is a Fourier series in root functions of the original problem.

Keywords: Cauchy function, multiple roots, Green function, Fourier series.

**Постановка задачи
 и предварительные построения**

Данная статья является продолжением работ [1, 2]. В ней изучена спектральная задача для дифференциального пучка с тремя пятикратными характеристическими корнями:

$$l(y) \equiv \left(\frac{d}{dx} - \lambda \right)^5 \left(\frac{d^2}{dx^2} + \lambda^2 \right)^5 y(x), \quad 0 < x < 1, \quad (1)$$

$$U_s(y) \equiv \frac{d^{s-1}y(0)}{dx^{s-1}} = 0, \quad s = \overline{1,13},$$

$$U_{13+s}(y) \equiv \frac{d^{s-1}y(1)}{dx^{s-1}} = 0, \quad s = 1, 2. \quad (2)$$

Введем в рассмотрение фундаментальную систему решений уравнения $l(y) = 0$:

$$y_j(x) = x^{j-1}e^{\lambda x}, \quad y_{5+j}(x) = x^{j-1}e^{i\lambda x}, \\ y_{10+j}(x) = x^{j-1}e^{-i\lambda x}, \quad j = \overline{1,5}. \quad (3)$$

В (3) i – мнимая единица.

Обозначим через $\mathbf{Y}(\xi, \lambda)$ матрицу Вронского решений (3). Как следует из теоремы Лиувилля, ее определитель не зависит от x . Для удобства введем обозначение $\det \mathbf{Y}(\xi, \lambda) = |\mathbf{Y}(\lambda)|$. Далее используем функцию Коши уравнения $l(y) = 0$.

$$g(x, \xi, \lambda) = \begin{cases} \begin{vmatrix} y_1(\xi) & y_2(\xi) & \dots & y_{15}(\xi) \\ y_1'(\xi) & y_2'(\xi) & \dots & y_{15}'(\xi) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ y_1^{(13)}(\xi) & y_2^{(13)}(\xi) & \dots & y_{15}^{(13)}(\xi) \end{vmatrix} \frac{-1}{|\mathbf{Y}(\lambda)|} & \text{при } x \leq \xi, \\ 0, & \text{при } x \geq \xi. \end{cases} \quad (4)$$

Отметим важные для нас два свойства указанной функции:

1) $g(x, \xi, \lambda)$ 13 раз непрерывно дифференцируема по x, ξ на $[0,1]^2$;

2) $g(x, \xi, \lambda)$ 15 раз непрерывно дифференцируема по x, ξ при $x \neq \xi$ и обладает свойствами:

$$\left. \frac{d^s g(x, \xi, \lambda)}{dx^s} \right|_{x=\xi+0} = \begin{cases} 0 & \text{при } s < 14 \\ 1 & \text{при } s = 14, \end{cases} \\ \left. \frac{d^s g(x, \xi, \lambda)}{d\xi^s} \right|_{\xi=x+0} = \begin{cases} 0 & \text{при } s < 14 \\ 1 & \text{при } s = 14. \end{cases} \quad (5)$$

В самом деле, непосредственно дифференцируя по x определитель в (4) 14 раз, получим первую из

формул (5). Дифференцирование по ξ 14 раз приводит ко 2-й из формул (5).

Лемма 1. Для любой 15 раз непрерывно дифференцируемой функции $f(x)$, $0 < x < 1$, равной нулю со всеми производными до 14-го порядка включительно, при $x = 0,1$ справедливы формулы:

$$\int_x^1 g(x, \xi, \lambda) f^{(k)}(\xi) d\xi = \int_x^1 f(\xi) \frac{d^k g(x, \xi, \lambda)}{d\xi^k} d\xi, \quad (6)$$

$k < 14$,

$$\int_x^1 g(x, \xi, \lambda) f^{(14)}(\xi) d\xi = f(x) + O\left(\frac{1}{\lambda}\right), \quad (7)$$

$$|\lambda| \gg 1, \quad 0 < x < 1.$$

Доказательство. В силу условий леммы и формул (5) интегрированием по частям приходим к (6). При доказательстве формулы (7) интегрированием по частям 14 раз приходим к равенству

$$\int_x^1 g(x, \xi, \lambda) f^{(14)}(\xi) d\xi = f(x) + \int_x^1 f(\xi) \frac{d^{14} g(x, \xi, \lambda)}{d\xi^{14}} d\xi. \quad (8)$$

Установим оценку интеграла в правой части формулы (8). С этой целью преобразуем определитель в формуле (4), полученный из $\det \mathbf{Y}(\xi, \lambda)$ заменой последней строки строкой $y_1(x), y_2(x), \dots, y_{15}(x)$. Вынося в этом определителе из первых пяти столбцов $-e^{\lambda\xi}$, из вторых пяти столбцов $-e^{i\lambda\xi}$, из последних 5 столбцов $-e^{-\lambda\xi}$, придем к определителю, последняя строка которого имеет вид $e^{i\lambda(x-\xi)}, xe^{-i\lambda(x-\xi)}, \dots, x^4 e^{-i\lambda(x-\xi)}; e^{i\lambda(x-\xi)}, \dots, x^4 e^{i\lambda(x-\xi)}; e^{-i\lambda(x-\xi)}, \dots, x^4 e^{-i\lambda(x-\xi)}$, а предыдущие строки являются лишь многочленами от λ и ξ . Таким образом,

$$\frac{d^{14} g(x, \xi, \lambda)}{dx^{14}} |\mathbf{Y}(\xi, \lambda)| = p_1(\lambda) e^{\lambda(x-\xi)} + p_2(\lambda) e^{i\lambda(x-\xi)} + p_3(\lambda) e^{-i\lambda(x-\xi)},$$

где $p_i(\lambda)$ – полиномы, отличные от нуля.

$$|\mathbf{Y}(\xi, \lambda)| = p_1(\lambda) e^{\lambda} + p_2(\lambda) e^{i\lambda} + p_3(\lambda) e^{-i\lambda}, \Rightarrow \\ \frac{d^{14} g(x, \xi, \lambda)}{dx^{14}} = \frac{p_1(\lambda) e^{\lambda(x-\xi)} + p_2(\lambda) e^{i\lambda(x-\xi)} + p_3(\lambda) e^{-i\lambda(x-\xi)}}{p_1(\lambda) e^{\lambda} + p_2(\lambda) e^{i\lambda} + p_3(\lambda) e^{-i\lambda}}. \quad (9)$$

Для определителя $|\mathbf{Y}(\xi, \lambda)|$, используя формулу Лиувилля, приходим к оценке

$$|Y(\xi, \lambda)| \approx |\lambda|^{105} \cdot C(\varepsilon), \quad |\lambda| \gg 1, \quad (10)$$

$\varepsilon < \xi \leq 1, \varepsilon > 0$ – малое число, $C(\varepsilon) > 0$. Согласно

$$(9), \left| \frac{d^{14} g(x, \xi, \lambda)}{dx^{14}} \right|_{\varepsilon < x < 1} \leq \frac{1}{e^{|\lambda \varepsilon|}}, \text{ откуда с учетом фор-}$$

мулы (8) получим представление (7).

Из установленной леммы следует

Теорема 1. Пусть C_l – последовательность замкнутых контуров в λ -плоскости, содержащая внутри точку $\lambda = 0$. Кратчайшее расстояние контуров C_l от начала стремится к бесконечности с ростом l . Тогда для функции $f(x)$, указанной в лемме 1,

$$\lim_{\substack{l \rightarrow \infty \\ 0 < x \leq 1}} \frac{-1}{2\pi\sqrt{-1}} \int_{C_l} \frac{d\lambda}{\lambda} \int_0^1 G(x, \xi, \lambda) \frac{d^{14} f(\xi)}{d\xi^{14}} d\xi = f(x). \quad (11)$$

Характеристический определитель граничной задачи (1), (2)

Матрицу $\{u_{ij}(x, \lambda)\}_{ij=1}^{15} \equiv \{U_i(y_j(x, \lambda))\}_{ij=1}^{15} \equiv U(\lambda)$ называют характеристической, а $\det U(\lambda) = \Delta(\lambda)$ – характеристическим определителем задачи (1), (2). Корни уравнения $\Delta(\lambda) = 0$ известны как спектр задачи (собственные значения). Элементарные подсчеты определителя $\Delta(\lambda)$, содержащего экспоненты λ только в двух последних строках, дают

$$\Delta\lambda \approx \lambda^{46} ([A]e^{2\lambda} + [B]e^{2i\lambda} + [C]e^{-2i\lambda}), \quad (12)$$

где A, B, C – отличные от нуля константы.

Лемма 2. Нули определителя $\Delta(\lambda)$ т.е. собственные значения задачи (1), (2), образуют три бесконечные последовательности, расположенные вдоль трех лучей, исходящих из начала, и имеют асимптотические представления:

- 1) $\lambda_k \approx \frac{i}{-4} \ln \left| \frac{C}{B} \right| - \frac{k\pi}{2}, \quad k = 1, 2, 3, \dots;$
- 2) $\lambda_k \approx \frac{i+1}{-4} \ln \left| \frac{A}{B} \right| + \frac{k\pi(i-1)}{2}, \quad k = 1, 2, 3, \dots;$
- 3) $\lambda_k \approx \frac{i+1}{-4} \ln \left| \frac{A}{C} \right| + \frac{k\pi(i+1)}{2}, \quad k = 1, 2, 3, \dots$

Доказательство. 1. На отрицательной части вещественной оси $\varepsilon^{2\lambda} \rightarrow 0$ при $\lambda \rightarrow -\infty$, т.е.

$$B\varepsilon^{4i\lambda} + C \rightarrow 0 \Rightarrow$$

$$e^{4i\lambda + 2k\pi i} \approx -\frac{C}{B} \Rightarrow \lambda + \frac{k\pi}{2} \approx \frac{i}{4} \ln \left| \frac{C}{B} \right|.$$

2. На биссектрисе первого квадранта $e^{-2i\lambda} \rightarrow 0$ при $\lambda \rightarrow \infty$. Для нулей определителя $\Delta(\lambda)$ приходим к уравнению $Ae^{2\lambda} + Be^{2i\lambda} \approx 0 \Rightarrow$

$$\lambda_k \approx \frac{i+1}{-4} \ln \left| \frac{A}{B} \right| + \frac{k\pi}{2} (i-1), \quad k = 1, 2, 3, \dots$$

Аналогичное рассуждение в случае 3.

Функция Грина и основная теорема

Дальнейшее изложение свяжем с мероморфной по λ функцией Грина задачи (1), (2) [3], которая тесно связана с рассмотренной функцией Коши и характеристической матрицей задачи (1), (2):

$$G(x, \xi, \lambda) = \frac{\Delta(x, \xi, \lambda)}{\Delta(\lambda)} = \begin{vmatrix} g(x, \xi, \lambda) & y_1(x) & \dots & y_{15}(x) \\ U_1(g)_x & & & \\ \dots & & \mathbf{U}(\lambda) & \\ U_{15}(g)_x & & & \end{vmatrix}, \quad (13)$$

где $g(x, \xi, \lambda), \Delta(\lambda)$ указаны в формулах (4), (12), а $\mathbf{U}(\lambda)$ – матрица определителя $\Delta(\lambda)$. Разложим числитель функции Грина на два слагаемых

$$G(x, \xi, \lambda) = g(x, \xi, \lambda) + \frac{E(x, \xi, \lambda)}{\Delta(\lambda)}, \quad (14)$$

где E получено из определителя $\Delta(\lambda)$ заменой элемента в его левом верхнем углу нулем, т.е.

$$E(x, \xi, \lambda) = \begin{vmatrix} 0 & y_1(x) & \dots & y_{15}(x) \\ U_1(g)_x & & & \\ \dots & & \mathbf{U}(\lambda) & \\ U_{15}(g)_x & & & \end{vmatrix}. \quad (15)$$

Опираясь на выражения краевых условий (2) и фундаментальные решения (3), найдем оценки

$$U_k(g)_x = g(0, \xi, \lambda) \approx \frac{1}{\lambda^{15-k}}, \quad k = \overline{1, 13}.$$

$$U_k(g)_x = g(1, \xi, \lambda) = 0 \quad \text{при } k = 14, 15. \quad (16)$$

С другой стороны, разлагая $E(x, \xi, \lambda)$ по первой строке, приходим к пятнадцати определителям, в каждом из которых один столбец заменен столбцом $(U_1(g)_x, \dots, U_{15}(g)_x)$. При этом в оценке $E(x, \xi, \lambda)$ порядок степени по λ понижается на 14. Принимая во внимание выражение (12), получим оценку

$$\frac{E(x, \xi, \lambda)}{\Delta(\lambda)} \approx \frac{1}{\lambda^{14}}. \quad (17)$$

Согласно теореме 1 и формулам (14), (17), устанавливается основная

Теорема 2. Для любой пятнадцатикратно непрерывно дифференцируемой на $[0,1]$ функции $f(x)$, равной нулю на концах 0,1, справедлива формула разложения по корневым функциям задачи (1), (2):

$$\lim_{\substack{l \rightarrow \infty \\ 0 < x \leq 1}} \frac{-1}{2\pi\sqrt{-1}} \int_{C_l} \frac{d\lambda}{\lambda} \int_0^1 G(x, \xi, \lambda) \frac{d^{14} f(\xi)}{d\xi^{14}} d\xi = f(x), \quad (18)$$

где C_l – последовательность замкнутых, расширяющихся контуров в λ -плоскости, указанная в теореме 1, проходящая вне δ -окружности нулей определителя $\Delta(\lambda)$.

Доказательство. Согласно (17), левую часть равенства (18) запишем в виде

$$\lim_{\substack{l \rightarrow \infty \\ 0 < x \leq 1}} \frac{-1}{2\pi\sqrt{-1}} \int_{C_l} \frac{d\lambda}{\lambda} \int_0^1 g(x, \xi, \lambda) \frac{d^{14} f(\xi)}{d\xi^{14}} d\xi + \lim_{\substack{l \rightarrow \infty \\ 0 < x \leq 1}} \frac{-1}{2\pi\sqrt{-1}} \int_{C_l} \frac{d\lambda}{\lambda} \int_0^1 \frac{d^{14} f(\xi)}{d\xi^{14}} d\xi.$$

Первый предел равен $f(x)$ на основании теоремы (1). Равенство нулю второго предела очевидно.

Литература

1. Вагабов А.И. n-кратная формула разложения в ряды Фурье по корневым элементам дифференциального пучка с n-кратной характеристикой // Диф. уравнения. 2016. Т. 52, № 5. С. 555–560.
2. Вагабов А.И. О базисности собственных элементов дифференциального пучка шестого порядка с трехкратными характеристиками // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2017. № 1. С. 14–17.
3. Наймарк М.А. Линейные дифференциальные операторы. М.: Наука, 1969. 526 с.

References

1. Vagabov A.I. n-kратnaya formula razlozheniya v ryady Fur'e po kornevym elementam differentsial'nogo puchka s n-kратnoi kharakteristikoi [n-multiple expansion formula in Fourier series on root elements of a differential buch with the n-multiple characteristic]. *Dif. uravneniya*. 2016, vol. 52, No. 5, pp. 555-560.
2. Vagabov A.I. O bazisnosti sobstvennykh elementov differentsial'nogo puchka shestogo poryadka s trekhkratnymi kharakteristikami [On the basis property of the eigenelements of a sixth-order differential pencil with triple characteristics]. *Izv. vuzov. Sev.-Kavk. region. Estestv. nauki*. 2017, No. 1, pp. 14-17.
3. Naimark M.A. *Lineinye differentsial'nye operatory* [Linear differential operators]. Moscow: Nauka, 1969, 526 p.

О РЕКОНСТРУКЦИИ ХАРАКТЕРИСТИК ВКЛЮЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ МОДЕЛИ ТИМОШЕНКО

© 2018 г. А.О. Ватульян^{1,2}, К.В. Гущина¹

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

²Южный математический институт – филиал Владикавказского научного центра РАН, Владикавказ, Россия

ON THE RECONSTRUCTION OF CHARACTERISTICS OF INCLUSION BASED ON THE TIMOSHENKO MODEL

A.O. Vatulyan^{1,2}, K.V. Guschina¹

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

²Southern Mathematical Institute - Branch of the Vladikavkaz Scientific Center, Russian Academy of Sciences, Vladikavkaz, Russia

Ватульян Александр Ованесович – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой теории упругости, Институт математики, механики и компьютерных наук им. И.И. Воровича, Южный федеральный университет, ул. Мильчакова, 8а, г. Ростов-на-Дону, 344090, Россия; заведующий отделом дифференциальных уравнений, Южный математический институт – филиал Владикавказского научного центра РАН, ул. Маркуса, 22, г. Владикавказ, РСО-Алания, 362027, Россия, e-mail: vatulyan@math.sfedu.ru

Alexander O. Vatulyan - Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Head of the Department of Elasticity Theory, Vorovich Institute of Mathematics, Mechanics and Computer Sciences, Southern Federal University, Milchakova St., 8a, Rostov-on-Don, 344090, Russia; Head of the Department of Differential Equations, Southern Mathematical Institute - Branch of the Vladikavkaz Scientific Center, Russian Academy of Sciences, Marcusa St., 22, Vladikavkaz, Republic of North Ossetia - Alania, 362027, Russia, e-mail: vatulyan@math.sfedu.ru

Гущина Ксения Владимировна – студент, кафедра теории упругости, Институт математики, механики и компьютерных наук им. И.И. Воровича, Южный федеральный университет, ул. Мильчакова, 8а, г. Ростов-на-Дону, 344090, Россия, e-mail: guschina.ksu@gmail.com

Ksenia V. Guschina - Student, Department of Elasticity Theory, Vorovich Institute of Mathematics, Mechanics and Computer Sciences, Southern Federal University, Milchakova St., 8a, Rostov-on-Don, 344090, Russia; e-mail: guschina.ksu@gmail.com

Изучены колебания упругой однородной балки для модели Тимошенко и балки с дефектом типа включения, которое имеет эллипсоидальную форму. Осуществлены приведение к безразмерному виду задачи и составление канонической системы уравнений. Физические характеристики неоднородной балки отличны от характеристик балки без дефекта. Получены резонансные значения однородной балки и исследовано влияние параметров включения на резонансные значения балки с дефектом на основе метода пристрелки. С помощью методов теории возмущений построена формула для поправок к резонансным частотам, которая связывает резонансные значения для неповрежденной балки и балки с дефектом. На основе полученного соотношения решены две обратные задачи. В первой реализован поэтапный метод восстановления геометрических характеристик включения эллипсоидальной формы. Во второй задаче выполнено восстановление физических характеристик включения, а именно соотношение модулей жесткостей и плотностей. Продемонстрирована высокая точность предложенного метода.

Ключевые слова: колебания, балка, включение, резонансная частота, обратная задача, поправка, модель Тимошенко, изгиб.

The oscillations of an elastic homogeneous beam for the Timoshenko model and a beam with an inclusion-type defect that has an ellipsoidal shape are studied. The adduction is carried out to the dimensionless form of the problem and the composition of the canonical system of equations. The physical characteristics of a non-uniform beam differ from the characteristics of a beam without a defect. The resonance values of a homogeneous beam are obtained and the influence of the inclusion parameters on the resonance values of a beam with a defect on the basis of the method of alignment is investigated. Using the methods of perturbation theory, a formula is constructed for corrections to the resonant frequencies, which relates resonance values for an intact beam and a beam with a defect. On the basis of the obtained relation, two inverse problems are solved. In the first, a step-by-step method for restoring the geometric characteristics of the inclusion of an ellipsoidal shape is implemented. In the second problem, the physical characteristics of an inhomogeneous beam are reconstructed, namely the ratio of the stiffness and density modules. The high accuracy of the proposed method is demonstrated.

Keywords: oscillations, beam, inclusion, resonant frequency, inverse problem, correction, Timoshenko model, bending.

Введение

Балки являются основным и простейшим конструктивным элементом, работающим на изгиб. Их широко применяют в конструкциях гражданских, общественных и промышленных зданий, в балочных площадках, междуэтажных перекрытиях, мостах, эстакадах, в виде подкрановых балок производственных зданий, в конструкциях гидротехнических шлюзов и затворов и в других сооружениях. Широкое распространение балок определяется простотой изготовления и надежностью в работе. Достаточно часто балочные элементы, являющиеся составными частями механизмов, сооружений, машин, имеют переменную жёсткость. Неоднородности возникают как на этапе изготовления, так и в процессе эксплуатации.

Наиболее детально исследованы задачи о колебаниях стержней и пластин с дефектами типа полостей и трещин. Так, в работах [1, 2] рассматривались прямая и обратная задачи о поперечных и продольных колебаниях цилиндрического стержня с дефектом в форме полости малого размера. В [1] реализован подход к определению местоположения и объема малой полости произвольной формы при анализе поперечных колебаний; в [2] решена задача об определении местоположения и объема малой полости произвольной формы на основании моделирования полости отрицательной массой.

В работе [3] представлен метод поэтапного определения параметров симметричного тонкого надреза в балке при анализе изгибных колебаний. Метод реализован для балочных моделей Эйлера – Бернулли и Тимошенко. Получены формулы, связывающие резонансные значения для неповрежденной балки и балки с дефектом. На основании этих формул реализована процедура поэтапного восстановления параметров надреза.

Гораздо меньше исследованы обратные задачи для упругих тел с включениями. Работа [4] посвящена решению задачи идентификации эллипсоидальной полости или эллипсоидального включения (жёсткого или упругого) в изотропном линейно упругом теле при статическом нагружении. Для её решения применён метод, основанный на использовании функционала взаимности. Предложена конструктивная процедура, с помощью которой геометрические параметры дефекта выражаются через значения функционала взаимности. Эти значения могут быть вычислены, если в статическом испытании на одноосное растяжение (сжатие) на внешней поверхности тела измеряются перемещения.

В работе [5] предложен метод получения верхней и нижней оценок для объёма одиночного дефекта

произвольной формы в изотропном линейно упругом теле. Представленные в [5] оценки записаны через изменение упругой энергии тела, определяемое наличием дефекта. Величина последнего может быть вычислена по данным о перемещениях и усилиях на внешней границе тела, полученным в одном произвольном статическом испытании. Аналогичные оценки для случаев полости и жёсткого включения получены в работе [6].

Исследование влияния неоднородности включения на резонансные характеристики для модели Эйлера – Бернулли осуществлено в [7].

В настоящей работе рассмотрены колебания неоднородной балки с эллипсоидальным включением. Сформулирована постановка прямой задачи о колебаниях неоднородной балки в рамках модели Тимошенко. Обсуждено влияние характеристик включения на резонансные частоты. Получены приближенные формулы для поправок к резонансным частотам, представлена схема восстановления некоторых геометрических и физических характеристик включения.

Исследование резонансных частот балки с дефектом

Классическая теория изгиба изотропных однородных стержней Эйлера – Бернулли основана на гипотезе плоских сечений: первоначально плоское поперечное сечение остается и после изгиба плоским и нормальным к продольным волокнам балки. Среди компонент тензора напряжений отличны от нуля только напряжения растяжения–сжатия.

Обобщение классической теории поперечных колебаний стержней, основанное на учете влияния инерции вращения элементов стержня и деформации поперечного сдвига, было получено С.П. Тимошенко [8].

Используем эту модель для анализа поперечных колебаний балки с включением.

Рассмотрим колебания неоднородной балки длиной L с поперечным сечением F , в которой имеется включение с новым свойством в виде эллипсоида вращения (рис. 1).

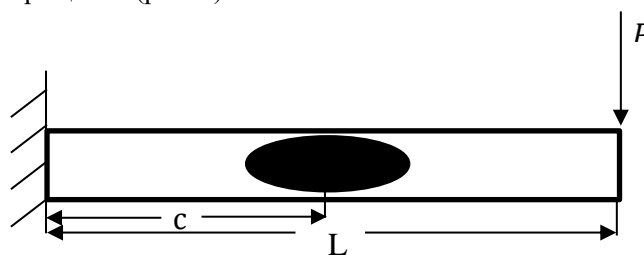


Рис. 1. Балка с эллипсоидальным включением
/ Fig. 1. Beam with ellipsoidal inclusion

Вводим систему координат, начало которой поместим на левом конце стержня; ось x_1 направим по нейтральной оси, центр сечения выберем таким образом, чтобы момент $S = \int_F x_3 dF = 0$.

Гипотезы о структуре полей смещений для колебаний балки с учетом касательных напряжений имеют вид $u_3 = w$, $u_1 = x_3 \psi$. Тогда ненулевые компоненты тензора деформаций и напряжений находятся по формулам: $\varepsilon_{11} = x_3 \psi'$, $\varepsilon_{13} = \frac{1}{2}(w' + \psi)$, $\sigma_{13} = G(w' + \psi)$, $\varepsilon_{33} = 0$, $\sigma_{11} = E x_3 \psi'$.

Здесь E , G – модули Юнга и сдвига, которые могут быть функциями координат. Потенциальная энергия деформации стержня при учете касательных напряжений имеет вид [9]

$$\Pi = \frac{1}{2} \int_0^L [E(x_3 \psi')^2 + G(x_3)(w' + \psi)^2] dx_1 = \frac{1}{2} \int_0^L [D(x_1) \psi'^2(x_1) + D_1(x_1)(w'(x_1) + \psi(x_1))^2] dx_1.$$

Кинетическая энергия стержня представима в форме [9] $K = \frac{1}{2} \int_0^L \int_F \rho(u_1^2 + u_3^2) dF dx_1 =$

$$= \frac{1}{2} \int_0^L (R(x_1) w^2 + D_2(x_1) \psi^2) dx_1,$$

$$D(x_1) = \int_F E x_3^2 dF; R(x_1) = \int_F \rho dF,$$

$$D_1(x_1) = \int_F G dF; D_2(x_1) = \int_F \rho x_3^2 dF.$$

Применяя вариационный принцип Гамильтона – Остроградского [9] и отыскивая стационарное значение функционала $\mathcal{L} = \Pi - \omega^2 K$, после интегрирования по частям получим

$$\begin{aligned} & D(x_1) \psi'(x_1) \delta \psi \Big|_0^L - \\ & - \int_0^L (D(x_1) \psi'(x_1))' \delta \psi dx_1 + G(x_1)(w'(x_1) + \psi(x_1)) \delta w \Big|_0^L - \\ & - \int_0^L \left((D_1(x_1)(w'(x_1) + \psi(x_1)))' \delta w - \right. \\ & \left. - D_1(x_1)(w'(x_1) + \psi(x_1)) \delta \psi \right) dx_1 - \\ & - \omega^2 \int_0^L (R(x_1) w(x_1) \delta w + D_2(x_1) \psi(x_1) \delta \psi) dx_1 = 0. \end{aligned}$$

Приравнявая к нулю коэффициенты при независимых вариациях, получим уравнения колебаний неоднородной балки для модели Тимошенко в виде

системы дифференциальных уравнений второго порядка с переменными коэффициентами:

$$\begin{cases} -(k' D_1(x_1)(w'(x_1) + \psi(x_1)))' - \rho \omega^2 R(x_1) w(x_1) = 0, \\ -(D(x_1) \psi'(x_1))' + k' D_1(x_1)(w'(x_1) + \psi(x_1)) - \\ - \omega^2 D_2(x_1) \psi(x_1) = 0. \end{cases} \quad (1)$$

Параметр $k' = \frac{1}{k}$ введен С.П. Тимошенко, причем k – коэффициент, учитывающий неравномерность распределения касательных напряжений по поперечному сечению стержня. Отметим, что для круглого поперечного сечения $k' \approx 0,9$.

Корректные граничные условия, соответствующие этой модели, для консольного стержня с нагружением сосредоточенной силой P и моментом на конце $x = L$ имеют вид

$$\begin{aligned} w(0) = 0, \psi(0) = 0, D(L) \psi'(L) = M, \\ (k' D_1(x_1)(w'(x_1) + \psi(x_1)))(L) = P. \end{aligned} \quad (2)$$

Будем считать в дальнейшем, что F – круг радиуса a ; включение представляет собой эллипсоид вращения.

Пусть его центр расположен в точке $x_1 = c$ и имеет полуоси b_1 и b_2 . Тогда уравнение осевого сечения эллипсоида имеет вид $\frac{(x_1 - c)^2}{b_1^2} + \frac{z^2}{b_2^2} = 1$.

Выполним обезразмеривание задачи (1), (2). Введем безразмерную координату $x = \frac{x_1}{L}$, безразмерные функции $W(x) = L w(x)$, спектральный параметр

$$\chi^2 = \frac{\rho \omega^2 L^2}{E_0}, \text{ связанный с частотой колебаний, ко-}$$

$$\text{эффициент } \delta_1 = k' \frac{G_0}{E_0}.$$

Функции $D(x)$, $D_1(x)$, $D_2(x)$, $R(x)$ в этом случае можно определить следующим образом:

$$\begin{aligned} D(x) &= E_0 J_0 (1 - (1 - \tau_1) r^4(x)), \\ R(x) &= \rho_0 F_0 (1 - (1 - \tau_2) r^2(x)), \\ D_1(x) &= G_0 F_0 (1 - (1 - \tau_3) r^2(x)), \\ D_2(x) &= G_0 J_0 (1 - (1 - \tau_2) r^4(x)), \\ J_0 &= \frac{\pi a^4}{4}, F_0 = \pi a^2. \end{aligned} \quad (3)$$

Здесь E_0 , G_0 , ρ_0 – модули Юнга и сдвига, плотность неповрежденной балки; E_1 , G_1 , ρ_1 – модули Юнга и сдвига, плотность включения.

В (3) переменный безразмерный радиус $r(x)$ в области включения определяется по формуле

$$r(x) = \varepsilon \sqrt{1 - \frac{(x - c_0)^2}{\delta^2}}, \quad c_0 = \frac{c}{L}, \quad \varepsilon = \frac{b_2}{a}, \quad \delta = \frac{b_1}{L}$$

и равен нулю вне области.

Обезразмеренная система уравнений, описывающая колебания консольно закрепленной балки модели Тимошенко с переменными геометрическими характеристиками, имеет вид

$$\begin{cases} -(\delta_1 d_1(x)(w'(x) + \psi(x)))' - \chi^2 r(x)w(x) = 0, \\ -(d(x)\psi'(x))' + \frac{4}{m^2} \delta_1 d_1(x)(w'(x) + \psi(x)) - \\ - \chi^2 d_2(x)\psi(x) = 0. \end{cases} \quad (4)$$

Здесь введены функции

$$d(x) = \begin{cases} 1, & |x - c_0| \geq \delta, \\ 1 - f_1(x), & |x - c_0| \leq \delta, \end{cases} \quad r(x) = \begin{cases} 1, & |x - c_0| \geq \delta, \\ 1 - f_2(x), & |x - c_0| \leq \delta, \end{cases}$$

$$d_1(x) = \begin{cases} 1, & |x - c_0| \geq \delta, \\ 1 - f_3(x), & |x - c_0| \leq \delta, \end{cases} \quad g(x) = \left(1 - \frac{(x - c_0)^2}{\delta^2}\right),$$

$$d_2(x) = \begin{cases} 1, & |x - c_0| \geq \delta, \\ 1 - f_4(x), & |x - c_0| \leq \delta, \end{cases}$$

$$f_1(x) = m_1 \varepsilon^4 g^2(x); \quad f_2(x) = m_2 \varepsilon^2 g(x);$$

$$f_3(x) = m_3 \varepsilon^2 g(x); \quad f_4(x) = m_4 \varepsilon^4 g^2(x);$$

$$\tau_1 = \frac{E_1}{E_0}; \quad \tau_2 = \frac{\rho_1}{\rho_0}; \quad \tau_3 = \frac{G_1}{G_0},$$

$$m_1 = 1 - \tau_1, \quad m_2 = 1 - \tau_2, \quad m_3 = 1 - \tau_3,$$

$$m_4 = 1 - \tau_2; \quad \varepsilon = \frac{b_2}{a}; \quad \delta = \frac{b_1}{L}; \quad m = \frac{a^2}{L^2}; \quad c_0 = \frac{c}{L}.$$

Граничные условия для общего нагружения сосредоточенной силой и моментом на конце имеют вид

$$w(0) = 0, \quad \psi(0) = 0, \quad d(1)\psi'(1) = m_0, \quad (5)$$

$$(d_1(x)(w'(x) + \psi(x)))(1) = p_0.$$

Прямая задача состоит в нахождении из краевой задачи (5) функций $w(x)$ и $\psi(x)$ при некотором значении спектрального параметра χ и заданных законах изменения функций $d(x), d_1(x), d_2(x), r(x)$.

Отметим, что в силу линейности задачи виды нагружения (сила или момент) могут быть рассмотрены отдельно.

Эта задача может быть решена методом пристрелки [10]. Введем в рассмотрение вспомогательные функции:

$$\psi_1(x) = d(x)\psi'(x), \quad w_1(x) = d_1(x)(w'(x) + \psi(x)). \quad (6)$$

Таким образом, краевая задача (4), (5) при нагружении силой (момент равен нулю) после введения функций (6) принимает вид

$$\mathbf{X}' = \mathbf{A}\mathbf{X}, \quad (7)$$

$$\mathbf{X} = \begin{pmatrix} w(x) \\ \psi(x) \\ w_1(x) \\ \psi_1(x) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{pmatrix},$$

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} 0 & -1 & 1/d_1(x) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/d(x) \\ 0 & -\chi^2 d_2(x) & \delta_1 4/m & 0 \\ \chi^2 r(x)/\delta_1 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

Граничные условия:

$$w(0) = 0, \quad \psi(0) = 0, \quad \psi_1(1) = 1, \quad w_1(1) = 0.$$

Аналогично формируются граничные условия при нагружении моментом.

Для нахождения компонент вектора \mathbf{X} будем решать две независимые задачи Коши, каждая из которых представляет собой систему четырех дифференциальных уравнений первого порядка вида (7) с условиями, заданными в точке $x=0$ (при $x=0$ задаются данные Коши для функций $w_1(x)$ и $\psi_1(x)$, различные для каждой из задач).

$$\text{Введем векторы } \mathbf{X}^{(1)} = \begin{pmatrix} w^{(1)} \\ \psi^{(1)} \\ w_1^{(1)} \\ \psi_1^{(1)} \end{pmatrix}, \quad \mathbf{X}^{(2)} = \begin{pmatrix} w^{(2)} \\ \psi^{(2)} \\ w_1^{(2)} \\ \psi_1^{(2)} \end{pmatrix}$$

как решение следующих задач Коши:

$$1) \quad \mathbf{X}^{(1)'} = \mathbf{A}\mathbf{X}^{(1)}, \quad \mathbf{X}^{(1)}(0) = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix};$$

$$2) \quad \mathbf{X}^{(2)'} = \mathbf{A}\mathbf{X}^{(2)}, \quad \mathbf{X}^{(2)}(0) = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}.$$

Согласно методу пристрелки, искомое решение может быть представлено в виде $\mathbf{X} = C_1 \mathbf{X}^{(1)} + C_2 \mathbf{X}^{(2)}$, где C_1, C_2 – неизвестные параметры.

Далее для удовлетворения условиям на $x=1$ необходимо решить систему линейных алгебраических уравнений

$$\begin{cases} C_1 \psi_1^{(1)}(1) + C_2 \psi_1^{(2)}(1) = 0, \\ C_1 w_1^{(1)}(1) + C_2 w_1^{(2)}(1) = 1. \end{cases} \quad (8)$$

Приравнивая к нулю определитель системы (8), найдем резонансные значения методом половинного деления.

На рис. 2 представлено сравнение точных резонансных значений неповрежденной балки и балки с включением в зависимости от координаты центра включения при значениях параметров: $\delta=0,05$; $\varepsilon=0,5$; $\tau_1=0,8$; $\tau_2=0,6$; $\tau_3=0,6$ (такое соотношение модулей упругости и плотностей характеризует некоторую степень деструкции включения). Точками на рис. 2 изображены резонансные значения балки с дефектом, а линией – неповрежденной балки (рис. 2а – первая частота, рис. 2б – вторая, рис. 2в – третья).

Отметим, что зависимость первого резонансного значения носит монотонный характер; второго и третьего – немонотонный.

Соотношения для поправок к резонансным частотам

Из предыдущего пункта следует, что имеется некоторая связь между резонансными значениями балки с включением и положением его центра.

Получим формулу для поправки к резонансным значениям. Для этого упростим функционал \mathcal{L} .

Потенциальная и кинетическая энергия для балки Тимошенко имеет вид

$$\begin{aligned} \Pi &= \frac{1}{2} \int_0^L [D(x)\psi'^2 + D_1(x)(w' + \psi)^2] dx = \\ &= \frac{1}{2} L \pi E_0 a^2 \int_0^1 [k'(1-f_3)(w' + \psi)^2 + \frac{1}{4} m(1-f_1)\psi'^2] d\xi; \\ K &= \frac{1}{2} \int_0^L R(x)w^2 + D_2(x)\psi^2 dx = \\ &= \omega^2 \pi \rho_0 a^2 L^3 \frac{1}{2} \int_0^1 [(1-f_2)w^2 + (1-f_4) \frac{a^2}{4L^2} \psi^2] d\xi. \end{aligned}$$

Используем соотношения Рэлея $\omega^2 = \frac{\Pi}{K}$ [9]. Без-

размерный параметр χ^2 вычисляется по формуле

$$\chi^2 = \frac{\int_0^1 [k'(1-f_3)(w' + \psi)^2 + \frac{1}{4} m(1-f_1)\psi'^2] d\xi}{\int_0^1 [(1-f_2)w^2 + (1-f_4) \frac{1}{4} m\psi^2] d\xi}.$$

Считая, что включение мало, $\varepsilon \ll 1$ и $\delta \ll 1$, будем искать представление функций $w(x)$ и $\psi(x)$ в виде $w = w_0 + \varepsilon w_1$, $\psi = \psi_0 + \varepsilon \psi_1$. Тогда

$$\chi^2 = \frac{\Pi_0 - m_3 \varepsilon^2 k' \int_{c_0-\delta}^{c_0+\delta} g(w'_0 + \psi_0)^2 d\zeta}{K_0 - m_2 \varepsilon^2 \int_{c_0-\delta}^{c_0+\delta} g w_0^2 d\zeta} =$$

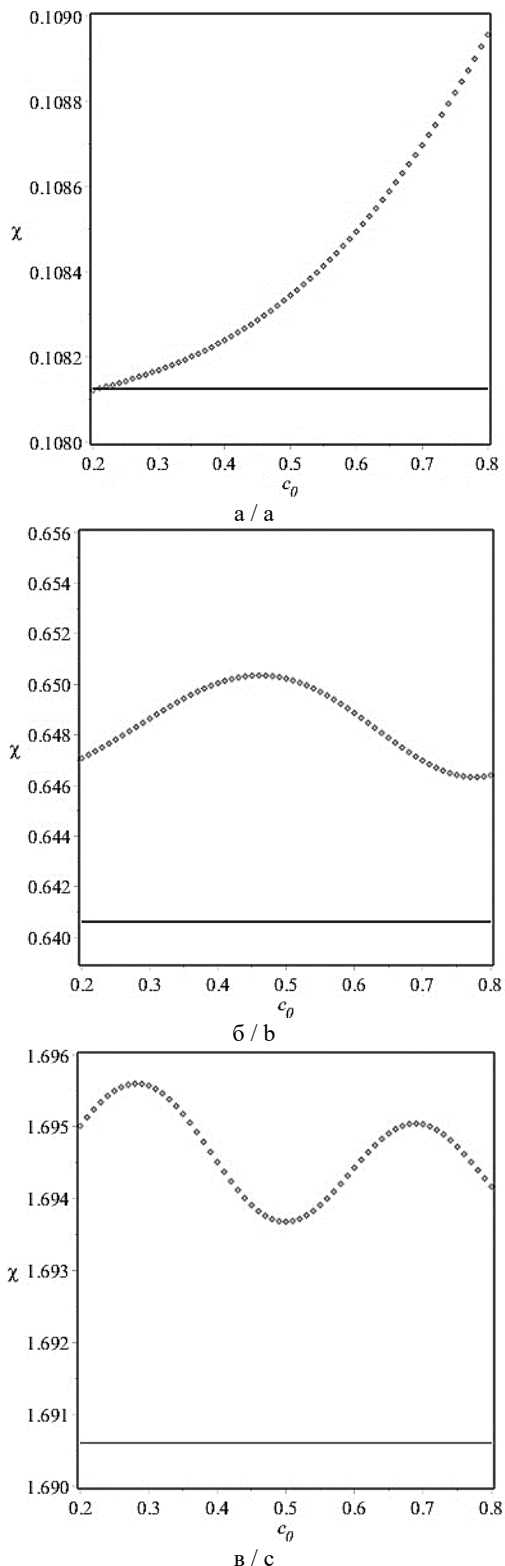


Рис. 2. Зависимость резонансного значения от координаты центра включения: а – первого; б – второго; в – третьего / Fig. 2. Dependence resonance value on the coordinate of the switching center: a - first; b - second; c - third

$$= \frac{\Pi_0 - m_3 \varepsilon^2 2\delta k' g(c_0)(w'_0(c_0) + \psi_0(c_0))^2}{K_0 - m_2 \varepsilon^2 2\delta g(c_0)w_0^2(c_0)},$$

где Π_0 и K_0 – соответственно потенциальная и кинетическая энергия однородной балки.

Найдём соотношение $\frac{\chi^2}{\chi_0^2}$ для поправок к резонансным значениям.

$$\frac{\chi^2}{\chi_0^2} = 1 - \frac{m_3 v k' g(c_0)(w'_0(c_0) + \psi_0(c_0))^2}{\Pi_0} + \frac{m_2 v g(c_0)w_0^2(c_0)}{K_0}, \quad (9)$$

причем введено обозначение $v = 2\delta \varepsilon^2$.

В табл. 1 приведены результаты сравнения резонансных значений, полученных методом пристрелки и при помощи формулы (9), а также относительная погрешность формулы (9) при $\varepsilon=0,5$; $\tau_1=0,8$; $\tau_2=0,6$; $\tau_3=0,6$.

Таблица 1

Сравнение резонансных значений / Comparison of resonance values

Резонансные значения			
$\delta=0,05; c_0=0,2$			
Метод пристрелки	0,108118	0,64686	1,70118
Формула (9)	0,108109	0,64034	1,69175
Погрешность, %	0,007	1	0,5
$c_0=0,4$			
Метод пристрелки	0,10823	0,64999	1,69813
Формула (9)	0,10814	0,64181	1,69193
Погрешность, %	0,08	1	0,3
$c_0=0,7$			
Метод пристрелки	0,10869	0,64693	1,70128
Формула (9)	0,10829	0,64087	1,69374
Погрешность, %	0,3	0,9	0,4
$\delta=0,1; c_0=0,2$			
Метод пристрелки	0,10804	0,6474	1,70809
Формула (9)	0,10809	0,64007	1,69291
Погрешность, %	0,05	1	0,8
$c_0=0,4$			
Метод пристрелки	0,10828	0,65349	1,703
Формула (9)	0,10816	0,643	1,69327
Погрешность, %	0,1	1	0,5
$c_0=0,7$			
Метод пристрелки	0,10921	0,6477	1,7074
Формула (9)	0,10846	0,64112	1,69688
Погрешность, %	0,6	1	0,6

Результаты расчетов свидетельствуют о достаточной работоспособности формулы (9) для малых включений.

Поэтапный метод восстановления геометрических характеристик включения эллипсоидальной формы

Обратная задача состоит в восстановлении координаты центра включения и объема включения по известным значениям двух резонансных частот при использовании формулы (9).

Обозначим

$$\frac{\chi_n^2}{\chi_{0n}^2} = \alpha_n, \quad n = 1, 2, \quad (10)$$

где n – номер резонансного значения.

Нетрудно по α_1 и α_2 найти объем включения.

После исключения v из системы (10) было получено трансцендентное уравнение для нахождения c_0 .

Из этого трансцендентного уравнения найдены значения координаты центра включения c_0 . Далее, зная координату центра включения и α_1 , восстановим v . В табл. 2 представлены результаты восстановления параметров дефекта при $\varepsilon=0,5$; $\tau_1=0,8$; $\tau_2=0,6$; $\tau_3=0,6$; $\delta=0,048$, что соответствует $v=0,024$.

Таблица 2

Восстановление параметров дефекта / Restore defect parameters

c_0	Полученное c_0	Полученное v	Погрешность v , %
0,2	0,1975	0,0243	1,6
0,3	0,3028	0,0231	3,5
0,4	0,4012	0,0236	1,4
0,5	0,5010	0,0238	0,76
0,6	0,6006	0,02391	0,37
0,7	0,7002	0,02396	0,12
0,8	0,8003	0,02397	0,12

Восстановление соотношений модулей жесткостей и плотностей

Подобно способу, изложенному в предыдущем пункте, можно реализовать реконструкцию отношений модулей упругости и плотностей включения на неповрежденной части балки на основе формулы (9).

Соотношение для модулей жесткостей и плотностей имеет вид

$$\frac{G_1}{G_0} = 1 - \frac{(w_0^2(c_0)g(c_0)m_2v + k'\alpha_1 - K_0)\Pi_0}{K_0 k' v g(c_0)(w'_0(c_0) + \psi_0(c_0))^2};$$

$$\frac{\rho_1}{\rho_0} = 1 -$$

$$\frac{(\psi_0^2(c_0)g(c_0)k'm_3v + 2\psi_0(c_0)g(c_0)k'm_3w'_0(c_0)v + \Pi_0\alpha_1 - \Pi_0)K_0}{\Pi_0 g(c_0)v w_0^2(c_0)}.$$

В табл. 3 приведены результаты восстановления соотношений модулей упругости и плотностей при значениях параметров $\varepsilon=0,5$; $\tau_1=0,8$; $\tau_2=0,6$; $\tau_3=0,6$; $\delta=0,048$ при различных значениях c_0 .

Таблица 3

Восстановление модулей / Recovery of modules

c_0	Полученное τ_3	Погрешность τ_3 , %	Полученное τ_2	Погрешность τ_2 , %
0,2	0,6141	2,36	0,6471	7,8
0,3	0,6063	1,06	0,5997	0,049
0,4	0,6135	2,25	0,6432	7,2
0,5	0,6073	1,23	0,6059	0,98
0,6	0,607	1,16	0,6035	0,58
0,7	0,6064	1,06	0,5998	0,01
0,8	0,6064	1,06	0,6	0,003

Заключение

В работе изучены колебания неоднородной балки Тимошенко с эллипсоидальным включением, причем физические характеристики включения меньше, чем соответствующие величины для однородной балки.

Проведен анализ зависимости резонансных значений от координаты центра включения для различных параметров. Получена приближенная формула для поправки к резонансным значениям. Приведены результаты сравнения резонансных значений, полученных методом пристрелки и при помощи приближенной формулы для различных значений параметров. На основе полученной формулы решены две обратные задачи; восстановлены геометрические характеристики включения эллипсоидальной формы и отношения модулей упругости и плотностей.

Литература

1. Ватульян А.О., Солуянов Н.О. Идентификация полости в упругом стержне при анализе поперечных колебаний // Прикладная механика и техническая физика. 2008. Т. 49, № 6. С. 1015–1020.
2. Ахтямов А.М., Сатыев Э.И. Определение местоположения и объема полости в упругом стержне по двум собственным частотам его колебаний // Дефектоскопия. 2012. № 5. С. 78–83.
3. Ватульян А.О., Осипов А.В. Об одном подходе при определении параметров дефекта в балке // Дефектоскопия. 2014. № 11. С. 37–47.
4. Шифрин Е.И. Идентификация эллипсоидального дефекта в упругом теле по результатам одного испытания на одноосное растяжение (сжатие) // Изв. РАН. МТТ. 2010. № 3. С. 131–142.
5. Alessandrini G., Morassi A., Rosset E. Detecting an inclusion in an elastic body by boundary measurements // SIAM J. Math. Anal. 2002. Vol. 33, № 6. P. 1247–1268.
6. Morassi A., Rosset E. Detecting rigid inclusions, or cavities, in an elastic body // J. Elast. 2003. Vol. 73, № 1–3. P. 101–126.

7. Ватульян А.О., Кашталяян Д.О. Об определении локализованной зоны деструкции в упругой балке // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2015. № 4. С. 29–34.
8. Алфутов Н.А. Основы расчета на устойчивость упругих систем. М.: Машиностроение, 1978. 312 с.
9. Филиппов А.П. Колебания деформируемых систем. 2-е изд. М.: Машиностроение, 1970. 733 с.
10. Амосов А.А., Дубинский Ю.А., Копченова Н.В. Вычислительные методы для инженеров: учеб. пособие. М.: Высш. школа, 1994. 544 с.

References

1. Vatul'yan A.O., Soluyanov N.O. Identifikatsiya polosti v uprugom stержne pri analize poperechnykh kolebaniy [Identification of a cavity in an elastic rod in the analysis of transverse oscillations]. *Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika*. 2008, vol. 49, No. 6, pp. 1015-1020.
2. Akhtyamov A.M., Satyev E.I. Opredelenie mestopolozheniya i ob"ema polosti v uprugom stержne po dvum sobstvennym chastotam ego kolebaniy [Determination of the location and volume of a cavity in an elastic rod at two natural frequencies of its oscillations]. *Defektoskopiya*. 2012, No. 5, pp. 78-83.
3. Vatul'yan A.O., Osipov A.V. Ob odnom podkhode pri opredelenii parametrov defekta v balke [On one approach in determining the parameters of a defect in a beam]. *Defektoskopiya*. 2014, No. 11, pp. 37-47.
4. Shifrin E.I. Identifikatsiya ellipsoidal'nogo defekta v uprugom tele po rezul'tatam odnogo ispytaniya na odnoosnoe rastyazhenie (szhatie) [Identification of an ellipsoidal defect in an elastic body from the results of a single test for uniaxial tension (compression)]. *Izv. RAN. MTT*. 2010, No. 3, pp. 131-142.
5. Alessandrini G., Morassi A., Rosset E. Detecting an inclusion in an elastic body by boundary measurements. *SIAM J. Math. Anal.* 2002, vol. 33, No. 6, pp. 1247-1268.
6. Morassi A., Rosset E. Detecting rigid inclusions, or cavities, in an elastic body. *J. Elast.* 2003, vol. 73, No. 1-3, pp. 101-126.
7. Vatul'yan A.O., Kashtal'yan D.O. Ob opredelenii lokalizovannoi zony destruktсии v uprugoi balke [On the determination of a localized zone of destruction in an elastic beam]. *Izv. vuzov. Sev.-Kavk. region. Estestv. nauki*. 2015, No. 4, pp. 29-34.
8. Alfutov N.A. *Osnovy rascheta na ustoichivost' uprugikh sistem* [Basics of calculating the stability of elastic systems]. Moscow: Mashinostroenie, 1978, 312 p.
9. Filippov A.P. *Kolebaniya deformiruemyykh sistem* [Oscillations of deformable systems]. 2nd ed. Moscow: Mashinostroenie, 1970, 733 p.
10. Amosov A.A., Dubinskii Yu.A., Kopchenova N.V. *Vychislitel'nye metody dlya inzhenerov* [Computational methods for engineers]. Textbook. Moscow: Vyssh. shkola, 1994, 544 p.

УДК 534.232

DOI 10.23683/0321-3005-2018-2-23-29

АНАЛИЗ КОНТАКТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПЬЕЗОАКТУАТОРА И УПРУГОГО СЛОЯ В РЕЖИМЕ УСТАНОВИВШИХСЯ КОЛЕБАНИЙ НА ОСНОВЕ МЕТОДА СОСРЕДОТОЧЕННЫХ УСИЛИЙ*

© 2018 г. А.А. Ляпин¹

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

ANALYSIS OF CONTACT INTERACTION OF PIEZOELASTIC ACTUATOR AND ELASTIC LAYER IN TERMS OF STEADY OSCILLATIONS ON BASIS OF PIN-FORCED METHOD

A.A. Lyapin¹

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

Ляпин Александр Александрович – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, лаборатория механики деформируемых тел и конструкций, Институт математики, механики и компьютерных наук им. И.И. Воровича, Южный федеральный университет, пр. Стачки, 200/1, г. Ростов-на-Дону, 344090, Россия, e-mail: lyapin@sfnu.ru

Alexander A. Lyapin - Candidate of Physics and Mathematics, Senior Researcher, Laboratory of Mechanics of Deformable Bodies and Constructions, Vorovich Institute of Mathematics, Mechanics and Computer Sciences, Southern Federal University, Stachki Ave., 200/1, Rostov-on-Don, 344090, Russia, e-mail: lyapin@sfnu.ru

Применение электроупругих актуаторов для возбуждения акустического сигнала в упругих телах является одной из основных методик неразрушающего контроля. Математическое моделирование процессов взаимодействия актуатора и среды позволяет разрабатывать более точные и современные методы диагностики упругого состояния тел. В рамках статьи проведен анализ контактного взаимодействия электроупругого актуатора и упругого слоя в осесимметричной постановке режима установившихся колебаний. Решение построено на основе инженерного подхода, основанного на замене актуатора сосредоточенными усилиями по границе контакта, а также методом конечного элемента. Моделируется полная задача взаимодействия актуатора и среды. При решении задачи методом конечного элемента применяются специальные методики для моделирования бесконечных сред. Корректность моделирования волновых полей при таком подходе проверена на основе решения задачи о распространении волн в упругом слое методом обращения интегрального преобразования Ханкеля. Амплитуды сосредоточенных усилий определены путем интегрирования контактных нормальных и касательных напряжений по области контакта. Итоговые волновые поля, полученные представленными методами, сравниваются друг с другом для различных частот.

Ключевые слова: неразрушающий контроль, пьезоактуатор, распространение волн, метод конечного элемента, метод сосредоточенных сил.

Application of piezoelectric actuators for generation of acoustic signal while scanning elastic bodies is one of the basic methodic of non-destructive testing. Mathematical modeling for interaction processes of actuator and media allows developing more accurate and modern methods for health monitoring of elastic bodies. In terms of paper presented the calculation of contact interaction of piezoelectric actuator and elastic layer in case of axisymmetric steady-state oscillations is performed. The solution is constructed on the basis of engineering approach, based on description of an actuator as concentrated forces placed along the contact edge and the finite element method for simulation the full problem of an actuator and a media interaction. While performing the finite element simulation the special methodic for dealing with infinitive bodies is used. The correctness for such wave field solutions is checked with known solutions for wave distribution in an elastic layer based on the inverse Hankel integral transformation. Amplitudes for concentrated forces are determined by integration of normal and tangential contact stresses along the contact area. Resulted wave fields are compared for various vibration frequencies.

Keywords: non-destructive testing, piezoelectric actuator, guided waves, finite element method, pin-force method.

* Работа выполнена при поддержке государственного задания Министерства образования и науки Российской Федерации № 3.9997.2017/5.2, № 9.4726.2017/8.9.

Бегущие упругие волны хорошо зарекомендовали себя как инструмент идентификации повреждений при мониторинге всевозможных промышленных объектов. Для неразрушающего контроля в качестве генераторов высокочастотных волн применяются пьезокерамические актуаторы. Построение моделей взаимодействия механических конструкций и пьезокерамических актуаторов для понимания электромеханического динамического поведения таких систем является важной задачей для развития техник неразрушающего контроля и мониторинга состояния конструкций, в том числе из композитных материалов, которые находят все большее применение в авиастроении, химической промышленности, трубопроводных системах и т.д.

Одной из основных проблем при эффективном использовании пьезоактуаторов является корректное описание процессов распространения генерируемых упругих волн и, в частности, связанное электроупругое поведение области между актуатором и объектом. Построение модели упругих сред с расположенными на поверхности пьезоактуаторами является необходимым условием разработки новых и оптимизации существующих систем неразрушающего контроля, приводит к более глубокому пониманию электромеханического динамического поведения структуры и характера распространения волн.

Анализом колебаний связанных систем типа актуатор – объект и разработкой эффективных моделей описания электроупругих актуаторов начали заниматься уже давно. Стоит отметить значительный вклад отечественных ученых по данной проблематике [1–3]. Для решения прикладных инженерных задач неразрушающего контроля зачастую применяются упрощенные модели актуаторов, основанные на моделях балок и пластин [4–10]. Однако границы применения таких моделей жестко ограничены небольшим частотным диапазоном, где длины волн значительно больше характерных размеров объекта.

Для более сложных структур аналитическое и численно-аналитическое моделирование становится крайне сложным или невозможным. В таком случае в качестве одного из методов решения может быть использован метод конечного элемента (МКЭ), хорошо зарекомендовавший себя при анализе электроупругих структур [11, 12]. Однако и конечно-элементные модели обладают рядом ограничений, особенно для случаев тел больших размеров и высокочастотных колебаний, где соответственное число элементов приводит к значительному времени расчета.

Целью данной статьи является исследование свойств взаимодействия пьезоактуатора и упругого слоя в режиме установившихся колебаний. Задача рассмотрена в осесимметричной постановке, что отвечает случаю актуатора цилиндрической формы – наиболее распространенной и применяемой в техниках неразрушающего контроля. Математическое моделирование процесса взаимодействия актуатора и слоя осуществлено на основе МКЭ. Корректность описания волновых процессов в слое обоснована сравнением КЭ-решений для слоя с решениями, сформулированными методами математического аппарата теории упругости – на основе обращения интегральных представлений решений. В дополнение к КЭ-решениям волновые поля, генерируемые актуатором, построены на основе метода сосредоточенных усилий, который заключается в эффективной замене актуатора системой сосредоточенных сил, расположенных по границе контактной зоны. Полученные решения сравниваются и анализируются для различных частот колебаний.

Построение решений для упругого слоя

Для математического моделирования волновых полей, генерируемых пьезоактуатором в слое, необходимо корректно строить решение для задачи об установившихся колебаниях упругого слоя под действием системы нагрузок на части поверхности. Такое описание свойств распространения волн может быть реализовано различными способами, в том числе МКЭ с применением специальных техник для моделирования бесконечно удаленной границы.

Для проверки корректности КЭ волновых полей упругого слоя необходимо построить эталонные решения известными методами теории упругости. Пусть рассматриваемый упругий слой толщины h находится под воздействием системы нормальных и касательных напряжений, действующих на круглом пятне радиуса a на верхней поверхности слоя $z=h$.

Решение задачи об установившихся колебаниях упругого слоя строится известным способом через представления Ламе и интегральное преобразование Ханкеля. Приведем вкратце схему построения решения. Геометрия задачи и граничные условия представлены на рис. 1.

Рассматривается упругий слой в цилиндрической системе координат: $r \in [0, \infty)$; $z \in [-h, 0]$; $\varphi \in [0, 2\pi]$. Нагрузка представлена заданными нормальными σ_{zz} и касательными σ_{zr} напряжениями на части границы $z=0$, $r \in [0, a]$.

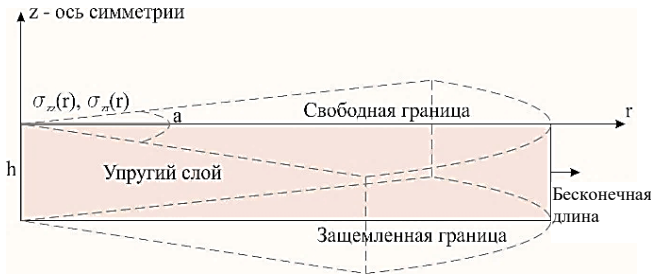


Рис. 1. Рассматриваемая область и граничные условия / Fig. 1. Problem area and boundary conditions

Уравнения колебаний среды представляют собой классические уравнения Ламе

$$\nabla \nabla \cdot \mathbf{u} - \frac{\theta_1^2}{\theta_2^2} \nabla \times \nabla \times \mathbf{u} + \theta_1^2 \mathbf{u} = 0, \quad (1)$$

где $\theta_1^2 = \omega^2 a^2 / V_p^2$, $\theta_2^2 = \omega^2 a^2 / V_s^2$,
 $V_p = \sqrt{(\lambda + 2\mu) / \rho}$, $V_s = \sqrt{\mu / \rho}$.

Определяющие соотношения для тензора напряжений:
 $\boldsymbol{\sigma} = 2\mu \boldsymbol{\varepsilon} + \lambda \text{Etr} \boldsymbol{\varepsilon}$.

Граничные условия на верхней границе слоя представлены функциями нормальных и касательных напряжений, нижняя граница жестко закреплена:

$$\begin{aligned} \sigma_{zz}(r, 0) &= \begin{cases} s_1(r), & 0 \leq r \leq a \\ 0, & r > a \end{cases}, \\ \sigma_{zr}(r, 0) &= \begin{cases} s_2(r), & 0 \leq r \leq a \\ 0, & r > a \end{cases}, \\ \mathbf{u}(r, -h) &= 0. \end{aligned} \quad (2)$$

Решение строится в виде разложения волнового поля на потенциальную и вихревую составляющие:
 $\mathbf{u} = \{u_r, u_z\} = \nabla \varphi + \nabla \times (\psi \mathbf{e}_\phi)$.

С учетом такого представления, дифференциальные уравнения (1) преобразуются в уравнения Гельмгольца для определения неизвестных потенциалов:

$$\Delta \varphi + \theta_1^2 \varphi = 0, \quad \Delta \psi + \theta_2^2 \psi = 0. \quad (3)$$

Решение уравнений (3) может быть построено на основе интегрального преобразования Ханкеля, которое для некоторой функции $f(r)$ имеет вид

$$\begin{aligned} \bar{f}(k) &= \text{H}_p[f(r)] = \int_0^\infty f(r) J_p(kr) r dr, \\ f(r) &= \text{H}_p^{-1}[\bar{f}(k)] = \int_{\Gamma_+} \bar{f}(k) J_p(kr) k dk. \end{aligned}$$

Параметр p выбран для соответствующих напряжений следующим образом: $p=0$ для $\sigma_{zz}(r, z)$,

$p=1$ для $\sigma_{zr}(r, z)$; контур Γ_+ – с учетом обхода особенностей подынтегральной функции.

В таком случае уравнения Гельмгольца (3) после преобразования Ханкеля принимают вид

$$\frac{\partial^2 \bar{\varphi}}{\partial z^2} - k^2 + \theta_1^2 \bar{\varphi} = 0, \quad \frac{\partial^2 \bar{\psi}}{\partial z^2} - k^2 + \theta_2^2 \bar{\psi} = 0.$$

Решение для слоя будем строить в виде суперпозиции решений для двух полуплоскостей (рис. 2).

Тогда решения уравнений Гельмгольца должны убывать на бесконечности для каждой из соответствующих полуплоскостей. Представим построение решения для полуплоскости, направленной вниз.

$$\begin{aligned} \bar{\varphi} &= C_1(k) \exp[\sigma_1 z], \quad \bar{\psi} = C_2(k) \exp[\sigma_2 z], \\ \sigma_j &= \sqrt{k^2 - \theta_j^2}, \quad j=1,2. \end{aligned}$$

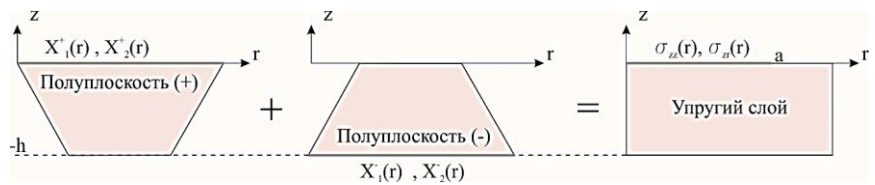


Рис. 2. Схема суперпозиции полуплоскостей для построения решения для слоя / Fig. 2. Superposition scheme for half-planes in terms of layer solution

Трансформанты перемещений и напряжений в таком случае могут быть выражены в виде

$$\begin{aligned} \bar{\mathbf{u}}(k, z) &= \begin{Bmatrix} \bar{u}_R \\ \bar{u}_z \end{Bmatrix} = \mathbf{U}(k, z) \cdot \mathbf{C}(k), \\ \bar{\mathbf{t}}(k, z) &= \begin{Bmatrix} \bar{\sigma}_z \\ \bar{\sigma}_{zr} \end{Bmatrix} = \mathbf{B}(k, z) \cdot \mathbf{C}(k), \end{aligned} \quad (4)$$

$$\mathbf{U} = \begin{pmatrix} -k \exp(\sigma_1 z) & -\sigma_2 \exp(\sigma_2 z) \\ \sigma_1 \exp(\sigma_1 z) & k \exp(\sigma_2 z) \end{pmatrix},$$

$$\mathbf{B} = \begin{pmatrix} \zeta_2^2 \exp(\sigma_1 z) & 2k \sigma_2 \exp(\sigma_2 z) \\ -2k \sigma_1 \exp(\sigma_1 z) & -\zeta_2^2 \exp(\sigma_2 z) \end{pmatrix},$$

$$\zeta_2^2 = k^2 + \sigma_2^2.$$

Пусть на поверхности полуплоскости действует система нормальных и касательных напряжений

$$\mathbf{t} = \begin{Bmatrix} \sigma_{zz} \\ \sigma_{zr} \end{Bmatrix} = \mathbf{X}(r), \quad z=0, \quad r \in (0, \infty). \text{ Тогда неизвестные константы в решении (4) можно представить в виде } \mathbf{C}(k) = \mathbf{B}^{-1}(k, 0) \cdot \bar{\mathbf{X}}(k).$$

Трансформанты перемещений и напряжений для полуплоскости имеют вид

$$\bar{\mathbf{u}}(k, z) = \begin{Bmatrix} \bar{u}_R \\ \bar{u}_z \end{Bmatrix} = \mathbf{U}(k, z) \cdot \mathbf{B}^{-1}(k, 0) \cdot \bar{\mathbf{X}}(k) = \mathbf{Q}(k, z) \cdot \bar{\mathbf{X}}(k),$$

$$\bar{\mathbf{t}}(k, z) = \begin{Bmatrix} \bar{\sigma}_z \\ \bar{\sigma}_{zr} \end{Bmatrix} = \mathbf{B}(k, z) \cdot \mathbf{B}^{-1}(k, 0) \cdot \bar{\mathbf{X}}(k) = \mathbf{G}(k, z) \cdot \bar{\mathbf{X}}(k).$$

Тогда решение для слоя может быть представлено в виде

$$\bar{\mathbf{u}}(k, z) = \begin{Bmatrix} \bar{u}_r \\ \bar{u}_z \end{Bmatrix} = \mathbf{Q}^+(k, z) \cdot \bar{\mathbf{X}}^+(k) + \mathbf{Q}^-(k, z) \cdot \bar{\mathbf{X}}^-(k),$$

$$\bar{\mathbf{t}}(k, z) = \begin{Bmatrix} \bar{\sigma}_z \\ \bar{\sigma}_{zr} \end{Bmatrix} = \mathbf{G}^+(k, z) \cdot \bar{\mathbf{X}}^+(k) + \mathbf{G}^-(k, z) \cdot \bar{\mathbf{X}}^-(k).$$

Верхний индекс (+, -) соответствует полуплоскости, направленной вниз и вверх соответственно.

Решения содержат не произвольные неизвестные константы, а некоторые функции, соответствующие распределённым напряжениям на границах полуплоскостей. Определение этих напряжений следует из удовлетворения граничным условиям исходной задачи:

$$\bar{\sigma}_{zz}(k, 0) = S_1(k), \quad \bar{\sigma}_{zr}(k, 0) = S_2(k), \quad \bar{\mathbf{u}}(k, -h) = \mathbf{0}.$$

Соответствующая система линейных алгебраических уравнений имеет вид

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & \bar{G}_{11}^-(k, 0) & \bar{G}_{12}^-(k, 0) \\ 0 & 1 & \bar{G}_{21}^-(k, 0) & \bar{G}_{22}^-(k, 0) \\ \bar{Q}_{11}^+(k, -h) & \bar{Q}_{12}^+(k, -h) & \bar{Q}_{11}^-(k, -h) & \bar{Q}_{12}^-(k, -h) \\ \bar{Q}_{21}^+(k, -h) & \bar{Q}_{22}^+(k, -h) & \bar{Q}_{21}^-(k, -h) & \bar{Q}_{22}^-(k, -h) \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} X_1^+(k) \\ X_2^+(k) \\ X_1^-(k) \\ X_2^-(k) \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} S_1(k) \\ S_2(k) \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix}.$$

Определитель этой системы характеризует дисперсионные свойства упругого слоя. Для конкретного материала слоя и его размеров можно построить дисперсионные множества, определяющие динамические свойства распространения упругих волн.

Решение аналогичной задачи о распространении упругих волн в слое с заданными напряжениями на границе было построено на основе МКЭ в пакете ANSYS. Задача решена в стационарной осесимметричной постановке с применением КЭ PLANE182 (четырёхузловой элемента с двумя степенями свободы в каждом узле и возможностью моделировать осесимметричную деформацию) и моделированием бесконечно удалённой границы элементом INFIN257, который для динамических типов анализа удовлетворяет условию поглощающей границы, позволяющей избавиться в решении от отраженных полей.

Толщина слоя h для численных экспериментов выбрана 10 мм; материал слоя – сталь с параметрами: модуль Юнга – $2 \cdot 10^{11}$ Па; коэффициент Пуассона – 0,31; плотность – 7850 кг/м^3 . В качестве нагрузки на части границы слоя $z=0, 0 \leq r \leq a$, $a=0,004$ м задано нормальное распределенное усилие с амплитудой $8,1 \cdot 10^{10}$ Па.

Результаты моделирования для различных частот колебаний представлены на рис. 3 (сплошной и пунктирной линиями отмечены решения методом обращения интегрального преобразования, штрихпунктирной и точечной – решения, построенные в пакете ANSYS).

Заметим, что для низкой частоты решение соответствует квазистатическому полю перемещений, что также подтверждается дисперсионными множествами – на низких частотах бегущие волны отсутствуют. Таким образом, можно заключить, что построенные решения для задачи о распространении волн в упругом слое за счет системы нагрузок на верхней границе МКЭ корректны. Следующим этапом является исследование свойств взаимодействия пьезоактуатора и упругого слоя.

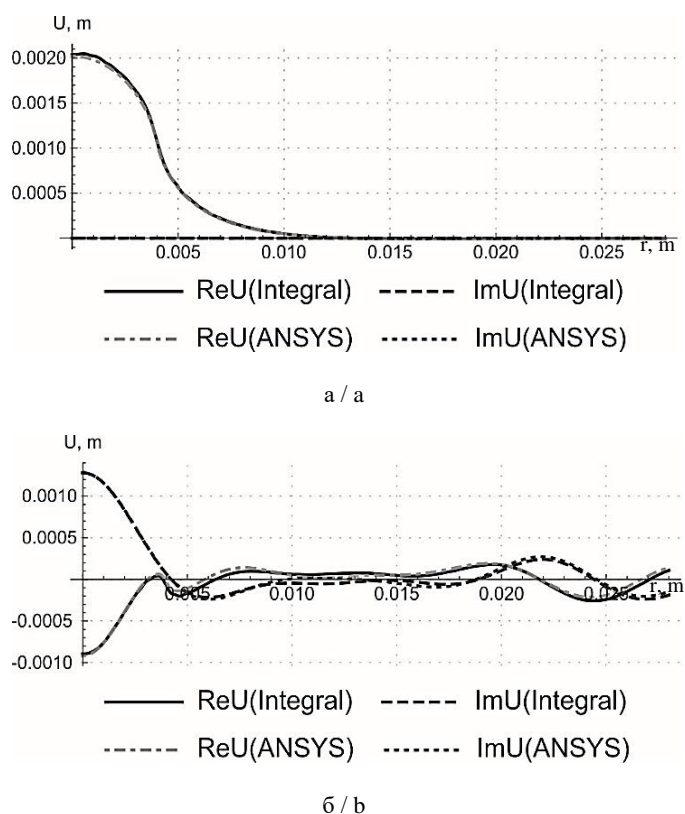


Рис. 3. Поля вертикальных перемещений на верхней границе слоя для частоты 3 кГц – а, 400 кГц – б / Fig. 3. Vertical displacements fields along the top edge of layer for frequencies 3 kHz - a, 400 kHz - b

Решение задачи взаимодействия актуатора и слоя

Рассмотрим взаимодействие пьезоактуатора и упругого слоя в осесимметричной постановке и в режиме установившихся колебаний. Геометрия и граничные условия задачи представлены на рис. 4.

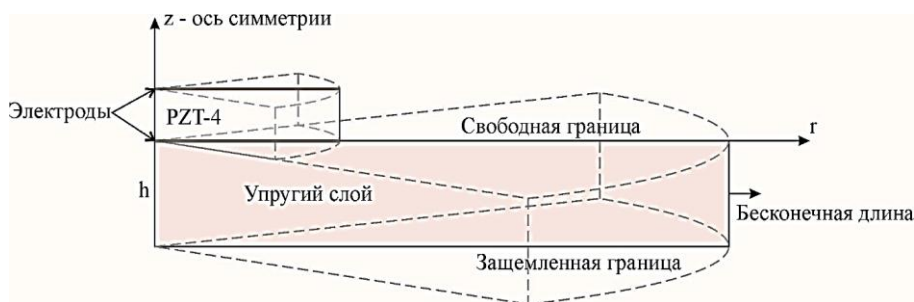


Рис. 4. Геометрия и граничные условия
 / Fig. 4. Geometry and boundary conditions

Аналогично предыдущему решению моделирование напряженно-деформированного состояния слоя осуществлено на основе КЭ PLANE182 и элемента INFIN257 для моделирования бесконечно удаленной границы. Для описания свойств пьезоактуатора использован элемент PLANE223, позволяющий моделировать электроупругие материалы. Размеры и материал упругого слоя выбраны аналогично предыдущим численным экспериментам. Актуатор представляет собой цилиндр диаметром 8 мм и толщиной 2 мм, выполненный из материала PZT-4, свойства которого описаны в таблице [7]. Нижняя граница актуатора заземлена, на верхней задан потенциал в 1 В.

**Материальные свойства керамики PZT-4
 / Material properties of ceramics PZT-4**

Параметры матрицы постоянных	Обозначение	Величина
Упругие, Па	C_{11}	$13,9 \cdot 10^{10}$
	C_{12}	$7,78 \cdot 10^{10}$
	C_{13}	$7,43 \cdot 10^{10}$
	C_{33}	$11,5 \cdot 10^{10}$
	C_{44}	$2,56 \cdot 10^{10}$
	C_{66}	$3,06 \cdot 10^{10}$
Диэлектрические, Ф/м	ϵ_{11}	$6,45 \cdot 10^{-9}$
	ϵ_{33}	$5,62 \cdot 10^{-2}$
Пьезоэлектрические, Кл/м ²	e_{31}	-5,2
	e_{33}	15,1
	e_{15}	12,7

Решение связанной задачи численно-аналитическими методами представляет собой достаточно сложную процедуру. В таких случаях применяется методика замены актуатора системой сосредоточенных нормальных и касательных усилий по границе контактной области. В случае, когда переходной слой между актуатором и средой стремится к нулю по толщине, касательные напряжения на интерфейсе сосредотачиваются в области границы актуатора [4, 13]. Следуя данной гипотезе, можно уйти от

решения задачи взаимодействия пьезоактуатора и упругого слоя и анализировать деформированное состояние упругого слоя под действием системы сосредоточенных усилий.

Остается неочевидным вопрос амплитуды таких сосредоточенных усилий. Одним из вариантов их определения может являться метод интегрирования нормальных и касательных напряжений

по области контакта в задаче о взаимодействии актуатора и среды. В частности, значения напряжений в узлах КЭ-модели были интерполированы сплайном третьего порядка. Полученная интерполяционная функция проинтегрирована по границе контакта. Итоговые значения использованы в качестве амплитуд сосредоточенных нормальных и касательных усилий, расположенных в точке $z=h$, $r=a$. В результате можно построить волновые поля в слое методом обращения интегрального преобразования Ханкеля, если в качестве граничных условий (2) взять $\sigma_{zz}(r,0) = A\delta(r-a)$, $\sigma_{rz}(r,0) = B\delta(r-a)$, где A и B – значения интегралов нормальных и касательных напряжений по области контакта актуатора и слоя.

Важным параметром задачи является частота колебаний. Проведем анализ для низких и средних частот, так как при частотах выше первой собственной частоты радиальных колебаний актуатора такая эффективная замена невозможна (рис. 5, 6).

Поля колебаний для всех представленных случаев совпадают достаточно точно.

Таким образом, МКЭ позволяет эффективно строить поля колебаний для бесконечных областей путем применения специальных команд. Такие решения продемонстрировали достаточную точность и скорость расчета, которая в случае интегрального подхода значительно ниже. Применение эффективной модели сосредоточенных усилий для описания пьезоактуатора – популярная методика неразрушающего контроля и мониторинга упругого состояния конструкций, но требующая информации о контактных усилиях на соответствующей частоте, что достаточно сложно определить без решения полной связанной контактной задачи.

Дальнейшее развитие полученных результатов будет направлено на учет особых свойств на контакте, что характеризует клеевой слой и требует особого внимания при изучении распространения волн в задачах неразрушающего контроля и мониторинга упругих структур.

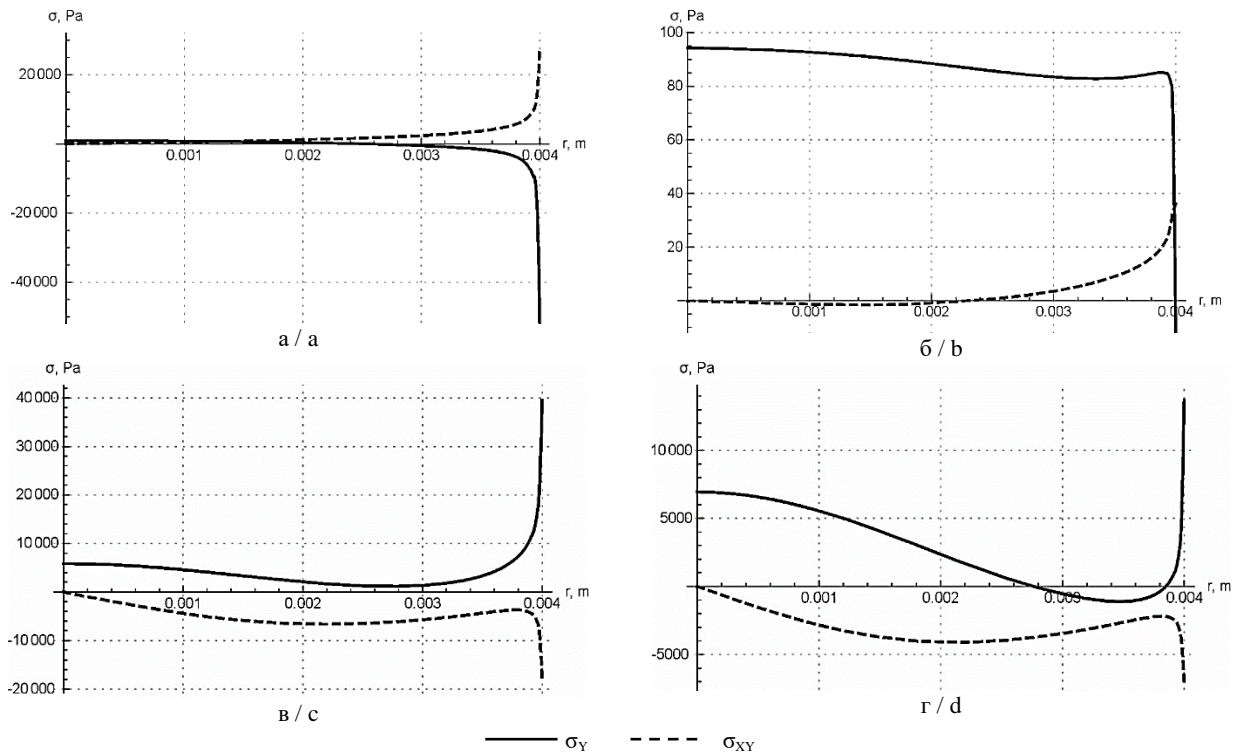


Рис. 5. Действительная (а, в) и мнимая (б, г) части нормальных (сплошная линия) и касательных (пунктирная линия) напряжений для частоты колебаний 120 кГц и 400 кГц / Fig. 5. Real (a,c) and imaginary (b,d) parts for normal (solid line) and tangential (dashed line) stresses for frequencies 120 kHz and 400 kHz

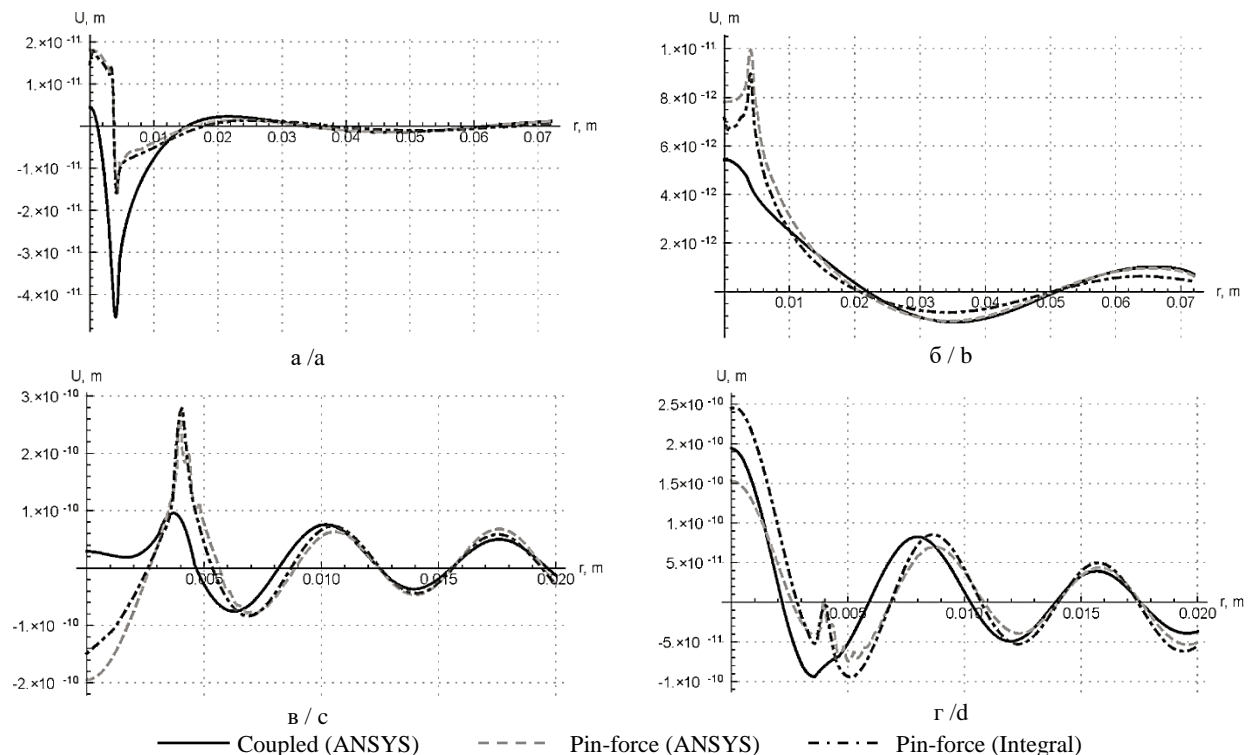


Рис. 6. Действительная (а, в) и мнимая (б, г) части вертикальных смещений по верхней границе слоя для связанного решения (сплошная линия), эффективного решения сосредоточенными усилиями, построенного в ANSYS (пунктирная линия), эффективного решения сосредоточенными усилиями, построенного интегральным методом (точечно-пунктирная линия) для частоты колебаний 120 кГц и 400 кГц / Fig. 6. Real (a, c) and imaginary (b, d) parts of vertical displacements along the top layer edge for coupled solution (solid line), effective ANSYS pin-force solution (dashed line), pin-force solution with integral approach (dot-dashed line) for frequencies 120 kHz and 400 kHz

Литература

1. Наседкин А.В., Шихман В.М., Захарова С.В. Конечно-элементный расчет высокотемпературных преобразователей акустической эмиссии // Дефектоскопия. 2011. № 7. С. 49–64.
2. Glushkov E.V., Glushkova N.V., Evdokimov A.A. Distribution of the energy of a piezoelectric actuator between traveling waves excited in an elastic layer // J. of Applied Mechanics and Technical Physics. 2015. Vol. 56, № 6. P. 1007–1014.
3. Glushkov Y.V., Glushkova N.V., Seemann W., Kvasha O.V. The excitation of waves by piezoelectric patch actuators arranged symmetrically on both surfaces of an elastic layer // J. of Applied Mathematics and Mechanics. 2011. Vol. 75, № 1. P. 56–64.
4. Crawley E.F., de Luis J. Use of Piezoelectric Actuators as Elements of Intelligent Structures // AIAA J. 1987. Vol. 25, № 10. P. 1373–1385.
5. Sirohi J., Chopra In. Fundamental Understanding of Piezoelectric Strain Sensors // J. of Intelligent Material Systems and Structures. 2000. Vol. 11. P. 246–257.
6. Wood R.J., Steltz E., Fearing R.S. Optimal energy density piezoelectric bending actuators // Sensors and Actuators A: Physical. 2005. Vol. 119, № 2. P. 476–488.
7. Партон В.З., Кудрявцев Б.А. Электромагнитоупругость пьезоэлектрических и электропроводных тел. М.: Наука, 1988, 470 с.
8. Lee C.K., Moon F.C. Laminated piezopolymer plates for torsion and bending sensors and actuators // J. Acoust. Soc. Am. 1989. Vol. 85. P. 2432–2439.
9. Tzou H.S., Gader M. Theretical analysis of a multi-layered thin shell coupled with piezoelectric shell actuators for disturbed vibration control // J. Sound Vibrat. 1989. Vol. 132. P. 433–450.
10. Crawley E.F., Lazarus K.B. Induced strain actuation of isotropic and anisotropic plates // AIAA J. 1991. Vol. 29. P. 944–951.
11. Detwiler D.T., Shen M.-H.H., Venkayya V.B. Finite element analysis of laminated composite structures containing distributed piezoelectric actuators and sensors // Finite Elements in Analysis and Design. 1995. Vol. 20, № 2. P. 87–100.
12. Sung Yi, Shih Fu Ling, Ming Ying Large deformation finite element analyses of composite structures integrated with piezoelectric sensors and actuators // Finite Elements in Analysis and Design. 2000. Vol. 35, № 1. P. 1–15.
13. Giurgiutiu V. Structural Health Monitoring with Piezoelectric Wafer Active Sensors. Academic Press: Burlington, MA, USA, 2007. 1024 p.

References

1. Nasedkin A.V., Shikhman V.M., Zakharova S.V. Konechno-elementnyi raschet vysokotemperaturnykh preobrazovatelei akusticheskoi emissii [Finite-element calculation of high-temperature acoustic emission transducers]. *Defektoskopiya*. 2011, No. 7, pp. 49-64.
2. Glushkov E.V., Glushkova N.V., Evdokimov A.A. Distribution of the energy of a piezoelectric actuator between traveling waves excited in an elastic layer. *J. of Applied Mechanics and Technical Physics*. 2015, vol. 56, No. 6, pp. 1007-1014.
3. Glushkov Y.V., Glushkova N.V., Seemann W., Kvasha O.V. The excitation of waves by piezoelectric patch actuators arranged symmetrically on both surfaces of an elastic layer. *J. of Applied Mathematics and Mechanics*. 2011, vol. 75, No. 1, pp. 56-64.
4. Crawley E.F., de Luis J. Use of Piezoelectric Actuators as Elements of Intelligent Structures. *AIAA J.* 1987, vol. 25, No. 10, pp. 1373-1385.
5. Sirohi J., Chopra In. Fundamental Understanding of Piezoelectric Strain Sensors. *J. of Intelligent Material Systems and Structures*. 2000, vol. 11, pp. 246-257.
6. Wood R.J., Steltz E., Fearing R.S. Optimal energy density piezoelectric bending actuators. *Sensors and Actuators A: Physical*. 2005, vol. 119, No. 2, pp. 476-488.
7. Parton V.Z., Kudryavtsev B.A. *Elektromagnitnouprugost' p'ezoelektricheskikh i elektroprovodnykh tel* [Electromagnetoelasticity of piezoelectric and electrically conductive bodies]. Moscow: Nauka, 1988, 470 p.
8. Lee C.K., Moon F.C. Laminated piezopolymer plates for torsion and bending sensors and actuators. *J. Acoust. Soc. Am.* 1989, vol. 85, pp. 2432-2439.
9. Tzou H.S., Gader M. Theretical analysis of a multi-layered thin shell coupled with piezoelectric shell actuators for disturbed vibration control. *J. Sound Vibrat.* 1989, vol. 132, pp. 433-450.
10. Crawley E.F., Lazarus K.B. Induced strain actuation of isotropic and anisotropic plates. *AIAA J.* 1991, vol. 29, pp. 944-951.
11. Detwiler D.T., Shen M.-H.H., Venkayya V.B. Finite element analysis of laminated composite structures containing distributed piezoelectric actuators and sensors. *Finite Elements in Analysis and Design*. 1995, vol. 20, No. 2, pp. 87-100.
12. Sung Yi, Shih Fu Ling, Ming Ying. Large deformation finite element analyses of composite structures integrated with piezoelectric sensors and actuators. *Finite Elements in Analysis and Design*. 2000, vol. 35, No. 1, pp. 1-15.
13. Giurgiutiu V. *Structural Health Monitoring with Piezoelectric Wafer Active Sensors*. Academic Press: Burlington, MA, USA, 2007, 1024 p.

УДК 513.98

DOI 10.23683/0321-3005-2018-2-30-34

О СХОДИМОСТИ РАЗНОСТНОГО МЕТОДА РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ КОШИ ДЛЯ ОБЫКНОВЕННОГО ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО УРАВНЕНИЯ С ОПЕРАТОРОМ ДРОБНОГО ДИФФЕРЕНЦИРОВАНИЯ РИМАНА – ЛИУВИЛЛЯ

© 2018 г. Ф.Ф. Малиева¹, В.Д. Бейбалаев^{1,2}

¹Дагестанский государственный университет, Махачкала, Россия,

²Дагестанский государственный университет народного хозяйства, Махачкала, Россия

ON THE CONVERGENCE OF THE DIFFERENCE METHOD FOR SOLVING THE CAUCHY PROBLEM FOR AN ORDINARY DIFFERENTIAL EQUATION WITH THE RIEMANN-LIOUVILLE FRACTIONAL DIFFERENTIATION OPERATOR

F.F. Malieva¹, V.D. Beybalaev^{1,2}

¹Dagestan State University, Makhachkala, Russia,

²Dagestan State University of National Economy, Makhachkala, Russia

Малиева Фарида Феликсовна – аспирант, кафедра прикладной математики, Дагестанский государственный университет, ул. Гаджиева, 43а, г. Махачкала, Республика Дагестан, 367000, Россия, e-mail: faridadavudova@mail.ru

Farida F. Malieva - Postgraduate, Department of Applied Mathematics, Dagestan State University, Gadzhieva St., 43a, Makhachkala, Republic Dagestan, 367000, Russia, e-mail: faridadavudova@mail.ru

Бейбалаев Ветлугин Джабраилович – кандидат физико-математических наук, доцент, кафедра прикладной математики, Дагестанский государственный университет, ул. Гаджиева, 43а, г. Махачкала, Республика Дагестан, 367000, Россия; доцент, кафедра математики, Дагестанский государственный университет народного хозяйства, ул. Атаева, 5, г. Махачкала, Республика Дагестан, 367008, Россия, e-mail: kasprij_03@mail.ru

Vetlugin D. Beybalaev - Candidate of Physics and Mathematics, Associate Professor, Department of Applied Mathematics, Dagestan State University, Gadzhieva St., 43a, Makhachkala, Republic Dagestan, 367000, Russia; Associate Professor, Department of Mathematics, Dagestan State University of National Economy, Ataeva St., 5, Makhachkala, Republic Dagestan, 3670008, Russia, e-mail: kasprij_03@mail.ru

Исследован разностный метод $(2-\alpha)$ -го порядка точности решения задачи Коши для дифференциального уравнения с оператором дробного дифференцирования Римана – Лиувилля. Получена разностная аппроксимация дробной производной Римана – Лиувилля $(2-\alpha)$ -го порядка точности и оценки для коэффициентов разностной аппроксимации. Показано, что разностная схема аппроксимирует дифференциальное уравнение $(2-\alpha)$ порядком точности, а сумма коэффициентов меньше или равна единице. Получена оценка погрешности предложенного численного метода решения задачи Коши. Для погрешности метода при условиях, что, если правая часть уравнения удовлетворяет условию Липшица с константой A по второму аргументу и $q = A\tau^\alpha\Gamma(1-\alpha) < 1$, получена оценка, из которой следует сходимость предложенного численного метода решения задачи Коши для обыкновенного дифференциального уравнения с оператором дробного дифференцирования Римана – Лиувилля. Предложенный численный метод решения задачи Коши имеет более высокий порядок точности, чем численные методы, применяемые ранее.

Ключевые слова: дробная производная, аппроксимация, разностная схема, устойчивость, сходимость, дифференциальные уравнения.

In this paper, we study the difference method of order $(2-\alpha)$ of the accuracy of the solution of the Cauchy problem for a differential equation with the Riemann-Liouville fractional differentiation operator. A difference approximation is obtained for the fractional Riemann-Liouville derivative of order $(2-\alpha)$ of accuracy. It is shown that the difference scheme approximates the differential equation $(2-\alpha)$ by the order of accuracy. It is shown that the difference scheme approximates the differential equation $(2-\alpha)$ by the order of accuracy, and the sum of the coefficients is less than or equal to one. An error estimate is obtained for the proposed numerical method for solving the Cauchy problem. For the error of the method under the conditions that if the right-hand side of the equation satisfies the Lipschitz condition with constant A in the second argument and $q = A\tau^\alpha\Gamma(1-\alpha) < 1$, an estimate is obtained from which the convergence of the proposed numerical method for solving the Cauchy problem for the ordinary differential equation with the Riemann-Liouville fractional differentiation operator follows. The proposed numerical method for solving the Cauchy problem has a higher accuracy order than the numerical methods proposed earlier.

Keywords: fractional derivative, approximation, difference scheme, stability, convergence, differential equations.

Введение

Работа посвящена анализу одного разностного метода решения задачи Коши для обыкновенного дифференциального уравнения с оператором дробного дифференцирования Римана – Лиувилля. В монографии [1] приведены теоремы о существовании и единственности решения задачи Коши для обыкновенного дифференциального уравнения с оператором дробного дифференцирования Римана – Лиувилля. Разностные методы решения дифференциальных уравнений в производных дробного порядка также рассмотрены в работах [1–6]; [7] и [8] посвящены численным методам решения краевых задач для уравнения теплопроводности с операторами дробного дифференцирования.

Разностная аппроксимация дробной производной

Рассмотрим на отрезке $[0, T]$ производную дробного порядка в смысле Римана – Лиувилля от функции $u(t)$ [9]

$$D_{0t}^{\alpha} u(t) = \frac{1}{\Gamma(1-\alpha)} \frac{d}{dt} \int_0^t \frac{u(s)}{(t-s)^{\alpha}} ds, \quad (1)$$

где $0 < \alpha < 1$.

Представим равенство (1) в виде

$$D_{0t}^{\alpha} u(t) = \frac{d}{dt} \bar{u}(t), \quad \text{где } \bar{u}(t) = \frac{1}{\Gamma(1-\alpha)} \int_0^t \frac{u(s)}{(t-s)^{\alpha}} ds.$$

Введем на отрезке $[0, T]$ сетку

$$\omega_m = \{t_m = m\tau, m = 0, 1, 2, \dots, M, M = \frac{T}{\tau}\}.$$

Тогда

$$\begin{aligned} D_{0t}^{\alpha} u(t_{n+1/2}) &= \frac{d}{dt} \bar{u}(t_{n+1/2}) = \\ &= \frac{\bar{u}(t_{n+1}) - \bar{u}(t_n)}{\tau} + O(\tau^2). \end{aligned} \quad (2)$$

Найдем $\bar{u}(t_{n+1})$ и $\bar{u}(t_n)$:

$$\begin{aligned} \bar{u}(t_{n+1}) &= \frac{1}{\Gamma(1-\alpha)} \int_0^{t_{n+1}} \frac{u(s)}{(t_{n+1}-s)^{\alpha}} ds = \\ &= \frac{1}{\Gamma(1-\alpha)} \sum_{k=1}^{n+1} \int_{(k-1)\tau}^{k\tau} \frac{u(s)}{(t_{n+1}-s)^{\alpha}} ds = \\ &= \frac{\tau^{1-\alpha}}{\Gamma(1-\alpha)} \left[\sum_{k=0}^n (p_k - kq_k) u(t_{n-k}) - \right. \\ &\quad \left. - \sum_{k=0}^n (p_k - (k+1)q_k) u(t_{n-k+1}) \right] + \psi_{n+1}, \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \text{где } \psi_{n+1} &= \frac{1}{\Gamma(1-\alpha)} \sum_{k=1}^{n+1} O(\tau^2) \int_0^{t_{n+1}} \frac{1}{(t_{n+1}-s)^{\alpha}} ds = \\ &= \frac{(n+1)^{1-\alpha}}{\Gamma(2-\alpha)} O(\tau^{3-\alpha}), \\ \bar{u}(t_n) &= \frac{1}{\Gamma(1-\alpha)} \int_0^{t_n} \frac{u(s)}{(t_n-s)^{\alpha}} ds = \\ &= \frac{1}{\Gamma(1-\alpha)} \sum_{k=1}^n \int_{(k-1)\tau}^{k\tau} \frac{u(s)}{(t_n-s)^{\alpha}} ds = \\ &= \frac{\tau^{1-\alpha}}{\Gamma(1-\alpha)} \left[\sum_{k=1}^n (p_{k-1} - (k-1)q_{k-1}) u(t_{n-k}) - \right. \\ &\quad \left. + \sum_{k=1}^n (p_{k-1} - kq_{k-1}) u(t_{n-k+1}) \right] + \psi_n, \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \psi_n &= \frac{n^{1-\alpha}}{\Gamma(2-\alpha)} O(\tau^{3-\alpha}), \\ p_k &= \frac{1}{(2-\alpha)} [(k+1)^{2-\alpha} - k^{2-\alpha}], \end{aligned} \quad (5)$$

$$q_k = \frac{1}{(1-\alpha)} [(k+1)^{1-\alpha} - k^{1-\alpha}]. \quad (6)$$

Подставляя (3) и (4) в (2), получим

$$\begin{aligned} D_{0t}^{\alpha} u(t_{n+1/2}) &= \frac{1}{\Gamma(1-\alpha)\tau} \sum_{k=0}^n \rho_k u(t_{n-k+1}) + \\ &+ \frac{(n+1)^{1-\alpha} - n^{1-\alpha}}{\Gamma(2-\alpha) \cdot \tau} O(\tau^{3-\alpha}) + O(\tau^2), \end{aligned}$$

где $\rho_0 = q_0 - p_0$,

$$\begin{aligned} \rho_1 &= 2p_0 - p_1 + 2q_1 - q_0, \\ \rho_k &= (-p_{k-2} + 2p_{k-1} - p_k) + (k-2)q_{k-2} - \\ &- (2k-1)q_{k-1} - (k+1)q_k, \quad k \geq 2. \end{aligned} \quad (7)$$

Учитывая, что

$$\begin{aligned} \frac{(n+1)^{1-\alpha} - n^{1-\alpha}}{\tau} O(\tau^{3-\alpha}) &\leq \\ &\leq \frac{n^{1-\alpha} + 1 - n^{1-\alpha}}{\tau} O(\tau^{3-\alpha}) = O(\tau^{2-\alpha}), \end{aligned}$$

окончательно получим разностную аппроксимацию дробной производной Римана – Лиувилля $(2-\alpha)$ -го порядка точности в случае, когда $0 < \alpha \leq 1$.

$$D_{0t}^{\alpha} u(t_{n+1/2}) = \sum_{k=0}^n \rho_k u(t_{n-k+1}) + O(\tau^{2-\alpha}),$$

где ρ_k вычисляются согласно (5) и (6).

Для коэффициентов ρ_k имеют место следующие равенства:

$$\rho_0 = \frac{1}{(2-\alpha)}, \quad \rho_1 = -\frac{3-2^{2-\alpha}}{(1-\alpha)(2-\alpha)},$$

$$\begin{aligned} \sum_{k=0}^n \rho_k &= q_0 - p_0 + 2p_0 - p_1 + 2q_1 - q_0 - p_0 + 2p_1 - \\ &- p_2 - 3q_1 + 3q_2 - p_1 + 2p_2 - p_3 + q_1 - 5q_2 + 4q_3 - \\ &- p_2 + 2p_3 - p_4 + 2q_2 - 7q_3 + 5q_4 + \dots + \quad (8) \\ &- p_{n-2} + 2p_{n-1} - p_n + (n-2)q_{n-2} - (2n-1)q_{n-1} + \\ &+ (n+1)q_n = p_{n-1} - p_n - (n-1)q_{n-1} + (n+1)q_n. \end{aligned}$$

Подставляя (5) и (6) в равенство (8), получим

$$\sum_{k=0}^n \rho_k = \frac{t_{n+1}^{2-\alpha} - 2t_n^{2-\alpha} + t_{n-1}^{2-\alpha}}{(1-\alpha)(2-\alpha)} \cdot \tau^\alpha. \quad (9)$$

Таким образом,

$$\sum_{k=0}^n \rho_k \leq 1. \quad (10)$$

Разностные методы решения задачи Коши для системы ОДУ с производными дробного порядка

Рассмотрим задачу Коши для системы обыкновенных дифференциальных уравнений с производными дробного порядка Римана – Лиувилля (1).

$$D_{0+}^\alpha u(t) = f(t, u), \quad t > 0, \quad (11)$$

$$u(0) = u^{(0)},$$

где $f(t, u) =$

$$= (f_1(t, u_1, \dots, u_m), f_2(t, u_1, \dots, u_m), \dots, f_m(t, u_1, \dots, u_m)),$$

$$u(t) = (u_1(t), u_2(t), \dots, u_m(t)), \quad t > 0, \quad 0 < \alpha < 1.$$

Предположим, что функции $f_i, i=1,2,\dots,m$, непрерывны по всем аргументам в замкнутой области $D = \{ |t| \leq a, |u_i - u_i^{(0)}| < b, i=1,2,\dots,m \}$, т.е. существует такое $M = \text{const} > 0$, что всюду в D выполняются неравенства $|f_i| < M, i=1,2,\dots,m$.

Предположим, кроме того, что в D для функций f_i имеет место условие Липшица по аргументам u_1, u_2, \dots, u_m , т.е.

$$\begin{aligned} &|f_i(t, u'_1, u'_2, \dots, u'_m) - f_i(t, u''_1, u''_2, \dots, u''_m)| \leq \\ &\leq L\{|u'_1 - u''_1| + |u'_2 - u''_2| + \dots + |u'_m - u''_m|\} \end{aligned}$$

для всех точек $(t, u'_1, u'_2, \dots, u'_m)$ и $(t, u''_1, u''_2, \dots, u''_m)$ в области D .

При выполнении этих условий система (11) имеет единственное решение [10] $u_1 = u_1(t), u_2 = u_2(t), \dots, u_m = u_m(t)$, определенное при $|t| \leq t_0 = \min(a, b/M)$ и принимающее при $t=0$ заданные начальные значения.

Для численного решения задачи (11) введем по переменной t равномерную сетку с шагом $\tau > 0$: $\omega_\tau = \{t_n = n\tau, n = 0, 1, 2, \dots\}$.

Обозначим через $u(t)$ точное решение задачи (11), через $y_n = y(t_n)$ – приближенное.

Уравнение (11) заменим, пользуясь аппроксимацией (7), разностным:

$$\frac{1}{\Gamma(1-\alpha)\tau^\alpha} \sum_{k=0}^n \rho_k y_{n-k+1} - f(t_{n+1/2}, y_{n+1/2}) = 0,$$

$$y_{n+1/2} = y_n + \Gamma(2-\alpha) \left(\frac{\tau}{2}\right)^\alpha f(t_n, y_n), \quad (12)$$

$$y_0 = u_0, \quad n = 0, 1, 2, \dots$$

Решение этого уравнения можно найти по рекуррентным формулам:

$$y_0 = u_0, \quad y_{n+1/2} = y_n + \Gamma(2-\alpha) \left(\frac{\tau}{2}\right)^\alpha f(t_n, y_n),$$

$$y_{n+1} = \frac{3-2^{2-\alpha}}{(1-\alpha)} y_n - \quad (13)$$

$$- (2-\alpha) \sum_{k=2}^n \rho_k y_{n-k+1} + \Gamma(1-\alpha)\tau^\alpha f(t_{n+1/2}, y_{n+1/2}).$$

Приведем несколько определений из [11] о сходимости и порядке точности разностного метода.

Определение 1. Будем говорить, что метод (12) сходится в точке t_n , если $|y_n - u(t_n)| \rightarrow 0$ при $\tau \rightarrow 0$.

Определение 2. Будем говорить, что метод имеет p -й порядок точности, если существует число $p \geq 0$

такое, что $|y_n - u(t_n)| = O(\tau^p)$ при $\tau \rightarrow 0$. Метод сходится на интервале $(0, T]$, если он сходится в каждой точке $t \in (0, T]$.

Обозначим через $z_n = y_n - u(t_n)$. Подставляя $y_n = z_n + u_n$ в (10), получим

$$\begin{aligned} &\frac{1}{\Gamma(1-\alpha)\tau^\alpha} \sum_{k=0}^n \rho_k z_{n-k+1} = f(t_{n+1/2}, z_{n+1/2} + u_{n+1/2}) - \\ &- \frac{1}{\Gamma(1-\alpha)\tau^\alpha} \sum_{k=0}^n \rho_k u_{n-k+1} - u_k. \quad (14) \end{aligned}$$

Правую часть уравнения (14) представим в виде суммы $\psi_n^{(1)} + \psi_n^{(2)}$, где

$$\psi_n^{(1)} = \quad (15)$$

$$= -\frac{1}{\Gamma(1-\alpha)\tau} \sum_{k=0}^n \rho_k u_{n-k+1} + f(t_{n+1/2}, u_{n+1/2}),$$

$$\psi_n^{(2)} = f(t_{n+1/2}, u_{n+1/2} + z_{n+1/2}) - f(t_{n+1/2}, u_{n+1/2}).$$

Функция $\psi_n^{(1)}$ называется погрешностью аппроксимации разностного уравнения (12) на решении исходного уравнения (11).

Покажем, что $\psi_n^{(1)} \rightarrow 0$ при $\tau \rightarrow 0$.

$$\begin{aligned} \psi_n^{(1)} &= -\frac{1}{\Gamma(1-\alpha)\tau} \sum_{k=0}^n \rho_k u_{n-k+1} + f(t_{n+1/2}, u_{n+1/2}) = \\ &= -D_{0t}^\alpha u(t_{n+1/2}) + O(\tau^{2-\alpha}) + \\ &+ f(t_{n+1/2}, u_{n+1/2}) = O(\tau^{2-\alpha}). \end{aligned}$$

Таким образом, разностная схема (12) аппроксимирует задачу Коши (10) со вторым порядком.

Введем следующие обозначения:

$$\begin{aligned} k_1(y) &= f(t_n, y_n), \quad k_1(u) = f(t_n, u_n), \\ k_2(y) &= f\left(t_{n+1/2}, y_n + \Gamma(2-\alpha)\left(\frac{\tau}{2}\right)^\alpha f(t_n, y_n)\right), \\ k_2(u) &= f\left(t_{n+1/2}, u_n + \Gamma(2-\alpha)\left(\frac{\tau}{2}\right)^\alpha f(t_n, u_n)\right). \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Тогда } |\psi_n^2| &\leq |k_2(y) - k_2(u)| \leq \\ &\leq A(|y_n - u_n| + \Gamma(2-\alpha)(\tau/2)^\alpha |k_1(y) - k_1(u)|) \leq \\ &\leq A(1 + A(\tau/2)^\alpha \Gamma(2-\alpha)) \cdot |z_n| = Ac \cdot |z_n|, \end{aligned}$$

где $|k_1(y) - k_1(u)| \leq A|y_n - u_n| = A|z_n|$,

$$c = 1 + A(\tau/2)^\alpha \Gamma(2-\alpha).$$

$$\text{Имеем } \frac{1}{\Gamma(1-\alpha) \cdot \tau^\alpha} \sum_{k=0}^n \rho_k z_{n-k+1} = \psi_n^1 + \psi_n^2,$$

$Ac \rightarrow A$, при $\tau \rightarrow 0$.

Пусть $m \leq n$ – то значение k , при котором достигается $\max_{1 \leq k} |z_k|$. Тогда

$$|\psi_n^{(2)}| \leq A|z_n| \leq A \max_{1 \leq k} |z_k| = A|z_m|,$$

$$\sum_{k=0}^n |\rho_k| \cdot |z_k| \leq |z_m| \sum_{k=1}^n |\rho_k|.$$

Следовательно,

$$\begin{aligned} |z_m| &\leq A\Gamma(1-\alpha)\tau^\alpha |z_m| + \tau^\alpha \cdot \Gamma(1-\alpha) |\psi_n^{(1)}| \leq \\ &\leq A \cdot \tau^\alpha \Gamma(1-\alpha) |z_m| + \tau^\alpha \cdot \Gamma(1-\alpha) \max_{0 \leq j \leq n} |\psi_j^{(1)}|, \end{aligned}$$

или $(1-q)|z_m| \leq \tau^\alpha \Gamma(1-\alpha) \max_{0 \leq j \leq n} |\psi_j^{(1)}|$, где

$$q = A\Gamma(1-\alpha) \cdot \tau^\alpha.$$

$$\text{Полагая } q < 1, \text{ получим } \|z\| \leq \frac{\tau^\alpha \Gamma(1-\alpha)}{1-q} \|\psi^{(1)}\|,$$

где $\|z\| = \max_{1 \leq k} |z_k|$.

Теорема. Пусть правая часть уравнения (11) удовлетворяет условию Липшица с константой A по второму аргументу, и пусть $\psi_j^{(1)}$ – невязка, определенная равенством (15). Тогда для погрешности метода при $n\tau \leq a$ и $q < 1$ справедлива оценка

$$\|y - u\| \leq \frac{\tau^\alpha \Gamma(1-\alpha)}{1-q} \|\psi^{(1)}\|, \text{ где } q = A\tau^\alpha \Gamma(1-\alpha).$$

Литература

1. Meerschaert M.M., Tadjeran C. Finite difference approximations for two-sides space-fractional partial differential equations // Applied Numerical Mathematics. 2006. Vol. 56. P. 80–90.
2. Абдурагимов Э.И., Омарова Р.А. Положительное решение граничной задачи для одного нелинейного дифференциального уравнения с дробными производными // Вестн. ДГУ. 2015. Вып. 6. С. 99–104.
3. Бейбалаев В.Д. Математическая модель переноса в средах с фрактальной структурой // Мат. моделирование. 2009. Т. 21, № 5. С. 55–62.
4. Нагоров А.Л. Численные методы для дробных операторов в системах обработки изображений // Фундаментальные и прикладные проблемы математики и информатики : материалы конф. Махачкала, 2017. С. 138–140.
5. Назаралиев М.А., Бейбалаев В.Д. Численные методы решения краевой задачи для уравнения теплопереноса с производной дробного порядка // Вестн. ДГУ. 2008. Вып. 6. С. 46–53.
6. Бейбалаев В.Д. Разностные методы решения задачи Коши для обыкновенного дифференциального уравнения с оператором дробного дифференцирования // Вестн. ДГУ. 2014. Вып. 6. С. 53–61.
7. Бейбалаев В.Д. Численный метод решения задачи переноса с двусторонней производной дробного порядка // Вестн. СамГТУ. Физ.-мат. науки. 2009. № 1 (18). С. 267–270.
8. Бейбалаев В.Д. Численный метод решения математической модели теплопереноса в средах с фрактальной структурой // Фундаментальное исследование. 2007. № 12. С. 67–71.
9. Самко С.Г., Килбас А.А., Маричев О.И. Интегральные и производные дробного порядка и некоторые их приложения. Минск: Наука и техника, 1987. 498 с.

10. Нахушев А.М. Элементы дробного исчисления и их применение. Нальчик, 2003. 299 с.

11. Самарский А.А., Гулин А.В. Численные методы. М.: Наука, 1989. 430 с.

References

1. Meerschaert M.M., Tadjeran C. Finite difference approximations for two-sides space-fractional partial differential equations. *Applied Numerical Mathematics*. 2006, vol. 56, pp. 80-90.

2. Abduragimov E.I., Omarova R.A. Polozhitel'noe reshenie granichnoi zadachi dlya odnogo nelineinogo differentsial'nogo uravneniya s drobnymi proizvodnymi [Positive solution of the boundary value problem for one non-linear differential equation with fractional derivatives]. *Vestn. DGU*. 2015, iss. 6, pp. 99-104.

3. Beibalaev V.D. Matematicheskaya model' perenosa v sredakh s fraktal'noi strukturoi [Mathematical model of transfer in mediums with fractal structure]. *Mat. modelirovanie*. 2009, vol. 21, No. 5, pp. 55-62.

4. Nagorov A.L. [Numerical methods for fractional operators in image processing systems]. *Fundamental'nye i prikladnye problemy matematiki i informatiki* [Fundamental and applied problems of mathematics and Informatics]. Proceedings of the Conference. Makhachkala, 2017, pp. 138-140.

5. Nazaraliev M.A., Beibalaev V.D. Chislennye metody resheniya kraevoi zadachi dlya uravneniya teploperenosa s proizvodnoi drobnogo poryadka [Numerical

methods for solving the boundary value problem for heat transfer equation with derivative of fractional order]. *Vestn. DGU*. 2008, iss. 6, pp. 46-53.

6. Beibalaev V.D. Raznostnye metody resheniya zadachi Koshi dlya obyknovennogo differentsial'nogo uravneniya s operatoram drobnogo differentsirovaniya [Difference methods for solving the Cauchy problem for an ordinary differential equation with fractional differentiation operators]. *Vestn. DGU*. 2014, iss. 6, pp. 53-61.

7. Beibalaev V.D. Chislennyi metod resheniya zadachi perenosa s dvustoronnei proizvodnoi drobnogo poryadka [Numerical method of solving the problem of transferring from two-sided derivative of fractional order]. *Vestn. SamGTU. Fiz.-mat. nauki*. 2009, No. 1 (18), pp. 267-270.

8. Beibalaev V.D. Chislennyi metod resheniya matematicheskoi modeli teploperenosa v sredakh s fraktal'noi strukturoi [Numerical solution method the mathematical model of heat transfer in media with fractal structure]. *Fundamental'noe issledovanie*. 2007, No. 12, pp. 67-71.

9. Samko S.G., Kilbas A.A., Marichev O.I. *Integral'nye i proizvodnye drobnogo poryadka i nekotorye ikh prilozheniya* [Integral and fractional order derivatives and some of their applications]. Minsk: Nauka i tekhnika, 1987, 498 p.

10. Nakhushhev A.M. *Elementy drobnogo ischisleniya i ikh primeneniye* [Elements of fractional calculus and their application]. Nalchik, 2003, 299 p.

11. Samarskii A.A., Gulin A.V. *Chislennye metody* [Numerical methods]. Moscow: Nauka, 1989, 430 p.

УДК 534.1

DOI 10.23683/0321-3005-2018-2-35-44

ДИНАМИКА И УСТОЙЧИВОСТЬ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ТЕПЛООВОГО ИМПУЛЬСА*

© 2018 г. Н.Ф. Морозов¹, Д.А. Индейцев^{1,2,3}, А.В. Лукин², И.А. Попов², О.В. Привалова², Л.В. Штукин^{2,3}

¹Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия,

²Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия,

³Институт проблем машиноведения РАН, Санкт-Петербург, Россия

DYNAMICS AND STABILITY OF ELECTROSTATIC TRANSDUCER UNDER THE INFLUENCE OF HEAT IMPULSE

N.F. Morozov¹, D.A. Indeitsev^{1,2,3}, A.V. Lukin², I.A. Popov², O.V. Privalova², L.V. Shtukin^{2,3}

¹St. Petersburg State University, St. Petersburg, Russia,

²Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia,

³Institute of Problems of Mechanical Engineering, Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russia

Морозов Никита Федорович – доктор физико-математических наук, профессор, академик РАН, заведующий кафедрой теории упругости, математико-механический факультет, Санкт-Петербургский государственный университет, Университетский пр., 28, Старый Петергоф, г. Санкт-Петербург, 198504, Россия, e-mail: n.morozov@spbu.ru

Nikita F. Morozov - Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Academician, Russian Academy of Sciences, Head of the Department of Elasticity Theory, Faculty of Mathematics and Mechanics, St. Petersburg State University, Universitetskii Pr., 28, Peterhof, St. Petersburg, 198504, Russia, e-mail: n.morozov@spbu.ru

Индейцев Дмитрий Анатольевич – доктор физико-математических наук, профессор, член-корреспондент РАН, кафедра теории упругости, математико-механический факультет, Санкт-Петербургский государственный университет, Университетский пр., 28, Старый Петергоф, г. Санкт-Петербург, 198504, Россия; научный руководитель, Институт проблем машиноведения РАН, Большой пр., 61, г. Санкт-Петербург, 199178, Россия; заведующий кафедрой механики и процессов управления, Институт прикладной математики и механики, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, ул. Политехническая, 29, г. Санкт-Петербург, 195251, Россия, e-mail: dmitry.indeitsev@gmail.com

Dmitry A. Indeitsev - Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Corresponding Member, Russian Academy of Sciences, Department of Elasticity Theory, Faculty of Mathematics and Mechanics, St. Petersburg State University, Universitetskii Pr., 28, Peterhof, St. Petersburg, 198504, Russia; Scientific Advisor, Institute of Problems of Mechanical Engineering, Russian Academy of Sciences, Bolshoi Ave., 61, St. Petersburg, 199178, Russia; Head of the Department of Mechanics and Control Processes, Institute of Mathematics and Mechanics, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Polytechnicheskaya St., 29, St. Petersburg, 195251, Russia, e-mail: dmitry.indeitsev@gmail.com

Лукин Алексей Вячеславович – аспирант, ассистент, кафедра механики и процессов управления, Институт прикладной математики и механики, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, ул. Политехническая, 29, г. Санкт-Петербург, 195251, Россия, e-mail: lukin_av@spbstu.ru

Aleksey V. Lukin - Postgraduate, Assistant, Department of Mechanics and Control Processes, Institute of Mathematics and Mechanics, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Polytechnicheskaya St., 29, St. Petersburg, 195251, Russia, e-mail: lukin_av@spbstu.ru

Попов Иван Алексеевич – аспирант, ассистент, кафедра механики и процессов управления, Институт прикладной математики и механики, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, ул. Политехническая, 29, г. Санкт-Петербург, 195251, Россия, e-mail: popov_ia@spbstu.ru

Ivan A. Popov - Postgraduate, Assistant, Department of Mechanics and Control Processes, Institute of Mathematics and Mechanics, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Polytechnicheskaya St., 29, St. Petersburg, 195251, Russia, e-mail: popov_ia@spbstu.ru

*Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 17-01-0414.

Привалова Ольга Васильевна – кандидат технических наук, доцент, кафедра механики и процессов управления, Институт прикладной математики и механики, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, ул. Политехническая, 29, г. Санкт-Петербург, 195251, Россия, e-mail: o.privalova@mail.ru

Olga V. Privalova - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Mechanics and Control Processes, Institute of Mathematics and Mechanics, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Polytechnicheskaya St., 29, St. Petersburg, 195251, Russia, e-mail: o.privalova@mail.ru

Штукин Лев Васильевич – кандидат физико-математических наук, доцент, кафедра механики и процессов управления, Институт прикладной математики и механики, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, ул. Политехническая, 29, г. Санкт-Петербург, 195251, Россия; старший научный сотрудник, лаборатория математического моделирования волновых процессов, Институт проблем машиноведения РАН, Большой пр., 61, г. Санкт-Петербург, 199178, Россия, e-mail: Lvtvsh4749@gmail.com

Lev V. Shtukin - Candidate of Physics and Mathematics, Associate Professor, Department of Mechanics and Control Processes, Institute of Mathematics and Mechanics, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Polytechnicheskaya St., 29, St. Petersburg, 195251, Russia; Senior Researcher, Laboratory for Mathematical Modelling of Wave Phenomena, Institute of Problems of Mechanical Engineering, Russian Academy of Sciences, Bolshoi Ave., 61, St. Petersburg, 199178, Russia, e-mail: Lvtvsh4749@gmail.com

Рассмотрена задача об импульсном лазерном воздействии на упругий элемент электростатического преобразователя в виде заземленной с двух концов проводящей микробалки. Исходное положение равновесия балки под действием электрического поля найдено путем применения проекционного метода Галеркина к нелинейному уравнению электроупругости и его дальнейшее решение с помощью численных методов теории ветвления. Показано, что положений равновесия упругого элемента либо два (устойчивое и неустойчивое), либо ни одного при достаточно сильном электрическом поле. Вычислено поле температуры в балке при действии импульса. Динамика балки в окрестности найденного положения равновесия при температурном воздействии исследована путем перехода от континуальной проблемы к системе обыкновенных дифференциальных уравнений. Для анализа полученной системы использованы теоремы об устойчивости решений линейных систем с переменными коэффициентами. Указано на возможность потери устойчивости положения равновесия при нагреве элемента лазерным импульсом. Определены области в пространстве параметров импульса, соответствующие устойчивости и неустойчивости указанного положения равновесия.

Ключевые слова: упругая устойчивость, лазерное воздействие, микроэлектромеханические системы, связанные задачи, динамика.

Laser-induced vibrations and elastic stability of a clamped-clamped beam electrostatic transducer are considered under ultrafast laser pulse. It is assumed that laser pulse acts as volume heat generation with Gaussian time-profile localized in near-surface layer of the beam. Temperature load non-stationarity and non-homogeneity through length and thickness lead to appearance of thermal-induced mechanical moment and axial forced acting on the beam, which can result in buckling phenomena. Semi-analytical methods for solution of nonlinear boundary-value problems are used for static equilibrium determination of the beam in the electric field of one stationary electrode. Analytical solution of non-stationary temperature problem in the beam volume is obtained. Finally, areas in parameter space of system geometrical and mechanical properties along with laser pulse characteristics are determined which correspond to elastic stability of initial equilibrium form of the beam subjected to laser pulse.

Keywords: elastic stability, laser-induced vibrations, microelectromechanical systems, coupled-field problems, dynamics.

Введение

Проблема динамической устойчивости элементов конструкций представляет собой практически важную и далеко не полностью изученную область исследований. К примеру, в работах [1–4] показано, что критические значения усилий, при которых происходит потеря устойчивости, могут существенно отличаться от известных статических (эйлеровых) значений.

Причиной тому может служить неучет дополнительных динамических степеней свободы в выбранной модели элемента конструкции. В указанных выше работах учет продольных волн сжатия-растя-

жения приводит к явлению параметрического резонанса, что существенно меняет всю картину динамической потери устойчивости.

Вызывает интерес присутствие указанной выше проблемы динамической устойчивости в ряде весьма актуальных задач науки и техники. Прежде всего, указанное явление встречается при применении лазерных технологий для неразрушающего контроля конструкций и изучения физических свойств материалов на микро- и наномасштабном уровнях, а также при осуществлении технологических процессов производства элементов нано- и микросистемной техники [5–7]. Кроме того, подобные задачи возникают при обеспечении работоспособности

нано- и микроэлектромеханических систем в условиях внешних нестационарных (в том числе ударных и импульсных тепловых) воздействий [8–10]. Именно в работах [11, 12] на примере модели балки Бернулли – Эйлера отмечается, что большое влияние на динамику микро- и наномасштабных конструкций при лазерном импульсном воздействии оказывают изгибающие моменты, вызванные неравномерным распределением температуры по объему упругого элемента.

В настоящей работе показано, что действие температурного изгибающего момента менее важно с точки зрения динамики и устойчивости упругих элементов нано- и микросистемной техники, чем действие ранее не учитываемых осевых (мембранных) усилий, имеющих тепловую природу. Кроме того, установлено, что наличие предварительного напряженно-деформированного состояния, вызванного технологическими факторами или действием электростатического поля, существенно влияет на критические значения осевых усилий и связанных с ними предельных тепловых нагрузок.

Постановка задачи

Рассматривается задача об импульсном лазерном воздействии на упругий элемент электростатического преобразователя (рис. 1).

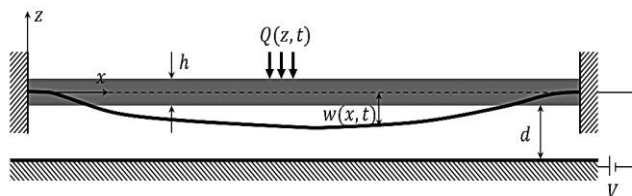


Рис. 1. Схема электростатического преобразователя / Fig. 1. Model of electrostatic transducer

В качестве модели, описывающей динамику данного элемента, выберем модель балки Бернулли – Эйлера. Особенностью её поведения в настоящей задаче является необходимость учета предварительного напряженно-деформированного состояния. Последнее вызвано двумя факторами. Во-первых, технология сборки такова, что исходная длина недеформированной балки может быть больше расстояния между опорами, что создает дополнительное сжимающее усилие. Во-вторых, балке как подвижному электроду электростатического преобразователя сообщается стационарная разность потенциалов \$V\$ с неподвижным электродом, что создает предварительный прогиб \$w_s(x)\$ под действием сил притяжения в электростатическом поле.

Примем, что действие лазерного импульса \$Q(x, z, t)\$ на поверхность балки сводится в основном

к появлению теплового фронта, распространяющегося по её объёму [13]. Неравномерность и нестационарность поля температуры как по толщине, так и по длине балки в общем случае приводят к появлению изгибающего момента [11, 14] и осевого усилия, ответственных за возможную потерю устойчивости.

Основные уравнения рассматриваемой физически нелинейной связанной задачи термоэлектроупругости, описывающие динамический изгиб балки, имеют вид

$$EI \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + \rho b h \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + E b \alpha_T \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} z \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} dz +$$

$$+ \left[E b h \frac{\Delta L}{L} + E b \alpha_T \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \theta dz - \right.$$

$$\left. - \frac{E b h}{2L} \int_0^L \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 dx \right] \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} = \frac{\epsilon_r \epsilon_0 b V^2}{2(d-w)^2},$$

$$k \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} \right) + Q(z, t) = \rho c_v \frac{\partial \theta}{\partial t} + \beta T_0 \frac{\partial e}{\partial t}. \quad (1)$$

Здесь \$x, z\$ – продольная и вертикальная координаты соответственно; \$t\$ – время; \$w(x, t)\$ – поперечное перемещение геометрического центра сечения балки; \$\theta(x, z, t) = T(x, z, t) - T_0\$ – изменение температуры относительно отсчетной температуры \$T_0\$; \$b, h, L, d\$ – геометрические параметры системы: ширина, высота, длина балки и начальный зазор между электродами соответственно; \$I = \frac{bh^3}{12}\$ – момент инерции сечения; \$E\$ – модуль Юнга; \$\nu\$ – коэффициент Пуассона; \$\rho\$ – плотность материала; \$\alpha_T\$ – коэффициент линейного температурного расширения; \$\epsilon_r \epsilon_0\$ – диэлектрическая проницаемость среды в зазоре между электродами; \$k\$ – коэффициент теплопроводности материала балки; \$c_v\$ – удельная теплоемкость; \$\beta = \frac{E \alpha_T}{1-2\nu}\$ – коэффициент, связывающий приращение температуры со скоростью изменения объема деформируемого тела; \$e = -z \frac{\partial^2 w}{\partial x^2}\$; \$P = E b h \frac{\Delta L}{L}\$ – сжимающая осевая сила, вызванная технологическими факторами. В целях некоторого упрощения задачи будем считать лазерное воздействие равномерным по длине балки. Примем, что объемное тепловыделение при действии лазера имеет вид

$$Q(z, t) = \frac{R_a L_0}{\delta t_p^2} t \cdot \exp\left(\frac{z-\frac{h}{2}}{\delta} - \frac{t}{t_p}\right). \quad (2)$$

Здесь \$L_0\$ – параметр, характеризующий мощность воздействия; \$R_a\$ – коэффициент поглощения облучаемой поверхности; \$\delta\$ – характерная глубина проникновения импульса в материал; \$t_p\$ – длительность импульса.

Поясним физический смысл силовых и моментных факторов, присутствующих в первом из уравнений (1). Третье слагаемое в левой части уравнения описывает действие «температурного момента» – изгибающего момента, вызванного неравномерным по длине балки температурным расширением материала. В случае равномерного по длине объемного тепловыделения единственной причиной возникновения этого момента является факт связанности механического и температурного полей по закону Дюамеля – Неймана [15]. Слагаемые в квадратных скобках описывают осевые усилия различной природы, оказывающие влияние на динамику системы. В предложенной модели учитываются сжимающая сила технологического происхождения $Ebh \frac{\Delta L}{L}$ и растягивающая, связанная с удлинением центральной линии при поперечных деформациях. В правой части уравнения стоит пондеромоторная сила электростатического поля, имеющая существенно нелинейный характер [16].

Определение формы равновесия балки в электрическом поле

Краевая задача для нахождения статического прогиба $w_s(x)$ получается из общей системы уравнений (1) отбрасыванием инерционных членов в условиях отсутствия теплового воздействия. Переходя к безразмерным величинам (продольной координате $\tilde{x} = x/L$ и прогибу $\tilde{w}_s = w_s/d$), получим следующую нелинейную граничную задачу:

$$\frac{\partial^4 \tilde{w}_s}{\partial \tilde{x}^4} + \left[P_{non} - \alpha_1 \int_0^1 \left(\frac{\partial \tilde{w}_s}{\partial \tilde{x}} \right)^2 d\tilde{x} \right] \frac{\partial^2 \tilde{w}_s}{\partial \tilde{x}^2} = \frac{\lambda}{(1 - \tilde{w}_s)^2}, \quad (3)$$

$$\tilde{w}_s(0) = \frac{\partial \tilde{w}_s}{\partial \tilde{x}}(0) = \tilde{w}_s(1) = \frac{\partial \tilde{w}_s}{\partial \tilde{x}}(1) = 0,$$

где

$$\alpha_1 = 6 \left(\frac{d}{h} \right)^2, \quad P_{non} = 12 \frac{L \Delta L}{h h}, \quad \lambda = \frac{6 \epsilon_r \epsilon_0 L^4 V^2}{E h^3 d^3}. \quad (4)$$

Параметр α_1 характеризует степень геометрической нелинейности задачи и связанной с этим важности удлинения осевой линии балки при изгибе; P_{non} есть безразмерная осевая сила, вызванная технологическими факторами; параметр λ зависит от величины электрического поля и равен отношению энергии электрического поля при нулевом прогибе к потенциальной энергии упругой деформации при прогибе балки на полную величину зазора.

Не останавливаясь подробно на решении этой задачи, отметим, что она не допускает точного аналитического решения. Для получения приближенного решения авторы воспользовались методом Галеркина, где координатные функции выбраны в виде собственных функций сжатой защемленной балки в отсутствие электрического поля [17, 18]. Отметим, что в системе наблюдается известная катастрофическая бифуркация с исчезновением форм равновесия при достижении параметром λ определенного критического значения (регулярной экстремальной точки, pull-in instability [16]).

На рис. 2 показана диаграмма ветвления положений равновесия в зависимости от значений параметра λ . По оси ординат откладывается прогиб в центральном сечении балки.

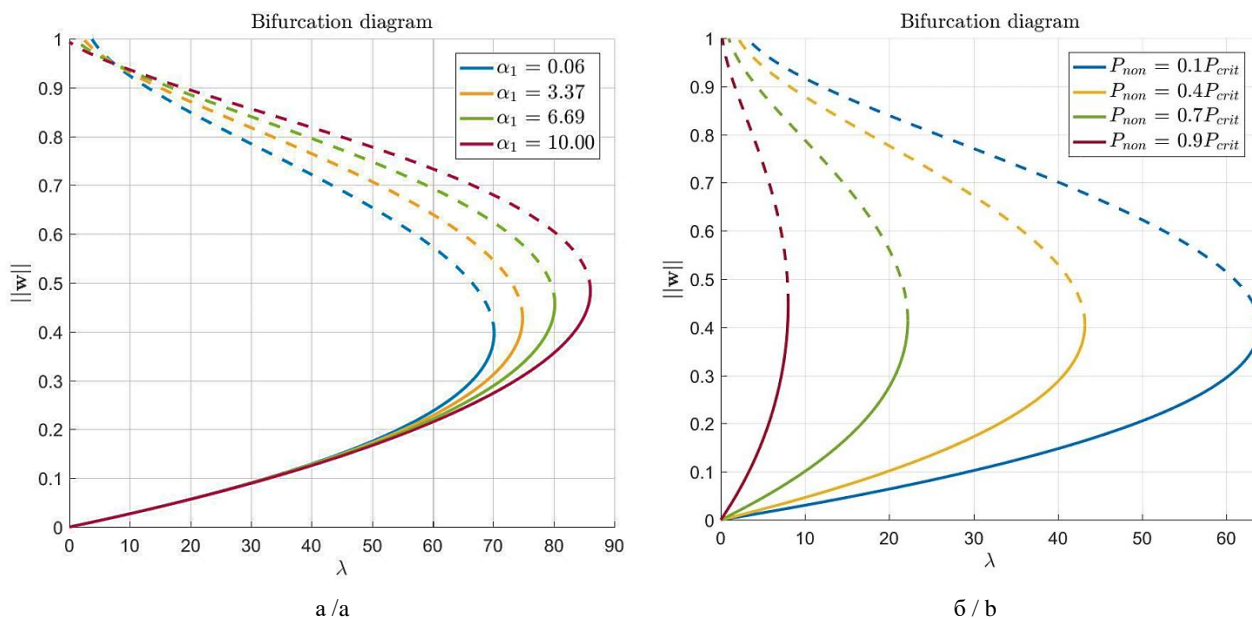


Рис. 2. Диаграмма ветвления форм равновесия / Fig. 2. Bifurcation diagram for equilibrium forms

Как видно из рис. 2а, увеличение отношения расстояния между электродами d к высоте балки h (4) и связанный с этим рост влияния фактора ужесточения балки при изгибе приводят к увеличению максимальных устойчивых прогибов и соответствующих им величин силы электрического поля. Как видно из рис. 2б, рост первоначального конструктивного поджатия приводит к уменьшению критического значения силы электрического поля, при которой происходит катастрофическая бифуркация. Отметим, что значение осевой силы P_{non} , при котором бифуркационным становится $\lambda = 0$, отвечает величине P_{crit} эйлеровой критической силы для сжатого стержня.

Определив исходное напряженно-деформированное состояние балки в электростатическом поле, перейдем к исследованию отклика системы на лазерное импульсное воздействие.

Решение нестационарной задачи теплопроводности

Рассмотрим задачу о температурном состоянии балки под действием лазерного импульса. Считая пренебрежимо малой генерацию тепла, вызванную изменением во времени объемной деформации e (принимая параметр β в (1) равным нулю), приходим к следующей нестационарной задаче теплопроводности:

$$k \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} + Q(z, t) = \rho c_v \frac{\partial \theta}{\partial t}, \quad (5)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial z} = 0 \text{ при } z = \pm \frac{h}{2}, \quad \theta(z, 0) = 0,$$

где в качестве граничного принято условие отсутствия теплообмена с окружающей средой.

На рис. 3а показана зависимость от времени объемного тепловыделения $Q(z, t)$, характеризующего лазерный импульс (2), на верхней поверхности балки ($z = \frac{h}{2}$). На рис. 3б показано тепловыделение по высоте балки в различные моменты времени.

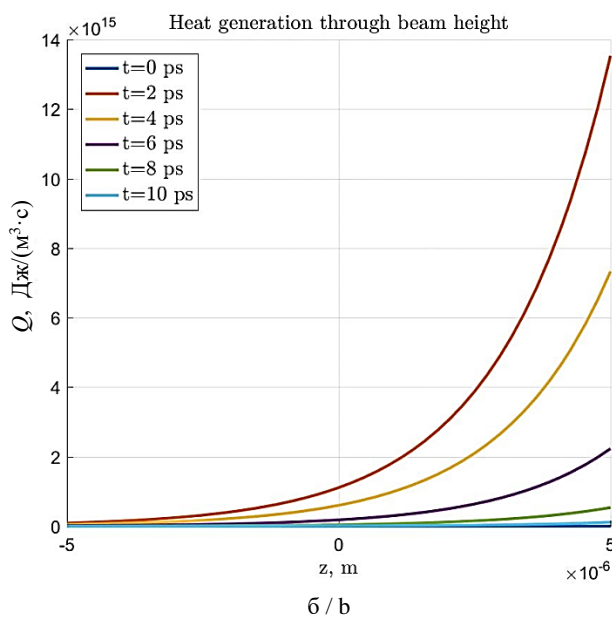
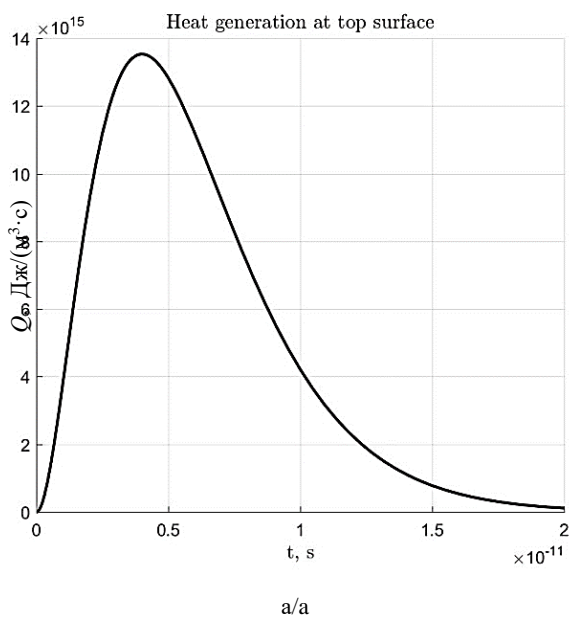


Рис. 3. Характер лазерного теплового воздействия / Fig. 3. Profile of heat pulse

Решение смешанной (гранично-начальной) задачи (5) находится с помощью метода Фурье разложения по собственным функциям однородной задачи [19] и имеет вид

$$\theta(z, t) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{g_n}{\kappa_n^2} [e^{-\lambda_n^2 t} - (\kappa_n t + 1)e^{-t/t_p}] Z_n(z), \quad (6)$$

где

$$Z_n(z) = \begin{cases} \cos \frac{\pi n z}{h}, & n = 0, 2, 4, \dots \\ \sin \frac{\pi n z}{h}, & n = 1, 3, 5, \dots \end{cases} \quad (7)$$

$$\kappa_n = \frac{1}{t_p} - \lambda_n^2, \quad \lambda_n = \frac{\pi n a}{h}, \quad a = \sqrt{\frac{k}{\rho c_v}},$$

$$g_0 = \frac{\bar{Q} \delta}{h} \left(1 - e^{-\frac{h}{\delta}} \right), \quad \bar{Q} = \frac{R_a L_0}{\delta t_p^2 \rho c_v},$$

$$g_n = \begin{cases} \sin \frac{\pi n}{2} \cdot \frac{2\bar{Q} \delta h \left(1 + e^{-\frac{h}{\delta}} \right)}{\pi^2 \delta^2 n^2 + h^2}, & n = 1, 3, 5, \dots \\ \cos \frac{\pi n}{2} \cdot \frac{2\bar{Q} \delta h \left(1 - e^{-\frac{h}{\delta}} \right)}{\pi^2 \delta^2 n^2 + h^2}, & n = 2, 4, 6, \dots \end{cases}$$

На рис. 4а показано изменение температуры на верхней поверхности балки с геометрическими параметрами: $h = 10$ мкм, $L = 100$ мкм, $b = 5$ мкм для различного числа N_t учтенных членов ряда (6). В качестве материала балки взят кремний, теплофизические свойства которого приняты следующими:

$$\rho = 2330 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}; \quad c_v = 713 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}\cdot\text{К}}; \quad k = 156 \frac{\text{В}}{\text{м}\cdot\text{К}};$$

$T_0 = 293$ К. Для параметров лазерного импульса заданы следующие значения: $L_0 = 1 \cdot 10^{11} \frac{\text{Дж}}{\text{м}^2}$; $t_p = 2 \cdot 10^{-12} \text{ с} = 2$ пс; $R_a = 0,5$; $\delta = 2$ мкм. На рис. 4б показано распределение температуры по высоте балки в различные моменты времени.

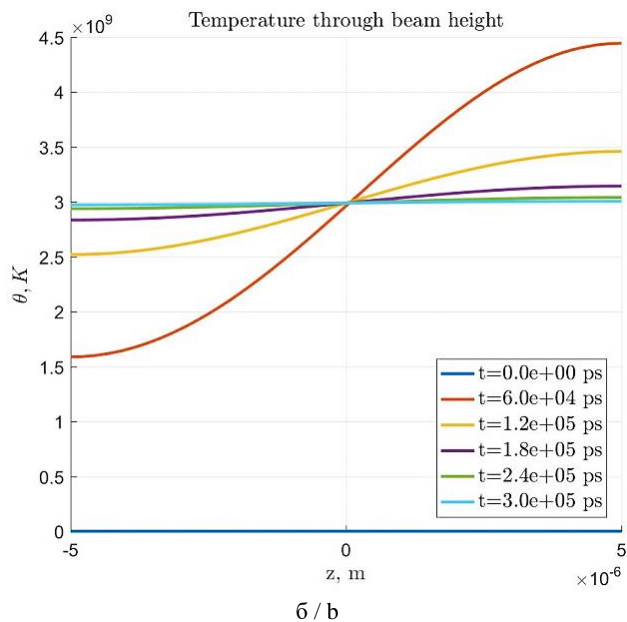
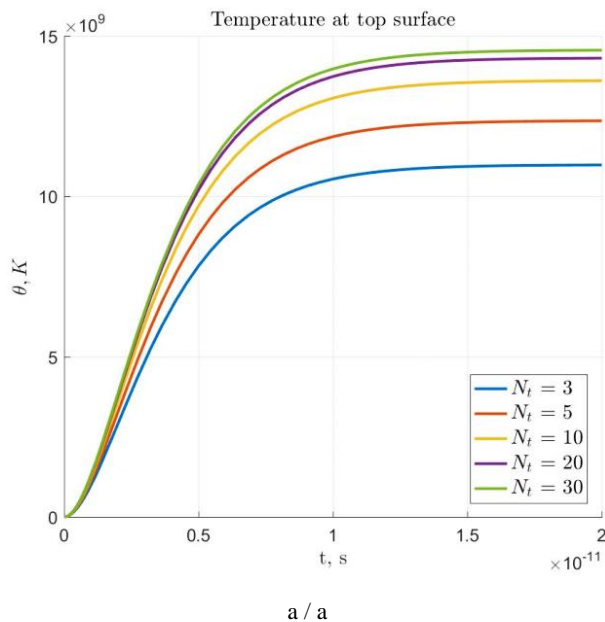


Рис. 4. Результаты решения задачи теплопроводности / Fig. 4. Results of heat transfer problem

Как видно из рис. 4а, сходимость ряда, описывающего решение, не является быстрой: для точного определения установившейся в материале температуры необходим учет не менее 20 членов ряда. Согласно рис. 4б, с течением времени происходит выравнивание температуры по высоте балки, что естественным образом вытекает из вида граничных условий.

Найденное температурное распределение позволяет вычислить динамические силовые факторы, действующие на упругий элемент электростатического преобразователя в его предварительном напряженно-деформированном состоянии.

Отметим, что температурная осевая сила, входящая в уравнение (1), не зависит от особенностей распределения температуры в конструкции и определяется её интегралом по высоте балки.

Исследование устойчивости балки при лазерном воздействии

Перейдем к исследованию динамики балки с начальной погибью $w_s(x)$ в электростатическом

поле под действием лазерного импульса. Решение уравнения (1) представим в виде

$$w(x, t) = w_s(x) + w_d(x, t), \quad (8)$$

где $w_s(x)$ есть найденное решение краевой задачи (3).

Для искомой функции $w_d(x, t)$ получаем следующую нелинейную динамическую задачу в частных производных:

$$\begin{aligned} EI(w_s^{IV} + w_d^{IV}) + \rho b h \ddot{w}_d + \left[P + \right. \\ \left. + Eb\alpha_T \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \theta(z, t) dz - \frac{Ebh}{2L} \int_0^L (w_s' + \right. \\ \left. + w_d')^2 dx \right] \cdot (w_s'' + w_d'') = \frac{\epsilon_r \epsilon_0 b V^2}{2(d-w_s-w_d)^2}, \quad (9) \\ w_d(0, t) = \frac{\partial w_d}{\partial x}(0, t) = w_d(L, t) = \\ = \frac{\partial w_d}{\partial x}(L, t) = 0. \end{aligned}$$

В данном уравнении отсутствует температурный изгибающий момент, так как в сделанных предположениях температурное поле однородно по длине балки. Действие теплового импульса выражается в наличии динамической осевой силы, определяемой интегралом от температуры $\theta(z, t)$ по высоте балки.

Исчерпывающее исследование динамики системы требует решения нелинейной начально-граничной задачи (9), что может быть выполнено с помощью приближенных аналитических методов. В частности, метод Галеркина приведет к системе нелинейных обыкновенных дифференциальных уравнений, зависящей от параметров. Решение подобных систем может быть получено с помощью численных методов теории бифуркаций [20–22].

Основной задачей настоящей работы является определение влияния параметров лазерного импульса на устойчивость нетривиальной формы равновесия упругого элемента электростатического преобразователя. По крайней мере, оценку сверху критических параметров воздействия можно получить, проведя анализ линеаризованного уравнения движения, получаемого из (9) разложением нелинейных слагаемых в ряд Тейлора по w_d и отбрасыванием старших степеней искомой функции. Таким образом, приходим к следующему линейному уравнению движения балки в окрестности положения равновесия $w_s(x)$:

$$EI \frac{\partial^4 w_d}{\partial x^4} + \rho b h \frac{\partial^2 w_d}{\partial t^2} + [P + E b \alpha_T \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \theta(z, t) dz - \frac{E b h}{2L} \int_0^L \left(\frac{\partial w_s}{\partial x}\right)^2 dx] \frac{\partial^2 w_d}{\partial x^2} - \frac{E b h}{L} \int_0^L \frac{\partial w_s}{\partial x} \frac{\partial w_d}{\partial x} dx \frac{\partial^2 w_s}{\partial x^2} - \frac{\epsilon_r \epsilon_0 b V^2}{(d-w_s)^3} w_d = -E b \alpha_T \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \theta(z, t) dz \cdot \frac{\partial^2 w_s}{\partial x^2}. \quad (10)$$

Отметим, что при наличии электрического поля (и связанного с этим ненулевого статического прогиба w_s) уравнение движения (10) является неавтономным: нестационарное температурное распределение приводит к появлению поперечной силы, действующей на балку.

Решение динамической задачи (10) ищется в виде ряда Галеркина по собственным формам колебаний заземленной с двух концов балки с учетом осевого сжатия силой P :

$$w_d(x, t) = \sum_{j=1}^{N_d} \eta_j(t) \phi_j(x), \quad (11)$$

где N_d – число учтенных координатных функций.

Запись проекционных условий приводит к следующей системе линейных уравнений с переменными коэффициентами относительно координатных множителей $\eta_j(t)$:

$$\sum_{j=1}^{N_d} \left\{ \rho b h \delta_{jm} \frac{d^2 \eta_j}{dt^2} + \left[E I A_{jm} + [P + E b \alpha_T \frac{g_0 h}{\kappa_0^2} (1 - (\kappa_0 t + 1) e^{-\kappa_0 t}) - \frac{E b h}{2L} \int_0^L \left(\frac{\partial w_s}{\partial x}\right)^2 dx] B_{jm} - \frac{E b h}{L} C_{jm} - \epsilon_r \epsilon_0 b V^2 D_{jm} \right] \eta_j \right\} = H_m(t), \quad m = 1, \dots, N_d, \quad (12)$$

где введены следующие обозначения для проекционных коэффициентов:

$$A_{jm} = (\phi_j^{IV}, \phi_m), \quad B_{jm} = (\phi_j'', \phi_m), \\ C_{jm} = \int_0^L w_s' \phi_j' dx \cdot \int_0^L w_s'' \phi_m dx, \\ D_{jm} = \int_0^L \frac{\phi_j \phi_m}{(d-w_s)^3} dx, \quad (13)$$

$$H_m(t) = -E b \alpha_T \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \theta(z, t) dz \cdot \int_0^L w_s'' \phi_m dx.$$

В матричной форме система (12) принимает вид $\mathbf{M} \ddot{\boldsymbol{\eta}} + [\mathbf{N} + \mathbf{L}(t)] \boldsymbol{\eta} = \mathbf{H}(t)$, (14) где \mathbf{M} и \mathbf{N} – определенные постоянные матрицы; $\mathbf{L}(t)$ – матрица с коэффициентами, зависящими от времени; $\mathbf{H}(t)$ – вектор-столбец правых частей.

Представляет интерес нахождение областей в пространстве параметров лазерного воздействия, соответствующих устойчивости в смысле Ляпунова решения неоднородной системы (14). Из теории устойчивости движения известно [23], что решение неоднородной линейной системы устойчиво тогда и только тогда, когда устойчиво тривиальное решение соответствующей однородной системы. Таким образом, задача сводится к исследованию системы (14) с нулевой правой частью. В стандартной форме данная система имеет вид

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A} \mathbf{x} + \mathbf{B}(t) \mathbf{x}, \quad (15)$$

где $\mathbf{x}(t)$ – новый вектор-столбец искомых функций времени; $\mathbf{A}, \mathbf{B}(t)$ – матрицы, однозначно определяемые по матрицам $\mathbf{M}, \mathbf{N}, \mathbf{L}(t)$.

Для линейных систем с переменными коэффициентами вида (15) справедлива теорема [24], согласно которой решение $\mathbf{x} \equiv \mathbf{0}$ устойчиво по Ляпунову, если собственные значения матрицы \mathbf{A} имеют неположительную вещественную часть, а чисто мнимые собственные значения различны; если интеграл $\int_0^\infty \|\mathbf{B}(t)\| dt$ ограничен, где $\|\mathbf{B}(t)\| = \sum_{i,j=1}^{2N_d} |b_{ij}|$.

Как видно из (6), в рассматриваемом случае матрица $\mathbf{B}(t)$ удовлетворяет условиям теоремы, и поэтому для определения устойчивости достаточно знать знак вещественной части собственных значений матрицы \mathbf{A} . В общем случае для этого требуется построить соответствующий характеристический многочлен и применить к нему, к примеру, критерий Гурвица [23]. При учете большого числа N_d координатных функций эта процедура может быть выполнена с помощью компьютерных программ символьных вычислений, но является весьма трудоемкой. Анализ конкретного вида системы (12) показывает, что перекрестные слагаемые в уравнениях значительно меньше диагональных, т.е. система является слабосвязанной. Этот факт позволяет рассматривать входящие в систему уравнения как независимые. В этом предположении условие устойчивости решения состоит в положительности квадрата частоты эквивалентного осциллятора, соответствующего рассматриваемой координатной функции ϕ_j (т.е.

форме колебаний, по которой ожидается потеря устойчивости):

$$\rho b h \frac{d^2 \eta_j}{dt^2} + \left[E I A_{jj} + \left[P + E b \alpha_T \frac{g_0 h}{\kappa_0^2} (1 - (\kappa_0 t + 1) e^{-\kappa_0 t}) - \frac{E b h}{2L} \int_0^L \left(\frac{\partial w_s}{\partial x} \right)^2 dx \right] B_{jj} - \frac{E b h}{L} C_{jj} - \epsilon_r \epsilon_0 b V^2 D_{jj} \right] \eta_j = H_j(t).$$

С учетом (7) приходим к следующему выражению для критического значения мощности лазерного импульса (максимального по времени тепловыделения на верхней поверхности балки) в зависимости от его длительности t_p и глубины проникновения в материал δ :

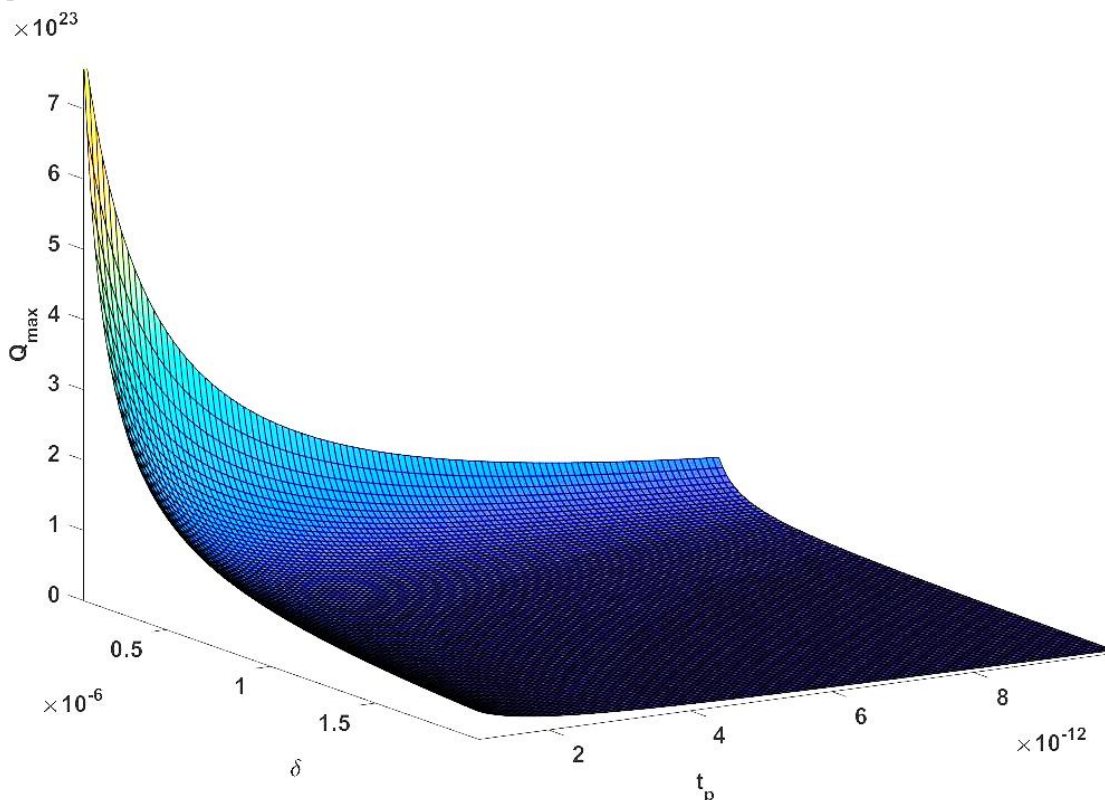


Рис. 5. Граница области устойчивости балки в пространстве параметров лазерного воздействия / Fig. 5. Area of elastic stability in parameters space

Сравнение результатов работ [11, 14] с полученными выше значениями критической мощности лазерного импульса указывает на то, что потеря устойчивости начальной формы равновесия балки Бернулли – Эйлера в связи с наличием сжимающей осевой силы температурного происхождения происходит значительно раньше, чем достижение опасных прогибов за счет изгибающего момента. Последнее необходимо учитывать при практических расчетах упругих эле-

$$Q_{crit} = \frac{\rho c_v}{E b \alpha_T t_p \delta (1 - e^{-h/\delta}) e} \cdot \left\{ \frac{E I A_{jj} - \frac{E b h}{L} C_{jj} - \epsilon_r \epsilon_0 b V^2 D_{jj}}{-B_{jj}} - P + \frac{E b h}{2L} \int_0^L \left(\frac{\partial w_s}{\partial x} \right)^2 dx \right\}.$$

Отметим, что найденное условие устойчивости формы равновесия микробалки зависит от геометрических параметров системы, физико-механических свойств материала, осевой силы конструкционного происхождения, а также внешних факторов, связанных с действием лазерного импульса и электростатического поля.

На рис. 5 показана граница области устойчивости в пространстве параметров (t_p, δ, Q_{max}) .

ментов нано- и микросистемной техники, а также других конструкций, находящихся под действием импульсных тепловых нагрузок.

Заключение

Рассмотрена задача об импульсном лазерном воздействии на упругий элемент электростатического преобразователя в виде заземленной с двух концов проводящей микробалки. Получено исход-

ное положение равновесия под действием электрического поля. Показано, что таких положений равновесия либо два (устойчивое и неустойчивое), либо ни одного при достаточно сильном электрическом поле. Найдено поле температуры в балке при действии импульса. Указано на возможность потери устойчивости положения равновесия при нагреве элемента лазерным импульсом. Определены области в пространстве параметров импульса, соответствующие устойчивости и неустойчивости указанного положения равновесия.

Литература

1. Лаврентьев М.А., Ишлинский А.Ю. Динамические формы потери устойчивости упругих систем // Докл. АН СССР. 1949. Т. 64, № 6. С. 776–782.
2. Вольмир А.С. Нелинейная динамика пластинок и оболочек. М.: Наука, 1972. 432 с.
3. Морозов Н.Ф., Товстик П.Е. О динамической потере устойчивости стержня при продольной нагрузке, меньшей эйлеровой // Докл. РАН. 2013. Т. 453, № 3. С. 282–285.
4. Беляев А.К., Морозов Н.Ф., Товстик П.Е., Товстик Т.П. Параметрические резонансы в задаче о продольном ударе по тонкому стержню // Вестн. СПбГУ. Математика. Механика. Астрономия. 2016. Т. 3 (61), вып. 1. С. 77–94.
5. Poletkin K., Kulish V. [et al.] Thermal properties of thin films studied by ultrafast laser spectroscopy: Theory and experiment // International J. of Heat and Mass Transfer. 2014. April. P. 1–20.
6. Jx Ma [et al.] Analytical solution of transient heat conduction in bi-layered circular plate irradiated by laser pulse // Canadian J. of Physics. 2016. Vol. 95 (4). P. 322–330.
7. Xinwei Wang, Xiafan Xu Thermoelastic waves in metal induced by ultrafast laser pulses // J. of Thermal Stresses. 2002. Vol. 25. P. 457–473.
8. Younnis M.I. MEMS Linear and Nonlinear Statics and Dynamics. Springer Science, 2011. 453 p.
9. Евстифеев М.И., Челтанов И.Б. Вопросы обеспечения стойкости микромеханических гироскопов при механических воздействиях // Гироскопия и навигация. 2013. № 1 (80). С. 119–133.
10. Некрасов Я.А., Моисеев Н.В., Беляев Я.В., Павлова С.В., Локшонков Р.Г. Влияние поступательных вибраций, ударов и акустических помех на характеристики микромеханического гироскопа // Гироскопия и навигация. 2016. № 2 (93). С. 56–67.
11. Jx Ma [et al.] Thermoelastic response of a simply supported beam irradiated by a movable laser pulse // Canadian J. of Physics. 2017. Vol. 95 (10). P. 1–11.
12. Nayfeh A.H., Pai P.F. Linear and Nonlinear Structural Mechanics. N.Y.: Wiley, 2004. 746 p.
13. Tang D.W., Araki N. Wavy, wavelike, diffusive thermal responses of finite rigid slabs to high-speed heating of laser pulses // International J. of Heat and Mass Transfer. 1999. Vol. 42. P. 855–860.

14. Daining Fang, Soh A.K. Laser-induced vibrations of microbeams under different boundary conditions // International J. of Solids and Structures. 2008. Vol. 45. P. 1993–2013.

15. Новацкий В. Динамические задачи термоупругости. М.: Мир, 1970. 256 с.

16. Wen-Ming Zhang [et al.] Electrostatic pull-in instability in MEMS/NEMS: A review // Sensors and Actuators A. 2014. Vol. 214. P. 187–218.

17. Лукин А.В., Попов И.А., Скубов Д.Ю. Исследование устойчивости и ветвления форм равновесия упругих элементов микросистемной техники // Нелинейная динамика машин – SCHOOL-NDM 2017. М., 2017. С. 313–322.

18. Лукин А.В., Попов И.А., Скубов Д.Ю. Нелинейная динамика и устойчивость элементов микросистемной техники // Науч.-техн. вестн. информационных технологий, механики и оптики. 2017. Т. 17, № 6. С. 1107–1115.

19. Владимиров В.С. Сборник задач по уравнениям математической физики. 5-е изд., перераб. и доп. М.: Физматлит, 2016. 520 с.

20. Nayfeh A.H., Balachandran B. Applied Nonlinear Dynamics: Analytical, Computational and Experimental Methods. Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2004. 685 p.

21. Kuznetsov Yu.A. Elements of Applied Bifurcation Theory. N.Y.: Springer Verlag, 2004. 631 p.

22. Govaerts W., Kuznetsov Yu.A. [et al.] MATCONT and CL_MATCONT: Continuation toolboxes in MATLAB. Utrecht University, 2018. 128 p.

23. Демидович Б.П. Лекции по теории устойчивости движения. М.: Наука, 1967. 472 с.

24. Verhulst F. Nonlinear Differential Equations and Dynamical Systems. Springer Verlag, 1990. 277 p.

References

1. Lavrent'ev M.A., Ishlinskii A.Yu. Dinamicheskie formy poteri ustoychivosti uprugikh sistem [Dynamic forms of loss of stability of elastic systems]. Dokl. AN SSSR. 1949, vol. 64, No. 6, pp. 776–782.
2. Vol'mir A.S. Nelineinaya dinamika plastinok i obolochek [Nonlinear dynamics of plates and shells]. Moscow: Nauka, 1972, 432 p.
3. Morozov N.F., Tovstik P.E. O dinamicheskoi potere ustoychivosti stержnya pri prodol'noi nagruzke, men'shei eilerovoi [On the dynamic loss of stability of the rod at a longitudinal load less than the Eulerian]. Dokl. RAN. 2013, vol. 453, No. 3, pp. 282–285.
4. Belyaev A.K., Morozov N.F., Tovstik P.E., Tovstik T.P. Parametricheskie rezonansy v zadache o prodol'nom udare po tonkomu stержnyu [Parametric resonance in the problem of longitudinal impact on a thin rod]. Vestn. SPbGU. Matematika. Mekhanika. Astronomiya. 2016, vol. 3 (61), iss. 1, pp. 77–94.
5. Poletkin K., Kulish V. [et al.] Thermal properties of thin films studied by ultrafast laser spectroscopy: Theory

and experiment. *International J. of Heat and Mass Transfer*. 2014, April, pp. 1-20.

6. Jx Ma [et al.] Analytical solution of transient heat conduction in bi-layered circular plate irradiated by laser pulse. *Canadian J. of Physics*. 2016, vol. 95 (4), pp. 322-330.
7. Xinwei Wang, Xiafan Xu. Thermoelastic waves in metal induced by ultrafast laser pulses. *J. of Thermal Stresses*. 2002, vol. 25, pp. 457-473.
8. Younnis M.I. *MEMS Linear and Nonlinear Statics and Dynamics*. Springer Science, 2011, 453 p.
9. Evstifeev M.I., Chelpanov I.B. Voprosy obespecheniya stoikosti mikromekhanicheskikh giroskopov pri mekhanicheskikh vozdeistviyakh [The problems of providing of stability of MEMS gyroscopes the mechanical influences]. *Giroskopiya i navigatsiya*. 2013, No. 1 (80), pp. 119-133.
10. Nekrasov Ya.A., Moiseev N.V., Belyaev Ya.V., Pavlova S.V., Lokshonkov R.G. Vliyanie postupatel'nykh vibratsii, udarov i akusticheskikh pomekh na kharakteristiki mikromekhanicheskogo giroskopa [The influence of translational vibration, shock and acoustic noise on the characteristics of micromechanical gyroscope]. *Giroskopiya i navigatsiya*. 2016, No. 2 (93), pp. 56-67.
11. Jx Ma [et al.] Thermoelastic response of a simply supported beam irradiated by a movable laser pulse. *Canadian J. of Physics*. 2017, vol. 95 (10), pp. 1-11.
12. Nayfeh A.H., Pai P.F. *Linear and Nonlinear Structural Mechanics*. New York: Wiley, 2004, 746 p.
13. Tang D.W., Araki N. Wavy, wavelike, diffusive thermal responses of finite rigid slabs to high-speed heating of laser pulses. *International J. of Heat and Mass Transfer*. 1999, vol. 42, pp. 855-860.
14. Daining Fang, Soh A.K. Laser-induced vibrations of microbeams under different boundary conditions. *International J. of Solids and Structures*. 2008, vol. 45, pp. 1993-2013.
15. Novatskii V. *Dinamicheskie zadachi termouprugosti* [Dynamic problems of thermoelasticity]. Moscow: Mir, 1970, 256 p.
16. Wen-Ming Zhang [et al.]. Electrostatic pull-in instability in MEMS/NEMS: A review. *Sensors and Actuators A*. 2014, vol. 214, pp. 187-218.
17. Lukin A.V., Popov I.A., Skubov D.Yu. [Investigation of stability and branching of equilibrium forms of elastic elements of microsystems technology]. *Nelineinaya dinamika mashin – SCHOOL-NDM 2017* [Nonlinear dynamics of machinery – SCHOOL-NDM 2017]. Moscow, 2017, pp. 313-322.
18. Lukin A.V., Popov I.A., Skubov D.Yu. Nelineinaya dinamika i ustoichivost' elementov mikrosistemnoi tekhniki [Nonlinear dynamics and stability of elements of microsystem technique]. *Nauch.-tekhn. vestn. informatsionnykh tekhnologii, mekhaniki i optiki*. 2017, vol. 17, No. 6, pp. 1107-1115.
19. Vladimirov V.S. *Sbornik zadach po uravneniyam matematicheskoi fiziki* [Collection of problems on equations of mathematical physics]. 5th ed. Moscow: Fizmatlit, 2016, 520 p.
20. Nayfeh A.H., Balachandran B. *Applied Nonlinear Dynamics: Analytical, Computational and Experimental Methods*. Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2004, 685 p.
21. Kuznetsov Yu.A. *Elements of Applied Bifurcation Theory*. New York: Springer Verlag, 2004, 631 p.
22. Govaerts W., Kuznetsov Yu.A. [et al.]. *MATCONT and CL_MATCONT: Continuation toolboxes in MATLAB*. Utrecht University, 2018, 128 p.
23. Demidovich B.P. *Lektsii po teorii ustoichivosti dvizheniya* [Lectures on the theory of stability of motion]. Moscow: Nauka, 1967, 472 p.
24. Verhulst F. *Nonlinear Differential Equations and Dynamical Systems*. Springer Verlag, 1990, 277 p.

НАУКИ О ЗЕМЛЕ SCIENCE OF EARTH

УДК 631.445.42: 631.5

DOI 10.23683/0321-3005-2018-2-45-58

ВЛИЯНИЕ ПРОМЕЖУТОЧНЫХ ПОСЕВОВ НА МИКРОАГРЕГАТНЫЙ СОСТАВ ПОЧВ СУХОСТЕПНОЙ И ПОЛУПУСТЫННОЙ ЗОН АЗЕРБАЙДЖАНА

© 2018 г. М.П. Бабаев¹, Ф.М. Рамазанова¹, Р.И. Мирза-заде¹

¹Институт почвоведения и агрохимии Национальной академии наук Азербайджана, Баку, Азербайджан

THE INFLUENCE OF THE INTERMEDIATE SOWINGS ON MICROAGGREGATE COMPOSITION SOILS IN THE DRY STEPPE AND SEMI-DESERT ZONE OF AZERBAIJAN

M.P. Babaev¹, F.M. Ramazanova¹, R.I. Mirza-zade¹

¹Institute of Soil Science and Agrochemistry, Azerbaijan National Academy of Science, Baku, Azerbaijan

Бабаев Магеррам Пирверди-оглы – доктор сельскохозяйственных наук, профессор, академик НАН Азербайджана, заведующий лабораторией генезиса, географии и картографии почв, Институт почвоведения и агрохимии Национальной академии наук Азербайджана, ул. Мамеда Рагима, 5, г. Баку, AZ 1073, Азербайджан, e-mail: maharram-babayev@rambler.ru

Maharram P. Babaev - Doctor of Agricultural Sciences, Professor, Academician, Azerbaijan National Academy of Science, Head of Laboratory of Genesis, Geography and Cartography of Soils, Institute of Soil Science and Agrochemistry, Azerbaijan National Academy of Science, Mammada Rahima St., 5, Baku, AZ 1073, Azerbaijan, e-mail: maharram-babayev@rambler.ru

Рамазанова Фироза Мухуровна – кандидат сельскохозяйственных наук, доцент, ведущий научный сотрудник, Институт почвоведения и агрохимии Национальной академии наук Азербайджана, ул. Мамеда Рагима, 5, г. Баку, AZ 1073, Азербайджан, e-mail: firoza.ramazanova@rambler.ru

Firoza M. Ramazanova - Candidate of Agricultural Sciences, Associate Professor, Leading Researcher, Institute of Soil Science and Agrochemistry, Azerbaijan National Academy of Science, Mammada Rahima St., 5, Baku, AZ 1073, Azerbaijan, e-mail: firoza.ramazanova@rambler.ru

Мирза-заде Рена Ислам-гызы – кандидат сельскохозяйственных наук, доцент, заведующая почвенным музеем, Институт почвоведения и агрохимии Национальной академии наук Азербайджана, ул. Мамеда Рагима, 5, г. Баку, AZ 1073, Азербайджан

Rena I. Mirza-zade - Candidate of Agricultural Sciences, Associate Professor, Head of Soil Museum, Institute of Soil Science and Agrochemistry, Azerbaijan National Academy of Science, Mammada Rahima St., 5, Baku, AZ 1073, Azerbaijan

Цель исследований – изучение и оценка в длительных исследованиях влияния целинной растительности и разнообразных схем промежуточных посевов кормовых культур на гранулометрический и микроагрегатный состав и водопрочные агрегаты целинных и орошаемых генетически различных (серо-коричневые (каштановые) – сухостепная зона и лугово-сероземные – полупустынная зона) почв Кура-Араксинской низменности Азербайджана.

Установлено, что для целинных серо-коричневых (каштановых) (содержание в слое 0–25 см почвы <0,01 мм 57,34 %) и орошаемых (<0,01 мм – 58,43–59,84 %) почв механический состав тяжелосуглинистый; для целинных лугово-сероземных почв (<0,01 мм – 55,96 %) – тяжелосуглинистый, а для орошаемых – на грани тяжелого суглинка (<0,01 мм – 58,11–59,60 %) и легкой глины (<0,01 мм – 61,91 %), характеризуется более удовлетворительным количеством «истинных» микроагрегатов (в слое 0–25 см – 34,90 и 33,17 %) и микроагрегированностью.

Выявлено, что под влиянием орошения и промежуточных посевов культур после длительных опытов на обоих типах почв происходили вынос илистой фракции и накопление ее в слое 25–50 см. Более заметно это накопление под вариантом

озимая рожь + вика + рапс (1-й урожай) → кукуруза + соя + сорго + амарант (2-й урожай) → ячмень + вика (3-й урожай). Коэффициент дисперсности в слое 0–25 см почвы данного варианта – наименьший (для орошаемых серо-коричневых (каштановых) – 16,87 %, лугово-сероземных – 16,17), а количество водопрочных агрегатов <0,25 мм под этим вариантом выше, чем под целинной растительностью на соответствующих целинных почвах.

Ключевые слова: лугово-сероземные и серо-коричневые (каштановые) почвы, промежуточные посевы, гранулометрический и микроагрегатный состав.

The aim of the research is to study and evaluate, in long-term studies, the influence of virgin vegetation and different-species schemes of intermediate crops of fodder crops on the granulometric and microaggregate composition and waterproof aggregates of virgin and irrigated genetically different (kastanozems) - dry steppe zone and gleyic calcisols - semidesert zone) the soils of the Kura-Araks lowland of Azerbaijan.

Studies have revealed that for the virgin (at the layer 0-25 cm a fraction content <0,01 mm forms - 57.34 %) and irrigative (<0.01 mm - 58.43-59.84 %) kastanozems and irrigated kastanozems soils dry steppe zone the mechanical composition is heavy loamy, but for the gleyic calcisols semi-desert zone - heavy loamy (<0.01 mm - 55.96 %) and for the irrigated gleyic calcisols - in limit of heavy loamy (<0.01 mm - 58.11-59.60 %) and light clay (<0.01 mm - 61.91 %), characterized by a more satisfactory number of "true" microaggregates (in the 0–25 cm layer –34.90 and 33.17 %) and by microaggregation.

It is revealed that under an influence of the irrigation and plant interseeding on both types of the soil, after long experiments happened enleaching of the silt fraction and its accumulation at the layer 25-50 cm.

This accumulation is noticeable under a variant of winter rye+vetch+rape (harvest 1) - corn+soybean+sorghum+amaranth (harvest 2) - barley+vetch (harvest 3). The dispersion coefficient at the layer 0-25 cm of soil of the given variant - the lowest (for irrigated kastanozems - 16.87 %, irrigated gleyic calcisols - 16.17 %), but a quantity of the waterstable aggregates <0.25 mm under this variant is higher than under virgin vegetation on the corresponding virgin soils.

Keywords: gleyic calcisols and kastanozems soils, intermediate sowings, granulometric and microaggregate composition.

Введение

Гранулометрический состав оказывает большое влияние на развитие почвообразовательного процесса и, прежде всего, определяет сорбционные поглощательные свойства почвы [1–5], в то же время гранулометрический и микроагрегатный состав и структурное состояние почв обуславливает потенциальное и актуальное плодородие [2–5], оказывают влияние на агрономические свойства почвы [6]. Поэтому важно знать, как гранулометрический состав и структура почв изменяются при ее сельскохозяйственном использовании [7]. При изучении роли гранулометрического состава в почвообразовании и повышении плодородия традиционно используется изменение содержания илистой фракции (<0,001 мм) по профилю [8, 9]. Если агрофизические свойства оказывают большое влияние на развитие почвообразовательного процесса и плодородие [10–12], то растительный фактор – на агрофизические свойства и направленность процесса почвообразования [10]. В зависимости от биологических особенностей культур, количества и качества оставляемых ими растительных остатков существенно меняются гранулометрический и микроагрегатный состав, структура почвы, направленность почвообразовательного процесса и плодородие [13].

В естественном состоянии серо-коричневым (каштановым) сухостепной зоны и лугово-серозем-

ным почвам полупустынной зоны присуще невысокое естественное плодородие, при бесхозяйственном использовании этих земель при орошении под зерновые и пропашные культуры и хлопок самовоспроизводство агрофизических свойств почв ограничено и ежегодно происходит снижение содержания гумуса [14] (табл. 1). Улучшить агрофизические свойства данных почв возможно путем возделывания промежуточных посевов кормовых культур, обеспечивающих круглогодичное наличие растительного покрова и непрерывное поступление в почву свежего органического вещества в виде стерне-корневых остатков, восполнение дефицита гумуса в почве, регулирование направленности почвообразовательного процесса и укрепление кормовой базы в этой зоне. Поэтому качественная оценка изменений гранулометрического и микроагрегатного состава орошаемых серо-коричневых (каштановых) и лугово-сероземных почв под промежуточными посевами культур в сухостепной и полупустынной зонах Азербайджана актуальна и имеет практическое значение.

Цель исследований – изучение и оценка в длительных исследованиях влияния целинной растительности и разновидовых схем промежуточных посевов кормовых культур на гранулометрический и микроагрегатный состав и водопрочные агрегаты целинных и орошаемых почв Кура-Араксинской низменности Азербайджана.

Таблица 1

Основные диагностические показатели почв / the main diagnostic indicators of soil

Показатели почвы	Данные М.П. Бабаева (1984 г.)				Данные М.П. Бабаева, Ф.М. Рамазановой (1999 г.)			
	Целинные		Орошаемые		Целинные		Орошаемые	
	Лугово-серо-земные	Серо-коричневые (каштановые)	Лугово-серо-земные	Серо-коричневые (каштановые)	Лугово-серо-земные	Серо-коричневые (каштановые)	Лугово-серо-земные	Серо-коричневые (каштановые)
Глубина залегания грунтовых вод, м	4,0–6,0	2,5–5,0	3,0–4,0	> 3,0–4,0	3,5–6,0	2,5–4,5	2,0–3,5	> 3,0–4,0
Структура: А1	Пылевато-комковатая, крупно-зернистая	Зернистая, мелко-ореховатая, комковатая	Пылевато-комковатая, комковатая, глыбистая	Комковато-пылевато-глыбистая	Пылевато-комковатая, зернисто-комковатая	Зернистая, ореховато-комковатая	Пылевато-комковато-глыбистая	Комковато-пылевато-глыбистая
Глубина выраженности, см:								
гипса	120–140	90–110	140–160	110–140	120–140	90–115	145–160	110–147
карбонатности	30–40	30–50	70–80	60–100	30–40	30–55	77–85	65–107
засоленности	30–80	–	130–170	90–100	33–80	–	137–185	90–110
Мощность гумусового горизонта, см	20–35	40–45	40–50	40–50	40–50	45–55	40–50	40–52
Гумус, % (0–25 см почвы)	1,5–2,0	2,47–2,64	2,1–2,78	2,68–2,77	1,5–1,77	2,37–2,48	2,10–2,31	2,58–2,67
Гранулометрический состав (0–25 см почвы):								
илистая фракция (<0,001 мм), %	20,0–24,0	35,2–43,9	33,0–34,0	25,0–28,0	19,0–23,2	35,0–40,1	27,1–29,2	22,0–23,5
физическая глина (<0,01 мм), %	37,0–50,0	52,8–55,8	52,0–56,84	52,0–60,0	37,0–52,0	53,0–56,2	52,9–63,1	53,0–61,4
водопрочные агрегаты (>0,25 мм), %	26,0–35,0	58,0–58,18	44,0–45,0	45,0–48,0	25,0–30,1	48–50,0	36,8–40,5	35,1–42,4
Плотный остаток, %	0,75–1,06	0,60–0,76	0,34–0,46	0,11–0,14	0,84–1,19	0,77–0,82	0,47–0,59	0,19–0,27
Плотность почвы, г/см ³	1,27–1,32	1,09–1,38	1,30–1,40	1,24–1,49	1,27–1,39	1,16–1,43	1,37–1,42	1,28–1,49
Удельный вес, г/см ³	1,5–2,0	1,2–1,3	1,4–1,5	1,9–2,4	1,55–2,17	1,27–1,34	1,49–1,61	2,07–2,82

Объект и методика исследований

Исследования проведены в 1999–2016 гг. на целинных и орошаемых почвах сухостепной зоны (г. Акстафа, почва серо-коричневая (каштановая) – по WRB – kastanozems и irrigri kastanozems) и полупустынной зоны (г. Уджар, почва лугово-сероземная, по WRB – gleyic calcisols и irrigri gleyic calcisols).

Климат – субтропический с сухим жарким летом, среднегодовая температура воздуха +12...+13 °С, температура холодного месяца (января) +3,9...+5,2 °С, сумма активных температур – 4400–5200 °С, приход ФАР – 120–135 ккал/см², испаряемость высокая (947–1210 мм), ИС (по Будыко) – 1,0–11,0, КУ (по Иванову) – 0,25–0,09, количество осадков – 110–330 мм [15].

Целинные и орошаемые серо-коричневые (каштановые) почвы, тип – горные серо-коричневые, подтип – серо-коричневые (каштановые), формируются на верхнечетвертичных глинистых и тяжелоглинистых аллювиальных и пролювиальных отложениях на высоте 70–300 м над уровнем моря. *Целинные почвы* карбонатные, со слабым хлоридно-сульфатным засолением. Содержание гумуса в слое 0–25 см почвы (табл. 1) составляет 2,37–2,48 % [14, 15]. *Орошаемые почвы* по гранулометрическому составу тяжелосуглинистые. В слое 0–25 см почвы содержание илистой фракции составляет 22–23,5 %, физической глины – 53,0–61,4, гумуса – 2,58–2,67 %, pH – 8,0–8,5 [14–16].

Целинные и орошаемые лугово-сероземные почвы расположены на высоте 48,80 м н.у.м., на делювиально-аллювиальных лессовидных суглинках. Целинные почвы часто карбонатные или с признаками слабого хлоридно-сульфатного типа засоления. Плотность в слое 0–25 см – 1,27–1,39 г/см³, исходное содержание гумуса – 1,5–1,77 %. Орошаемые лугово-сероземные почвы – тяжелосуглинистые, в пахотном слое содержание фракции размером <0,001 и <0,01 мм составляет 27,1–29,1 и 52,9–63,1 %, гумуса – 2,10–2,31, плотного остатка – 0,47–0,59 % (табл. 1) [14–16].

Схема опыта: 1. Целина; 2. Озимая рожь (1-й урожай) → кукуруза (2-й урожай); 3. Люцерна; 4. Кукуруза (весенний посев); 5. Озимая рожь+вика+рапс (1-й урожай) → кукуруза+соя+сорго+амарант (2-й урожай) → ячмень+вика (3-й урожай); 6. Ячмень (на зерно, хозпосев).

Агротехника – зональная, периодическое (2000, 2005, 2010 и 2015 гг. под 2, 3, 4 и 5-м вариантами) внесение 20 т/га подстилочного полуперепревшего навоза и N₉₀P₁₂₀K₆₀ с включением изучаемых в опытах технологий возделывания. Площадь делянок –

72 м². Влажность почвы поддерживалась орошением на уровне 75–80 % НВ. Постановка опытов и полевые работы проведены по методике ВИК им. В.Р. Вильямса (1987). Образцы почв отбирали по слоям 0–25, 25–50, 50–75, 75–100 см: на целине в 1-й декаде мая и октября; при получении 2-го и 3-го урожая – во 2-й декаде мая и 3-й декаде сентября; на посевах люцерны – в 1-й декаде мая и октября; кукурузы – в 3-й декаде апреля и 1-й декаде августа; ячменя (хозпосева) – в 3-й декаде сентября и июля. Орошение бороздовое. Влажность почвы поддерживалась не ниже 75–80 % НВ. Гранулометрический и микроагрегатный состав определяли по Качинскому [17], коэффициент структурности – расчетным путем по А.Ф. Вадюниной и З.А. Корчагиной [18], статистическую обработку данных вели по В.А. Доспехову [19].

Результаты и их обсуждение

Существенное влияние на плодородие сухостепных и полупустынных почв оказывают биологические особенности культур, количество и качество поступающих в почву растительных остатков агрофитоценозов (табл. 2). Установлено, что наибольшее поступление растительных остатков (196,90 и 188,55, г = 0,59 ц/га) и углерода – 6438,65 и 6175,01 кг/га, а также питательных элементов (N – 313,07 и 299,79; P₂O₅ – 157,52 и 150,84; K₂O – 417,43 и 399,70 кг/га) в слой 0–50 см почвы отмечено на 5-м варианте, т.е. при получении трех урожаев зеленой массы в год с одного гектара. Это способствовало повышению в слое 0–50 см почвы гумуса (за 18 лет его содержание по отношению к исходному повысилось на 0,31 и 0,35 %), обеспечению положительного баланса гумуса (0,63 и 0,59 т/га), что оказало положительное влияние на микроагрегатный состав и водопропрочную структуру орошаемых серо-коричневых (каштановых) и лугово-сероземных почв.

Каждая почва отличается определенными диагностическими признаками и характерной особенностью гранулометрического состава (неоднородное распределение структурных элементов по профилю почв) [4, 12, 20, 21], и по этим признакам можно отличать одну почву от другой и получать некоторые сведения об их происхождении, составе, свойствах, уровне плодородия [21]. Основополагающим физическим свойством почвы является гранулометрический состав [22], который оказывает значительное влияние на почвообразование и плодородие [1].

Анализ экспериментальных данных показал, что в слое 0–25 см целинной серо-коричневой (каштановой) почвы (сухостепная зона) гранулометрический состав – тяжелосуглинистый (табл. 3).

Таблица 2

Поступление в почву углерода и питательных веществ с растительными остатками и показатели плодородия почв (в слое 0–50 см почвы, в среднем за 18 лет) / The release of carbon and nutrients into the soil with plant residues and soil fertility indicators (in a layer of 0-50 cm of soil, on average over 18 years)

Варианты	Масса стерне-корневых остатков в сух. стоянии, ц/га	Поступило в почву со стерне-корневыми остатками, кг/га				Гумус, %	Запас гумуса, т/га	Баланс гумуса, т/га
		C	N	P ₂ O ₅	K ₂ O			
Серо-коричневая (каштановая) почва								
Исходная почва						2,58		
Целина	34,97	1398,8	34,97	13,99	36,01	2,57	159,4	+0,03
Рожь→кукуруза В сумме за 2 урожая	104,32	3651,2	123,01	47,5	106,50	2,32	142,76	-0,22
Люцерна	107,00	3852,00	217,21	87,74	199,02	2,77	170,47	+0,47
Кукуруза на силос	41,80	1463,00	48,91	16,72	31,14	2,19	136,90	-0,60
Рожь + вика + рапс→ кукуруза+соя+сорго +амарант→ ячмень + вика В сумме за 3 урожая	196,90	6438,65	313,07	157,52	417,43	2,89	173,10	+0,63
Ячмень на зерно (хозпосев)	38,9	1400,4	31,12	14,78	37,78	2,16	120,91	-1,71
Лугово-сероземная почва								
Исходная почва						2,10–2,37		
Целина	30,89	1235,6	31,14	12,36	31,81	2,44	158,6	+0,28
Рожь→кукуруза В сумме за 2 урожая	95,89	3356,15	113,07	43,66	97,89	2,12	129,6	-0,20
Люцерна (за 4 укоса)	97,94	3525,84	19,88	80,31	182,17	2,66	163,7	+0,43
Кукуруза на силос	37,77	1321,95	44,19	15,11	28,13	1,77	110,2	-0,48
Рожь + вика + рапс→ кукуруза+соя+сорго + амарант→ ячмень + вика В сумме за 3 урожая	188,55	6175,01	299,79	150,84	399,70	2,72	162,92	+0,59
Ячмень на зерно (хозпосев)	35,74	1286,64	28,59	13,58	34,71	2,07	115,87	-1,64

Содержание физической глины (<0,01 мм) в этом слое почвы составляло 57,34 %. Заметное оглинивание профиля в слое 25–50 см, где отмечается высокое содержание частиц физической глины <0,01 мм (60,08 %) и ила <0,001 мм (27,92 %), показывает, что большая часть не расходовалась на цементизацию микроагрегатов >0,01 мм. Высокодисперсная фракция составляет 46,47 % от физической глины, что указывает на оглиненность этой части профиля. Гранулометрический состав целинной лугово-сероземной почвы (полупустынная зона) в слое 0–25 см несколько легче (<0,01 мм – 55,96 % и <0,001 мм – 20,0 %), и оглинивание профиля (25–50 см) выражено слабее (<0,01 мм – 59,22 % и <0,001 мм – 23,06 %) (табл. 3), чем в целинной серо-коричневой (каштановой) почве. Высокодисперсная фракция в этом слое составляла 38,94 % от физической глины, что подтверждает относительно слабую оглиненность этой части профиля. Орошение относится к числу факторов, наиболее существенно влияющих на почвенные процессы [23]. При орошении гранулометрический состав первичных зональных почв преимущественно утяжеляется [24–26], а в Кура-Араксинской низменности изменение гранулометриче-

ского состава почв под влиянием орошения многофакторное и зависит от источника поливных вод, давности орошения, содержания гумуса, возделываемых культур, количества и качества поступающих в почву растительных остатков и др. [16]. Выявлено, что под чистыми посевами злаковых культур (2-й, 4-й и 6-й варианты) почвенный профиль орошаемых серо-коричневых (каштановых) и лугово-сероземных почв был относительно более уплотненным и четко выделялся рыхлостью слой 0–25 см (табл. 3, 4). Глубже сформировались почти одинаковой плотности горизонты. Профиль почвы под вариантами озимая рожь+вика+рапс (1-й урожай) → кукуруза+соя+сорго+амарант (2-й урожай) → ячмень+вика (3-й урожай) и люцерны более рыхловатый – во всем 50-сантиметровом слое почвы отмечались полуразложившиеся остатки прошлогодней запаханной стерни, ходы червей и поры, что и придавало рыхлость профилю.

Если под 2-м, 4-м и 6-м вариантами структура 0–25 слоя почвы была мелкокомковато-пылеватой, то под 3-м и 5-м вариантами в слоях 0–25 и 25–50 см почвы – мелкокомковато-зернистой, причем в слое 25–50 см серо-коричневой почвы преобладала хорошо выраженная зернистая структура.

Таблица 3

**Гранулометрический состав целинных и орошаемых серо-коричневых (каштановых) почв
 / Granulometric composition of virgin and irrigated kastanozems**

Варианты	Глубина, см	Фракции, мм, и их содержание, %						
		1–0,25	0,25–0,05	0,05–0,01	0,01–0,005	0,005–0,001	<0,001	<0,01
1	0–25	1,39	11,15	30,12	9,56	22,32	25,46	57,34
	25–50	0,70	10,82	28,40	1,80	20,36	27,92	60,08
	50–75	1,17	3,83	41,12	11,08	17,72	25,08	53,88
	75–100	–	–	–	–	–	–	–
2	0–25	0,96	17,99	21,32	11,77	21,53	26,43	59,73
	25–50	0,90	13,30	22,15	11,57	25,00	27,08	63,65
	50–75	0,24	12,96	29,51	10,06	20,74	26,49	57,29
	75–100	–	11,70	30,96	8,39	22,97	25,98	57,34
3	0–25	0,73	15,81	24,92	9,05	22,74	26,75	58,54
	25–50	0,89	19,35	21,40	11,96	18,95	27,65	58,36
	50–75	1,00	6,45	29,49	9,40	26,96	26,70	63,06
	75–100	0,16	14,13	31,75	11,96	16,02	25,98	53,06
4	0–25	1,49	13,77	24,90	11,93	21,80	26,11	59,84
	25–50	1,94	12,98	23,32	12,54	22,47	26,75	61,76
	50–75	1,71	14,13	25,96	415,55	19,36	23,29	58,20
	75–100	1,11	11,93	26,11	10,96	24,35	25,54	60,85
5	0–25	0,20	11,61	28,78	8,12	24,62	26,67	59,41
	25–50	0,26	9,98	29,53	10,08	22,78	27,37	60,23
	50–75	0,30	13,12	29,05	13,37	16,63	27,53	57,53
	75–100	0,57	12,33	23,44	10,88	15,64	26,38	56,06
6	0–25	0,83	12,05	27,92	14,94	19,97	24,29	59,20
	25–50	0,39	11,87	27,80	10,73	23,60	25,61	59,94
	50–75	1,51	13,13	27,96	11,55	20,36	25,49	57,40
	75–100	0,98	14,12	26,45	11,45	22,00	25,00	58,45

Примечание. 1 – целина; 2 – озимая рожь (1-й урожай) → кукуруза (2-й урожай); 3 – люцерна; 4 – кукуруза (весенний посев); 5 – озимая рожь + вика + рапс (1-й урожай) → кукуруза+ соя+сорго+ амарант (2-й урожай) → ячмень+вика (3-й урожай); 6 – ячмень (зерно, хозпосев).

Несмотря на устойчивость в почвообразовательных процессах гранулометрического и микроагрегатного состава, в орошаемой серо-коричневой (каштановой) и лугово-сероземной почвах наблюдается изменения в гранулометрическом составе почвы (табл. 3, 4). В слое 0–25 см орошаемой серо-коричневой почвы содержание мелкого песка колебалось в пределах от 11,61 до 17,99 % (табл. 3). Минимальное значение этой фракции (6,45 %) содержится в слое 50–75 см почвы под люцерной, а наибольшее – под кукурузой основного весеннего посева (14,13 %).

В пахотном слое отмечено повышенное содержание крупной пыли (0,05–0,01 мм), значения которой колебались в пределах 21,32–28,78 %. Средняя пыль (0,01–0,005 мм) определяет связанность и пластичность почвы, удерживает влагу. Однако эта фракция обладает слабой водопроницаемостью и неспособна к коагуляции. Поэтому невысокое содержание средней пыли в почве (менее 10 %) позволяет избежать её запыления [27, 28]. Наименьшее содержание этой фракции в слое 0–25 см почвы отмечено под 5-м вариантом (8,12 %), а наибольшее – под ячменем (14,94 %), остальные варианты занимали промежуточное положение.

Потенциальное плодородие почвы определяется количеством илстых частиц. В сухостепной и полупустынной зонах наблюдается вынос тонких частиц по профилю. Поэтому в верхнем слое почвы содержание илистой фракции меньше, чем в подпахотном слое почвы [29–32]. Наши исследования подтверждают это предположение, так как при выносе илистой фракции из верхнего слоя обнаруживался максимум ила в иллювиальной части профиля. Выявлено, что ее количество возрастает от 24,29–26,92 % в слое 0–25 см почвы до 25,61–27,65 % в иллювиальном, а потом в слое 75–100 см почвы снижается до 25,00–26,38 %. Это говорит о некотором утяжелении гранулометрического состава и накоплении илстых частиц на глубине 25–50 см почвы. Оглинивание отмечается в орошаемой серо-коричневой (каштановой) почве при увеличении количества физической глины и илистой фракции, особенно в средних слоях почвенного профиля. Это связано со слитностью верхней и средней частей профиля при их орошении (увлажнении). Почва под 5-м вариантом уступает по степени оглинивания и мощности горизонта элювиального накопления глины почвам под 2-м, 4-м и 6-м вариантами. Однако глинонакопление под 5-м вариантом несколько меньше, чем в почвах остальных вариантов.

Таблица 4

**Гранулометрический состав целинной и орошаемой лугово-сероземной почвы
/ Granulometric composition of virgin and irrigated gleyic calcisols**

Варианты	Глубина, см	Фракции, мм, и их содержание, %						
		1–0,25	0,25–0,05	0,05–0,01	0,01–0,005	0,005–0,001	<0,001	<0,01
1	0–25	0,79	18,80	24,45	9,87	26,09	20,00	55,96
	25–50	–	16,90	23,88	10,99	25,17	23,06	59,22
	50–75	–	14,90	27,00	9,02	27,21	21,87	58,10
	75–100	0,24	17,99	28,37	5,68	27,99	19,73	53,40
2	0–25	0,30	17,59	20,20	11,31	23,20	26,40	61,91
	25–50	–	11,64	26,70	10,20	24,19	26,27	61,66
	50–75	1,07	15,33	21,00	13,60	14,60	25,00	62,60
	75–100	–	15,23	24,80	9,40	23,80	26,77	59,97
3	0–25	0,17	18,36	22,20	9,60	22,80	26,87	59,27
	25–50	0,16	17,64	20,40	10,20	23,80	27,80	61,80
	50–75	0,04	16,23	24,13	10,53	22,67	26,40	59,60
	75–100	–	10,60	30,80	9,60	23,20	25,80	58,60
4	0–25	0,10	16,60	25,19	12,00	22,00	26,11	58,11
	25–50	1,90	15,04	24,06	14,78	17,47	26,75	59,00
	50–75	0,15	16,00	24,33	15,87	20,36	23,29	59,52
	75–100	0,05	15,11	26,13	12,82	20,35	25,54	58,71
5	0–25	0,08	16,94	23,89	8,69	22,57	27,83	59,09
	25–50	0,17	13,86	24,40	10,11	23,13	28,33	61,57
	50–75	0,09	15,02	23,30	12,00	22,32	27,27	61,59
	75–100	0,24	15,88	21,20	10,01	26,13	26,54	62,68
6	0–25	0,27	11,22	27,53	11,75	23,67	25,56	60,98
	25–50	0,83	10,65	27,01	10,51	25,17	25,83	61,51
	50–75	1,69	14,13	25,83	9,00	25,06	24,29	58,35
	75–100	–	7,01	29,98	8,79	30,11	24,11	63,01

Примечание. 1 – целина; 2 – озимая рожь (1-й урожай) → кукуруза (2-й урожай); 3 – люцерна; 4 – кукуруза (весенний посев); 5 – озимая рожь+вика+рапс (1-й урожай) → кукуруза+соя+ сорго+ амарант (2-й урожай) → ячмень+вика (3-й урожай); 6 – ячмень (на зерно, хозпосев).

Установлено, что в слое 0–25 см почвы в сухостепной зоне целинной (содержание физической глины размером <0,01 мм составляло 57,34 %) и орошаемой серо-коричневой (каштановой) почв (<0,01 мм – 58,43–59,84 %) гранулометрический состав тяжелосуглинистый. Отмечается заметное оглинивание в слое 25–50 см, где содержание фракции <0,01 мм (60,08 %) и <0,001 мм (27,92 %) сравнительно высоко.

Гранулометрический состав (табл. 4) в слое 0–25 см целинной лугово-сероземной почвы (полупустынная зона) несколько легче (<0,01 мм – 55,96 % и <0,001 мм – 20,0 %), и оглинивание профиля (25–50 см) выражено слабее (<0,01 мм – 59,22 % и <0,001 мм – 23,06 %), чем в целинной серо-коричневой (каштановой). Гранулометрический состав орошаемой лугово-сероземной почвы по сравнению с целинным аналогом более тяжелый. Отмечено изменение в гранулометрическом составе частиц в слое 0–25 см почвы – количество фракции 0,25–0,05 мм колебалось в пределах 11,22–18,36 %. Минимальное количество мелкого песка содержалось в слое 50–75 см почвы под ячменем хозпосева, а максимальное – под вторым вариантом. Значения крупной пыли (0,05–0,01 мм) в пахотном слое почвы варьировало в пределах 20,00–30,88 %. Минимальное – под рожью (1-й урожай) → кукурузой (2-й урожай), а максимальное – под ячменем (хозпосев), остальные варианты занимали промежуточное положение.

Фракция частиц размером 0,01–0,005 мм обуславливает связанность и пластичность почвы, удерживает влагу. Минимальное содержание этой фракции в слое 0–25 см почвы выявлено под 6-м вариантом (9,02 %), а наибольшее – под 4-м вариантом (12,00 %). Тяжелосуглинистый гранулометрический состав целинной почвы объясняется содержанием физической глины в пределах 53,40–59,22 %, а орошаемой – нахождением гранулометрического состава на границе перехода тяжелого суглинка к легкой глины (58,11–61,91 %). С глубиной по профилю почвы наблюдалось понижение содержания физической глины (<0,01 мм) под всеми вариантами. Очевидно, это связано с некоторым утяжелением с глубиной гранулометрического состава. В подпахотном слое почвы отмечено накопление илестой фракции (<0,001 мм) под 2-м, 4-м и 6-м вариантами, однако оно было на 2,95 % меньше, чем в остальных вариантах. Степень оглинивания орошаемой лугово-сероземной почвы выше, чем серо-коричневой (каштановой). В орошаемой лугово-сероземной почве содержание крупной пыли по сравнению с серо-коричневой (каштановой) почвой под всеми вариантами было больше. Меньшее содержание фракции 0,005–0,001 мм было в почве под люцерной (22,00 %), а наибольшее (23,67 %) – под ячменем.

Одновременно с гранулометрическим составом определили и микроагрегатный состав почв (табл. 5).

Таблица 5

**Микроагрегатный состав целинной и орошаемой серо-коричневой (каштановой) и лугово-сероземной почв
 / Microaggregate composition of virgin and irrigated kastanozems and gleysols**

Варианты	Глубина, см	Фракции, мм, и их содержание, %							Фактор дисперсности	Степень агрегированности по доминирующим фракциям
		1–0,25	0,25–0,05	0,05–0,01	0,01–0,005	0,005–0,001	<0,001	<0,01		
Серо-коричневая почва										
1	0–25	–	34,60	38,44	6,90	14,56	5,50	26,96	21,60	78,40
	25–50	0,16	4,44	8,00	6,40	18,00	6,00	30,40	21,49	78,51
	50–75	–	40,38	39,18	3,35	10,09	7,00	20,44	27,91	72,09
	75–100	–	–	–	–	–	–	–	–	–
2	0–25	4,80	42,47	22,83	9,09	14,98	5,83	29,90	22,06	77,94
	25–50	7,14	25,31	35,21	8,59	17,85	5,90	32,34	21,79	78,21
	50–75	5,43	30,99	36,09	6,11	15,78	5,60	27,49	26,05	73,95
	75–100	–	31,77	32,84	5,53	20,86	9,00	35,39	34,64	65,36
3	0–25	0,79	37,95	36,01	4,66	14,69	5,90	25,25	22,06	77,94
	25–50	1,99	38,10	34,95	4,58	14,38	6,00	24,96	21,70	78,30
	50–75	0,66	37,85	34,89	6,83	12,57	7,20	26,60	26,97	73,03
	75–100	0,89	33,51	39,92	3,90	13,43	8,35	25,68	32,14	67,86
4	0–25	2,79	30,02	36,81	6,75	15,65	7,98	30,38	23,17	76,83
	25–50	8,07	33,27	31,58	4,67	16,26	6,15	27,08	22,99	77,01
	50–75	6,05	38,95	33,98	4,67	8,99	7,36	21,02	31,60	68,40
	75–100	0,79	33,85	30,33	10,98	15,11	8,94	35,03	35,00	65,00
5	0–25	1,11	39,30	35,99	4,38	14,72	4,50	23,60	16,87	83,13
	25–50	0,41	36,98	37,46	4,29	16,26	4,60	25,15	16,81	83,19
	50–75	3,00	40,01	35,11	3,03	13,05	5,80	21,09	21,09	78,91
	75–100	4,58	33,83	32,06	4,90	16,73	7,90	29,53	29,95	70,05
6	0–25	8,10	34,19	30,78	7,97	13,16	5,80	26,93	23,88	76,12
	25–50	2,69	36,22	30,00	8,92	16,47	5,70	31,09	22,26	77,74
	50–75	4,55	36,97	28,95	10,82	11,21	7,50	29,53	29,42	70,04
	75–100	2,00	36,00	28,88	12,62	12,00	8,50	33,12	34,00	66,00
Лугово-сероземная почва										
1	0–25	0,69	25,11	38,09	10,65	20,83	4,63	36,11	23,15	76,85
	25–50	0,96	31,56	34,00	9,38	19,10	5,00	33,48	21,68	78,32
	50–75	0,80	29,11	32,02	12,32	18,69	5,44	38,09	24,87	75,13
	75–100	0,79	20,33	38,98	10,78	22,00	7,12	39,90	36,09	63,91
2	0–25	1,07	24,13	38,60	8,92	21,30	5,98	36,20	22,65	77,35
	25–50	–	21,66	38,60	7,00	26,80	5,94	45,74	22,61	77,39
	50–75	0,70	38,20	26,80	4,40	22,80	7,10	34,30	28,40	71,60
	75–100	0,06	29,74	33,20	2,80	25,00	9,20	37,00	34,37	65,63
3	0–25	0,82	31,63	41,55	7,02	13,20	5,78	26,00	21,51	78,49
	25–50	0,90	28,98	39,69	6,01	18,27	6,15	30,43	22,12	77,88
	50–75	1,17	36,38	32,67	6,30	16,26	7,22	29,78	27,35	72,65
	75–100	0,72	35,09	31,43	4,96	19,34	8,46	32,76	32,79	67,21
4	0–25	0,79	28,38	40,48	8,68	15,58	6,09	30,35	23,32	76,68
	25–50	–	33,56	36,22	7,61	16,11	6,50	30,22	24,30	75,70
	50–75	1,13	32,87	34,70	9,76	14,18	7,36	31,30	31,60	64,45
	75–100	–	30,11	32,81	9,17	18,97	8,94	37,08	35,00	62,77
5	0–25	0,69	37,94	36,08	5,08	15,71	4,50	25,29	16,17	83,83
	25–50	–	39,86	33,90	5,91	15,59	4,74	26,24	16,73	83,27
	50–75	0,70	39,98	35,05	5,79	12,00	6,48	24,27	23,76	76,24
	75–100	2,57	38,97	34,83	4,82	11,29	7,52	23,63	28,33	71,67
6	0–25	1,00	28,13	35,54	9,10	20,23	6,00	35,33	23,47	76,53
	25–50	1,10	30,39	27,88	8,30	26,03	6,30	40,63	24,39	75,61
	50–75	0,87	27,57	30,78	10,96	14,32	7,50	40,78	30,88	69,12
	75–100	–	26,50	31,02	9,48	25,00	8,00	42,48	35,26	64,74

Примечание. 1 – целина; 2 – озимая рожь (1-й урожай) → кукуруза (2-й урожай); 3 – люцерна; 4 – кукуруза (весенний посев); 5 – озимая рожь + вика + рапс (1-й урожай) → кукуруза+соя+сорго+амарант (2-й урожай)→ячмень+вика (3-й урожай); 6 – ячмень (на зерно, хозпосев).

Наиболее ценными являются микроагрегаты размером 0,25–0,05 и 0,05–0,01 мм. Микроагрегаты размером 0,01–0,005 мм снижают водо- и воздухопроницаемость [23].

Рассмотрение распределения фракций микроагрегатного состава показывает, что основную массу как в орошаемой серо-коричневой (каштановой), так и в лугово-сероземной почвах составляют агрегаты размером 0,05–0,01 и 0,25–0,05 мм. Количество микроагрегатов <0,001 мм колеблется в слое 0–25 см орошаемой серо-коричневой (каштановой) почвы в пределах 4,50–7,98 %, а в лугово-сероземной – 4,50–6,09 %. По показателям гранулометрического и микроагрегатного состава был рассчитан показатель фактора дисперсности [18], который в пахотном слое орошаемой серо-коричневой (каштановой) и лугово-сероземной почв подвержен значительным колебаниям (16,87–23,88 и 16,17–23,47 %). В орошаемой серо-коричневой (каштановой) почве фактор дисперсности по профилю меняется от 16,87–23,33 % до 29,95–34,64, а в лугово-сероземной – от 16,17–28,47 до 28,33–35,26 % (табл. 5). В обоих типах почв в слое

0–25 см наибольший фактор дисперсности установлен для ячменя хозпосева (23,88 и 23,47 %) и кукурузы чистого посева – 23,17 и 23,32 %, что указывает на слабую оструктуренность этого слоя почвы под рассматриваемыми культурами (табл. 5, рисунок).

Под люцерной и 5-м вариантом фактор дисперсности составлял 22,06 и 16,87 % и 21,51 и 16,17.

Для определения уровня микроагрегатности исследуемых типов почв рассчитано содержание «истинных» водопрочных микроагрегатов по [29] (табл. 6). Установлено, что в орошаемых серо-коричневых (каштановых) и лугово-сероземных почвах под 6-м вариантом создавались оптимальные условия образования «истинных» микроагрегатов.

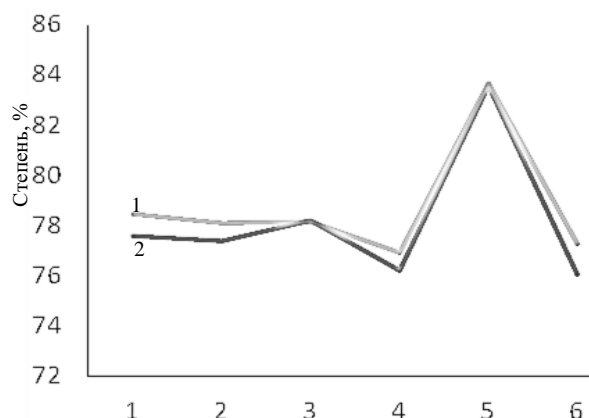
Под этим вариантом в орошаемой лугово-сероземной почве их количество составляло 33,19–36,72 %, а в серо-коричневой (каштановой) – 30,19–34,90. Немного меньшее количество микроагрегатов отмечено под люцерной (31,40–32,62 %), а под 2-м, 4-м и 6-м вариантами – еще меньше. Значит, непрерывное возделывание злаковых культур способствует некоторому разрушению микроагрегатной структуры.

Таблица 6

Содержание «истинных» водопрочных микроагрегатов, % / Content of "true" waterproof microaggregates in soil, %

Варианты	Глубина, см	Содержание фракций 0,25–0,01 мм			Содержание фракций 0,25–0,01 мм		
		Состав		Количество «истинных» микроагрегатов	Состав		Количество «истинных» микроагрегатов
		микроагрегатный	гранулометрический		микроагрегатный	гранулометрический	
		Лугово-сероземная почва			Серо-коричневая (каштановая)		
1	0–25	63,20	43,25	19,95	73,04	41,27	31,77
	25–50	65,56	40,78	24,78	62,44	39,22	23,22
	50–75	61,13	41,90	19,23	79,56	44,95	34,61
	75–100	59,31	46,36	12,95	–	–	–
2	0–25	62,73	38,79	23,94	65,30	39,31	25,99
	25–50	60,26	38,34	21,92	60,52	35,45	25,07
	50–75	65,00	36,33	28,67	67,08	42,47	24,61
	75–100	62,94	40,03	22,91	64,61	42,66	21,95
3	0–25	73,18	40,56	32,62	73,96	40,73	33,23
	25–50	68,67	38,04	30,63	73,05	40,75	32,30
	50–75	69,05	40,36	28,69	72,74	35,94	36,80
	75–100	66,52	41,40	25,12	73,43	43,88	29,59
4	0–25	68,86	41,79	27,07	66,83	38,67	28,16
	25–50	69,78	39,10	30,68	64,85	36,30	28,55
	50–75	67,57	40,33	27,24	72,93	40,09	32,84
	75–100	62,92	41,24	21,68	64,18	38,04	26,14
5	0–25	74,02	40,83	33,19	75,29	40,39	34,90
	25–50	70,76	38,26	32,50	74,44	39,51	34,93
	50–75	75,03	38,32	36,71	75,12	42,17	32,95
	75–100	73,80	37,08	36,72	65,89	35,77	30,12
6	0–25	63,67	38,75	24,92	64,97	39,97	25,00
	25–50	58,27	37,66	20,61	66,22	39,67	26,55
	50–75	58,35	39,96	18,39	65,92	41,09	24,83
	75–100	57,52	36,99	20,53	64,88	40,57	24,31

Примечание. 1 – целина; 2 – озимая рожь (1-й урожай) → кукуруза (2-й урожай); 3 – люцерна; 4 – кукуруза (весенний посев); 5 – озимая рожь+вика+рапс (1-й урожай) → кукуруза+соя+сорго+амарант (2-й урожай) → ячмень+вика (3-й урожай); 6 – ячмень (на зерно, хозпосев).



1 – серо-коричневая (каштановая) почва;
2 – лугово-сероземная почва

Степень агрегированности почв сухостепной и полупустынной зон по доминирующим фракциям, % (в слое 0–50 см почвы) / The degree of aggregation of soils of dry-steppe and semi-desert zones by dominant fractions, % (in a layer of 0–50 cm of soil)

В условиях интенсивно орошаемого земледелия гранулометрический состав является одним из опре-

деляющих признаков при диагностике окультуренных почв [16]. Установлено, что в целинной серо-коричневой (каштановой) почве содержание водопрочных агрегатов >0,25 мм в слое 0–25 см составляло 49,94 %, на орошаемой – в зависимости от схемы посевов – 24,01–55,60 % (табл. 7).

Также исследование подтвердило предположение о том, что в бессменных посевах кормовых культур содержание водопрочных агрегатов >0,25 мм в слое 0–25 см почвы варьировало в пределах 24,01–31,13 %. Наибольшее содержание водопрочных агрегатов в пахотном слое почвы отмечено под 5-м вариантом (55,60 %), а наименьшее – под кукурузой весеннего посева (24,01 %).

Для достоверности полученных данных была проведена статистическая обработка на 5%-м уровне значимости (табл. 8).

Среднее значение совокупности фракций 0,25–0,01 мм с 95%-м уровнем вероятности на оптимальном варианте (5-й вариант) на серо-коричневой (каштановой) почве находилось в доверительном интервале $\pm 0,80 \pm 0,92$ и лугово-сероземной – $\pm 0,68 \pm 0,45$, а коэффициент вариации соответственно составлял $V=1,67-1,69$ и $V=1,78-1,86$ %.

Таблица 7

Содержание водопрочных агрегатов в почвах, % / Content of waterproof aggregates in soils, %

Варианты	Глубина, см	Размер частиц, мм					
		5–3	3–1	1–0,5	0,5–0,25	> 1	>0,25
Серо-коричневая почва							
1	0–25	4,07	10,97	16,70	18,20	15,04	49,94
	25–50	4,73	9,40	12,30	14,17	14,13	40,60
2	0–25	3,90	6,43	14,56	14,83	10,33	39,72
	25–50	5,17	11,05	13,75	16,03	16,22	46,00
3	0–25	5,90	8,17	16,26	17,89	14,07	48,22
	25–50	6,56	9,05	16,81	16,70	15,61	49,12
4	0–25	3,01	5,40	6,90	8,70	8,41	24,01
	25–50	11,0	9,13	12,31	14,52	20,13	46,96
5	0–25	7,73	10,01	17,73	20,13	17,74	55,60
	25–50	10,59	9,78	19,03	18,43	20,37	57,83
6	0–25	3,00	5,03	11,05	12,05	8,03	31,13
	25–50	6,00	9,13	13,92	14,92	15,13	43,97
Лугово-сероземная почва							
1	0–25	2,25	5,10	9,60	8,05	7,35	25,00
	25–50	9,80	11,0	13,01	12,73	20,90	46,64
2	0–25	2,50	6,00	10,40	8,90	8,50	35,80
	25–50	10,47	12,50	13,70	13,92	22,97	50,59
3	0–25	2,70	6,80	14,30	15,81	9,50	39,61
	25–50	11,00	13,00	13,68	15,00	24,00	52,68
4	0–25	1,80	5,90	5,10	10,00	7,70	22,80
	25–50	9,30	8,80	12,30	10,50	18,60	41,40
5	0–25	2,90	7,34	15,90	17,10	10,24	43,25
	25–50	11,35	14,00	14,70	16,73	25,35	56,78
6	0–25	1,60	6,30	6,90	8,60	7,90	23,40
	25–50	6,90	8,00	13,70	12,40	14,90	41,00

Примечание. 1 – целина; 2 – озимая рожь (1-й урожай) → кукуруза (2-й урожай); 3 – люцерна; 4 – кукуруза (весенний посев); 5 – озимая рожь+вика+рапс (1-й урожай) → кукуруза+соя+сорго+амарант (2-й урожай) → ячмень+вика (3-й урожай); 6 – ячмень (на зерно, хозпосев).

Таблица 8

Статистические показатели физических свойств почв сухостепной и полупустынной зон
/ Statistical processing of physical properties of soils of dry-steppe and semi-desert zones

Варианты	n	Глубина, см	Доверительный интервал при 05 уровне значимости: $x \pm t_{05} s_x$				
			<0,001 мм	<0,01 мм	фракций 0,25–0,01 мм		
					Микроагрегатный	Гранулометрический	Количество «истинных» микроагрегатов
Серо-коричневая (каштановая) почва							
1	8	0–25	25,81±0,582	58,93±1,327	73,04±1,64	41,33±0,930	31,77±0,710
		25–50	28,09±0,640	61,04±1,360	62,44±1,43	39,78±0,900	23,22±0,530
2	10	0–25	26,19±0,437	59,97±0,982	65,30±0,720	41,8±0,900	25,99±0,180
		25–50	27,68±0,460	65,06±1,037	60,52±0,656	39,06±0,343	25,07±0,313
3	10	0–25	26,53±0,439	58,31±0,934	73,96±0,809	41,93±0,933	33,23± (–0,124)
		25–50	27,81±0,469	59,94±1,000	73,05±0,670	40,82±0,922	32,30±(–0,252)
4	10	0–25	25,90±0,432	60,15±0,982	66,83±0,737	39,30±0,880	28,16± (–0,143)
		25–50	27,64±0,521	62,00±1,030	64,85±0,721	36,91±0,836	28,55± (–0,115)
5	15	0–25	26,49±0,440	59,47±0,983	75,29±0,804	40,14±0,915	34,90± (–0,111)
		25–50	27,73±1,271	60,20±1,018	74,44±0,670	39,72±0,903	34,93± (–0,233)
6	10	0–25	25,22±0,418	59,13±0,982	64,97±0,716	40,32±0,917	25,00± (–0,201)
		25–50	28,12±0,449	60,01±1,018	66,22±0,688	39,98±0,910	26,55± (–0,222)
Лугово-сероземная почва							
1	8	0–25	20,27±0,460	56,02±1,277	63,21±1,44	43,46±0,986	19,95±0,454
		25–50	23,22±0,524	59,68±1,344	65,54±1,49	40,93±0,932	24,78±0,558
2	10	0–25	33,44±0,360	67,90±0,175	63,03±0,693	38,88±0,885	23,94± 0,162
		25–50	27,25±0,409	61,90±1,017	69,93±0,670	38,39±0,869	21,92± 0,199
3	10	0–25	35,24±0,358	60,40±0,966	93,09±0,689	40,76±0,922	32,62±(–0,233)
		25–50	31,05±0,414	62,16±1,017	69,62±0,723	38,26±0,878	30,63± (–0,155)
4	10	0–25	32,44±0,360	58,18±0,996	74,03±0,771	41,80±0,952	27,07± (–0,181)
		25–50	28,32±0,405	59,12±1,000	72,12±0,721	39,16±0,892	30,68± (–0,171)
5	15	0–25	39,00±0,356	59,75±0,968	97,91±0,686	43,54±0,453	33,19±0,233
		25–50	32,46±0,414	61,80±1,090	74,92±0,728	41,12±0,426	32,50±0,302
6	10	0–25	30,40±0,361	64,77±0,974	63,49±0,687	39,16±0,642	24,92±0,045
		25–50	26,35±0,407	61,67±1,017	74,92±0,648	37,83±0,860	20,61± (–0,212)

Примечание. 1 – целина; 2 – озимая рожь (1-й урожай) → кукуруза (2-й урожай); 3 – люцерна; 4 – кукуруза (весенний посев); 5 – озимая рожь+вика+рапс (1-й урожай) → кукуруза+соя+сорго+амарант (2-й урожай) → ячмень+вика (3-й урожай); 6 – ячмень (на зерно, хозпосев).

Выводы

1. Длительными исследованиями на орошаемых почвах сухостепной и полупустынной зон установлен оптимальный вариант (озимая рожь+вика+рапс (1-й урожай) → кукуруза+соя+сорго+ амарант (2-й урожай) → ячмень+вика (3-й урожай)) промежуточных посевов кормовых культур, обеспечивающих поступление в слой 0–50 см почвы ежегодно соответственно 196,90 и 188,55 ц/га сухой массы растительных остатков. Со стерневыми и корневыми остатками в почву ежегодно поступило 6438,65 и 6175,01 кг/га углерода и питательных элементов (N – 313,07 и 299,79 кг/га; P₂O₅ – 157,52 и 150,84 кг/га; K₂O – 417,43 и 399,70 кг/га). Это способствовало повышению гумуса на 0,31 и 0,35 % по отношению к его исходному содержанию, положительному балансу гумуса (0,63 и 0,59 т/га), что оказало положительное влияние на микроагрегатный состав и водопропрочную структуру орошаемой серо-коричневой (каштановой) и лугово-сероземной почв.

2. Почва под вариантом озимая рожь+вика+рапс (1-й урожай) → кукуруза+соя+сорго+амарант (2-й урожай) → ячмень+вика (3-й урожай) характеризуется более удовлетворительным гранулометрическим составом, количеством «истинных» микроагрегатов (в слое 0–25 см – 34,90 и 33,17 %), микроагрегированностью, наименьшим фактором дисперсности (16,87 и 16,17 %). Водопропрочность структурных агрегатов >0,25 мм в пахотном слое возрасла за вегетационный период на 15,71–28,66 и 7,45–16,16 %.

3. Установлено, что для целинной серо-коричневой (каштановой) (содержание в слое 0–25 см почвы <0,01 мм – 57,34 %) и орошаемой (<0,01 мм – 58,54–59,84 %) почв структурный состав – тяжелосуглинистый; для целинной лугово-сероземной почвы (<0,01 мм – 55,96 %) – тяжелосуглинистый, а для орошаемой – на грани тяжелого суглинка (<0,01 мм – 58,11–59,27 %) и легкой глины (<0,01 мм – 60,98–61,91).

Литература

1. Макарычев С.В., Зайкова Н.И. Агрофизические особенности орошаемых черноземов правобережья р. Оби // Вестн. Алтайского гос. аграр. ун-та. 2014. № 2 (112). С. 40–45.
2. Подарь Л.П., Бессонова А.С. Агрегатный состав почвы // Плодородие и обработка почвы в севообороте: межвуз. сб. науч. ст. Кишинев : Кишиневский сельскохоз. ин-т им. М.В. Фрунзе, 1986. С. 114.
3. Синещеков В.Е., Слесарев В.Н., Ткаченко Г.И., Дудкина Е.А. Гранулометрический состав и микроагрегатный состав черноземов выщелоченных при минимизации основной обработки // Сиб. вестн. с/х науки. 2017. Т. 47, № 1. С. 18–24.
4. Мамедов Р.Г. Агрофизическая характеристика почв Приараксинской полосы. Баку : Элм, 1970. 320 с.
5. Бабаев М.П., Рамазанова Ф.М. Воспроизводство плодородия орошаемых серо-бурых почв аридной зоны Азербайджана // Живые и биокосные системы. 2017. № 21. URL: <http://www.jbks.ru/> (дата обращения: 23.01.2018).
6. Рамазанова Ф.М. Влияние промежуточных посевов кормовых культур на агрофизические показатели орошаемых почв сухой субтропической зоны Азербайджана // Российская сельскохозяйственная наука. 2017. № 4. С. 47–50.
7. Семендяева Н.В., Крупская Т.Н., Карловец Л.А. Влияние севооборотов на гранулометрический и микроагрегатный состав чернозема выщелоченного Новосибирского Приобья в длительных опытах // Агрохимия. 2015. № 1. С. 23–34.
8. Панфилов В.П. Физические свойства и водный режим почв Кулундинской степи. Новосибирск : Наука, 1973. 259 с.
9. Татаринцев В.Л. Структура гранулометрического состава и ее влияние на физическое состояние пахотных почв Алтайского Приобья. Барнаул : Изд-во Алтайского ГАУ, 2004. 179 с.
10. Ковда В.А. Почвенный покров, его улучшение, использование и охрана. М. : Наука, 1981. 182 с.
11. Ramazanova F.M., Babayev M.P. The Role of the Uninterrupted Sowings of Fodder Crops in the Current Process of Soil Formation // Soil-Water J. 2013. Vol. 2, № 2 (1). P. 943–950.
12. Роде А.А. Система методов исследования в почвоведении. Новосибирск : Наука, 1971. 91 с.
13. Рамазанова Ф.М. Влияние промежуточных посевов кормовых культур на плодородие орошаемых почв Азербайджана // Сиб. вестн. с/х науки. 2017. № 4. С. 103–109.
14. Бабаев М.П., Гурбанов Э.А., Рамазанова Ф.М. Основные виды деградации почв в Кура-Аразской низменности Азербайджана // Почвоведение. 2015. № 4. С. 501–512.
15. Салаев М.Э., Бабаев М.П., Джафарова Ч.М., Гасанов В.Г. Морфогенетические профили почв Азербайджана. Баку : Элм, 2004. 202 с.
16. Бабаев М.П. Орошаемые почвы Кура-Араксинской низменности и их производительная способность. Баку : Элм, 1984. 176 с.
17. Агрофизические методы исследования почв. М. : Наука, 1966. С. 5–42.
18. Вадюнина А.Ф., Корчагина З.А. Методы исследования физических свойств почв и грунтов. М. : Высшая школа, 1973. С. 5–82.
19. Доспехов В.А. Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследований). М. : Агропромиздат, 1985. 351 с.
20. Ramazanova F.M. Biology of the Irrigated Soils Under Fodder Crops in the Subtropical region of Azerbaijan // Soil Science in International Year of Soils 2015 : Intern. Soil Science Congress Eurasian Soil Science Societies. Sochi, 2015. P. 352–355.
21. Баламирзоев М.А., Саидов А.К., Мирзоев Э.М.-Р., Магомедов И.А. Морфогенез основных типов почв Терско-Сулакской низменности Дагестана // Вестн. Дагестанского науч. центра. 2012. № 46. С. 45–51.
22. Скрябина О.А., Боталов И.С. Физические свойства генетически различных почв Юсьвинского района Пермского края // Пермский аграр. вестн. 2014. № 4 (8). С. 51–56.
23. Mirza-zade R. Protection of soils as an important problem of protection of soil genofund of Azerbaijan // Soil Science in International Year of Soils 2015 : Intern. Soil Science Congress Eurasian Soil Science Societies. Sochi, 2015. P. 288–290.
24. Минашина Г.Г. Орошаемые почвы пустынь и их мелиорация. М. : Колос, 1978. 263 с.
25. Шейн Е.В., Гончаров В.М. Агрофизика. Ростов н/Д. : Феникс, 2006. 400 с.
26. Хитров Н.Б. Генезис, диагностика, свойства и функционирование глинистых набухающих почв Центрального Предкавказья. М. : Почвенный ин-т им. В.В. Докучаева, 2003. 504 с.
27. Кауричев М.С., Панов Н.П., Розанов Н.Н. [и др.] Почвоведение. М. : Агропромиздат, 1989. 719 с.
28. Салаев М.Э. Почвы Малого Кавказа. Баку : Изд-во АН АзССР, 1966. 329 с.
29. Гасанов В.Г. Состав и сезонные изменения минерализации речных, грунтовых и родниковых поймы р. Куры // Изв. АН Азерб. ССР. Сер. биол. наук. 1972. № 3. С. 65–71.
30. Ramazanova F.M. Influence of the Intermediate Sowings of Fodder Crops on the Agrofisical Indicators of the Irrigated Soils in Azerbaijan Dry Subtropics // Russian Agricultural Sci. 2017. Vol. 43, № 5. P. 410–413.
31. Рамазанова Ф.М. Воспроизводство плодородия орошаемых серо-коричневых (каштановых) почв Азербайджана посевами промежуточных культур // Науч. журн. Рос. НИИ проблем мелиорации. 2018. № 1 (29). С. 86–104. <http://www.rosniipm-sm.ru> (дата обращения: 21.01.2018).
32. Yong Z.L., Sprycher Y. Water-dispersible soil organic mineral particles: 1. Carbon and nitrogen distribution // Soil Sci. Soc. Am. J. 1979. Vol. 43. P. 324–328.

References

1. Makarychev S.V., Zaikova N.I. Agrofizicheskie osobennosti oroshaemykh chernozemov pravoberezh'ya r. Obi [Agrophysical features of irrigated chernozems of the right Bank of the Ob river]. *Vestn. Altaiskogo gos. agrar. un-ta*. 2014, No. 2 (112), pp. 40-45.
2. Podar' L.P., Bessonova A.S. [Aggregate composition of the soil]. *Plodorodie i obrabotka pochvy v sevooborote* [The fertility and soil cultivation in crop rotation]. Interuniversity collection of scientific articles. Chisinau: Kishinevskii sel'skokhoz. in-t im. M.V. Frunze, 1986, p. 114.
3. Sineshchekov V.E., Slesarev V.N., Tkachenko G.I., Dudkina E.A. Granulometricheskii sostav i mikroagregatnyi sostav chernozemov vyshchelochennykh pri minimizatsii osnovnoi obrabotki [Granulometrically composition and microaggregate composition of leached chernozem at minimizing the basic processing]. *Sib. vestn. s/kh nauki*. 2017, vol. 47, No. 1, pp. 18-24.
4. Mamedov R.G. *Agrofizicheskaya kharakteristika pochv Priaraksinskoj polosy* [Agrophysical characteristics of soils Priaraks strip]. Baku: Elm, 1970, 320 p.
5. Babaev M.P., Ramazanova F.M. Vosproizvodstvo plodorodiya oroshaemykh sero-burykh pochv aridnoi zony Azerbaidzhana [Restoration of fertility of irrigated grey-brown soils of the arid zone of Azerbaijan]. *Zhivye i biososnyye sistemy*. 2017, No. 21. Available at: <http://www.jbks.ru/> (accessed 23.01.2018).
6. Ramazanova F.M. Vliyanie promezhutochnykh posevov kormovykh kul'tur na agrofizicheskie pokazateli oroshaemykh pochv sukhoi subtropicheskoi zony Azerbaidzhana [Influence of intermediate crops of forage crops on agrophysical indicators of irrigated soils of dry subtropical zone of Azerbaijan]. *Rossiiskaya sel'skokhozyaistvennaya nauka*. 2017, No. 4, pp. 47-50.
7. Semendyaeva N.V., Krupskaya T.N., Karlovets L.A. Vliyanie sevooborotov na granulometricheskii i mikroagregatnyi sostav chernozema vyshchelochennogo Novosibirskogo Priob'ya v dlitel'nykh opytakh [Influence of crop rotations on granulometric and microaggregate composition of leached chernozem of Novosibirsk Ob region in long-term experiments]. *Agrokimiya*. 2015, No. 1, pp. 23-34.
8. Panfilov V.P. *Fizicheskie svoistva i vodnyi rezhim pochv Kulundinskoj stepi* [Physical properties and water regime of the Kulunda steppe soils]. Novosibirsk: Nauka, 1973, 259 p.
9. Tatarintsev V.L. *Struktura granulometricheskogo sostava i ee vliyanie na fizicheskoe sostoyanie pakhotnykh pochv Altaiskogo Priob'ya* [The structure of granulometric composition and its influence on the physical condition of the arable soils of the Altai Ob]. Barnaul: Izd-vo Altayskogo GAU, 2004, 179 p.
10. Kovda V.A. *Pochvennyi pokrov, ego uluchshenie, ispol'zovanie i okhrana* [Soil cover, its improvement, use and protection]. Moscow: Nauka, 1981, 182 p.
11. Ramazanova F.M., Babayev M.P. The Role of the Uninterrupted Sowings of Fodder Crops in the Current Process of Soil Formation. *Soil-Water J.* 2013, vol. 2, No. 2 (1), pp. 943-950.
12. Rode A.A. *Sistema metodov issledovaniya v pochvovedenii* [System of research methods in soil science]. Novosibirsk: Nauka, 1971, 91 p.
13. Ramazanova F.M. Vliyanie promezhutochnykh posevov kormovykh kul'tur na plodorodie oroshaemykh pochv Azerbaidzhana [Influence of intermediate crops forage crops on the fertility of irrigated soils of Azerbaijan]. *Sib. vestn. s/kh nauki*. 2017, No. 4, pp. 103-109.
14. Babaev M.P., Gurbanov E.A., Ramazanova F.M. Osnovnye vidy degradatsii pochv v Kura-Arazskoi nizmennosti Azerbaidzhana [Main types of soil degradation in the Kura-Araz lowland of Azerbaijan]. *Pochvovedenie*. 2015, No. 4, pp. 501-512.
15. Salaev M.E., Babaev M.P., Dzhafarova Ch.M., Gasanov V.G. *Morfogeneticheskie profily pochv Azerbaidzhana* [Morphogenetic profiles of soils of Azerbaijan]. Baku: Elm, 2004, 202 p.
16. Babaev M.P. *Oroshaemye pochvy Kura-Araksinskoj nizmennosti i ikh proizvoditel'naya sposobnost'* [Irrigated soils of the Kura-Araks lowland and their productive capacity]. Baku: Elm, 1984, 176 p.
17. *Agrofizicheskie metody issledovaniya pochv* [Agrophysical methods of soil research]. Moscow: Nauka, 1966, pp. 5-42.
18. Vadyunina A.F., Korchagina Z.A. *Metody issledovaniya fizicheskikh svoistv pochv i gruntov* [Methods of research of physical properties of soils]. Moscow: Vysshaya shkola, 1973, pp. 5-82.
19. Dospekhov V.A. *Metodika polevogo opyta (s osnovami statisticheskoi obrabotki rezul'tatov issledovaniia)* [Methodology of field experience (with the basics of statistical processing of research results)]. Moscow: Agropromizdat, 1985, 351 p.
20. Ramazanova F.M. Biology of the Irrigated Soils Under Fodder Crops in the Subtropical region of Azerbaijan. *Soil Science in International Year of Soils 2015*. Intern. Soil Science Songress Eurasian Soil Science Societies. Sochi, 2015, pp. 352-355.
21. Balamirzoev M.A., Saidov A.K., Mirzoev E.M.-R., Magomedov I.A. Morfogenez osnovnykh tipov pochv Tersko-Sulakskoi nizmennosti Dagestana [Morphogenesis of the main types of soils of the Terek-Sulak lowland of Dagestan]. *Vestn. Dagestanskogo nauch. tsentra*. 2012, No. 46, pp. 45-51.
22. Skryabina O.A., Botalov I.S. Fizicheskie svoistva geneticheskii razlichnykh pochv Yus'vinskogo raiona Permskogo kraia [Physical properties of genetically different soils of the Yusvinsky district of Perm region]. *Permskii agrar. vestn.* 2014, No. 4 (8), pp. 51-56.
23. Mirza-zade R. Protection of soils as an important problem of protection of soil genofund of Azerbaijan. *Soil Science in International Year of Soils 2015*. Intern. Soil Science Songress Eurasian Soil Science Societies. Sochi, 2015, pp. 288-290.

24. Minashina G.G. *Oroshaemye pochvy pustyn' i ikh melioratsiya* [Irrigated soils of deserts and their reclamation]. Moscow: Kolos, 1978, 263 p.

25. Shein E.V., Goncharov V.M. *Agrofizika* [Agrophysics]. Rostov-on-Don: Feniks, 2006, 400 p.

26. Khitrov N.B. *Genezis, diagnostika, svoistva i funktsionirovanie glinistyykh nabukhayushchikh pochv Tsentral'nogo Predkavkaz'ya* [The genesis, diagnosis, and operation of the properties of swelling clay soils of the Central Caucasus]. Moscow: Pochvennyi in-t im. V.V. Dokuchaeva, 2003, 504 p.

27. Kaurichev M.S., Panov N.P, Rozanov N.N. [i dr.] *Pochvovedenie* [Soil science]. Moscow: Agropromizdat, 1989, 719 p.

28. Salaev M.E. *Pochvy Malogo Kavkaza* [Soils of the Small Caucasus]. Baku: Izd-vo AN AzSSR, 1966, 329 p.

29. Gasanov V.G. Sostav i sezonnye izmeneniya mineralizatsii rechnyykh, gruntovykh i rodnikovykh poimy r.

Kury [Composition and seasonal changes in salinity, river, groundwater and spring floodplain of the river Kura]. *Izv. AN Azerb. SSR. Ser. biol. nauk.* 1972, No. 3, pp. 65-71.

30. Ramazanova F.M. Influence of the Intermediate Sowings of Fodder Crops on the Agrofisical Indicators of the Irrigated Soils in Azerbaijan Dry Subtropics. *Russian Agricultural Sci.* 2017, vol. 43, No. 5, pp. 410-413.

31. Ramazanova F.M. Vosproizvodstvo plodorodiya oroshaemykh sero-korichnevykh (kashtanovykh) pochv Azerbaidzhana posevami promezhutochnyykh kul'tur [Reproduction of fertility of irrigated gray-brown (chestnut) soils of Azerbaijan by crops of intermediate crops]. *Nauch. zhurn. Ros. NII problem melioratsii.* 2018, No. 1 (29), pp. 86-104. Available at: <http://www.rosniipm-sm.ru> (accessed 21.01.2018).

32. Yong Z.L., Sprycher Y. Water-dispersible soil organic mineral particles: 1. Carbon and nitrogen distribution. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 1979, vol. 43, pp. 324-328.

УДК 908:911.37

DOI 10.23683/0321-3005-2018-2-59-68

ГЕОЛОГО-ГЕОМОРФОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ БОЛЬШОЙ ИЗЛУЧИНЫ ДОНА КАК ФАКТОРЫ ИСТОРИЧЕСКОГО РАССЕЛЕНИЯ ЧЕЛОВЕКА В ЕЕ ГРАНИЦАХ

© 2018 г. И.С. Дедова¹, А.В. Селезнева¹

¹Волгоградский государственный социально-педагогический университет, Волгоград, Россия

GEOLOGICAL AND GEOMORPHOLOGICAL CONDITIONS OF THE BIG BEND OF DON AS FACTORS OF HISTORICAL RESETTLEMENT OF THE PERSON IN HER BORDERS

I.S. Dedova¹, A.V. Seleznyova¹

¹Volgograd State Social and Pedagogical University, Volgograd, Russia

Дедова Ирина Сергеевна – кандидат географических наук, доцент, кафедра географии, геоэкологии и методики преподавания географии, Волгоградский государственный социально-педагогический университет, пр. им. В.И. Ленина, 27, г. Волгоград, 400005, Россия, e-mail: itrofimova@yandex.ru

Irina S. Dedova - Candidate of Geography, Associate Professor, Department of Geography, Geoecology and a Technique of Teaching Geography, Volgograd State Social and Pedagogical University, V.I. Lenina Ave, 27, Volgograd, 400005, Russia, e-mail: itrofimova@yandex.ru

Селезнева Александра Васильевна – методист, учебное управление, Волгоградский государственный социально-педагогический университет, пр. им. В.И. Ленина, 27, г. Волгоград, 400005, Россия, e-mail: revina2006@yandex.ru

Aleksandra V. Seleznyova – Methodologist, Educational Management, Volgograd State Social and Pedagogical University, V.I. Lenina Ave, 27, Volgograd, 400005, Russia, e-mail: revina2006@yandex.ru

Рассматриваются особенности расселения человека в Большой излучине Дона – уникальном природном образовании. В формировании Большой излучины первостепенная роль принадлежит литолого-структурному фактору. Разнообразие минеральных ресурсов, благоприятная ландшафтно-климатическая обстановка, близость крупной речной системы Дона обусловили давнюю историю освоения рассматриваемой территории. Были выявлены четыре хронологических этапа расселения человека: ранний палеолит – поздний бронзовый век; ранний железный век – золотоордынский период; формирование казачьих стационарных поселений; современный этап. Анализ топографического расположения памятников и поселений указывает на освоение территорий, находящихся в диапазоне изогипс +100...+150 м до казачьего расселения более 50 % поселений, что было обусловлено хозяйственно-бытовым укладом жизни и сакральным фактором. Казачьи городки и хутора изначально возникали в интервале изогипс +30...+ 60 м (фактор укрытия в пойме или балочной системе). Современные хутора и станицы характеризуются преимущественным расположением на высотах +61...+120 м. Для донских поселений выделено три типа поселений, ориентированных по ходу геоморфологических элементов: площадной (поселения конусов выноса), линейный (вдоль бровки поймы, вдоль русел балок и т.д.), линейно-площадной (поселения обширных долин, адаптированных под оба склона). В геоморфологическом отношении освоены главным образом склоны нижнего плато (41 – более 70 % поселений), долины речных и балочных систем (50–70 %).

Ключевые слова: Восточно-Донская гряда, Большая излучина Дона, балка, овраг, склон, речная долина, поселение, исторический памятник.

Features of resettlement of the people in the Big Bend Don - unique natural education are considered. In formation of the Big Bend the paramount role belongs to a lithological and structural factor. A variety of mineral resources, favorable the landscape - climatic situation, proximity of large river system of Don have caused an old story of development of the considered territory. Four chronological stages of resettlement of the person have been revealed: an early paleolithic - a late bronze age; an early iron century - the period of Golden Horde state; formation the Cossack stationary settlements; present stage. The analysis of a topographical arrangement of monuments and settlements indicates development of the territories which are in range of isohypses of +100 ... +150 m before the Cossack resettlement more than 50 % of settlements that has been caused by economic and household tenor of life and a sacral factor. The Cossack towns and the farm initially arose in the range of isohypses +30...+ 60 m (a shelter factor in a flood plain or frame system). Modern the farm and the village are characterized by a primary arrangement at the heights of +61 ...+120 m. For the Don settlements three types of the settlements focused on the course of geomorphological elements are allocated: area (settlements of cones of carrying out), linear (along a flood plain brow, along courses of beams, etc.), linearly - area (settlements of the extensive valleys adapted under both slopes). In the

geomorphological relation mainly slopes of the lower plateau (41 - more than 70 % of settlements), valleys of river and frame systems (50-70 %) are mastered.

Keywords: *East Don Ridge, Big Bend of Don, beam, ravine, slope, river valley, settlement, historical monument.*

Геолого-геоморфологические особенности Большой излучины Дона

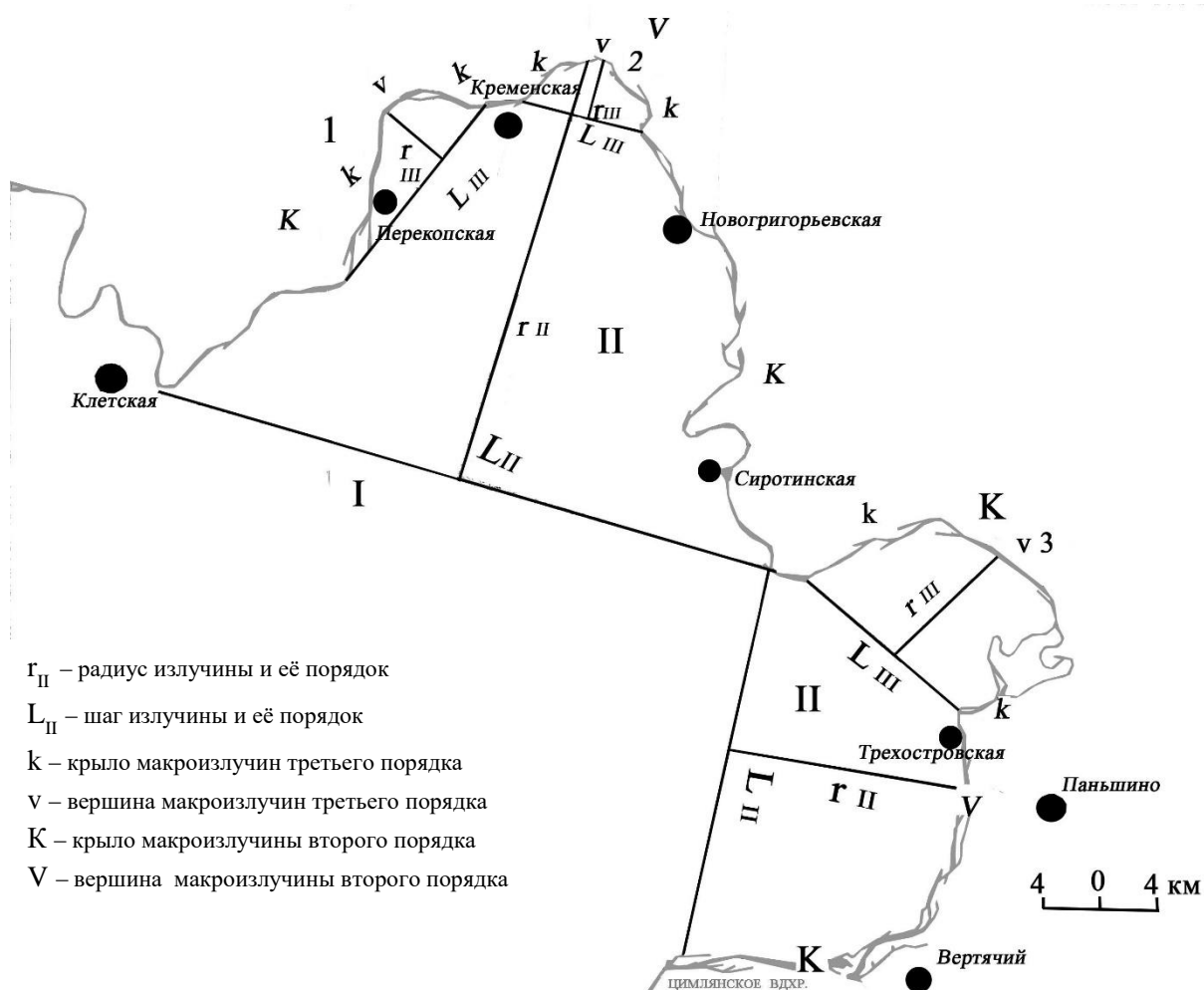
Рассмотрение в геоморфологии вопроса размещения памятников культуры и поселений – явление недавнее, обусловленное развитием экологического и эстетического направления в науке, а также формированием её социальной направленности. За последние 20–30 лет известны труды, касающиеся размещения средневековых городищ в бассейне р. Оки [1, 2], появления и развития селитьбы в Черноземной полосе ЕТР, Удмуртии и Крыму [3–5]. Для Нижнего Поволжья и бассейна Среднего Дона подобные исследования мало известны и опосредованы историческими проблемами расселения человека. А ведь рассматриваемая территория отличается большим количеством исторических памятников и поселений, которые отражают роль сложного рельефа в развитии типов поселений, их планировки, размещения. Особенно интересна с данной точки зрения Большая излучина Дона, которая несет следы как самых ранних человеческих культур, так и последних исторических событий. Здесь в условиях довольно сложного рельефа и пестрого геологического строения важную роль в формировании памятников и поселений сыграли ландшафтообразующее, стратегическое и сакральное значения рельефа, внимание на которых в рассмотренных ранее источниках не акцентируется. В данной статье рассматривается правобережная часть, в настоящее время являющаяся заповедной. Здесь создан природный парк Донской, функционируют палеонтологический памятник природы, охотозаказник. Несмотря на длительную историю освоения, природные особенности территории обладают хорошей сохранностью, уникальностью, неповторимостью и поэтому благоприятностью военно-стратегической, эколого-геоморфологической обстановки и сакрально-эстетической привлекательностью.

Большая излучина Дона – уникальное геологическое образование Волгоградской области. Её границы и выделение были обоснованы нами ранее [6]. Д.А. Тимофеев предложил именовать подобные образования долинными излучинами, так как деформации подвержены не только речное русло, но и вся речная долина с комплексом поймы и надпойменных террас. Причина этого явления освещалась нами и другими региональными исследователями ранее в целой серии публикаций. Мы связываем её

образование с действием тектоно-литологического фактора, когда на данном участке Дон огибает растущие локальные структуры, выделяемые в теле Доно-Медведицкого вала. Это позволяет разделить Большую излучину Дона на серию долинных излучин 2-го и 3-го порядков. Так, в границах Большой излучины прослежены Средняя (Кременская) и Малая (Сиротинско-Трехостровская) долинны меандры, которые, в свою очередь, разделены нами на Верховскую, Саушинскую и Хлебновскую долинны излучины 3-го порядка (рис. 1). Восходящие неотектонические движения за миоцен-четвертичный этап обусловили формирование высокого правобережья р. Дон в их границах и синхронизировали формирование речной долины с развитием каждой излучины. Геологическое строение территории отличается пестротой стратиграфического разреза, что обуславливает разнообразие её минерально-сырьевой базы, которая осваивалась человеком с далекого прошлого. В правобережной части известны месторождения известняка, фосфоритов, мела, охры; широко представлены проявления песчаника. Наиболее древними отложениями, выходящими на поверхность в центральной части Кременской излучины, являются породы среднего-верхнего карбона, представленные тёмноокрашенными известняками и доломитами, часто кремневыми [7, 8].

Берег Дона по линии ст. Старогригорьевская – х. Шохин сложен толщами средней юры (слоистые серые глины и пески байосского яруса), а также пермо-триаса [9]. Последние представлены красноцветными глинами и песчаниками с находками скелетов рептилий [10, 11]. Среднеюрские байосские отложения J₂b_j плащеобразно, со стратиграфическим несогласием, перекрывают породы C₂₋₃ и пермо-триаса. Крайней южной территорией их развития являются окрестности ст. Сиротинской.

Малая излучина Дона выполнена преимущественно отложениями мелового возраста. Северная её оконечность сложена белоснежным писчим мелом и мергелем туронского яруса верхнего мела, подстилаемого песками и песчаниками альб-сеномана. Контакт пород сеномана и турона прослеживается по эрозионным врезам оврагов, а перекрытие прочной породы нестойкой способствует созданию причудливых экзогенных форм рельефа. К югу они сменяются терригенными отложениями сантонского и кампанского ярусов верхнего мела.



Цифрами обозначены излучины: 1 – Саушинская; 2 – Верховская; 3 – Хлебновская

Рис. 1. Большая излучина Дона / Fig. 1. Big Bend of Don

Сантонские отложения – K_{2st} – представлены известковистыми опоками, залегающими на мергеле с примесью фосфоритов и фауны губок и перекрывающимися алевролитами и песчаниками [7]. Кампанский ярус K_{2cp} слагает межбалочные водоразделы, где он сохранился от размыва. Породы кампана представлены песчаниками, опоками и глинами светло-серой и светло-коричневой окраски.

В геоморфологическом отношении территория является равниной, обладающей пластово-ярусным строением и представлена Восточно-Донской грядой. Её средняя высота составляет +180...+200 м, максимальная абсолютная высота отмечена в окрестности ст. Трехостровской +252 м. Верхнее плато ровное, плоское, это реликт морского дна (позднемайкопский трансгрессивный водоем). Поверхность покрыта песками и песчаниками олигоцен-миоцена мощностью 10–20 м. Древние и современные эрозионно-денудационные процессы способствовали разобщению на ряд изолированных

гряд и холмов, известных под местным названием Венцы. Склоны Венцов, в особенности северные, довольно крутые, 10–20°, что объясняется слабым наклоном пластов на юг [12].

Нижний ярус рельефа образовался при разрушении верхнего яруса и перекрыт мощным плащом делювия. Так, у х. Хлебный и Зимовейский нами описан делювий мощностью 10 и 6,5 м соответственно. Формирование нижнего яруса связано с поздним миоцен-плиоценом, когда засушливые климатические условия способствовали активному протеканию эрозионных и склоновых процессов. Поэтому склон, разделяющий верхний и нижний ярусы, имеет сложное строение. Для него характерны крутой уступ (до 40–45°), выработанный в коренных породах (опоках, песчаниках и др.), склон транзита, покрытый маломощными отложениями, и склон аккумуляции, перекрытый делювием.

Нижний ярус рельефа имеет высоту +120...+150 м, поэтому относительная высота склона составляет

80...100 м. Нижний ярус представляет собой слабо-наклонную равнину, иногда круто обрывающуюся к Дону или пойме. Склон и нижний ярус сильно расчленены эрозионной сетью, местами образующей местности типа североамериканского бедленда. Для Восточно-Донской гряды характерны как древние эрозионные формы (долины малых рек, балки), так и современные (овраги, промоины, рывины). Значительной протяженностью (около 10–12 км) обладают так называемые долинно-балочные системы, верховья которых – это балка, а около 50–60 % от общей длины – речная долина. Их общими чертами являются наличие двух надпойменных террас, вскрытие водоносного горизонта на высоте +90...+100 м, формирование асимметрии берегов.

Овражная сеть отличается следующими географическими закономерностями в распространении: 1) для верхнего яруса Кэр составляет 0 км/км², что связано с отсутствием балок и оврагов; 2) уступ, разделяющий ярусы, обладает Кэр 1,9 км/км²; 3) для нижнего яруса Кэр составляет около 2,4 км/км²; 4) склоны наиболее крупных балок и речных долин имеют Кэр 3,4 км/км² [6].

Правобережье Дона отличается большей пестротой в распределении овражной сети. Особенно высока густота горизонтального эрозионного расчленения (Кэр) в районе ст. Клетской. В целом для гряды характерна амплитуда колебаний величины Кэр – 0,1–1,9 км/км². Средние значения достигают 0,35 км/км². Правый берег Дона, а также водосборы отдельных степных малых рек (например, р. Голубая) обладают Кэр более 1,6 км/км².

Для Восточно-Донской гряды характерны максимальные плотности оврагов – от 1 до 6 и 19 шт/км². Особенностью оврагов является наличие глубокого эрозионного вреза (до 100 м), что обуславливает их V-образный профиль. Меньшие показатели характерны для балок и заросших лесом лощин. В среднем их количество составляет 0,7 шт/км² [13].

Величины глубины местных базисов эрозии колеблются от 10–15 до 120–130 м. Преобладают территории с глубиной расчленения 50–100 м в правобережье Дона – 58,7 %. Средние уклоны поверхности в пределах исследуемой территории изменяются от 0°15' до 8° при явном преобладании значений 1–2° и 2–4° (50 %). Анализ карты средних уклонов свидетельствует, что Восточно-Донская гряда характеризуется следующим распределением уклонов: треть балочных бассейнов имеет пологие склоны до 1° (24,5 %). Максимальные уклоны принадлежат верховьям рек, а также крупным балочным системам, занимающим приводораздельные участки с наибольшими абсолютными высотами (29,5 %).

На склонах и днищах балок, а также в местах выхода мела и возле населенных пунктов, где эрозионный процесс активизируется антропогенным фактором, широко развиты овраги и промоины. Их количество резко возрастает до 5–10 шт/км² в пределах уступа и нижнего яруса, а в местах выхода мела и окрестностях населенных пунктов – более 10 шт/км². Балки имеют значительную длину (от 1,25 до 10,75 км), их долины широкие (от 0,5 км и более), корытообразные, склоны пологие. Верховья балок покрыты лесом из дуба, осины, вяза, терна, спиреи, часто здесь разгружается водоносный горизонт.

Рассматриваемая территория освоена человеком частично, 50–60 % земельного фонда приурочено к землям сельскохозяйственного назначения и селитьбы. Антропогенная активизация экзогенных процессов характерна для окрестностей крупных населенных пунктов, отдельных карьерных разработок, площадей пахотных угодий. Коэффициент распаханности Восточно-Донской гряды около 50 %.

Периодизация заселения Большой излучины Дона. Геоморфологические условия размещения памятников истории и поселений

Развитие взаимосвязанных склонами транзита нижнего и верхнего ярусов рельефа, широкое развитие эрозионной сети, создающей ландшафтное разнообразие территории и выходы источников с пресной питьевой водой, значительные отметки высот способствовали давнему освоению Большой излучины Дона (рис. 2). Наиболее древние места проживания и деятельности человека от палеолита до бронзового века формировались здесь под воздействием не только ландшафтных условий (выходы минерального сырья, наличие источников воды в балках, развитие разнотравных степей на плодородных почвах, служивших ценной кормовой базой для животноводства, обилие рыбных ресурсов), но и сакральных факторов (обожествление р. Дон, интерпретация излучины как символа цикличности, использование останцов как мест упокоения).

Так, тесная связь с геологическим строением местности прослеживается в расположении верхнепалеолитических стоянок (40–10 тыс. лет назад) – Новогригорьевская и Селезнева балки в окрестностях ст. Кременской, имеющие минимальные выходы четвертичных отложений и значительные проявления окремнелых известняков и серо-голубых кремней среднего-верхнего карбона [14]. Они стали для древнего человека весьма перспективными для организации мастерских каменных индустрий, которых на ограниченной площади около 25 км² выявлено 3.

Мастерские располагались на конусах выноса, высокой донской пойме и частично в балках, на абсолютных высотах +40...+50 м, что делало их положение весьма защищенным от неблагоприятных погодных условий мологосекснинско-остапковской ледниковой эпохи и удобным по отношению к источнику воды – р. Дон. Более поздняя неолитическая (орловская) культура известна в Большой излуцине Дона обширным нахождением у х. Задоно-Авиловского, где меловые породы подстилаются сеноманскими песками и прочными кварцевыми песчаниками, также широко использовавшимися для изготовления каменных орудий, а сантонская глина – для гончарного производства. Здесь прослеживается тесная связь человека с Доном, так как хозяйственная часть стоянки приходилась на донскую пойму. Это было стационарное поселение, датированное концом V – началом IV тыс. до н.э. Геоморфологические условия данной территории представлены склонами нижнего яруса рельефа с абсолютными высотами +120...+125 м и незначительным наклоном территории к долине Дона (4–4,5°). К западу от Задоно-Авиловской стоянки отмечается более позднее энеолитическое поселение репинской культуры (х. Репин) полуоседлых скотоводов [15]. Около 4500 лет назад суббореальная климатическая флуктуация приводит к увлажнению климата донских степей, обилию кормовых ресурсов для животноводства и развитию обширных площадей плодородных земель. Близость проявлений песчаника также играет роль в размещении поселения. Как и Задоно-Авиловская, Репинская стоянка приурочена к нижнему ярусу, представляющему пологонаклонную равнину крутизной 2,5°, с абсолютными высотами +100...+105 м.

Последующий бронзовый век, датируемый в степях Волго-Урала III–IV тыс. до н.э., отличается активным освоением тремя археологическими культурами (ямной, срубной, катакомбной) Большой излуцины Дона [12]. Доказательством этому служат свидетельства, по функциональным характеристикам играющие сакральное и хозяйственно-бытовое значение (селища). Поселения располагались как на берегу р. Дон (Задоно-Авиловское, Зимовейское на абсолютных высотах +120...+100 м), так и в балках, на надпойменных террасах и верхней части конусов выноса с абсолютной высотой +80...+100 м (Хлебный, Акатовский). Как правило, размещались поселения на склонах теневой экспозиции (за исключением селища Хлебное).

Изменения в идеологии степных племен в конце IV тыс. до н.э. обусловило сооружение курганов над

могилами умерших сородичей. Они олицетворяли мировую гору, дерево или ось, которые объединяли мир богов, мир людей и подземный мир. Сохранившиеся курганы Большой излуцины (более 30) имеют вид как отдельных холмов округлой формы, так и насыпей. В расположении курганных групп отмечается их более высокое гипсометрическое положение, чем у самих поселений (+120...+160 м), за исключением погребения у х. Хмелевского (могильники из сырцового кирпича на абс. высоте +70 м), приуроченность к верхним частям склонов крупных балок (4 курганные группы – у хуторов Камышинский, Дубовой, Хлебный, ст. Сиротинской), склонам нижнего плато (курганная группа х. Нижнегерасимовский, Трехостровское святилище) и верхнего плато (курганная группа у ст. Трехостровской). Здесь сказывалась интерпретация возвышенных участков рельефа, гряд и холмов с близостью к небесному миру и верховным божествам. Особое значение играло в жизни человека святилище Бога Огня (Агни), также известное как огневище (рис. 2). Оно характеризуется наилучшей сохранностью в рельефе и расположено в географическом центре Малой излуцины, олицетворяющей циклические представления о времени. Культовое сооружение является структурой округлой формы, диаметром по внешнему радиусу до 200 м. В центре расположен холм высотой около 2 м, диаметром около 30 м. Стратиграфия культурного слоя представлена прослаиванием мелового щебня, обломков огнеупора и обожженного сырцового кирпича, древесного угля, что позволило восстановить облик большой печи с длительным тлением древесины. Этот комплекс просуществовал около 100 лет, а затем был разрушен [15].

Примерно в XII в. до н.э. прекращают свое существование срубная и катакомбная культурно-исторические общности. Степи Евразии в значительной степени заустевают, начинается период, от которого осталось мало археологических памятников. Вероятной причиной этого явления считается наступление нового периода аридизации (иссушения) степей. Большая часть населения вынуждена была покинуть степную зону, а оставшаяся, адаптируясь к новым экологическим условиям, все более специализировалась на скотоводстве, постепенно переходя к его кочевой форме. Ранний железный век (VIII в. до н.э. – VI в. н.э.) характеризуется в Большой излуцине единичным грунтовым могильником у х. Зимовского, расположенным в верхней части склона балочной системы, на высоте +100 м.

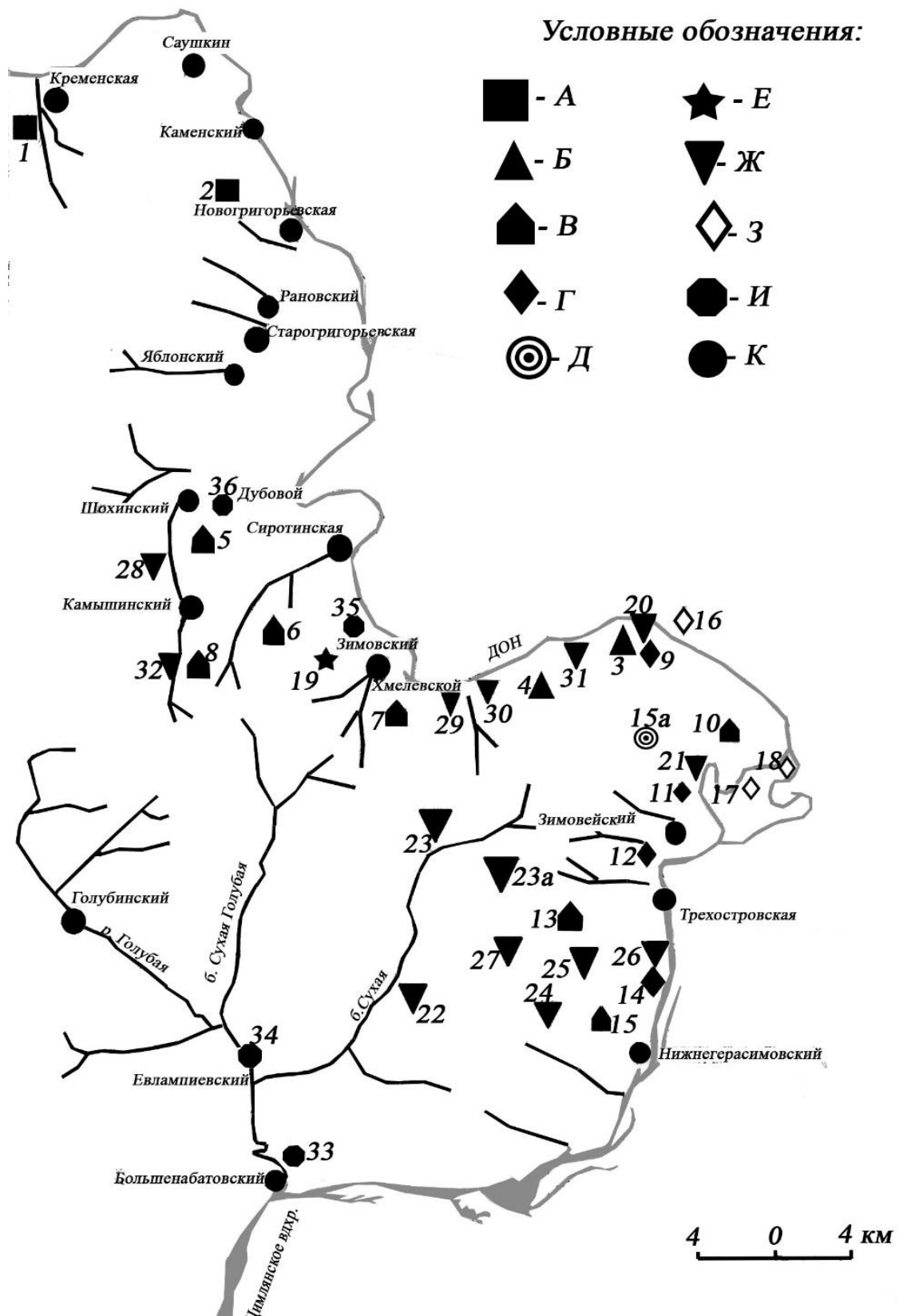


Рис. 2. Размещение поселений и памятников в границах Большой излучины Дона
/ Fig. 2. Placement of settlements and monuments within the boundaries of the Big Bend of Don

Буквами обозначены поселения и стоянки: А – верхний палеолит; Б – неолит-энеолит; В – курганы бронзового века; Г – селища бронзового века; Д – Трехостровское святилище; Е – памятники раннежелезного века; Ж – казачьи поселения, существовавшие с XVIII до 40-х гг. XX в.; З – средневековые казачьи городки; И – поселения, существовавшие с XVIII до 80–90-х гг. XX в.; К – современные поселения. Цифрами на рисунке обозначены: 1 – стоянка Балка Селезнева; 2 – стоянка Новогригорьевская; 3 – стоянка Задано-Авиловская; 4 – стоянка Репино; 5 – курганная группа у х. Дубового; 6 – курганная группа у ст. Сиротинской; 7 – курганы у х. Хмелевского; 8 – курганы у х. Камышинского; 9 – Задано-Авиловское селище; 10 – курганы у х. Хлебного; 11. – селище у х. Хлебного; 12 – селище у х. Зимовейского; 13 – курганы у ст. Трехостровской; 14 – селище у х. Акатовского; 15 – курганная группа у х. Нижнегерасимовский; 15а – Трехостровское святилище Бога Агни; 16 – Иловлинский городок; 17 – Паншин (Рыгин) городок; 18 – Качалин городок; 19 – курганы у х. Зимовского; 20 – х. Задано-Авиловский; 21 – х. Хлебный; 22 – х. Бирючков; 23 – х. Родионов; 24 – х. Верхнегерасимовский; 25 – х. Верхне-Акатовский; 26 – х. Нижне-Акатовский; 27 – х. Кисляковский; 28 – х. Хохлачев; 29 – х. Караицкий; 30 – х. Подгорский; 31 – х. Репин; 32 – х. Камышинка; 33 – х. Малонабатовский; 34 – х. Евлампиевский; 35 – х. Зимовский; 36 – х. Дубовой / Settlement and archaeological park: A - the upper Palaeolithic; B - the Neolithic-Eneolithic; C - bronze age barrows; D - settlements of the bronze age; E - Trehostrovskaya sanctuary; F - the monuments of the early iron age; G- Cossack settlements that existed from the XVIII to the 40-ies of XX century; H - Cossack medieval towns; I - settlements that existed from the eighteenth to the 80s and 90s of the XX century; J - the modern settlement. The figures in the picture indicate: 1 - parking Beam Selezneva; 2 - parking Novogrigorevskaya; 3 - parking Zadono-Avilovskaya; 4 - parking Repino; 5 - kurgan group at farm Dubovoy; 6 - kurgan group at stanitsa Sirovinskaya; 7 - kurgans at farm Khmelevskoy; 8 - the kurgans at farm Kamyshinsky; 9 - Zadono-Avilovskaya village; 10 - the kurgans at farm Hlebnii; 11 - the settlement at farm Hlebnii; 12 - the settlement at farm Zimoveiskiy; 13 - the kurgans near the stanitsa Trehostrovskaya; 14 - the settlement at farm Akatovskiy; 15 - the kurgans group at farm Nizhnegerasimovskiy; 15A - Trehostrovskaya sanctuary of the God Agni; 16 - Ilovlinisky town 17 - Panshin (Rygin) town; 18 - Kachalin town; 19 - the kurgans at farm Zimovskiy; 20 - farm Zadono-Wilowski; 21 - farm Hlebnii; 22 - farm Biryukov; 23 - farm Rodionov; 24 - farm Verhnegerasimovskiy; 25 - farm Upper-Akatuski; 26 - farm Lower-Akatuski; 27 - farm Kislyakovskiy; 28 - farm Khokhlachev; 29 - farm Karaitskiy; 30 - farm Podgorskiy; 31 - farm Repin; 32 - farm Kamyshinka; 33 - farm Malonabatovskiy; 34 - farm Evlampievskiy; 35 - farm Zimovskiy; 36 - farm Dubovoy

Последовавший период Средневековья превратил рассматриваемую территорию в обширные кочевья Хазарского каганата, а затем и Половецкого ханства, следы которых до настоящего времени не сохранились. Зато встречены более поздние золотоордынские поселения (Задано-Авиловское) и захоронения у ст. Трехостровская и Сиротинская. Интересно отметить, что в расположении курганов как бронзового века, так и Средневековья отмечаются сходные гипсометрические и геоморфологические условия.

С формированием казачьей этноисторической общности Большая излучина приобретает значение стратегическое. При размещении поселений все чаще играют роль выход к пляжам и руслу р. Дон, контроль удобных для переправ мест, защита поселений от набегов кочевников Крымского и Астраханского ханств. Так, известно, что Малая излучина Дона именуется у казачества маяком за хороший обзор левого берега [12]. Многочисленные казачьи хутора и станицы в своем расположении обладают целым рядом сходных черт. Как правило, основная их масса связана с крупными балочными и долинно-балочными системами, а также с конусами выноса, открывающимися на донскую пойму, что снижает риск затопления поселения во время половодья, а также делает его более сокрытым с суши. Наиболее древними казачь-

ими поселениями являются ныне исчезнувшие Паншин городок (конец XVI – начало XVII в.), Иловлинский городок (XVII в.), Качалин городок (первая половина XVII в.). Как правило, они были связаны с поймой или Качалинским островом (западная и северная части), что делало их практически неуязвимыми. В настоящее время в рельефе они выражены слабо и представлены ямами-землянками и полуземлянками, практически сnivelированными валами и насыпями, детализируются по находкам нумизматического материала, металлических изделий, обломков строительного камня и др. [16, 17]. С конца XVII в. известны на Дону правобережные станицы и хутора, упомянутые в многочисленных источниках XVIII в., – Трехостровская, Сиротинская, Старогригорьевская, Новогригорьевская, Кременская и др. Основной причиной увеличения числа жителей в Большой излучине Дона является политическая нестабильность в России в XVII в., обусловленная смутой, польской интервенцией и другими политическими событиями, способствовавшими оттоку населения в среднее и нижнее течение Дона и Волги. Станицы основываются на высоком правобережье, как правило, в амплитудах около 20 м. Поселения привязывались также к выходам пресной родниковой воды, близости пойменного леса, выгоды стратегической пози-

ции местности. Таковыми условиями обладали крупные долинные и балочные системы с наличием надпойменных эрозионных террас, конусы выноса, возвышавшиеся над поймой на несколько метров. Ориентировка улиц была также обусловлена геоморфологическим фактором. По данному критерию нами выделено 3 типа поселений: веерообразный (приуроченный к конусам выноса) (х. Хлебный, Нижне-Акатовский), линейный (вдоль балочных русел, тальвегов, х. Дубовой, Камышинка и др.) и площадной (приуроченный к пойме р. Дон, обширным балочным террасам, ст. Трехостровская, х. Хмелевской, ст. Сиротинская). В XVIII в. казацкие городки с Качалинского острова переносятся на левобережные террасы, где существуют и поныне (х. Паньшино, ст. Качалинская).

К концу XIX – началу XX в. Большая излучина Дона является вполне освоенной человеком. Сложный рельеф её центральной части также заселяется, и к 1941 г. в верховьях балок, на склонах верхнего яруса отмечены хутора (например, Кисляковский, Кубарожный, Верхне-Акатовский) линейного типа расселения, что обусловлено активным освоением целины, распашкой степей, развитием товарного животноводства. Однако к началу 50-х – 80-м гг. около 12 поселений (главным образом хутора) исчезает, что было связано с ведением боевых действий в Большой излучине Дона и дальнейшим укрупнением колхозов.

В настоящее время в рельефе они выражены разрушенными зданиями, остатками ЛЭП, ямами фундаментов, насыпями, валами (таблица).

Таким образом, несмотря на сложность рельефа Большой излучины Дона, его контрастности, она в течение длительного периода времени заселялась человеком. В ходе историко-географического обзора нами было проанализировано расположение 49 поселений и памятников, из которых 4 % относятся к стоянкам каменного века, 28 – к поселениям и сакральным памятникам эпохи бронзы, 6 % – к захоронениям и селищам золотоордынского времени. Средневековых казацких поселений выделено 3 (6 %), и все они приурочены к XVII в. и локализованы в пойме. С конца XVIII в. формируется станично-хуторской тип расселения, освоивший высокое правобережье (основная часть поселений и памятников – 56 %). В результате было выявлено, что в отличие от предыдущих временных эпох увеличивается их доля на отметках свыше +150 м. Из них в начале XX в. насчитывалось 16 поселений с линейным типом расселения; 9 – веерообразным; 5 – площадным. С середины до 70-х гг. XX в. с территории Большой излучины Дона исчезает 16 хуторов, а часть поселений (ст. Старогригорьевская, х. Яблонский, Саушкин, Нижнегерасимовский и т.д.) резко сокращают свою площадь. В настоящее время известно 15 станиц и хуторов с постоянным числом жителей.

Геоморфологические условия размещения памятников истории и поселений в Большой излучине Дона / Geomorphological conditions of placement of historical monuments and settlements in the Big Bend of Don

Эпоха	Геоморфологическое положение	Абсолютная высота	Уклоны земной поверхности	Экспозиция склона
Каменный век	Склоны нижнего плато – 75 %; склоны нижнего плато с частичным выходом на донскую пойму – 25 %	+30...+50 м – 25 %; +100...+120 м – 75 %	0–0,5° – 25 %; 2–4° – 74 %	Теневая экспозиция – 75 %; междуречье – 25 %
Эпоха бронзы – золотой орды	Нижнее плато – 41 %; склоны балок – 50 %; склоны верхнего плато – 9 %	+50...+100 м – 40 %; +101...+150 м – 58 %; свыше 150 м – 2 %	0–2° – 50 %; 2–4° – 43 %; 4 – 6° – 7 %	Теневая экспозиция – 64 %; солнечная экспозиция – 43 %; междуречье – 3 %
Казацкие городки	Пойма, пойменный остров – 100 %	+30...+40 м	0–0,5° – 100 %	–
Поселения, существовавшие с XVIII и исчезнувшие в середине XX в.	Балочные и речные долины, пойма – 63 %; склоны нижнего плато – 19 %; склоны верхнего плато и верховья балок – 18 %	+30...+60 м – 60 %; +61...+120 м – 19 %; +130 ...+150 м – 25 %; свыше 150 м – 6 %	0–1° – 63 %; 1–5° – 35 %; 5–12° – 2 %	Теневая экспозиция – 75 %; солнечная экспозиция – 19 %; междуречье – 6 %
Современные поселения	Долины балочных и малых речных систем – 46 %; склоны нижнего плато с выходом на донскую пойму – 46 %; межбалочный водораздел – 8 %	+30...+60 м – 36 %; +61...+120 м – 64 %	0–1° – 62 %; 1–5° – 38 %	Оба склона или междуречье – 52 %; теневая экспозиция – 38 %; солнечная экспозиция – 10 %

Выводы

1. Большая излучина Дона – уникальное ландшафтное образование, обладающее ресурсной, эстетической, военно-стратегической привлекательностью. Несмотря на сложный расчлененный рельеф, она издавна заселялась человеком. В качестве основных векторов расселения выступают речные долины и балочные системы, концентрирующие гидрологические и биологические ресурсы.

2. Нами разработана периодизация расселения человека в Большой излучине Дона, включающая четыре основных этапа освоения её территории и природных ресурсов. Первым этапом можно считать период ранний палеолит – эпоха бронзы (около 100 000 лет назад – I тыс. до н.э.), второй этап связан с ранним железным веком – золотоордынским средневековьем (VIII в. до н.э. – XIII–XIV вв. н.э.), третий – освоение Большой излучины казачеством (XVI–XVIII вв.), четвертый этап – современный, характерный для XX в. На последнем этапе присутствует сокращение поселений в Большой излучине Дона (ведение боевых действий в ходе Сталинградской битвы, укрупнение коллективных хозяйств в послевоенное время, миграции населения в города и крупные станицы и т.д.).

3. Анализ топографического расположения памятников и поселений указывает на освоение территорий, находящихся в диапазоне изогипс +100...+150 м до казачьего расселения (XVI–XVII вв.), – более 50 % поселений, что было обусловлено хозяйственно-бытовым укладом жизни и сакральным фактором. Казачьи городки и хутора изначально возникали в интервале изогипс +30...+ 60 м (фактор укрытия в пойме или балочной системе). Современные хутора и станицы характеризуются преимущественным расположением на высотах +61...+120 м. Для донских поселений выделено три типа поселений, ориентированных по ходу геоморфологических элементов: площадной (поселения конусов выноса), линейный (вдоль бровки поймы, вдоль русел балок и т.д.), линейно-площадной (поселения обширных долин, адаптированных под оба склона).

4. Наиболее освоенными геоморфологическими элементами рельефа являются склоны нижнего плато, балочных систем, а также речные и балочные долины, что обусловлено благоприятными ландшафтными условиями. Из балочных склонов наиболее освоены склоны теневой экспозиции (таблица), что в условиях сухостепной зоны обусловлено более комфортными микроклиматическими показателями.

Литература

1. *Евина А.И.* Геоморфологические условия возникновения городов в бассейне Верхней и Средней Оки в эпоху Средневековья : автореф. дис. ... канд. геогр. наук. М. : Ин-т географии, 2004. 24 с.
2. *Лихачева Э.А.* Экологические хроники Москвы. М. : Медиа-ПРЕСС, 2007. 304 с.
3. *Харченко С.В.* Развитие представлений о рельефе как факторе ветрового микроклимата города // Геоморфологи. Новое поколение. М. : Медиа-ПРЕСС, 2013. Вып. 2. С. 38–45.
4. *Кириллова А.В.* Особенности геоморфологического положения памятников истории и архитектуры в Удмуртии // Геоморфологи. Новое поколение. Вып. 2. М. : Медиа-ПРЕСС, 2013. С. 31–37.
5. *Сахнова Н.С., Войтеховский Д.В.* Геоморфологический фактор в развитии городов Крыма // Уч. зап. Таврического нац. ун-та им. В.И. Вернадского. География. 2014. Т. 27 (66), № 3. С. 13–20.
6. *Трофимова (Дедова) И.С.* Формирование рельефа больших коренных излучин Волги и Дона (на примере Волгоградской области) : автореф. дис. ... канд. геогр. наук. М. : Ин-т географии, 2008. 24 с.
7. Геология СССР: Ростовская, Волгоградская, Астраханская области, Калмыцкая АССР / под ред. А.В. Белова. М. : Недра, 1970. Т. 46. 667 с.
8. *Яриков Г.М., Урусов А.В., Золотухина Г.П., Кетат О.Б., Сарычева А.И., Кольцова В.В., Смирнов А.В., Лотарева Э.В., Григорьев Н.В.* Литолого-стратиграфический разрез Николаевской опорной скважины № 2 // Вопросы геологии и нефтегазоносности Волгоградской области. Л., 1965. Вып. 3. С. 93–112.
9. *Брылев В.А.* Эволюционная геоморфология юго-востока Русской равнины. Волгоград : Перемена, 2006. 350 с.
10. *Ярков А.А.* Палеогеографические реконструкции как фактор обоснования географо-палеонтологических особо охраняемых природных территорий Волгоградской области : автореф. дис. ... канд. геогр. наук. Волгоград, 1999. 21 с.
11. *Брылев В.А., Сагалаев В.А.* Особо охраняемые природные территории : учеб.-справ. пособие. Волгоград : Перемена, 2000. 260 с.
12. *Брылев В.А., Дедова И.С., Загарев В.В., Карпенко Р.В.* География Иловлинского района: геология, природа, история, экология, экономика. М. : Планета, 2017. 128 с.
13. *Дедова И.С.* Морфогенетическая характеристика эрозионной сети природного парка Донской // Грани познания. 2015. № 8 (42). С. 67–73. URL: <http://grani.vspu.ru/files/publics/1449490511.pdf> (дата обращения: 20.12.2017).
14. *Нехорошев П.Е.* Новая верхнепалеолитическая стоянка на Среднем Дону // Древности Волго-Донских степей. Волгоград : Перемена, 1994. Вып. 4. С. 81–88.
15. Археологическая энциклопедия Волгоградской области / под ред. А.С. Скрипкина. Волгоград : Изд-во ВГУ, 2009. 334 с.

16. Скворцов Н.Б. К истории Паншинского городка // Грани познания. 2013. № 5 (25). С. 1–7. URL: <http://grani.vspu.ru/files/publics/1378465830.pdf> (дата обращения: 15.01.2018).

17. Скворцов Н.Б. К истории старого Качалинского казачьего городка // Грани познания. 2013. № 6 (26). С. 83–89. URL: <http://grani.vspu.ru/1381297476.pdf> (дата обращения: 15.01.2018).

References

1. Evina A.I. *Geomorfologicheskie usloviya vznikeneniya gorodov v basseine Verkhnei i Srednei Oki v epokhu Srednevekov'ya* : avtoref. dis. ... kand. geogr. nauk [Geomorphological conditions of the cities in the basin of Upper and Middle Oka in the middle ages]. Moscow: In-t geografii, 2004, 24 p.

2. Likhacheva E.A. *Ekologicheskie khroniki Moskvy* [Environmental chronicles of Moscow]. Moscow: Media-PRESS, 2007, 304 p.

3. Kharchenko S.V. [Development of ideas about relief as a factor of wind microclimate of the city]. *Geomorfologi. Novoe pokolenie* [Geomorphologist. New generation]. Moscow: Media-PRESS, 2013, iss. 2, pp. 38-45.

4. Kirillova A.V. [Features of geomorphological position of historical and architectural monuments in Udmurtia]. *Geomorfologi. Novoe pokolenie* [Geomorphologist. New generation]. Moscow: Media-PRESS, 2013, iss. 2, pp. 31-37.

5. Sakhnova N.S., Voitekhovskii D.V. Geomorfologicheskii faktor v razvitiu gorodov Kryma [Geomorphological factor in the development of cities in Crimea]. *Uch. zap. Tavricheskogo nats. un-ta im. V.I. Vernadskogo. Geografiya*. 2014, vol. 27 (66), No. 3, pp. 13-20.

6. Trofimova (Dedova) I.S. *Formirovanie rel'efa bol'shikh korennykh izluchin Volgi i Dona (na primere Volgogradskoi oblasti)* : avtoref. dis. ... kand. geogr. nauk [Formation of the relief of large indigenous megabends of the Volga and Don (on the example of the Volgograd region)]. Moscow: In-t geografii, 2008, 24 p.

7. *Geologiya SSSR: Rostovskaya, Volgogradskaya, Astrakhanskaya oblasti, Kalmytskaya ASSR* [Geology of the USSR: Rostov, Volgograd, Astrakhan region, Kalmyk ASSR]. Ed. A.V. Belov. Moscow: Nedra, 1970, vol. 46, 667 p.

8. Yarikov G.M., Urusov A.V., Zolotukhina G.P., Ketat O.B., Sarycheva A.I., Kol'tsova V.V., Smirnov A.V., Lotareva E.V., Grigor'ev N.V. [Lithologic and stratigraphic

cut of the Nikolaev reference well No. 2]. *Voprosy geologii i neftegazonosnosti Volgogradskoi oblasti* [Geology and petroleum potential of the Volgograd region]. Leningrad, 1965, iss. 3, pp. 93-112.

9. Brylev V.A. *Evolutsionnaya geomorfologiya yugovostoka Russkoi ravniny* [Evolutionary geomorphology of the South-East of The Russian plain]. Volgograd: Peremena, 2006, 350 p.

10. Yarkov A.A. *Paleogeograficheskie rekonstruktsii kak faktor obosnovaniya geografo-paleontologicheskikh osobo okhranyaemykh prirodnykh territorii Volgogradskoi oblasti* : avtoref. dis. ... kand. geogr. nauk [Paleogeographic reconstructions as a factor in substantiating the geographical paleontological specially protected natural areas of the Volgograd region]. Volgograd, 1999, 21 p.

11. Brylev V.A., Sagalaev V.A. *Osobo okhranyaemye prirodnye territorii* [Protected areas]. Training manual. Volgograd: Peremena, 2000, 260 p.

12. Brylev V.A., Dedova I.S., Zagarev V.V., Karpenko R.V. *Geografiya Ilovinskogo raiona: geologiya, priroda, istoriya, ekologiya, ekonomika* [Geography of Ilovinsk district: Geology, nature, history, ecology, economy]. Moscow: Planeta, 2017, 128 ps.

13. Dedova I.S. Morfogeneticheskaya kharakteristika erozionnoi seti prirodnogo parka «Donskoi» [Morphogenetic characteristics of erosion network of the natural Park Donskoy]. *Grani poznaniya*. 2015, No. 8 (42), pp. 67-73. Available at: <http://grani.vspu.ru/files/publics/1449490511.pdf> (accessed 20.12.2017).

14. Nekhoroshev P.E. [New upper Paleolithic Parking on the Middle Don]. *Drevnosti Volgo-Donskikh stepei* [Antiquity of the Volga-Don steppes]. Volgograd: Peremena, 1994, iss. 4, pp. 81-88.

15. *Arkheologicheskaya entsiklopediya Volgogradskoi oblasti* [Archaeological encyclopedia of the Volgograd region]. Ed. A.S. Skripkin. Volgograd: Izd-vo VGU, 2009, 334 p.

16. Skvortsov N.B. K istorii Panshinskogo gorodka [The history town of Panshino]. *Grani poznaniya*. 2013, No. 5 (25), pp. 1-7. Available at: <http://grani.vspu.ru/files/publics/1378465830.pdf> (accessed 15.01.2018).

17. Skvortsov N.B. K istorii starogo Kachalinskogo kazach'ego gorodka [To the history of the old Kachala Cossack town]. *Grani poznaniya*. 2013, No. 6 (26), pp. 83-89. Available at: <http://grani.vspu.ru/1381297476.pdf> (accessed 15.01.2018).

УДК 631.581

DOI 10.23683/0321-3005-2018-2-69-74

СИДЕРАЛЬНЫЕ ПАРЫ В УСЛОВИЯХ ЛЕСОСТЕПИ УЛУГ-ХЕМСКОЙ КОТЛОВИНЫ ТУВЫ

© 2018 г. В.Н. Жуланова¹, Т.Ф. Жарова²

¹Тувинский государственный университет, Кызыл, Россия,

²Тувинский научно-исследовательский институт сельского хозяйства, Кызыл, Россия

GREEN MANURE VAPOR UNDER FOREST-STEPPE OF ULUG-HEM HOLLOW OF TYVA

V.N. Zhulanova¹, T.F. Zharova²

¹Tuva State University, Kyzyl, Russia,

²Tuva Research Institute of Agriculture, Kyzyl, Russia

Жуланова Валентина Николаевна – доктор биологических наук, профессор, кафедра агрономии, Тувинский государственный университет, ул. Ленина, 36, г. Кызыл, Республика Тыва, 667000, Россия, e-mail: zhvf@mail.ru

Valentina N. Zhulanova - Doctor of Biological Sciences, Professor, Department of Agronomics, Tuva State University, Lenina St., 36, Kyzyl, Tyva Republic, 667000, Russia, e-mail: zhvf@mail.ru

Жарова Татьяна Федоровна – старший научный сотрудник, Тувинский научно-исследовательский институт сельского хозяйства, ул. Магистральная, 2, г. Кызыл, Республика Тыва, 667000, Россия, e-mail: tuv_niish@mail.ru

Tatyana F. Zharova - Senior Researcher, Tuva Research Institute of Agriculture, Magistralnaya St., 2, Kyzyl, Tyva Republic, 667000, Russia, e-mail: tuv_niish@mail.ru

На основе анализа многолетних экспериментальных данных установлено, что одним из главных факторов повышения плодородия почвы и урожайности яровой пшеницы является сидерация. Изучено влияние различных видов паров на плодородие темно-каштановой почвы и продуктивность яровой пшеницы в условиях лесостепной зоны Тувы. Эффективность сидерального и занятого паров определяется количеством поступающего в почву органического вещества. Выявлено, что использование сидерального пара по сравнению с чистым паром способствовало повышению плодородия почвы и увеличению урожайности яровой пшеницы. Показано, что в лесостепной природно-климатической зоне Тувы из сидеральных паров наибольшую эффективность имеет сидеральный донниковый пар. Сидеральный донниковый пар после двух ротаций севооборота увеличил содержание гумуса в почве почти в 1,3 раза. Определено, что структурно-агрегатный состав темно-каштановой почвы оценивается хорошим уровнем. В пахотном слое темно-каштановой почвы легкосуглинистого состава водопрочность структуры составляет в среднем 52 %. При выращивании сидеральных культур происходит увеличение в слое 0–20 см водопрочности агрегатов почвы в 1,2 раза. Наибольшая биологическая активность почв наблюдается в сидеральном гороховом пару, наименьшая – в севообороте с донником на зеленую массу. Правильный подбор сидеральных культур в данном регионе может способствовать решению проблемы сохранения и повышения плодородия зональных почв. Установлено, что предшественники оказывают влияние на урожайность яровой пшеницы. В лесостепной зоне Тувы в засушливые годы одним из лучших предшественников является чистый пар, но наиболее высокий урожай яровой пшеницы получен после сидерального донникового пара и сидерального горохового пара.

Ключевые слова: севооборот, сидераты, чистый пар, сидеральный пар, донник, биологическая активность почв, темно-каштановая почва, плодородие почв, урожайность.

Based on the analysis of long-term experimental data established that one of the main factors to improve soil fertility and yield of spring wheat is green manuring. The influence of different types of vapor on the fertility of dark chestnut soil and productivity of spring wheat in conditions of forest-steppe zone of Tuva. Efficiency of green manure and vapor employed is determined by the amount entering the soil organic matter. Revealed that the use of a couple of green manure crops compared to bare fallow increased soil fertility and increased yield of spring wheat. It is observed that in the forest-steppe natural-climatic zone of Tuva of green manure vapors has the highest efficiency of green manure sweet clover couples. Sweet clover green manure fallow after two rotations of the rotation increased the content of humus in the soil almost 1.3 times. Determined that the structural-aggregate composition of dark chestnut soils is estimated at a good level. In the arable layer of dark chestnut soil light loamy composition, water stability of structure is an average of 52 %. When growing green manure crops is happening the increase in the layer 0-20 cm of water resistance of soil aggregates 1.2 times. Most soil biological activity occurs in pea green manure a couple, the lowest in the crop rotation with sweet clover for green mass. The correct selection of green manure

crops in this region can contribute to conserving and improving the fertility of zonal soils. It is established that the predecessors influence the yield of spring wheat. In the forest-steppe zone of Tuva in dry years, one of the best predecessors is bare fallow, but the highest yield of spring wheat obtained after sweet clover green manure and green manure of pea pair.

Keywords: crop rotation, cover crops, bare fallow, green manure vapor, clover, biological activity of the soil, dark chestnut soil, soil fertility, yield.

Земледелие Тувы ведется в сложных биоклиматических условиях. В сельскохозяйственных районах региона одной из главных задач является получение продовольственного зерна. Повышение урожайности и валовых сборов зерна определяется состоянием плодородия почв и уровнем применяемой агротехники. При возделывании полевых культур длительное время на пашне наблюдается дефицит основных элементов минерального питания. В последние годы на сельскохозяйственной территории Тувы наблюдается отрицательный баланс гумуса [1]. Такие же проблемы по дефициту питательных веществ в почве наблюдаются и в соседних аридных областях и республиках Сибири [2, 3].

Основу пахотного фонда Тувы составляют малогумусные, маломощные, легкого гранулометрического состава каштановые почвы [1]. Эти почвы нуждаются в постоянном контроле качественного состояния, так как они существенно ухудшили свое плодородие в годы интенсивного использования в результате дегумификации и развития эрозионных процессов. Снижение плодородия земель сельскохозяйственного использования отрицательно влияет на сельскохозяйственное производство республики.

При дефиците баланса гумуса в тувинских почвах требуется восполнение питательных веществ за счет внесения удобрений. Высокая цена на минеральные удобрения, их транспортировка и внесение в почву оказываются самыми энергоемкими затратами. Заделка органических удобрений также требует затрат. Поэтому альтернативными источниками поступления органического вещества в почву являются сидераты. Сидерация – биологизированный способ повышения плодородия почвы, при котором зеленая масса растений запахивается в почву на глубину пахотного слоя, улучшая ее структуру и обогащая гумусом. Положительную роль зеленого удобрения в повышении плодородия почв отмечают многие исследователи [4–8]. В связи с этим оптимизация минерального питания сельскохозяйственных культур, определение способов восстановления и повышения плодородия почвы с помощью одного из основных элементов биологического земледелия – сидерального пара является актуальной задачей, имеющей важное теоретическое и практическое значение.

Цель исследований – установление влияния различных видов сидеральных паров в полевых севооборотах на плодородие темно-каштановых почв и продуктивность зерновых культур в аридных условиях Тувы.

Объекты и методы исследований

Исследования проводили в полевых севооборотах в лесостепи Улуг-Хемской котловины Тувы на темно-каштановой среднесуглинистой почве опытного поля Тувинского НИИСХ. Общая учетная площадь опыта составила 515 м², расположение вариантов в опыте – систематическое, технология возделывания полевых культур в опыте – общепринятая для лесостепной зоны региона.

Объектом исследования служили яровая пшеница – в период 2006–2010 гг. сорт Кантегирская 89 и в 2012–2014 гг. – Чагытай, а также донник – Карабалькский, горох – Укосный. Полевые севообороты: 1) чистый пар – пшеница – пшеница; 2) донник на зеленое удобрение – пшеница – пшеница+донник; 3) горох на зеленое удобрение – пшеница – пшеница; 4) донник на зеленую массу – пшеница – пшеница + донник. Запашку донника проводили в фазу цветения, гороха – образования стручков, а зеленую массу донника убирали в фазе бутонизации – начало цветения.

В начале и в конце вегетационного периода по вариантам опыта отбирались почвенные образцы с глубины 0–20 см, в которых определили агрохимические и агрофизические показатели по стандартным методикам: гумус – по Тюрину (ГОСТ 26213-91); подвижный фосфор и обменный калий – по Мачигину в модификации ЦИНАО (ГОСТ 26205-91); азот нитратный – ионнометрическим методом (ГОСТ 26488-85); рН водной вытяжки – потенциометрическим методом (ГОСТ 26423-85); емкость поглощения – по Бобко-Аскинази (ГОСТ 17401-84); гранулометрический и микроагрегатный состав – по Н.А. Качинскому [9]; структурный состав, водпрочность структуры (агрегатный состав) – по Н.И. Саввинову [10]; плотность сложения почвы – по Н.А. Качинскому; влажность – термовесовым методом [11]; биологическую активность почв – аппликационным методом (разложение льняного полотна) [12].

Погодные условия вегетационного периода в исследуемый период сильно не изменялись. Сумма активных температур выше 10 °С составила 1577–1924 °С, а сумма эффективных температур выше 5 °С – 1198–1899 °С. В среднем за 2006–2014 гг. сумма осадков за летний период составила 239±18,5 мм, а коэффициент вариации – 22 %, что, по оценкам В.И. Савич [13], свидетельствует о небольшой изменчивости выпадения осадков.

Полученные данные были обработаны дисперсионно-математическим методом [14], статистическим методом по программе STATISTICA.

Результаты и обсуждение

По данным Территориального органа Федеральной службы государственной статистики по Республике Тува [15], пашня составляет 5 % от общей площади сельскохозяйственных угодий региона, а залежные земли – 2,3 %. В 2015 г. в структуре посевных площадей Тувы зерновые культуры (яровая пшеница) составили 20,8 %, кормовые (зерновые) – 61,2. Доля многолетних трав за прошлые годы составляет 7,3 %. При таком использовании пашни происходят интенсивная минерализация гумуса и снижение плодородия почв.

При сокращении внесения минеральных и органических удобрений в регионе [1] основным приемом управления плодородием почв остается сидерация. В Туве основной сидеральной культурой является донник [16].

Заделка на зеленое удобрение донника и гороха на глубину 0–20 см темно-каштановой почвы способствовала увеличению новообразованного гумуса, повышению биологической активности почвы и содержания нитратного азота.

По результатам исследования установлено, что использование сидеральных паров на темно-каштановых почвах приводит к улучшению гумусового состояния и основного питательного фона. Сидеральный донниковый пар после двух ротаций севооборота увеличил содержание гумуса в почве в 1,25 раза, сидеральный гороховый пар – в 1,12, занятый донниковый пар – в 1,1 раза (табл. 1).

Таблица 1

Основные показатели физико-химических свойств темно-каштановых почв после предшественников (среднее 2007–2014 гг.) / Main physical and chemical properties of dark chestnut soils after predecessors (secondary 2007-2014)

Показатели	Год отбора образцов	Предшественник			
		Чистый пар	Сидеральный донниковый пар	Сидеральный гороховый пар	Занятый донниковый пар
Гумус, %	2007	3,46	3,36	3,46	3,30
	2014	2,84	4,20	3,86	3,60
НСР ₀₅	–	0,35	0,21	0,41	0,72
Нитратный азот, мг/кг	2007	15,0	22,9	19,3	12,8
	2014	7,6	12,0	15,0	10,1
НСР ₀₅	–	0,07	0,02	0,09	0,03
Подвижный фосфор, мг на 100 г почвы	2007	29,3	20	14	18
	2014	39,2	48	37,6	46,2
НСР ₀₅	–	0,05	0,32	0,70	0,49
Обменный калий, мг на 100 г почвы	2007	86	112	100	114
	2014	160	180	180	140
НСР ₀₅	–	0,78	0,46	0,49	0,81

Хороший предшественник в аридной зоне для зерновых культур – чистый пар, но после двух ротаций произошло уменьшение гумуса в почве на 0,62 % (НСР₀₅=0,35 %). Уменьшение содержания гумуса обусловлено усилением минерализации органических веществ в результате ежегодной обработки почвы и небольшим поступлением органического вещества с пожнивными остатками зерновых культур.

Для выяснения влияния сидератов на гумусовое состояние темно-каштановых почв был определен структурно-агрегатный состав почвы перед закладкой опыта и после второй ротации севооборота. Перед закладкой опыта в 2006 г. темно-каштановые почвы имели благоприятные физические свойства. Наличие водопрочной структуры в слое 0–20 см составляло 51–54 %. Содержание водопрочных агрегатов > 0,25 мм в темно-каштановой среднесуглинистой почве оценивается хорошим уровнем. А тувин-

ские темно-каштановые и каштановые почвы легко-суглинистого и супесчаного гранулометрического состава оцениваются на удовлетворительном уровне (32–38 %) [17]. В верхнем слое эти почвы имеют отличную оструктуренность.

Результаты анализа показали, что сидеральные культуры в виде донника и гороха, а также занятый донниковый пар за две ротации севооборота способствовали увеличению содержания водопрочных агрегатов на 6,7, 0,4 и 3,4 % соответственно.

В севообороте в почве чистого пара произошло уменьшение количества водопрочных агрегатов на 2,3 % после прохождения ротации севооборота и хорошая оценка водопрочности структуры снизилась до удовлетворительной.

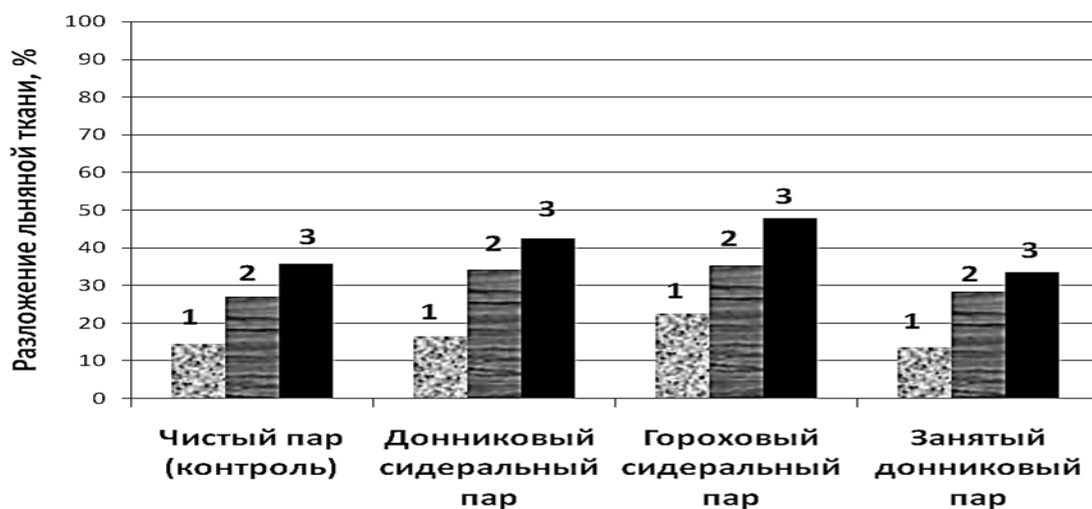
Почвенная биота под влиянием антропогенного воздействия изменяется в первую очередь, поэтому показатели биологической активности почв характе-

ризуют состояние почвенного плодородия. Интенсивность процессов переработки органического вещества в агроценозах и наземных экосистемах характеризуются биологической активностью почвы.

Среди методов определения показателей биологической активности выделяют метод разложения льняного полотна.

Интенсивность разрушения клетчатки в темно-каштановой почве за 90 дней в сидеральном гороховом пару составила 48 %, сидеральном донниковом пару – 43, чистом пару (контроль) – 36 и донниковом занятом пару – 34 % (рисунок). Степень разложения льняного полотна в сидеральных парах в 1,2–1,3

раза выше, чем в контроле. Наибольшая биологическая активность по всем срокам определения наблюдается в сидеральном гороховом пару, наименьшая – в севообороте с донником на зеленую массу. Вероятно, это связано с тем, что органическое вещество однолетних бобовых культур быстрее и интенсивнее разрушается, чем двулетних бобовых растений. А также причиной, вероятнее всего, является незначительное количество осадков в период вегетации культур. Известно, что влага является одним из определяющих факторов жизнедеятельности и активности микроорганизмов, что влияет и на скорость разложения целлюлозы.



Степень разложения льняного полотна в темно-каштановой среднесуглинистой почве в слое 0–20 см (1 – разложение через 30 дней; 2 – разложение через 60 дней; 3 – разложение через 90 дней) / The degree of decomposition of linen in dark chestnut medium loam soil in layer 0-20 cm (1 - decay after 30 days; 2 - decay after 60 days; 3 - decay of 90 days)

Результаты исследований показали, что предшественники оказывают влияние на урожайность яровой пшеницы. Одним из лучших предшественников для лесостепной зоны Тувы является чистый пар [6], он и служит в качестве контроля на опыте. Средняя урожайность яровой пшеницы сорта Кантегирская 89 за 2007–2009 гг. по контролю составила 1,96 т/га, а сорта Чагытай за 2012–2014 гг. – 1,99 (табл. 2). По нашим данным, в степных регионах современные системы земледелия должны основываться на интенсивном насыщении севооборотов бобовыми культурами с коротким периодом использования, в первую очередь это относится к многолетним бобовым травам (эспарцет, донник, люцерна и др.), возделываемым в занятых, сидеральных и кулисно-мульчирующих парах. Наряду с другими бобовыми культурами многолетние травы позволяют приостановить деградацию почвенного покрова и в определенной степени смоделировать природный ландшафт. Ограниченный набор культур обуславливает

неустойчивость кормопроизводства и не обеспечивает рационального использования природных ресурсов.

Таблица 2

Влияние предшественников на урожайность яровой пшеницы, т/га / Influence of predecessors on yield of spring wheat, t/ha

Предшественник	Кантегирская 89		Чагытай	
	В среднем за 2007–2009 гг.		В среднем за 2012–2014 гг.	
	т/га	Отклонение от контроля, т/га	т/га	Отклонение от контроля, т/га
Чистый пар (контроль)	1,96	–	1,99	–
Сидеральный пар (донник)	2,20	+0,24	2,10	+0,11
Сидеральный пар (горох)	2,24	+0,28	2,04	+0,05
Занятый пар (донник)	1,51	–0,23	1,85	–0,14
НСР ₀₅		0,19		0,11

Расширение посевов бобовых трав с коротким периодом использования, а также озимых культур, таких как вайда красильная, в полевых севооборотах является одним из главных факторов биологизации земледелия, оптимизации азотного и гумусового баланса почв в условиях недостаточного внесения органических и минеральных удобрений. Кроме того, расширенное введение в севообороты бобовых культур позволяет в значительной степени сбалансировать корма по белку, что обеспечивает успешное развитие АПК в целом.

Урожайность пшеницы варьирует по годам исследований и зависит от погодных условий. Благоприятные гидротермические условия вегетационного периода 2009 и 2013 гг. способствовали получению высокой урожайности пшеницы во всех севооборотах.

В среднем за 2007–2014 гг. наиболее высокий урожай пшеницы получен после сидерального донникового пара и сидерального горохового пара. Хотя надо отметить, что в 2009 и 2012 гг. прибавка урожая меньше НСР₀₅. За все годы исследований минимальная урожайность пшеницы получена после донникового занятого пара.

При запашке сидератов пшеница дает прибавку урожая на 0,11–0,28 т/га. Прибавка урожайности пшеницы на вариантах с сидеральными культурами составляла от 0,11 до 0,28 т/га по сравнению с контролем.

По исследованиям А.С. Сотпы [6], на каштановых почвах в умеренно влажные годы после запашки донника на зеленое удобрение прибавка урожая яровой пшеницы составила 0,20–0,24 т/га, а в засушливые годы сидеральные пары уступали чистому пару.

На воспроизводство плодородия почвы большой эффект оказывает один из эффективных приемов биологизации, такой как сидеральный пар. В качестве сидератов в Туве используют бобовые культуры (донник, горох). Однолетние и двулетние бобовые растения создают благоприятные физико-химические условия для роста и развития зерновых культур, накапливают доступные формы азота и пополняют ими почву.

Таким образом, применение бобовых однолетних культур в биологизированных системах земледелия позволяет повысить продуктивность пашни, что способствует повышению эффективности использования малогумусных земель.

Выводы

1. В Туве севообороты, содержащие сидеральные и занятые пары, повышают плодородие почвы за

одну ротацию. Сидеральные культуры (донник, горох) за 6–10 лет способствуют повышению содержания гумуса на 0,40–0,84 % (НСР₀₅=0,21–0,41 %).

2. Севообороты с сидеральными культурами за две ротации существенно оказывают положительное влияние на агрофизические свойства темно-каштановой среднесуглинистой почвы, улучшая водопрочность структуры почвенных агрегатов.

3. Целлюлозоразлагающая активность почв по вариантам опыта в общем характеризовалась как средняя. Наибольшая биологическая активность по всем срокам определения наблюдается в сидеральном гороховом пару, наименьшая – в севообороте с донником на зеленую массу.

4. Лучшими предшественниками для яровой пшеницы в лесостепной зоне Тувы являются в умеренно влажные годы сидеральный донниковый и сидеральный гороховый пары. В засушливые годы неплохой предшественник для зерновых культур – чистый пар, а занятый донниковый пар оказался неэффективным.

Литература

1. Жуланова В.Н. Современное гумусовое состояние агропочв Тувы // Эпоха науки. Вып. 5. С. 81–84. URL: http://eraofscience.com/Sbornik/5-mart_2016_g.pdf (дата обращения: 11.08.2018).
2. Авдюкова Т.В., Хруцкий С.А. Состояние плодородия почв пашни восточной зоны Красноярского края // Земледелие. 2017. № 1. С. 25–29.
3. Бутырин М.В., Штанцова В.В. Динамика основных показателей плодородия пахотных почв Иркутской области // Земледелие. 2017. № 4. С. 9–14.
4. Абрамов А.Ф. Перспективы использования сидеральных удобрений для повышения плодородия почв в Республике Саха (Якутия) // Агрехимические свойства почв и приемы их регулирования. IV Сибирские агрохимические Прянишниковые чтения : материалы междунар. науч.-практ. конф. Новосибирск : Россельхозакадемия СО, 2009. С. 226–230.
5. Чебоचाков Е.Я., Едимечев Ю.Ф., Романов В.Н., Шпагин А.И. Биологизация земледелия в природных зонах Средней Сибири // Достижения науки и техники АПК. 2013. № 6. С. 40–42.
6. Сотпа А.С. Влияние видов паров на свойства темно-каштановых почв Тывы и урожайность пшеницы // Сиб. вестн. с/х науки. 2014. № 3. С. 12–18.
7. Кузьминых А.Н. Сидераты – важный резерв сохранения плодородия почвы // Земледелие. 2011. № 4. С. 41.
8. Батудаев А.П., Цыбиков Б.Б., Базаржапова Н.А., Коришунов В.М., Мальцев Н.Н. Продуктивность полевых севооборотов в степной зоне Западного Забайкалья // Земледелие. 2011. № 4. С. 36–37.

9. Качинский Н.А. Физика почвы. М. : Высшая школа, 1965. 322 с.

10. Методическое руководство по изучению почвенной структуры. Л. : Колос, 1969. 430 с.

11. Практикум по почвоведению / под ред. И.С. Кауричева. М. : Агропромиздат, 1986. 336 с.

12. Звягинцев Д.Г., Асеева И.В., Бабьева И.П., Мирчинк Т.Г. Методы почвенной микробиологии и биохимии. М. : Изд-во Моск. ун-та, 1980. 224 с.

13. Савич В.И. Варьирование свойств почв во времени и пространстве // Докл. ТСХА. 1971. Вып. 162. С. 111–115.

14. Доспехов Б.А. Методика полевого опыта. М. : Колос, 1979. 416 с.

15. Статистический ежегодник Республики Тыва : стат. сб. / Тывастат. Кызыл, 2016. 241 с.

16. Жарова Т.Ф. Внедрение природоохраняющих ресурсосберегающих технологий на основе почвозащитных систем земледелия в Республике Тыва // Региональная экономика и управление. 2017. № 1 (49). URL: <http://eee-region.ru/article/4905> (дата обращения: 19.01.2017).

17. Жуланова В.Н., Кураченко Н.Л. Современное физическое состояние агропочв Тувы // Вестн. КрасГАУ. 2010. № 5. С. 18–23.

References

1. Zhulanova V.N. [Modern humus state of agricultural soils of Tuva]. *Epokha nauki* [The era of science]. Iss. 5, pp. 81-84. Available at: http://eraofscience.com/Sbornik/5-mart_2016_g.pdf (accessed 11.08.2018).

2. Avdyukova T.V., Khrutskii S.A. Sostoyanie plodorodiya pochv pashni vostochnoi zony Krasnoyarskogo kraya [Status of soil fertility of arable land in the Eastern zone of the Krasnoyarsk region]. *Zemledelie*. 2017, No. 1, pp. 25-29.

3. Butyrin M.V., Shtantsova V.V. Dinamika osnovnykh pokazatelei plodorodiya pakhotnykh pochv Irkutskoi oblasti [Dynamics of the major indicators of fertility of arable soils of Irkutsk oblast]. *Zemledelie*. 2017, No. 4, pp. 9-14.

4. Abramov A.F. [Prospects of use of sideral fertilizers for increase of soil fertility in the Republic of Sakha (Yakutia)]. *Agrokhimicheskie svoystva pochv i priemy ikh regulirovaniya. IV Sibirskie agrokhimicheskie Pryanishnikovye chteniya* [Agrochemical properties of soils and methods of their regulation. IV Siberian agrochemical Pryanishnikov readings]. Materials of Intern. scientific.-prakt. conf. Novosibirsk: Rossel'khozakademiya SO, 2009, pp. 226-230.

5. Chebochakov E.Ya., Edimeichev Yu.F., Romanov V.N., Shpagin A.I. Biologizatsiya zemledeliya v prirodnykh zonakh Srednei Sibiri [The agriculture biologization in the natural zones of Central Siberia]. *Dostizheniya nauki i tekhniki APK*. 2013, No. 6, pp. 40-42.

6. Sotpa A.S. Vliyanie vidov parov na svoystva temno-kashtanovykh pochv Tyvy i urozhainost' pshenitsy [Effect of vapor species on the properties of dark chestnut soils of Tuva and wheat yield]. *Sib. vestn. s/kh nauki*. 2014, No. 3, pp. 12-18.

7. Kuz'minykh A.N. Sideraty – vazhnyi rezerv sokhraneniya plodorodiya pochvy [Green manure is an important reserve for the conservation of soil fertility]. *Zemledelie*. 2011, No. 4, p. 41.

8. Batudaev A.P., Tsybikov B.B., Bazarzhapova N.A., Korshunov V.M., Mal'tsev N.N. Produktivnost' polevykh sevooborotov v stepnoi zone Zapadnogo Zabaikal'ya [Productivity of field crop rotations in the steppe zone of the Western Baikal region]. *Zemledelie*. 2011, No. 4, pp. 36-37.

9. Kachinskii N.A. *Fizika pochvy* [Physics of soil]. Moscow: Vysshaya shkola, 1965, 322 p.

10. *Metodicheskoe rukovodstvo po izucheniyu pochvennoi struktury* [Methodological guide to the study of soil structure]. Leningrad: Kolos, 1969, 430 p.

11. *Praktikum po pochvovedeniyu* [Workshop on soil science]. Ed. I.S. Kaurichev. Moscow: Agropromizdat, 1986, 336 p.

12. Zvyagintsev D.G., Aseeva I.V., Bab'eva I.P., Mirchin T.G. *Metody pochvennoi mikrobiologii i biokhimii* [Methods of soil Microbiology and biochemistry]. Moscow: Izd-vo Mosk. un-ta, 1980, 224 p.

13. Savich V.I. Var'irovanie svoystv pochv vo vremeni i prostranstve [Variation of soil properties in time and space]. *Dokl. TSKhA*. 1971, iss. 162, pp. 111-115.

14. Dospekhov B.A. *Metodika polevogo opyta* [Technique of field experience]. Moscow: Kolos, 1979, 416 p.

15. *Statisticheskii ezhegodnik Respubliki Tyva* [Statistical Yearbook of the Republic of Tuva] / Tyvastat. Kyzyl, 2016, 241 p.

16. Zharova T.F. Vnedrenie prirodookhrannykh resursosberegayushchikh tekhnologii na osnove pochvozashchitnykh sistem zemledeliya v Respublike Tyva [Introduction of environmental resource-saving technologies based on soil protection systems of agriculture in the Republic of Tyva]. *Regional'naya ekonomika i upravlenie*. 2017, No. 1 (49). Available at: <http://eee-region.ru/article/4905> (accessed 19.01.2017).

17. Zhulanova V.N., Kurachenko N.L. Sovremennoe fizicheskoe sostoyanie agropochv Tyvy [Modern physical state of agricultural soil of Tuva]. *Vestnik KrasGAU*. 2010, No. 5, pp. 18-23.

УДК 504.064

DOI 10.23683/0321-3005-2018-2-75-83

УГЛЕДОБЫВАЮЩИЕ РАЙОНЫ КАК ОЧАГ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ НАПРЯЖЕННОСТИ

© 2018 г. В.Е. Закруткин¹, Е.В. Гибков¹, Г.Ю. Скляренко¹, О.С. Решетняк¹

¹Южный федеральный университет, Ростов на-Дону, Россия

COAL-MINING AREAS AS SEATS OF ECOLOGICAL TENSION

V.E. Zakrutkin¹, E.V. Gibkov¹, G.Yu. Sklyarenko¹, O.S. Reshetnyak¹

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

Закруткин Владимир Евгеньевич – доктор геолого-минералогических наук, профессор, заведующий кафедрой геоэкологии и прикладной геохимии, Институт наук о Земле, Южный федеральный университет, ул. Зорге, 40, г. Ростов н/Д, 344090, Россия, e-mail: vezak@list.ru

Vladimir E. Zakrutkin - Doctor of Geology and Mineralogy, Professor, Head of the Department of Geoecology and Applied Geochemistry, Institute of Earth Sciences, Southern Federal University, Zorge St., 40, Rostov-on-Don, 344090, Russia, e-mail: vezak@list.ru

Гибков Евгений Викторович – кандидат географических наук, старший преподаватель, кафедра геоэкологии и прикладной геохимии, Институт наук о Земле, Южный федеральный университет, ул. Зорге, 40, г. Ростов н/Д, 344090, Россия, e-mail: irvict@mail.ru

Eugeny V. Gibkov - Candidate of Geography, Senior Lecturer, Department of Geoecology and Applied Geochemistry, Institute of Earth Sciences, Southern Federal University, Zorge St., 40, Rostov-on-Don, 344090, Russia, e-mail: irvict@mail.ru

Скляренко Григорий Юрьевич – кандидат геолого-минералогических наук, доцент, кафедра геоэкологии и прикладной геохимии, Институт наук о Земле, Южный федеральный университет, ул. Зорге, 40, г. Ростов н/Д, 344090, Россия, e-mail: gysklyarenko@sfnu.ru

Grigory Yu. Sklyarenko - Candidate of Geology and Mineralogy, Associate Professor, Department of Geoecology and Applied Geochemistry, Institute of Earth Sciences, Southern Federal University, Zorge St., 40, Rostov-on-Don, 344090, Russia, e-mail: gysklyarenko@sfnu.ru

Решетняк Ольга Сергеевна – кандидат географических наук, доцент, кафедра геоэкологии и прикладной геохимии, Институт наук о Земле, Южный федеральный университет, ул. Зорге, 40, г. Ростов н/Д, 344090, Россия, e-mail: olgare1@rambler.ru

Olga S. Reshetnyak - Candidate of Geography, Associate Professor, Department of Geoecology and Applied Geochemistry, Institute of Earth Sciences, Southern Federal University, Zorge St., 40, Rostov-on-Don, 344090, Russia, e-mail: olgare1@rambler.ru

Рассмотрены углепромышленные территории Российской Федерации как источник формирования экологической напряженности. Проанализированы изменения, происходящие в основных компонентах окружающей среды – атмосферном воздухе, почвенном покрове, поверхностных и подземных водах – в результате воздействия на них угледобывающей отрасли. Выявлено, что максимальное по масштабам воздействие в регионах такого типа производится на поверхностные и подземные воды. Сравнительный анализ природных вод угледобывающих регионов показал, что вне зависимости от региональных особенностей они отличаются низким качеством и мало пригодны для питьевых и хозяйственных целей местного населения.

Ключевые слова: углепромышленные территории, породные отвалы, подземные воды, поверхностные воды, загрязнение окружающей среды

The coal-mining territories of the Russian Federation as a source of formation of ecological tension are considered in article. The changes happening in key environmental components - air, soils, surface and underground waters - as a result of impact on them of coal-mining branch of industry are analysed. It is revealed that the influence, maximal on scales, is made on the surface and underground water. The comparative analysis of natural waters of coal-mining regions showed that they differ in poor quality and are of little use for the drinking and economic purposes.

Keywords: coal-mining territories, coal dumps, underground waters, surface water, environmental pollution.

Топливо-энергетический комплекс России играет важную роль в экономике страны. Этому способствуют богатые природные топливно-энергетические ресурсы страны: на территории России сосредоточена треть мировых запасов, в том числе 20 % мировых запасов угля. Начиная с 1995 г. наметился последовательный рост угледобычи, который будет продолжаться и в ближайшей перспективе [1, 2]. Очевидно, что подобная тенденция неизбежно приведет к обострению экологической ситуации в пределах углепромышленных территорий, поскольку хорошо известно, что угледобывающая промышленность традиционно считается одним из наиболее мощных факторов антропогенного преобразования окружающей среды. Так, в частности, подсчитано, что извлечение из недр 1 млн т угля в среднем сопровождается сбросом в открытые водоёмы 3,22 млн м³ загрязненных сточных вод, выбросом в атмосферу 2,93 тыс. т вредных веществ, перемещением на дневную поверхность и размещением на ней 1,48 млн м³ вскрышных и вмещающих пород, нарушением 10–30 га земель [1].

Наиболее типичными для углепромышленных территорий экологическими проблемами являются подъем уровня подземных вод, подтопление и заболачивание территории, ухудшение качества воды поверхностных и подземных водных объектов, выделение из выработок токсичных и взрывоопасных газов, активизация микросейсмических явлений,

вывод из хозяйственного использования значительных площадей вследствие размещения на них отходов горнорудного производства и их негативное воздействие на окружающую среду.

Важно подчеркнуть, что перечисленные выше экологические проблемы резко обострились в последние 20 лет в связи с реструктуризацией угольной промышленности, которая предусматривала ликвидацию нерентабельных шахт, в основном путем их затопления.

Серьезную экологическую опасность в пределах углепромышленных территорий представляют собой твердые отходы – отвалы угольных шахт, хвостохранилища обогатительных фабрик, золошлаковые отходы, складированные на поверхности в виде терриконов высотой до 80–100 м, отвалов хребтовой формы, реже – плоских отвалов. Только на территории Донбасса находится 1 257 терриконов общим объемом 1 056 519,9 тыс. м³, которые занимают площадь 5 526,3 га [3]. Наибольший же объем извлекаемой породы, как видно из рис. 1, приходится на Кузнецкий бассейн [4], где за время разработки угольных месторождений изъято из оборота около 91 тыс. га плодородных сельскохозяйственных земель [5].

В литологическом отношении отвалы представлены аргиллитами, алевролитами, песчаниками, углем и другими породами. Обломки отвальных пород неоднородны по гранулометрическому составу, имеют размер от глинистых частиц до глыб.

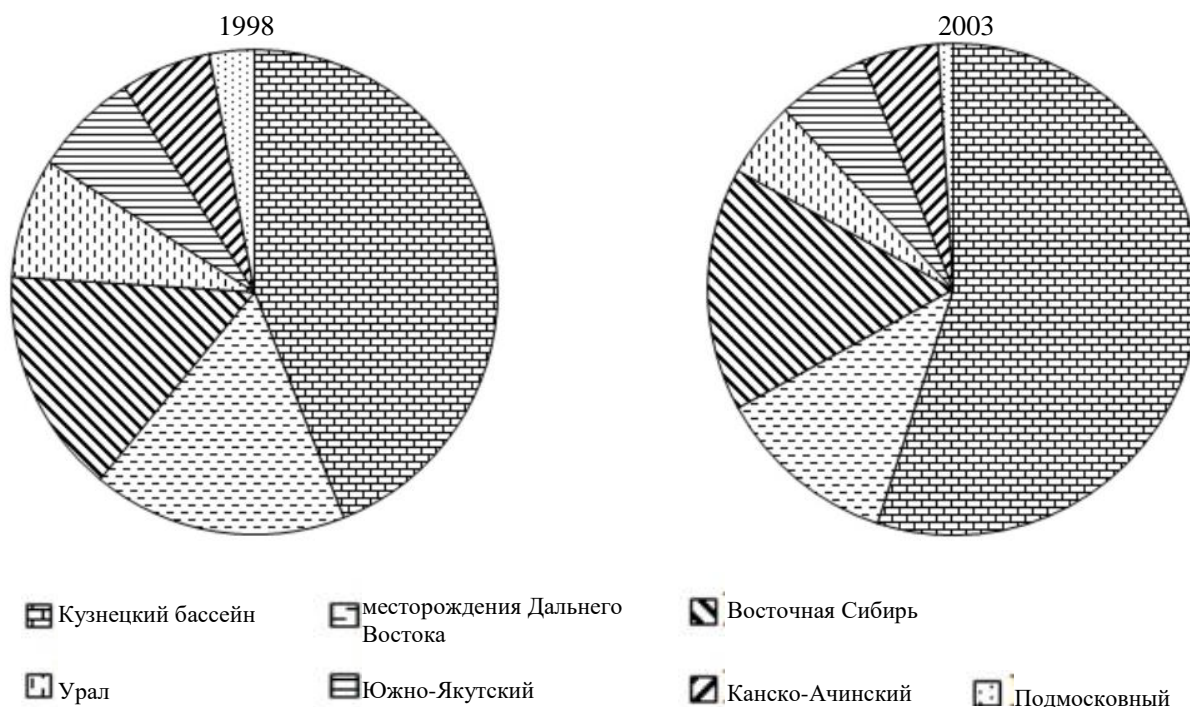


Рис. 1. Распределение объемов образования пород и отходов обогащения по угольным бассейнам и месторождениям / Fig. 1. Volume distribution of rock formation and dump breeds of coal basins and fields

Их геохимическая специфика обусловлена рядом факторов [6]. В первую очередь она определяется региональными особенностями угленосной провинции (структурно-тектоническая позиция, возраст угленосной толщи, палеогеографические условия угленакопления и др.), что хорошо видно на рис. 2, где демонстрируются существенные различия в геохимических спектрах микроэлементов вскрышных пород Донецкого и Кизеловского (Пермский край РФ) угольных бассейнов.

Эти различия проявляются, прежде всего, в относительной обогащенности большинством элементов отвальных пород Донбасса.

На рис. 3 демонстрируется сравнительная оценка геохимических спектров пород, из обломков которых в основном состоят эти отвалы. Как и следовало ожидать, большинство из рассматриваемых элементов проявляют склонность к накоплению в аргиллитах и алевролитах, особенно в их пиритизированных разностях. Таким образом, надо полагать, что чем большую роль в составе отвалов будут играть отмеченные разности пород, тем более существенное влияние они будут оказывать на компоненты окружающей среды.

Так, в частности, в результате самовозгорания терриконов в результате окисления пиритизированных обломков формируется мощный источник загрязнения атмосферного воздуха. Подсчитано, что один интенсивно горящий отвал является источником выделения в атмосферный воздух от 5 до 25 т в год опасных для здоровья населения загрязняющих веществ – главным образом оксида углерода, диоксида серы, сероводорода и оксидов азота. Поступление загрязняющих веществ в атмосферу происходит также и в результате ветровой эрозии. По имеющимся оценкам, в процессе дефляции за год с одного терриконика поступает свыше 0,7 т пыли, которая, оседая, загрязняет 2,5 га сельскохозяйственных земель.

Важно подчеркнуть, что горящие терриконники являются своего рода техногенными вулканами, «извержение» которых может приводить к трагическим последствиям. Характерным примером является взрыв террикона шахты им. Ильича бывшего треста «Кадиевуголь» в 1962 г., в результате чего произошел

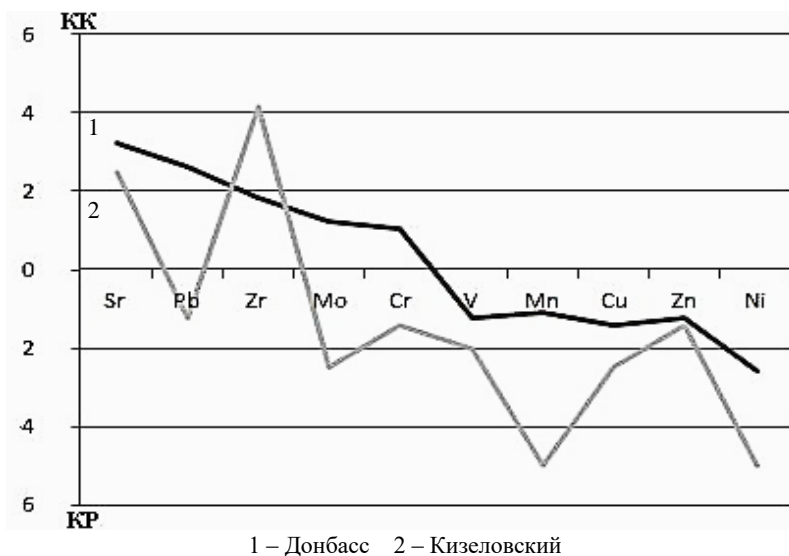


Рис. 2. Геохимические спектры отвальных пород Донецкого и Кизеловского угольных бассейнов (по данным [7, 8]) / Fig. 2. Geochemical ranges of dump breeds of the Donetsk and Kizelovsky coal basins (compiled according to [7, 8])

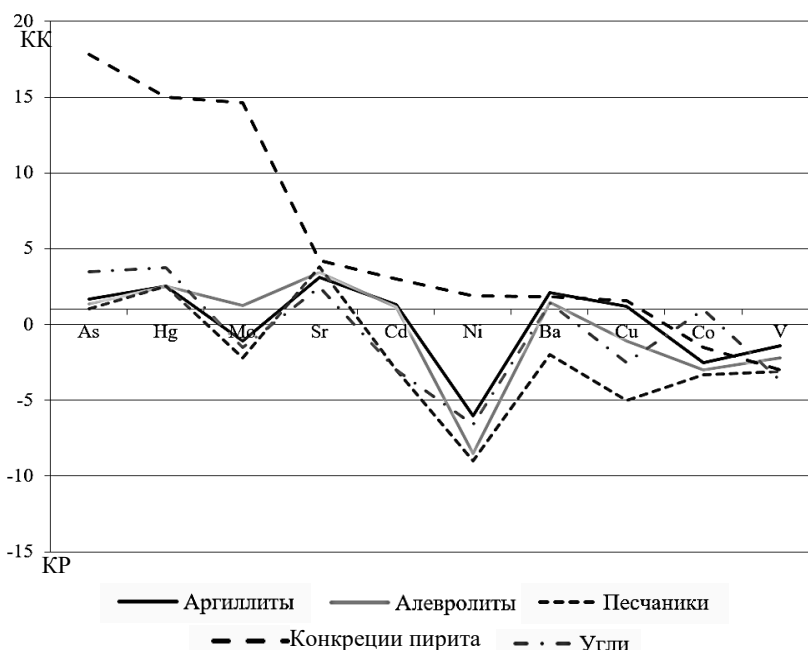


Рис. 3. Геохимические спектры отдельных литотипов Донецкого бассейна (по данным [7]) / Fig. 3. Geochemical ranges of separate lithotypes of the Donetsk basin (compiled according to [7])

выброс 42 тыс. м³ раскаленных обломков пород, которыми в считанные минуты был засыпан шахтерский поселок, что привело к гибели десятков людей [3].

Окисление пород отвалов, помимо самовозгорания терриконов, приводит к формированию сернокислого гидролиза, способствующего выщелачиванию из массива широкого спектра геохимически активных соединений, которые в дальнейшем могут попадать в поверхностные воды и почвы. Состав водорастворимых солей преимущественно сульфат-

ный. Из катионов преобладают Na и Mg, соотношение которых подвержено существенным колебаниям. Особого внимания заслуживают соединения Fe, содержания которых могут достигать 5400 мг/дм³. При взаимодействии сернокислых миграционных потоков с зональными типами почв формируются геохимические барьеры. В случае черноземов образуется щелочной барьер, на котором элементы, мигрирующие в виде простых катионов (Zn, Cu, Pb, Cd, Li, Sr), осаждаются в форме слаборастворимых гидроокислов. Группа элементов, находящаяся в сернокислом потоке в гидролизированных соединениях (Al, W, Be, Mo, Zr), осаждаются в черноземных почвах в виде простых ионов.

Не менее важной геоэкологической проблемой углепромышленных территорий является деградация поверхностной и подземной гидросфер. Поверхностные водные объекты испытывают комплексное воздействие в районах добычи, переработки и хранения угля. При этом наиболее уязвимыми являются малые и средние реки в силу невысокой самоочищающей способности. Многие из них практически полностью утратили свои природные функции, стали непригодными для использования не только в питьевых, но и в хозяйственных целях [9].

Во многих угольных бассейнах на территории Российской Федерации в зоне непосредственного влияния объектов угольной промышленности наблюдается трансформация компонентного состава речных вод. Так, для рек Восточного Донбасса характерно усиление процесса засоления, которое вызвано увеличением минерализации воды и высокой концентрацией солеобразующих компонентов – сульфатов, ионов натрия и магния [10–12].

Из приведенных в табл. 1 данных видно, что минерализация воды рек в бассейне р. Северский Донец изменяется в пределах 1,23–2,20 г/дм³, в бассейне Тузлова – 1,48–6,8. При этом наибольший вклад в минерализацию вносят сульфаты, концентрации которых изменяются в широких пределах – 0,25–1,42 (2,5–14,2 ПДК) и 0,69–2,69 г/дм³ (6,9–26,9 ПДК) соответственно.

В Пермском крае, на территории Кизеловского угольного бассейна, в зоне техногенного загрязнения находятся реки Яйва, Косьва, Усьва и их притоки. Здесь также наблюдается рост минерализации воды, увеличение содержания всех катионов, прежде всего щелочных и щелочно-земельных металлов, происходят частичное или полное вытеснение гидрокарбонат-иона сульфат-ионом и формирование кислых вод (табл. 2) [13, 14].

Еще большая изменчивость прослеживается в составе и содержании в речной воде микроэлементов (особенно тяжелых металлов). Приоритетными загрязнителями речных вод Кузнецкого угольного бассейна являются Fe, Cu, Zn, Cd [15], Восточного Донбасса – Fe, Al, Mn, Cu, Sr, загрязнение которыми

носит устойчивый характер с высокой частотой превышения ПДК [12, 16, 17], Кизеловского угольного бассейна – Fe и Mn, с кратностью превышения ПДК в сотни и тысячи раз [13].

Для многих водотоков в пределах угольных бассейнов характерно высокое содержание в воде соединений не только тяжелых металлов, но и других поллютантов. Наблюдается усиление загрязнения речных вод до аномально высоких значений такими компонентами, как фенолы и нефтепродукты [14], а в Приморском крае России в водных объектах (реках) на территории Лучегорского, Партизанского, Хасанского, Тавричанского, Подгороденского и Артемовского угольных бассейнов зафиксировано повышенное содержание метана [18]. Высокая степень насыщения поверхностных вод метаном не только ухудшает качество водной среды, но и создает неблагоприятную и опасную ситуацию, поскольку вытесненный водой метан образует взрывоопасную смесь в воздухе при содержании 6–9 %.

Подобная трансформация компонентного состава поверхностных вод углепромышленных территорий не могла не сказаться на качестве воды рек, которое значительно ухудшается в районах наибольшей концентрации объектов угледобычи и переработки угля. Многие водотоки угольных бассейнов относятся к водным объектам со стабильно высоким уровнем химического загрязнения, водная среда которых классифицируется 4-м и 5-м классами качества [12, 15, 19] (табл. 3).

Длительная добыча угля привела к широкомаштабным воздействиям и на подземные воды. Были нарушены их режим и баланс, существенно изменился химический состав. Эта проблема особенно актуальна на фоне сокращения запасов чистых питьевых вод. Наиболее остро она проявилась в Восточном Донбассе – густонаселенном аграрном регионе, находящемся в засушливых климатических условиях. Несмотря на высокую потребность населения, подземные воды не могут использоваться в хозяйственных целях из-за сильной загрязненности [20]. По результатам комплексной оценки качества подземные воды отнесены к категориям «грязная и очень грязная» – «чрезвычайно грязная» (рис. 4). Критическая гидроэкологическая ситуация характерна и для других угольных бассейнов и месторождений России: Кизеловского, Челябинского, Кузнецкого, Печорского, Раздольненского, Партизанского, Угловского и Сахалинского [21].

Загрязненность подземных вод имеет общие закономерности, характерные для всех угленосных провинций. На фоне значительного роста минерализации вод, обусловленного увеличением содержания основных макрокомпонентов, в них наблюдается еще более резкое увеличение концентраций микроэлементов – тяжелых металлов, представляющих серьезную опасность для здоровья населения.

Таблица 1

Обобщенный химический состав воды рек Восточного Донбасса по макрокомпонентам (составлено по [12])
/ Generalized chemical composition of the river water of the Eastern Donbass by macro components (compiled according to [12])

Ингредиент (показатель качества воды)	ПДК _{р/х} , мг/дм ³	Реки бассейна Северского Донца		Реки бассейна Тузлова	
		мг/дм ³	Кратность превышения ПДК	мг/дм ³	Кратность превышения ПДК
Na ⁺ + K ⁺	120	137–550*	1,1–4,6	189–763	1,6–6,3
Ca ²⁺	180	107–231	0,6–1,3	152–430	0,8–2,4
Mg ²⁺	40	29–105	0,7–2,6	60–167	1,5–4,1
Cl ⁻	300	71–427	0,2–1,4	142–515	0,5–1,7
SO ₄ ²⁻	100	250–1420	2,5–14,2	691–2688	6,9–26,9
HCO ₃ ⁻	–	207–585	–	146–567	–
Минерализация воды	1000	1230–2200	1,23–2,2	1480–6800	1,48–6,8

Примечание. * – приведены диапазоны среднегодовых концентраций веществ для рек в бассейнах.

Таблица 2

Химический состав воды р. Косьва (концентрации, мг/дм³) [14]
/ Chemical composition of Kosva River (concentration, mg/dm³)

Место отбора пробы воды	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺ +K ⁺	Минерализация	pH
Точки в районе г. Губаха								
Ниже устья р. Губашки	0	230,6	19,85	42,08	9,70	47,8	356,44	3,60
Ниже сброса вод ш. Крупской	0	941,4	70,91	92,18	24,3	198,4	1390,8	2,50
Ниже а/д моста	0	67,2	4,25	14,03	3,65	7,82	99,38	3,82
4 км ниже города	48,81	28,8	4,25	20,04	3,65	4,14	113,83	6,72
65 км ниже города	85,42	62,4	35,45	42,08	7,29	22,5	256,34	7,70
Устье реки								
Река Косьва, устье	54,92	67,2	25,53	30,02	2,43	24,6	213,37	6,86

Таблица 3

Качество речной воды в пределах отдельных угольных бассейнов РФ
/ River water quality within some coal basins of the Russian Federation

Реки (бассейны рек)	Угольный бассейн	Класс качества воды (степень загрязненности)
Косьва, Чусовая	Кизеловский	5-й (экстремально грязная)
Иня, Аба, Малый Бачат	Кузбасс	4-й (грязная)
Северский Донец, Тузлов	Восточный Донбасс	4-й (грязная) и 5-й (экстремально грязная)
Сусуя, Поронай, Углегорка	Сахалинский	4-й (грязная)
Лодьма	Приморский	4-й (грязная)

Так, для одного из старейших углепромышленных регионов – Восточного Донбасса – характерны хлоридно-сульфатные воды, общая минерализация которых достигает 7,5 г/дм³, содержание Cl⁻ – 2,3 г/дм³ и SO₄²⁻ – 4,3 г/дм³, а среди катионов преобладают Na⁺ (до 1,4 г/дм³) и Ca²⁺ (до 0,6 г/дм³). Среди микрокомпонентов подземных вод приоритетными являются Fe, Cu, Mn, Al, Sr, концентрация которых превышает ПДК до 85 раз [20]. Схожим химическим составом обладают подземные воды и других угольных бассейнов европейской части России, например Кизеловского, где минерализация вод может достигать 24 г/л [22]. Для загрязненных подземных вод бассейнов Сибири и Дальнего Востока чаще характерен гидрокарбонатный натриевый состав. Их минерализация в Кузбассе достигает 2,4 г/дм³, причем в незагрязненных аналогах она составляет в среднем 0,4 г/дм³. При этом усиливается роль Na⁺ и сульфат-иона.

Локализация участков максимального загрязнения подземных вод связана с концентрацией объектов угледобычи и геологическим строением территорий угольных бассейнов [20]. Так, на территории Восточного Донбасса смыкание выработанного подземного пространства шахт ведет к образованию крупных зон техногенной трещиноватости и формированию техногенного водоносного комплекса [21, 23]. Он характеризуется высокой проницаемостью водовмещающих пород, гидравлической связью глубинных шахтных вод и подземных вод различных водоносных горизонтов, в том числе грунтовых вод, и, как следствие, максимальным уровнем загрязнения. К природным факторам, усугубляющим загрязнение, относятся наклонное залегание пород водоносной толщи, определяющее направление течения потока подземных вод, а также наличие в пределах природно-техногенных водоносных комплексов разрывных нарушений и зон дробления, обеспечивающих

углубление зон аэрации породных массивов, увеличение плоскости контакта подземных вод с окисляемыми горными породами и усиление перетоков шахтных вод в верхние водоносные горизонты.

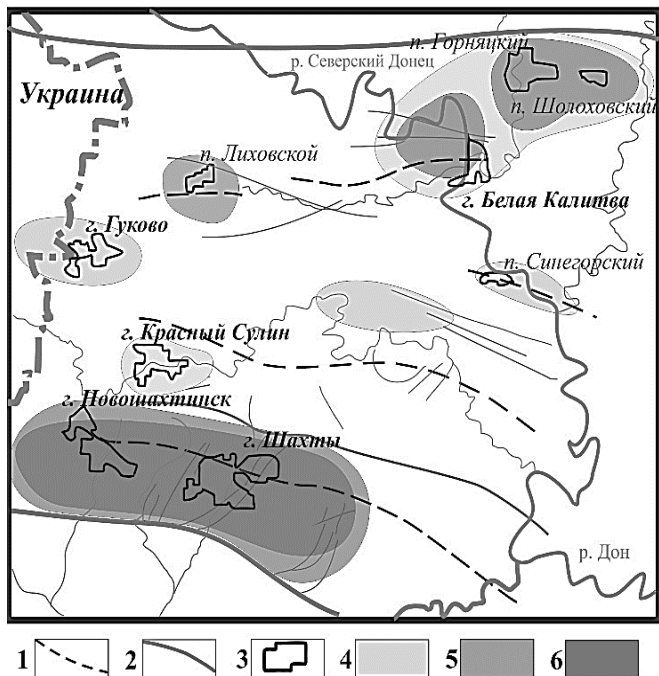


Рис. 4. Схема загрязненности подземных вод Восточного Донбасса: 1 – оси синклиналей; 2 – разрывные нарушения; 3 – населенные пункты; 4 – воды класса «загрязненная»; 5 – воды класса «грязная и очень грязная»; 6 – воды класса «чрезвычайно грязная» / Fig. 4. Scheme of groundwater pollution in the Eastern Donbass: 1 - axes of synclines; 2 - faults; 3 - settlements; 4 - polluted water; 5 - water class dirty and very dirty; 6 - extremely dirty water

Среди многочисленных источников загрязнения поверхностной и подземной гидросфер в пределах углепромышленных территорий в качестве приоритетного следует отметить техногенные шахтные воды.

Как известно, шахтные воды угольных бассейнов формируются за счет подземных вод, дренирующих горные выработки. Дополнительным источником может служить инфильтрация в горные выработки атмосферных осадков и поверхностных вод из прилегающих водных объектов, что особенно характерно для Восточного Донбасса, где трещиноватые горные породы пользуются широким распространением.

По своему составу шахтные воды сильно отличаются от исходных подземных вод по общей минерализации и содержанию большинства макро- и микрокомпонентов. Так, в частности, в углепромышленных районах Восточного Донбасса их минерализация изменяется в пределах 1,3–4,5 г/дм³, а в отдельных случаях достигает 10–12 г/дм³. По химическому составу это преимущественно воды сульфатного класса натриевой группы.

Химический состав шахтных вод непостоянен и заметно изменяется со временем. Вслед за ними изменяется и загрязненность вод, рассчитываемая по суммарному коэффициенту загрязнения (СКЗ) [12]. Так, по некоторым данным [24], за 5 лет эксплуатации угольных месторождений минерализация вод в отдельных шахтах Восточного Донбасса увеличилась на 9–13 %. При этом класс воды сменился с гидрокарбонатного на сульфатный, а местами – на хлоридный. В катионном составе отмечен рост содержания натрия. Однако наиболее существенные изменения в химическом составе шахтных вод произошли в последние 20–25 лет в связи с реструктуризацией угольной промышленности. Как показали наши расчеты, минерализация шахтных вод за этот период возросла в среднем на 55 %, а количество отдельных макрокомпонентов (сульфаты, Mg и Ca) увеличилось на 100–150 %. Аналогичные изменения произошли и в микрокомпонентном составе шахтных вод. Так, в Восточном Донбассе наиболее резко изменились содержания Fe, Cu, Mn, Sr, Li, Cd и Be, которые сильнее проявились в пробах из гидронаблюдательных скважин, примыкающих к ликвидированным шахтам. Это может свидетельствовать о динамичном состоянии массива горных пород в пределах выработанных шахтных полей, которое способствует раскрытию трещин, активизации выщелачивания металлов и движению глубинных растворов (в том числе и шахтных вод) к поверхности [12].

Затопление нерентабельных шахт способствовало поступлению техногенных шахтных вод в водоносные горизонты и формированию ореолов распространения сильнозагрязненных подземных вод, непригодных для хозяйственно-питьевого водоснабжения местного населения. Такая обстановка сложилась, в частности, в ряде населенных пунктов Октябрьского и Красносулинского районов Ростовской области. Например, в результате затопления ликвидированных шахт в Октябрьском районе уровень шахтных вод в погашенных горных выработках поднялся по пластам Несветаевской свиты (C₂⁴) на 146 м, а по пластам Степановской свиты (C₂⁵) – на 156 м. Это способствовало дальнейшему перетоку воды по трещиноватым зонам, развитым вдоль Большого Самбековского сброса и Аютинского надвига, в смежные ликвидированные горные выработки. Подобная обстановка характерна и для других углепромышленных территорий Российской Федерации.

Ликвидация объектов добычи угля оказала резко негативное влияние и на качество поверхностных вод за счет сброса на рельеф и поступления в речную сеть сильнозагрязненных шахтных вод. Объектами такого влияния в пределах Восточного Донбасса оказались, в частности, реки Кадамовка, Малый и Большой Несветай, Аюта, Кундрючья, Гнилуша, Лихая, Бургуста, Малая Каменка. В них, по

некоторым оценкам [25], поступает от 150 до 2500 м³/ч таких вод. Следует также учитывать высокую вероятность загрязнения речных вод не только сверху, но и снизу в связи с подъемом уровня подземных вод и выходом их на поверхность по тектонически нарушенным зонам как естественного, так и техногенного происхождения. Увеличение питания рек и водоемов подземными водами в результате ликвидации шахт Восточного Донбасса отмечалось рядом исследователей [24, 25].

Важно подчеркнуть, что поверхностные и подземные воды угледобывающих районов находятся в состоянии тесной двусторонней гидравлической связи. Она выражается в том, что подземные воды в течение всего года питают поверхностные водотоки, а последние, в свою очередь, – водоносные горизонты подрусловых грунтовых вод и грунтовых вод прибрежной полосы. Не исключено, что подобный водообмен существовал и до начала освоения угольных бассейнов. Но тогда он, скорее всего, имел локальный характер. В процессе эксплуатации угольных месторождений, особенно в результате массовой ликвидации нерентабельных шахт, ареалы активного водообмена между поверхностными и подземными водами значительно расширились. Этому способствовало, очевидно, развитие техногенных пликативных и особенно дизъюнктивных нарушений в горно-породном массиве, обеспечивающих высокую вертикальную проницаемость зоны аэрации. Как известно, в соответствии с существующей в настоящее время природоохранной и водохозяйственной политикой оценка поверхностных и подземных ресурсов осуществляется изолированно: по водохозяйственным балансам – для поверхностного стока, по эксплуатационным запасам – для подземного. Результаты проведенных исследований убеждают в том, что эффективное решение гидроэкологических проблем в углепромышленных районах возможно только на основе совместного использования, управления и оценки речных и подземных водных ресурсов. При этом необходимо учитывать, что основной вклад в ухудшение их качества в данном регионе принадлежит техногенным шахтным водам, минимизация воздействия которых на поверхностную и подземную гидросферу должна стать приоритетной задачей природоохранных органов.

Таким образом из приведенных выше материалов следует, что угледобывающие районы – наименее благополучные в экологическом отношении территории, своеобразный очаг экологической напряженности регионального масштаба. Природный комплекс, а также проживающее здесь население на протяжении многих десятилетий подвергаются мощному комплексному техногенному воздействию. Данное обстоятельство требует принятия неотложных мер по оздоровлению экологической обстановки. Эти меры должны быть направлены в первую очередь на минимизацию последствий воздействия на окружающую

среду наиболее приоритетных источников, в числе которых – твердые отходы добычи и переработки угля, складированные на земной поверхности в виде породных отвалов, а также техногенные шахтные воды. Для обеспечения контроля эффективности природоохранных мероприятий необходимы разработка и внедрение специализированной системы геоэкологического мониторинга.

Литература

1. Пашкевич М.А., Паршина М.В. Анализ экологической опасности объектов угольной промышленности // Горн. информ.-аналит. бюл. 2007. № 10. С. 305–312.
2. Плакиткина Л.С. Развитие добычи и экспорта угля в основных странах мира и России в период 2000–2013 (2012) гг. Вызовы и угрозы развитию добычи и экспорта угля в России в перспективном периоде // Горная промышленность. 2014. № 2 (114). С. 6–12.
3. Панов Б.С., Проскурня Ю.А. Модель самовозгорания породных отвалов угольных шахт Донбасса // Геология угольных месторождений : межвуз. науч. темат. сб. Екатеринбург, 2002. С. 274–281.
4. Гитич Л.В. Геолого-промышленная типизация техногенных месторождений угольного ряда // Разведка и охрана недр. 2006. № 11. С. 60–63.
5. Потапов В.П., Мазикин В.П., Счастливцев Е.Л., Вашилаева Н.Ю. Геоэкология угледобывающих районов Кузбасса. Новосибирск : Наука, 2005. 660 с.
6. Закруткин В.Е., Гибков Е.В. Техногенные геохимические потоки угледобывающих территорий и их влияние на окружающую среду (на примере Донецкого бассейна) // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2016. № 3 (191). С. 66–71.
7. Кизильштейн Л.Я. Экогеохимия элементов-примесей в углях. Ростов н/Д. : Изд-во СКНЦ ВШ, 2002. 296 с.
8. Никифорова Е.М., Солнцева Н.П. Влияние техногенных потоков на геохимию лесных почв (в связи с угледобычей) // Добыча полезных ископаемых и геохимия природных экосистем. М. : Наука, 1982. С. 82–130.
9. Закруткин В.Е., Иваник В.М. Состояние загрязненности воды рек Ростовской области в районах техногенного влияния ликвидируемых шахт Восточного Донбасса (реки бассейна Тузлова) // Современные фундаментальные проблемы гидрохимии и мониторинга качества поверхностных вод России : материалы науч.-практ. конф. с междунар. участием. Ч. 1. Ростов н/Д., 2009. С. 88–91.
10. Закруткин В.Е., Иваник В.М., Гибков Е.В. Эколого-географический анализ рисков реструктуризации угольной промышленности в Восточном Донбассе // Изв. РАН. Сер. геогр. 2010. № 5. С. 94–102.
11. Закруткин В.Е., Иваник В.М., Гибков Е.В., Скляров В.В. Оценка влияния ликвидируемых шахт Восточного Донбасса на гидрохимический состав малых рек бассейна Северского Донца // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2010. № 3. С. 84–87.

12. *Закруткин В.Е., Склярченко Г.Ю., Бакаева Е.Н., Решетняк О.С., Гибков Е.В., Фоменко Н.Е.* Поверхностные и подземные воды в пределах техногенно нарушенных геосистем Восточного Донбасса: формирование химического состава и оценка качества. Ростов н/Д.: Изд-во ЮФУ, 2016. 171 с.

13. *Ковалевская Н.П.* Биогеохимический потенциал микробиологических барьеров в формировании качества воды рек Кизеловского угольного бассейна // *Фундаментальные исследования*. 2015. № 2, ч. 19. С. 4203–4208. URL: <http://www.fundamental-research.ru/ru/article/view?id=37930> (дата обращения: 14.05.2016).

14. *Максимович Н.Г., Меньшикова Е.А., Блинов С.М.* Геоэкологическое состояние рек в районах освоения угольных месторождений // *Геология и минеральные ресурсы европейского северо-востока России: новые результаты и новые перспективы: материалы XIII геол. съезда Республики Коми. Сыктывкар, 1999. С. 156–159.*

15. *Лобченко Е.Е., Минаева Л.И., Ничипорова И.П., Лавренко Н.Ю.* Динамика качества поверхностных вод на территории Кузнецкого угольного бассейна // *Геоэкологические проблемы углепромышленных территорий: сб. тр. науч. конф. с междунар. участием. Ростов н/Д.: Изд-во ЮФУ, 2015. С. 283–295.*

16. *Гибков Е.В.* Эколого-географический анализ и оценка гидроэкологического риска на территории Восточного Донбасса в связи с реструктуризацией угольной промышленности: автореф. дис. ... канд. геогр. наук. Ростов н/Д., 2011. 23 с.

17. *Решетняк О.С., Закруткин В.Е., Гибков Е.В.* Микроэлементы в речных водах Восточного Донбасса // *Геоэкологические проблемы углепромышленных территорий: сб. тр. науч. конф. с междунар. участием. Ростов н/Д.: Изд-во ЮФУ, 2015. С. 283–295.*

18. *Мишукова Г.И., Мишуков В.Ф., Обжиров А.И.* Особенности проявления метана в природных водах на территории Приморского края России // *Вестн. ДВО РАН*. 2009. № 6. С. 43–49.

19. *Максимович Н.Г., Черемных Н.В., Хайрулина Е.А.* Экологические последствия ликвидации Кизеловского угольного бассейна // *Геогр. вестн.* 2006. № 2. С. 128–134.

20. *Закруткин В.Е., Склярченко Г.Ю., Гибков Е.В.* Особенности химического состава и степень загрязненности подземных вод углепромышленных районов Восточного Донбасса // *Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки*. 2014. № 4. С. 73–77.

21. *Тарасенко И.А., Зиньков А.В.* Природно-техногенные преобразования гидrolитосферы в районах ликвидированных угольных шахт // *Вестн. инженерной школы ДВФУ*. 2013. № 3 (16). С. 52–59.

22. *Имайкин А.К., Блинов С.М.* Гидродинамический режим шахтных вод Кизеловского угольного бассейна // *Естеств. и техн. науки*. 2012. № 1 (57). С. 224–228.

23. *Елохина С.Н.* Исследование геоэкологических последствий самозатопления шахтных полей // *Геоэкология*. 2004. № 5. С. 405–414.

24. *Экологический мониторинг ликвидации неперспективных шахт Восточного Донбасса / под ред. В.М. Еремеева. Шахты, 2001. 182 с.*

25. *Мохов А.В., Журбицкий Б.И., Карасев Г.К., Дымна А.И.* Влияние угольного комплекса на геоэкологическую ситуацию // *Проблемы и перспективы комплексного освоения минеральных ресурсов Восточного Донбасса. Ростов н/Д., 2005. С. 129–138.*

References

1. Pashkevich M.A., Parshina M.V. Analiz ekologicheskoi opasnosti ob'ektov ugol'noi promyshlennosti [Analysis of environmental risk of facilities of the coal industry]. *Gorn. inform.-analit. byul.* 2007, No. 10, pp. 305-312.

2. Plakitkina L.S. Razvitie dobychi i eksporta uglya v osnovnykh stranakh mira i Rossii v period 2000–2013 (2012) gg. Vyzovy i ugrozy razvitiyu dobychi i eksporta uglya v Rossii v perspektivnom periode [Development of coal production and exports in the main countries of the world and Russia in the period 2000-2013 (2012). Challenges and threats to the development of coal production and exports in Russia in the future]. *Gornaya promyshlennost'*. 2014, No. 2 (114), pp. 6-12.

3. Panov B.S., Proskurnya Yu.A. [Model of self-ignition of rock dumps of coal mines of Donbass]. *Geologiya ugol'nykh mestorozhdenii* [Geology of coal deposits]. Interuniversity scientific thematic collection. Ekaterinburg, 2002, pp. 274-281.

4. Gipich L.V. Geologo-promyshlennaya tipizatsiya tekhnogenykh mestorozhdenii ugol'nogo ryada [Geological and industrial type safety of technogenic deposits of coal-series]. *Razvedka i okhrana nedr.* 2006, No. 11, pp. 60-63.

5. Potapov V.P., Mazikin V.P., Schastlivtsev E.L., Vashlaeva N.Yu. *Geoekologiya ugledobyvayushchikh raionov Kuzbassa* [Geoecology of coal mining areas of Kuzbass]. Novosibirsk: Nauka, 2005, 660 p.

6. Zakrutkin V.E., Gibkov E.V. Tekhnogennye geokhimicheskie potoki ugledobyvayushchikh territorii i ikh vliyanie na okruzhayushchuyu sredu (na primere Donetskogo basseina) [Mining-induced geochemical flows of coal mining areas and their impact on the environment (on the example of the Donets basin)]. *Izv. vuzov. Sev.-Kavk. region. Estestv. nauki*. 2016, No. 3 (191), pp. 66-71.

7. Kizil'shtein L.Ya. *Ekogeokhimiya elementov-primesei v uglyakh* [Environmental geochemistry of elements-impurities in coals]. Rostov-on-Don: Izd-vo SKNTs VSh, 2002, 296 p.

8. Nikiforova E.M., Solntseva N.P. [Influence of technogenic flows on geochemistry of forest soils (due to coal mining)]. *Dobycha poleznykh iskopaemykh i geokhimiya prirodnykh ekosistem* [Mining and geochemistry of natural ecosystems]. Moscow: Nauka, 1982, pp. 82-130.

9. Zakrutkin V.E., Ivanik V.M. [State of water pollution in the rivers of Rostov region in the areas of technogenic influence of liquidated mines of East Donbass (Tuzlov river basin)]. *Sovremennye fundamental'nye problemy gidrokhimii i monitoringa kachestva poverkhnostnykh vod Rossii* [Modern fundamental problems of hydrochemistry and monitoring of surface water quality in Russia]. Materials of scientific-practical conference with international participation. Rostov-on-Don, 2009, ch. 1, pp. 88-91.

10. Zakrutkin V.E., Ivanik V.M., Gibkov E.V. *Ekologo-geograficheskii analiz riskov restrukturalizatsii ugol'noi promyshlennosti v Vostochnom Donbasse* [Ecologo-geographical analysis of the risks of restructuring the coal industry of East Donbass]. *Izv. RAN. Ser. geogr.* 2010, No. 5, pp. 9-102.
11. Zakrutkin V.E., Ivanik V.M., Gibkov E.V., Sklyarov V.V. *Otsenka vliyaniya likvidiruemykh shakht Vostochnogo Donbassa na gidrokhimicheskii sostav malykh rek basseina Severskogo Dontsa* [Assessment of influence of the liquidated mines Eastern Donbass on the hydrochemical composition of small rivers of the Seversky Donets basin]. *Izv. vuzov. Sev.-Kavk. region. Estestv. nauki.* 2010, No. 3, pp. 84-87.
12. Zakrutkin V.E., Sklyarenko G.Yu., Bakaeva E.N., Reshetnyak O.S., Gibkov E.V., Fomenko N.E. *Poverkhnostnye i podzemnye vody v predelakh tekhnogenno narushennykh geosistem Vostochnogo Donbassa: formirovaniye khimicheskogo sostava i otsenka kachestva* [Surface water and groundwater within the disturbed anthropogenic geosystems of East Donbass: the formation of the chemical composition and quality assessment]. Rostov-on-Don: Izd-vo YuFU, 2016, 171 p.
13. Kovalevskaya N.P. *Biogeokhimicheskii potentsial mikrobiologicheskikh bar'erov v formirovaniye kachestva vody rek Kizelovskogo ugol'nogo basseina* [Biogeochemical potential of microbiological barriers in the formation of water quality of the Kizelovsky coal basin rivers]. *Fundamental'nye issledovaniya.* 2015, No. 2, ch. 19, pp. 4203-4208. Available at: <http://www.fundamental-research.ru/ru/article/view?id=37930> (accessed 14.05.2016).
14. Maksimovich N.G., Men'shikova E.A., Blinov S.M. [Geoecological state of rivers in the areas of coal deposits development]. *Geologiya i mineral'nye resursy evropeiskogo severo-vostoka Rossii: novye rezul'taty i novye perspektivy* [Geology and mineral resources of the European North-East of Russia: new results and new prospects]. Materials of the 18th geological Congress of the Komi Republic. Syktyvkar, 1999, pp. 156-159.
15. Lobchenko E.E., Minina L.I., Nichiporova I.P., Lavrenko N.Yu. [Dynamics of surface water quality on the territory of Kuznetsk coal basin]. *Geoekologicheskie problemy uglepromyshlennykh territorii* [Geoecological problems of coal-industrial areas]. Proceedings of the scientific conference with international participation. Rostov-on-Don: Izd-vo YuFU, 2015, pp. 283-295.
16. Gibkov E.V. *Ekologo-geograficheskii analiz i otsenka gidroekologicheskogo riska na territorii Vostochnogo Donbassa v svyazi s restrukturalizatsiei ugol'noi promyshlennosti* : avtoref. dis. ... kand. geogr. nauk [Ecologo-geographical analysis and assessment of hydroecological risk in the territory of the Eastern Donbass in connection with the restructuring of the coal industry]. Rostov-on-Don, 2011, 23 p.
17. Reshetnyak O.S., Zakrutkin V.E., Gibkov E.V. [Trace elements in the river waters of the Eastern Donbass]. *Geoekologicheskie problemy uglepromyshlennykh territorii* [Geoecological problems of coal-industrial areas]. Proceedings of the scientific conference with the international participation. Rostov-on-Don: Izd-vo YuFU, 2015, pp. 283-295.
18. Mishukova G.I., Mishukov V.F., Obzhairov A.I. *Osobennosti proyavleniya metana v prirodnykh vodakh na territorii Primorskogo kraia Rossii* [Features of methane manifestation in natural waters in the territory of Primorsk region of Russia]. *Vestn. DVO RAN.* 2009, No. 6, pp. 43-49.
19. Maksimovich N.G., Cheremnykh N.V., Khairulina E.A. *Ekologicheskie posledstviya likvidatsii Kizelovskogo ugol'nogo basseina* [Ecological consequences of the Kizel coal basin liquidation]. *Geogr. vestn.* 2006, No. 2, pp. 128-134.
20. Zakrutkin V.E., Sklyarenko G.Yu., Gibkov E.V. *Osobennosti khimicheskogo sostava i stepen' zagryaznenosti podzemnykh vod uglepromyshlennykh raionov Vostochnogo Donbassa* [Peculiarities of chemical composition and degree of contamination of the underground water coal-producing areas of the Eastern Donbass]. *Izv. vuzov. Sev.-Kavk. region. Estestv. nauki.* 2014, No. 4, pp. 73-77.
21. Tarasenko I.A., Zin'kov A.V. *Prirodno-tekhnogenne preobrazovaniya gidrolitosfery v raionakh likvidirovannykh ugol'nykh shakht* [Natural-technogenic transformations of the hydrolithosphere in the areas of liquidated coal mines]. *Vestn. inzhenernoi shkoly DVFU.* 2013, № 3 (16), pp. 52-59.
22. Imaikin A.K., Blinov S.M. *Gidrodinamicheskii rezhim shakhtnykh vod Kizelovskogo ugol'nogo basseina* [Hydrodynamic regime of mine waters of the Kizel coal basin]. *Estestv. i tekhn. nauki.* 2012, No. 1 (57), pp. 224-228.
23. Elokhina S.N. *Issledovaniye geoekologicheskikh posledstviy samozatopeniya shakhtnykh polei* [Study of the geoecological consequences of self-flooding of mine fields]. *Geoekologiya.* 2004, No. 5, pp. 405-414.
24. *Ekologicheskii monitoring likvidatsii neperspektivnykh shakht Vostochnogo Donbassa* [Environmental monitoring of unviable mines Eastern Donbass]. Ed. V.M. Eremeev. Shakhty, 2001, 182 p.
25. Mokhov A.V., Zhurbitskii B.I., Karasev G.K., Dymna A.I. [Influence of the coal complex on the geoecological situation]. *Problemy i perspektivy kompleksnogo osvoeniya mineral'nykh resursov Vostochnogo Donbassa* [Problems and prospects of integrated development of mineral resources of the Eastern Donbass]. Rostov-on-Don, 2005, pp. 129-138.

ПРИБЛИЖЕННОЕ АНАЛИТИЧЕСКОЕ РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ОБ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОМ СОСТОЯНИИ ПРИЗЕМНОЙ АТМОСФЕРЫ В УСЛОВИЯХ АЭРОЗОЛЬНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ

© 2018 г. Г.В. Куповых¹, А.Г. Клово¹, Д.В. Тимошенко¹, С.С. Свидельский¹
¹Южный федеральный университет, Таганрог, Россия

APPROXIMATE ANALYTICAL SOLUTION OF THE PROBLEM OF THE ELECTRODYNAMIC STATE OF THE SURFACE ATMOSPHERE IN THE CONDITIONS OF AEROSOL POLLUTION

G.V. Kupovykh¹, A.G. Klovo¹, D.V. Timoshenko¹, S.S. Svidelsky¹
¹Southern Federal University, Taganrog, Russia

Куповых Геннадий Владимирович – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой высшей математики, Институт компьютерных технологий и информационной безопасности, Южный федеральный университет, пер. Некрасовский, 44, г. Таганрог, Ростовская область, 347928, Россия, e-mail: kupovykh@sfedu.ru

Gennady V. Kupovykh - Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Head of the Department of Higher Mathematics, Institute of Computer Technology and Information Security, Southern Federal University, Nekrasovskii Lane, 44, Taganrog, Rostov Region, 347928, Russia, e-mail: kupovykh@sfedu.ru

Клово Александр Георгиевич – кандидат технических наук, доцент, кафедра высшей математики, Институт компьютерных технологий и информационной безопасности, Южный федеральный университет, пер. Некрасовский, 44, г. Таганрог, Ростовская область, 347928, Россия, e-mail: klovo_ag@mail.ru

Aleksandr G. Klovo - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Higher Mathematics, Institute of Computer Technology and Information Security, Southern Federal University, Nekrasovskii Lane, 44, Taganrog, Rostov Region, 347928, Russia, e-mail: klovo_ag@mail.ru

Тимошенко Дмитрий Владимирович – кандидат физико-математических наук, доцент, кафедра высшей математики, Институт компьютерных технологий и информационной безопасности, Южный федеральный университет, пер. Некрасовский, 44, г. Таганрог, Ростовская область, 347928, Россия, e-mail: dmitrytim@yandex.ru

Dmitry V. Timoshenko - Candidate of Physics and Mathematics, Associate Professor, Department of Higher Mathematics, Institute of Computer Technology and Information Security, Southern Federal University, Nekrasovskii Lane, 44, Taganrog, Rostov Region, 347928, Russia, e-mail: dmitrytim@yandex.ru

Свидельский Сергей Сергеевич – аспирант, Институт компьютерных технологий и информационной безопасности, Южный федеральный университет, пер. Некрасовский, 44, г. Таганрог, Ростовская область, 347928, Россия e-mail: dr.leavesea@yahoo.com

Sergey S. Svidelsky - Postgraduate, Institute of Computer Technology and Information Security, Southern Federal University, Nekrasovskii Lane, 44, Taganrog, Rostov Region, 347928, Russia, e-mail: dr.leavesea@yahoo.com

Описывается электродинамическая модель горизонтально-однородной турбулентной приземной атмосферы при наличии в воздухе монодисперсных аэрозольных частиц. Математическая модель включает в себя нестационарные ионизационно-рекомбинационные уравнения переноса под действием электрического поля и турбулентной диффузии полярных легких ионов (аэроионов), в том числе члены, описывающие их взаимодействие с аэрозольными частицами, а также стационарное уравнение Пуассона с учетом образовавшихся тяжелых ионов. Предполагается выполнение условия равновесия для тяжелых ионов, и их перенос не учитывается. Анализ системы уравнений позволяет оценить время установления стационарного электродинамического состояния, которое меняется от 100 до нескольких десятков секунд при увеличении концентраций аэрозольных частиц в атмосфере от $5 \cdot 10^9$ до $5 \cdot 10^{10}$ м⁻³. Характерная высота электродного слоя меняется от нескольких десятков сантиметров до нескольких метров: увеличивается при усилении степени турбулентного перемешивания и уменьшается при повышении концентрации аэрозольных частиц. Для получения стационарных аналитических решений уравнений модели сделаны следующие допущения: скорость ионизации в приземной атмосфере считается постоянной; при рассматриваемых концентрациях аэрозольных частиц рекомбинацией легких ионов можно пренебречь; электрическое поле и коэффициенты турбулентной диффузии (для легких и тяжелых ионов) постоянны и не зависят от высоты. Получены приближенные аналитические выражения для распределения по высоте кон-

центраций полярных аэроионов и плотности объемного электрического заряда в зависимости от значений концентрации аэрозольных частиц, напряженности электрического поля и степени турбулентного перемешивания. Полученные результаты хорошо согласуются с теорией электродного эффекта в атмосфере и могут быть основой для построения численной модели электродинамических процессов в приземном слое атмосферы.

Ключевые слова: атмосфера, аэроионы, аэрозоль, электрическое поле, объемный заряд, турбулентная диффузия, приземный слой, электродный эффект, электродинамика.

The article describes an electrodynamic model of the horizontally homogeneous turbulent surface atmosphere in the presence of monodisperse aerosol particles. The mathematical model includes nonstationary ionization-recombination transport equations due to the electric field and turbulent diffusion of polar light ions (air ions), including terms describing their interaction with aerosol particles and also the stationary Poisson equation with allowance for the formed heavy ions. It is assumed that the equilibrium condition for heavy ions is satisfied, and their transfer is not taken into account. Analysis of the system of equations makes it possible to estimate the time of establishment of a stationary electrodynamic state, which varies from 100 to several tens of seconds with an increase in the concentrations of aerosol particles in the atmosphere from $5 \cdot 10^9$ to $5 \cdot 10^{10} \text{ m}^{-3}$. The characteristic height of the electrode layer varies from several tens of centimeters to several meters: it increases with increasing degree of turbulent mixing and decreases with increasing concentration of aerosol particles. To obtain stationary analytical solutions of the model equations, the following assumptions are made: the rate of ionization in the surface atmosphere is assumed to be constant; at the considered concentrations of aerosol particles, recombination of light ions can be neglected; the electric field and the coefficients of turbulent diffusion (for light and heavy ions) are constant and do not depend on altitude. Approximate analytical expressions are obtained for the vertical distribution of the concentrations of polar aero ions and the density of the space electric charge as a function of the concentration of aerosol particles, the electric field strength, and the degree of turbulent mixing. The obtained results are in good agreement with the theory of the electrode effect in the atmosphere and can be the basis for constructing a numerical model of electrodynamic processes in the surface layer.

Keywords: atmosphere, air ions, aerosol, electric field, space charge, turbulent diffusion, surface layer, electrode effect, electrostatics.

В монографиях по теории атмосферного электричества [1–4] описаны модели электрического состояния приземного слоя в приближении электродного эффекта для различных метеорологических условий с учетом наличия аэрозольных частиц в воздухе. Стационарность общей модели электродного эффекта в атмосфере предполагает, что условия равновесия между тяжелыми и легкими ионами выполнены. В результате проведенных исследований установлено, что присутствие в воздухе аэрозольных частиц и осаждение на них легких ионов (аэроионов) приводят к образованию тяжелых ионов, и, как следствие, уменьшается электрический объемный заряд, обусловленный аэроионами. При достаточно больших концентрациях аэрозоля (более 10^{10} м^{-3}) объемный заряд, создаваемый тяжелыми ионами, полностью определяет электрическую структуру приземного слоя.

В силу сложности и многофакторности протекающих в атмосфере процессов, сегодня часто используются численные методы решений математических уравнений модели. Однако для правильной постановки задач моделирования и последующей интерпретации результатов полезно проводить предварительные аналитические исследования математической модели с целью определения основных закономерностей в поведении расчетных характеристик в зависимости от параметров моделирования.

Будем исходить из того, что приземный слой заполнен монодисперсными аэрозольными частицами. Предполагая, что аэроионы заряжаются однократно, пренебрегая переносом тяжелых ионов, образующихся за счет взаимодействия аэроионов с аэрозолем, систему уравнений для описания электродинамического состояния горизонтально-однородного приземного слоя можно представить в виде [5–7]

$$\begin{aligned} \frac{\partial n_1}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial z} \left(D_T(z) \cdot \frac{\partial n_1}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial z} (b_1 E n_1) &= \\ = q - \alpha n_1 n_2 - n_1 \eta_1 N_2 - n_1 \eta_2 N_0, \\ \frac{\partial n_2}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial z} \left(D_T(z) \cdot \frac{\partial n_2}{\partial z} \right) - \frac{\partial}{\partial z} (b_2 E n_2) &= \\ = q - \alpha n_1 n_2 - n_2 \eta_1 N_1 - n_2 \eta_2 N_0, \\ \frac{\partial E}{\partial z} &= \frac{e}{\epsilon_0} (n_1 - n_2 + N_1 - N_2), \\ N_0 + N_1 + N_2 &= N = \text{const}, \end{aligned} \quad (1)$$

где $n_{1,2}$ – объемная концентрация легких ионов; $b_{1,2}$ – их подвижность; E – напряженность электрического поля; q – интенсивность ионообразования; α – коэффициент рекомбинации легких ионов; $N_{1,2}$ – объемные концентрации положительных и отрицательных тяжелых ионов; N_0 – концентрация нейтральных аэрозольных частиц; N – полная кон-

центрация аэрозольных частиц; $D_T(z)$ – коэффициент турбулентной диффузии для легких ионов; $\eta_{1,2}$ – коэффициенты воссоединения легких ионов с аэрозольными частицами; e – элементарный заряд; ε_0 – электрическая постоянная.

Первое и второе уравнения системы (1) – ионизационно-рекомбинационные уравнения для легких ионов; третье – уравнение Пуассона вместе с условием равновесия для тяжелых ионов.

Положим, что коэффициенты турбулентной диффузии для легких и тяжелых ионов совпадают и не меняются, т.е. $D_T(z) = \chi(z) = D_0 = \text{const}$, что соответствует устойчивой стратификации приземного слоя атмосферы [8]. Для приведения системы (1) к безразмерному виду введем обозначения:

$$N'_{1,2} = \frac{N_{1,2}}{N_\infty}, n'_{1,2} = \frac{n_{1,2}}{n_\infty}, E' = \frac{E}{E_\infty}, t' = \frac{t}{T}, z' = \frac{z}{l_0},$$

$$l_0 = (D_0 \tau_N)^{1/2}, \tau_N = \frac{1}{\sqrt{(BN)^2 + 4\alpha q}}, \quad (2)$$

$$n_\infty = n_{1,2}(z=l) = \frac{-BN + \sqrt{(BN)^2 + 4\alpha q}}{2\alpha}.$$

Здесь $B = \frac{2\eta_1\eta_2}{\eta_1 + 2\eta_2}$ – параметр, зависящий от ко-

эффициентов взаимодействия легких ионов, нейтральных и заряженных аэрозольных частиц; E_∞ – значение напряженности электрического поля на верхней границе электродного слоя l , где выполняются условия:

$$\frac{\partial n_{1,2}}{\partial z} \Big|_{z \rightarrow l} \rightarrow 0, \quad \frac{\partial N_{1,2}}{\partial z} \Big|_{z \rightarrow l} \rightarrow 0, \quad \frac{\partial E}{\partial z} \Big|_{z \rightarrow l} \rightarrow 0;$$

l_0 – характерная толщина турбулентного электродного слоя с учетом наличия аэрозольных частиц с концентрацией N ; T – характерное время изменения электродинамических характеристик атмосферы.

В зависимости от значений концентрации аэрозольных частиц N и значений коэффициента турбулентной диффузии D_0 характерное время τ_N и характерная высота l_0 электродного слоя в соответствии с формулами системы (2) принимают значения, представленные в табл. 1.

На первом этапе получим аналитические решения соответствующих дифференциальных уравнений для нахождения распределений концентраций положительных и отрицательных легких ионов по высоте: $n_{1,2}(z)$. Далее на основании уравнения Пуассона осуществим расчет плотности электрического заряда ρ и напряженности электрического поля E , создаваемого этим объемным зарядом. Для этого проинтегрируем уравнение Пуассона, и полученное выражение представим в виде

$$E_r = E_0 - \frac{1}{\varepsilon_0} \int_0^l \rho(z) dz, \quad \rho(z) = \rho_n + \rho_N, \quad (3)$$

где E_r – результирующее электрическое поле; E_0 – напряженность электрического поля вне электродного слоя; ρ_n, ρ_N – плотности электрического заряда, создаваемые легкими и тяжелыми ионами (аэрозольными частицами) соответственно.

Таблица 1

Характерные значения времени установления и высоты электродного слоя / Characteristic values of the establishment time and the height of the electrode layer

Параметры модели: $\eta_1=1,4 \cdot 10^{-12} \text{ м}^{-3}\text{с}^{-1}, \eta_2=4 \cdot 10^{-12} \text{ м}^{-3}\text{с}^{-1},$ $q=10^7 \text{ м}^{-3}\text{с}^{-1}, \alpha=1,6 \cdot 10^{-12} \text{ м}^{-3}\text{с}^{-1}$			
$N, \text{ м}^{-3}$	$D_0, \text{ м}^2/\text{с}$	$\tau_N, \text{ с}$	$l_0, \text{ м}$
$5 \cdot 10^9$	0,01	101	1,0
	0,1		3,2
$1 \cdot 10^{10}$	0,01	69	0,8
	0,1		2,6
$5 \cdot 10^9$	0,01	17	0,4
	0,1		1,3

Таким образом, расчеты плотности объемного заряда ρ_n , создаваемого полярными аэроионами, и напряженности электрического поля E , генерируемого этим объемным зарядом, будем проводить по формулам:

$$\rho_n(z) = e(n_1 - n_2), \quad E = \frac{1}{\varepsilon_0} \int_0^l \rho_n(z) dz. \quad (4)$$

Для получения аналитических решений упростим систему (1), сделав следующие допущения:

1) рассмотрим стационарный случай электродинамической модели горизонтально-однородного приземного слоя атмосферы с учетом наличия в нем аэрозольных частиц;

2) скорость ионизации в приземной атмосфере предположим постоянной $q = \text{const}$;

3) при значительных концентрациях аэрозольных частиц в атмосфере, сопоставимых с концентрациями аэроионов (более $2 \cdot 10^9 \text{ м}^{-3}$), процессом рекомбинации легких ионов можно пренебречь;

4) для получения аналитического решения предположим, что электрическое поле $E_r = E_0$ и не зависит от высоты;

5) пренебрежем переносом тяжелых ионов, тогда $\eta_1 \approx \eta_2 = \eta$, а член в правой части ионизационно-рекомбинационных уравнений, описывающий взаимодействие аэроионов с аэрозолем, запишем в виде $BN_{1,2}$ [6].

Таким образом, ограничимся рассмотрением следующей системы, вытекающей из первых двух уравнений (1):

$$D_0 \frac{d^2 n_{1,2}}{dz^2} \pm b_{1,2} E_0 \frac{dn_{1,2}}{dz} - BN n_{1,2} = -q. \quad (5)$$

с граничными условиями:

$$n_{1,2}(z = z_0) = 0, \quad n_{1,2}(z = l) = \sqrt{\frac{q}{\alpha}} = n_\infty, \quad (6)$$

где z_0 – параметр шероховатости земной поверхности.

Рассмотрим уравнение, вытекающее из системы (5), описывающее изменение концентрации n_1 положительно заряженных аэроионов:

$$D_0 \frac{d^2 n_1}{dz^2} - b_1 E_0 \frac{dn_1}{dz} - BN n_1 = -q. \quad (7)$$

Уравнение (7) является линейным неоднородным обыкновенным дифференциальным уравнением второго порядка с постоянными коэффициентами [9] и может быть решено аналитически. Общим решением уравнения (7) является функция

$$n_1(z) = C_1 e^{k_1 z} + C_2 e^{k_2 z} + \frac{q}{BN}, \quad (8)$$

где $k_{1,2} = \frac{b_1 E_0 \pm \sqrt{4D_0 BN + (b_1 E_0)^2}}{2D_0}$; $C_{1,2}$ – произвольные постоянные.

Используя граничные условия (6), найдем значения констант $C_{1,2}$, входящих в (8):

$$\begin{cases} C_1 = -e^{(k_2 - k_1)z_0} \frac{BN n_\infty + q \cdot (e^{k_1(l-z_0)} - 1)}{BN(e^{k_2 l} - e^{(k_2 - k_1)z_0 + k_1 l})} - \frac{q e^{-k_1 z_0}}{BN}, \\ C_2 = (e^{k_1(l-z_0)} - 1) \frac{BN n_\infty + q \cdot (e^{k_1(l-z_0)} - 1)}{BN(e^{k_2 l} - e^{(k_2 - k_1)z_0 + k_1 l})}. \end{cases} \quad (9)$$

После некоторых преобразований получаем распределение концентрации положительно заряженных легких ионов по высоте:

$$n_1(z) = \frac{BN n_\infty + q \cdot (e^{k_1(l-z_0)} - 1)}{BN(e^{k_2 l} - e^{(k_2 - k_1)z_0 + k_1 l})} (e^{k_2 z} - e^{(k_2 - k_1)z_0 + k_1 z}) + \frac{q}{BN} (1 - e^{k_1(z-z_0)}). \quad (10)$$

Аналогично, решая второе уравнение системы (5) для концентрации отрицательно заряженных легких ионов n_2 , получим

$$n_2(z) = \frac{BN n_\infty + q \cdot (e^{m_1(l-z_0)} - 1)}{BN(e^{m_2 l} - e^{(m_2 - m_1)z_0 + m_1 l})} (e^{m_2 z} - e^{(m_2 - m_1)z_0 + m_1 z}) +$$

$$+ \frac{q}{BN} (1 - e^{m_1(z-z_0)}), \quad (11)$$

$$\text{где } m_{1,2} = \frac{-b_2 E_0 \pm \sqrt{4D_0 BN + (b_2 E_0)^2}}{2D_0}.$$

Подставляя в первое уравнение (4) выражения (10) и (11), получим выражение для плотности объемного заряда:

$$\rho(z) = \quad (12)$$

$$= e \left(\frac{BN n_\infty + q \cdot (e^{k_1(l-z_0)} - 1)}{BN(e^{k_2 l} - e^{(k_2 - k_1)z_0 + k_1 l})} (e^{k_2 z} - e^{(k_2 - k_1)z_0 + k_1 z}) - \frac{q}{BN} e^{k_1(z-z_0)} \right) - e \left(\frac{BN n_\infty + q \cdot (e^{m_1(l-z_0)} - 1)}{BN(e^{m_2 l} - e^{(m_2 - m_1)z_0 + m_1 l})} (e^{m_2 z} - e^{(m_2 - m_1)z_0 + m_1 z}) - \frac{q}{BN} e^{m_1(z-z_0)} \right).$$

Найдем выражение для напряженности электрического поля E , подставляя выражение (12) во второе уравнение (4). Интегрирование дает следующий результат:

$$E(l) = \frac{e}{\varepsilon_0} \left(A_1 \left(\frac{1}{k_2} (e^{k_2 l} - 1) - \frac{1}{k_1} e^{(k_2 - k_1)z_0} (e^{k_1 l} + 1) \right) - \frac{q}{BN} \cdot \frac{1}{k_1} e^{-k_1 z_0} (e^{k_1 l} + 1) \right) - \frac{e}{\varepsilon_0} \left(A_2 \left(\frac{1}{m_2} (e^{m_2 l} - 1) - \frac{1}{m_1} e^{(m_2 - m_1)z_0} (e^{m_1 l} + 1) \right) - \frac{q}{BN} \cdot \frac{1}{m_1} e^{-m_1 z_0} (e^{m_1 l} + 1) \right), \quad (13)$$

$$\text{где } A_1 = \frac{BN n_\infty + q \cdot (e^{k_1(l-z_0)} - 1)}{BN(e^{k_2 l} - e^{(k_2 - k_1)z_0 + k_1 l})},$$

$$A_2 = \frac{BN n_\infty + q \cdot (e^{m_1(l-z_0)} - 1)}{BN(e^{m_2 l} - e^{(m_2 - m_1)z_0 + m_1 l})}.$$

В табл. 2 представлены следующие расчетные величины: максимальные значения плотности объемного заряда и высоты, напряженности электрического поля, генерируемого объемным зарядом аэроионов, для различных значений коэффициента турбулентной диффузии: $D_0=0,01 \text{ м}^2/\text{с}$ и $D_0=0,1 \text{ м}^2/\text{с}$.

Анализ полученных аналитических решений позволяет сделать следующие выводы:

1. При равных значениях концентрации аэрозольных частиц в воздухе N с ростом напряженности электрического поля E_0 увеличиваются значения плотности объемного заряда ρ_{\max} и электрического поля E в приземном слое, генерируемые аэроионами.

2. С увеличением концентрации аэрозольных частиц N при одном и том же значении напряженности электрического поля E_0 происходит уменьшение

значений плотности объемного заряда ρ_{\max} и электрического поля E .

3. Значения электрического поля E в приземном слое, создаваемого аэроионами, уменьшаются с ростом концентрации аэрозольных частиц и увеличиваются при усилении степени турбулентного перемешивания.

4. Усиление степени турбулентного перемешивания увеличивает масштаб распределения электрических характеристик и значения электрического поля, обуславливаемого объемным зарядом.

5. Изменение максимального значения плотности объемного заряда ρ_{\max} пропорционально изменению значений напряженности электрического поля E_0 (ρ_{\max} уменьшается или увеличивается в зависимости от изменения значения E_0).

6. Высота z_{\max} , соответствующая максимальному значению плотности объемного заряда ρ_{\max} , остается практически неизменной при одних и тех же значениях концентрации аэрозоля N вне зависимости от степени турбулентного перемешивания. С увеличением значения концентрации N аэрозольных частиц в воздухе значения z_{\max} уменьшаются.

7. Следует отметить, что предположение о постоянстве электрического поля $E_r = E_0$, т.е. пренебрежение вкладом объемного заряда ρ_n аэроионов в генерацию поля у земли, вполне законно при концентрациях аэрозольных частиц N в воздухе более 10^{10} м^{-3} .

Таблица 2

Значения максимальной плотности объемного заряда и напряженности электрического поля для $D_0=0,01 \text{ м}^2/\text{с}$ и $D_0=0,1 \text{ м}^2/\text{с}$
/ The values of the maximum density of the space charge and the electric field strength for $D_0=0.01 \text{ м}^2/\text{с}$ and $D_0=0.1 \text{ м}^2/\text{с}$

$E_0, \text{ В/м}$	-100			-50			-200			-500		
$N \cdot 10^{10}, \text{ м}^{-3}$	1	5	0,5	1	5	0,5	1	5	0,5	1	5	0,5
$D_0=0,01$												
$\rho_{\max} \cdot 10^{11}, \text{ Кл/м}^3$	8	2	10	4	0,9	7	10	4	20	30	9	30
$z_{\max}, \text{ м}$	0,4	0,1	0,8	0,4	0,1	0,8	0,4	0,1	0,8	0,4	0,1	0,8
$E, \text{ В/м}$	-5	-1	-14	-2	-1	-8	-9	-1	-26	-18	-1	-41
$D_0=0,1$												
$\rho_{\max} \cdot 10^{11}, \text{ Кл/м}^3$	4	2	5	2	80	3	8	3	10	20	7	20
$z_{\max}, \text{ м}$	4,9	0,9	6,3	4,6	0,9	6,3	4,7	0,9	6,4	5,2	0,9	5,4
$E, \text{ В/м}$	-27	-2	-65	-14	-1	-33	-53	-4	-125	-116	-10	-257

Полученные приближенные аналитические решения для распределения концентраций полярных аэроионов по высоте для различных физических условий в целом не противоречат теории электродного эффекта в атмосфере [1–4]. Объемный электрический заряд, создаваемый легкими ионами, в каждом исследуемом случае является положительным, что также хорошо согласуется с известными теоретическими и экспериментальными данными [10]. Аэрозоль при концентрациях, превышающих характерные значения для аэроионов, практически полностью определяет электродинамическую структуру приземной атмосферы.

Литература

1. *Куповых Г.В.* Электродинамические процессы в приземном слое атмосферы. Таганрог : Изд-во ТТИ ЮФУ, 2009. 114 с.
2. *Морозов В.Н.* Математическое моделирование атмосферно-электрических процессов с учетом влияния аэрозольных частиц и радиоактивных веществ. СПб. : Изд-во РГГМУ, 2011. 253 с.
3. *Морозов В.Н., Куповых Г.В.* Математическое моделирование глобальной атмосферной электриче-

ской цепи и электричества приземного слоя. СПб. : Астерион, 2017. 307 с.

4. *Куповых Г.В., Морозов В.Н., Шварц Я.М.* Теория электродного эффекта в атмосфере. Таганрог : Изд-во ТРТУ, 1998. 123 с.

5. *Морозов В.Н., Куповых Г.В., Редин А. А., Кудринская Т.В.* Нестационарное физико-математическое моделирование электрических процессов в приземном слое атмосферы с учетом субмикронных аэрозольных частиц // Тр. ГГО им. А.И. Воейкова. СПб., 2017. Вып. 584. С. 36–57.

6. *Редин А.А., Куповых Г.В., Клово А.Г., Болдырев А.С.* Математическое моделирование электродинамических процессов в приземном слое в условиях аэрозольного загрязнения атмосферы // Изв. ЮФУ. Техн. науки. 2011. № 8 (121). С. 111–121.

7. *Редин А.А., Куповых Г.В., Болдырев А.С.* Электродинамическая модель конвективно-турбулентного приземного слоя атмосферы // Изв. вузов. Радиофизика. 2013. Т. 56, № 11–12. С. 820–828.

8. *Орленко Л.Р.* Строение планетарного пограничного слоя атмосферы. Л. : Гидрометеиздат, 1979. 270 с.

9. *Корн Г., Корн Т.* Справочник по математике для научных работников и инженеров. М. : Наука, 1984. 831 с.

10. Чалмерс Дж.А. Атмосферное электричество. Л. : Гидрометеиздат, 1974. 420 с.

References

1. Kupovykh G.V. *Elektrodinamicheskie protsessy v prizemnom sloe atmosfery* [Electrodynamic processes in the surface layer of the atmosphere]. Taganrog: Izd-vo TTI YuFU, 2009, 114 p.

2. Morozov V.N. *Matematicheskoe modelirovanie atmosferno-elektricheskikh protsessov s uchetom vliyaniya aerazol'nykh chastits i radioaktivnykh veshchestv* [Mathematical modeling of atmospheric-electrical processes taking into account the influence of aerosol particles and radioactive substances]. Saint Petersburg: Izd-vo RGGMU, 2011, 253 p.

3. Morozov V.N., Kupovykh G.V. *Matematicheskoe modelirovanie global'noi atmosferno elektricheskoi tsepi i elektrichestva prizemnogo sloya* [Mathematical modeling of the global atmospheric electric circuit and electricity of the surface layer]. Saint Petersburg: Asterion, 2017, 307 p.

4. Kupovykh G.V., Morozov V.N., Shvarts Ya.M. *Teoriya elektrodnoogo effekta v atmosfere* [Theory of electrode effect in the atmosphere]. Taganrog: Izd-vo TRTU, 1998, 123 p.

5. Morozov V.N., Kupovykh G.V., Redin A. A., Kudrinskaya T.V. *Nestatsionarnoe fiziko-matematicheskoe modelirovanie elektricheskikh protsessov v prizem-*

nom sloe atmosfery s uchetom submikronnykh aerazol'nykh chastits [Nonstationary physico-mathematical modeling of electrical processes in the atmospheric surface layer subject to submicron aerosol particles]. *Tr. GGO im. A.I. Voeikova*. Saint Petersburg, 2017, iss. 584, pp. 36-57.

6. Redin A.A., Kupovykh G.V., Klovo A.G., Boldyrev A.S. *Matematicheskoe modelirovanie elektrodinamicheskikh protsessov v prizemnom sloe v usloviyakh aerazol'nogo zagryazneniya atmosfery* [Mathematical modeling of electrodynamic processes in the surface layer in terms of aerosol pollution of the atmosphere]. *Izv. YuFU. Tekhn. nauki*. 2011, No. 8 (121), pp. 111-121.

7. Redin A.A., Kupovykh G.V., Boldyrev A.S. *Elektrodinamicheskaya model' konvektivno-turbulentnogo prizemnogo sloya atmosfery* [Electrodynamic model of the convective-turbulent surface layer of the atmosphere]. *Izv. vuzov. Radiofizika*. 2013, vol. 56, No. 11-12, pp. 820-828.

8. Orlenko L.R. *Stroenie planetarnogo pogrannichnogo sloya atmosfery* [Structure of the planetary boundary layer of the atmosphere]. Leningrad: Gidrometeizdat, 1979, 270 p.

9. Korn G., Korn T. *Spravochnik po matematike dlya nauchnykh rabotnikov i inzhenerov* [Handbook of mathematics for scientists and engineers]. Moscow: Nauka, 1984, 831 p.

10. Chalmers Dzh.A. *Atmosfernoe elektrichestvo* [Atmospheric electricity]. Leningrad: Gidrometeizdat, 1974, 420 p.

УДК 553.98(262.81)

DOI 10.23683/0321-3005-2018-2-90-94

РАЗВИТИЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ О ВОЗОБНОВЛЯЕМОСТИ УГЛЕВОДОРОДОВ В РАЗРАБАТЫВАЕМЫХ ЗАЛЕЖАХ И ПУТИ РАЦИОНАЛЬНОЙ ДОБЫЧИ НЕФТИ И ГАЗА

© 2018 г. Э.С. Сианисян¹, А.В. Бочкарев², В.А. Бочкарев³, С.Э. Сианисян³

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

²Российский государственный университет нефти и газа им. И.М. Губкина, Москва, Россия,

³LUKOIL International Upstream West Inc., Хьюстон, США

THE DEVELOPMENT OF IDEAS ABOUT THE SUSTAINABILITY OF HYDROCARBONS IN EXISTING RESERVOIRS, AND THE SUSTAINABLE PRODUCTION OF OIL AND GAS

E.S. Sianisyan¹, A.V. Bochkarev², V.A. Bochkarev³, S.E. Sianisyan³

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

²Gubkin Russian State University of Oil and Gas, Moscow, Russia,

³LUKOIL International Upstream West Inc., Houston, USA

Сианисян Эдуард Саркисович – доктор геолого-минералогических наук, профессор, кафедра геологии нефти и газа, Институт наук о Земле, Южный федеральный университет, ул. Зорге, 40, г. Ростов-на-Дону, 344090, Россия, e-mail: edward@sfedu.ru

Eduard S. Sianisyan - Doctor of Geology and Mineralogy, Professor, Department of Oil and Gas Geology, Institute of Earth Sciences, Southern Federal University, Zorge St., 40, Rostov-on-Don, 344090, Russia, e-mail: edward@sfedu.ru

Бочкарев Анатолий Владимирович – доктор геолого-минералогических наук, профессор, кафедра общей и нефтегазопромысловой геологии, Российский государственный университет нефти и газа им. И.М. Губкина, ул. Нагорная, 5, г. Лосино-Петровский, 141150, Россия, e-mail: anatolybochkarev@gmail.com

Anatoly V. Bochkarev - Doctor of Geology and Mineralogy, Professor, Department of General and Oil and Gas Geology, Gubkin Russian State University of Oil and Gas, Nagornaya St., 5, Losino-Petrovskii, 141150, Russia, e-mail: anatolybochkarev@gmail.com

Бочкарев Виталий Анатольевич – кандидат геолого-минералогических наук, заместитель директора по геологоразведке, LUKOIL International Upstream West Inc., 3 Гринвэй Плаза, г. Хьюстон, штат Техас, 77046, США, e-mail: Vitaliy.Bochkarev@lukoil-international.com

Vitaliy A. Bochkarev - Candidate of Geology and Mineralogy, Deputy Head of the Geological Prospecting, LUKOIL International Upstream West Inc., 3 Greenway Plaza, Houston, Texas, 77046, USA, e-mail: Vitaliy.Bochkarev@lukoil-international.com

Сианисян Сергей Эдуардович – кандидат геолого-минералогических наук, заместитель менеджера по геологии, LUKOIL International Upstream West Inc., Гринвэй Плаза, 3, г. Хьюстон, штат Техас, 77046, США, e-mail: Sergey.Sianisyan@lukoil-international.com

Sergey E. Sianisyan - Candidate of Geology and Mineralogy, Deputy Manager for Geology, LUKOIL International Upstream West Inc., Greenway Plaza, 3, Houston, Texas, 77046, USA, e-mail: Sergey.Sianisyan@lukoil-international.com

Представлен обзор исследований российских ученых в области изучения естественного обновления запасов углеводородов в пределах Терско-Каспийского краевого прогиба и зоне сочленения между юго-восточным склоном Воронежской антеклизы и западного края Прикаспийской синеклизы. В основу приведенных исследований положена концепция двухэтапного формирования месторождений углеводородов, основанная на органической теории происхождения нефти. Характерными показателями концепции являются погружение потенциально исходных пород на глубину газового окна, наличие зон накопления, а также современных миграционных каналов. Убедительным доказательством многоэтапного формирования залежей нефти и газа в Прикаспийской впадине и Терско-Каспийском прогибе явились выполненные нами исследования флюидных включений. Расчеты и доказательства, экспериментальные исследования позволили на основе созданной модели разломно-блокового строения и двухэтапного формирования залежей УВ обобщать перспективы нефтегазоносности и целесообразность ведения геолого-разведочных работ в пределах этих областей. Предложены пути рациональной добычи нефти и газа на месторождении Северные Бузачи со значительным увеличением коэффициента извлекаемой нефти.

Ключевые слова: Тенгиз, Северные Бузачи, Бузачинский свод, блоковое строение, генезис УВ, палеозойские отложения, юрский продуктивный пласт, нефтяные залежи в рифовых постройках.

The article presents the review of Russian scientists researches in the study of natural renewal of hydrocarbon reserves in the Terek-Caspian foredeep sag and the zone of joint between southeastern slope of the Voronezh anticline and west edge of the Pricaspiysk syncline. The conception of two-step formation of hydrocarbon deposits relied on organic theory of oil origin is in the base of introduced investigations. The main points of the concept are potentially dip source rocks in the deep gas window, the presence of current migration channels and the presence of areas of accumulation. Studies of fluid inclusions, performed by us, were a convincing proof of the multistage formation of oil and gas deposits in the Caspian basin and the Terek-Caspian deflection. Calculations, proofs, experimental researches have allowed to prove prospects of oil and gas potential and expediency of conducting geological prospecting works within these areas on the basis of the created model of a fault-block structure and two-stage formation of deposits of hydrocarbons. The ways of rational oil and gas production at the Severnye Buzachi field with a significant increase in the coefficient of extracted oil are proposed.

Keywords: *Tengiz, Severnye Buzachi, Buzachin vault, block structure, genesis of hydrocarbons, Paleozoic deposits, Jurassic productive lauer, oil deposits in reef buildings.*

Ранее на основе анализа геологических, геохимических, гидродинамических процессов нами совместно с С.Б. Остроуховым была предложена и разработана модель двухэтапного формирования залежей нефти и газа [1–4]. В классическом варианте схема двухэтапного формирования залежей углеводородов (УВ) на примере платформенного и бортового склонов Прикаспийской впадины выглядит следующим образом. На первом этапе депрессионная и платформенная части впадины в девонское и каменноугольное время испытывали устойчивое погружение, обеспечивая компенсированное осадконакоплением погружение бортовой части. К началу верхнекаменноугольного периода нефтегазоматеринские отложения девона и нижней части раннего карбона находились в погруженных частях западного борта Прикаспийской впадины, в условиях главной зоны нефтеобразования (интервал глубин 1800–3000 м, градации катагенеза МК¹₁–МК²₂). Нефтегазовые залежи формировались как в зоне генерации, так и на путях миграции УВ.

На втором этапе материнские породы оказались в условиях главной зоны газообразования (интервал глубин 3000–4300 м, градации катагенеза МК³₁–МК⁵₁) и зоны метанообразования (интервал глубин 4300–5300 м и до фундамента, градации МК⁵₁–АК³₂ и более), в которых идут активные процессы генерации и эмиграции углеводородных газов.

В результате влияния газового потока в разрезе бортовой части впадины и ее платформенного продолжения сформировались на данном этапе развития нефтегазоносного бассейна три основные зоны: газовая, переходная от газовой к нефтяной и нефтяная. На путях миграции газоконденсатных растворов происходят процессы перераспределения ранее сформировавшихся залежей.

Новая газоконденсатная история подобных залежей связана с постоянно возобновляемыми запасами УВ зоны генерации, где уже имеются избыточные ресурсы углеводородных газов (УВГ) в условиях аномально высоких пластовых давлений

(АВПД). В связи с этим подток УВГ сопровождается ростом пластового давления в залежи, что подтверждается замерами пластовых давлений на ряде залежей.

Убедительным доказательством многоэтапного формирования залежей нефти и газа в пределах платформенного и бортового склонов Прикаспийской впадины явились выполненные нами исследования флюидных включений. Полученные декриптограммы свидетельствуют о том, что максимальные палеотемпературы Малышевско-Петровской структурной зоны достигали в породах бобриковского горизонта 98–125 °С, а палеогеотермический градиент составлял 28–31 °С /км.

Особое место занимают результаты исследования включений жильных образований, содержащих захваченные микропорции раствора, что помогает восстановить истинную картину процессов миграции. Обнаружение углеводородов во включениях – прямое свидетельство вертикальной или субвертикальной миграции водно-углеводородного раствора. Гомогенизация и вакуумная декриптация газозоно-жидких включений свидетельствуют о том, что температура их консервации составляла 160–180 °С, что позволяет рассчитать глубины, с которых происходила миграция флюидов, – 5 км и более.

Таким образом, вакуумно-декриптометрические исследования образцов палеозойских пород отдельных площадей подтверждают предложенную ранее концепцию о существовании нескольких стадий формирования залежей углеводородов в пределах платформенного и бортового склонов Прикаспийской впадины.

Приведенные выше расчеты и доказательства, экспериментальные исследования позволили на основе созданной модели разломно-блокового строения и двухэтапного формирования залежей УВ обосновать перспективы нефтегазоносности и целесообразность ведения геолого-разведочных работ (ГРП) в пределах западного борта Прикаспийской впадины.

Аналогичные выводы, но с несколько иными и, возможно, более убедительными основаниями можно сделать при анализе геологических особенностей, условий миграции флюидов и разработки залежей месторождений Терско-Каспийского прогиба (ТКП). Результаты широкого комплекса исследований, проведенных авторами в течение нескольких десятилетий, свидетельствуют о том, что определяющая роль в формировании и размещении залежей УВ в осадочном чехле, в том числе для условий ТКП, принадлежит вертикально-ступенчатой стадийной миграции флюидов [5].

Нами проведен анализ разработки 15 месторождений и залежей нефти мезозойских отложений, расположенных в пределах Чеченской Республики, за последние четверть века. Это уникальные данные, по времени захватывающие период военных действий, нестабильной, нерегулируемой добычи, временной консервации скважин. Во всех из них к началу военных действий происходило снижение пластового давления, уменьшение уровня добычи нефти. В военный период добыча на большинстве залежей не велась, однако при восстановлении работы добывающих скважин эпизодически как давление, так и темп добычи резко возрастали, о чем мы подробно сообщали ранее [5]. Как и при исследовании палеозойских пород платформенного и бортового склонов Прикаспийской впадины, прямыми доказательствами происходивших процессов вертикальной миграции являются флюидные включения, убедительно свидетельствующие о перетоках УВ из нижезалегающих пластов. При этом термобарогеохимическими исследованиями установлено, что мигрирующие растворы достигали температур 240 °С и выше.

О возобновляемости ресурсов УВ в мезозойско-кайнозойских отложениях ТКП свидетельствуют и анализ разработки залежей нефти в периоды до и после войн Отечественной и чеченской, и выводы, сделанные В.П. Гавриловым.

Исследование в этом направлении мы продолжили при изучении крупного по запасам газонефтяного месторождения Северные Бузачи (геологические запасы более 200 млн т нефти, извлекаемые – 50...80 млн т), на котором к настоящему времени пробурено более 1200 скважин. Продуктивный разрез отложений представлен юрскими (байосский, батский ярусы) и меловыми (неокомский надъярус, аптский и альбский ярусы) породами. Структура Северные Бузачи находится в непосредственной близости к зоне сочленения двух платформ (Восточно-Европейская и Скифско-Туранская) и двух нефтегазоносных провинций (Прикаспийская и Северо-Кавказско-

Мангышлакская), расположена в центральной части Бузачинского свода и приурочена к узкой, линейной брахиантиклинальной складке субширотного простирания, осложненной многочисленными разрывными нарушениями субширотной и субмеридиональной ориентировки (рис. 1).

Тектонические нарушения субширотного и субмеридионального простирания, выделенные по результатам интерпретации сейсморазведочных работ, делят структуру на 14 укрупненных блоков (рис. 1).

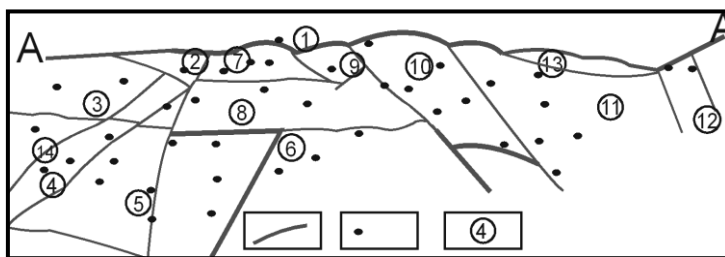


Рис. 1. Схема расположения блоков по результатам интерпретации сейсмики 3D / Fig. 1. The arrangement of blocks according to the results of 3D seismic interpretation

Следует отметить, что в акватории Северного Каспия и на прилегающей суше выявлена обособленная группа надсолевых нефтяных и нефтегазовых месторождений, продуктивность которых связана с юрско-меловыми отложениями [4]. Считается, что разные по запасам месторождения в мезозойских отложениях Северного Каспия сформировались за счет УВ, полностью или частично разрушенных нефтяных залежей в подсолевых каменноугольных рифогенных постройках Приморского свода. Нефтегазовый потенциал самих юрско-меловых пород ($S_1=0,02\div 0,05$ и $S_2=0,2\div 0,4$ мг УВ/г) и степень их преобразованности (протокатагенез) на рассмотренной территории относятся к крайне бедным [6].

В рассматриваемом регионе не все ловушки заполнены УВ, что, с одной стороны, исключает формирование залежей *in situ* или в ближайшем окружении одновозрастных пород, а с другой – указывает на избирательность путей миграции. Собственные депрессии в рассматриваемом районе малопогружены по мезозойско-кайнозойским отложениям, а история прогибания отложений в них, согласно графикам погружения и реконструкции условий образования и накопления залежей УВ Северо-Каспийской зоны поднятий, указывает на то, что юрско-меловые отложения не погружались здесь глубже 1500 м. При этом подошва юрских отложений в самой погруженной части не достигала главной зоны нефтеобразования примерно 600 м [6].

Палеозойские нефти Северного Каспия как источник УВ для юрско-меловых пород продуцировались из ОБ, отложившегося в условиях значительного дефицита кислорода и значительного сероводородного заражения, т.е. в типично морских условиях с богатой морской флорой и фауной, и были связаны с карбонатными фациями. Нефти палеозойского возраста генерированы ОБ, степень преобразованности которого соответствовала $R^0=0,95...1,03$ (градации катагенеза $МК_1^2...МК_2^1$, соответствующие главной зоне и фазе нефтеобразования). Мигрировала же эта нефть в породы, в которых степень преобразованности ОБ не превышает до сих пор градаций стадии протокатагенеза: в экстрактах ОБ (глубины 500...1500 м) соответственно $R^0=0,37...0,53$. Из изложенного следует, что палеозойские нефти образовались в одних условиях (застойный режим с дефицитом кислорода), а находятся в юрских ловушках, в которых материнское вещество формировалось в других условиях (континентальный режим с наземной растительностью и торфяниками). Таким образом, месторождения в юрско-меловых отложениях Северного Каспия сформировались за счет мультисистем, прорвавшихся сквозь соленосную покрывку под огромным пластовым давлением по зонам дробления разрывных нарушений из-за разрушения уникальных по объему и запасам массивных рифогенных залежей в подсолевых каменноугольных отложениях.

Следует обратить внимание на второй этап истории развития нефтяных залежей палеозойского возраста в юрско-меловых ловушках, который связан с длительным периодом их разрушения. Попав в результате единовременной инъекции с глубины 4–6 км и разместившись в ловушках на глубинах 0,25...1,5 км, нефть, не получая дополнительного питания, стала деградировать, со временем терять привлекательные товарные свойства в основном за счет систематического снижения содержания в ее составе легких фракций. Реконструированный состав первичной нефти месторож-

дений Северного Каспия, полученный в результате компьютерного моделирования, свидетельствует о том, что плотность исходной нефти на первом этапе должна находиться в пределах 0,800...0,810 г/см³ при стандартных условиях, что отвечает плотности современной тенгизской нефти (0,8055 г/см³).

Взяв за основу рассмотренную концепцию, авторы предложили механизм повышения коэффициента извлечения нефти (КИН) на месторождении Северные Бузачи. Поскольку известен источник УВ в юрско-меловых отложениях, предлагается закачка в эти пласты подвижных легких и агрессивных УВ из подсолевых палеозойских залежей в рифогенных постройках по схеме, представленной на рис. 2. Генетическая связь юрско-меловых нефтей с исходной подсолевой палеозойской нефтью в рифовых постройках обеспечит удовлетворительную совместимость трудноизвлекаемых нефтей юрско-меловых залежей месторождения Северные Бузачи и внедряемой легкой нефти на газоконденсатной основе (подсолевая палеозойская залежь месторождения Тенгиз).

Технологическая цепочка предусматривает доставку легкой нефти от месторождения Тенгиз по трубопроводу (расстояние 181 км по берегу) в пределы 7-го блока месторождения Северные Бузачи и закачку ее через нагнетательные скважины в нефтенасыщенные юрско-меловые пласты. Извлечение смеси растворенных в друг друга нефтей предполагается фонтанным способом с повышением КИН от 0,1...0,2 до 0,5...0,6, характерного для залежей в палеозойских рифовых постройках.

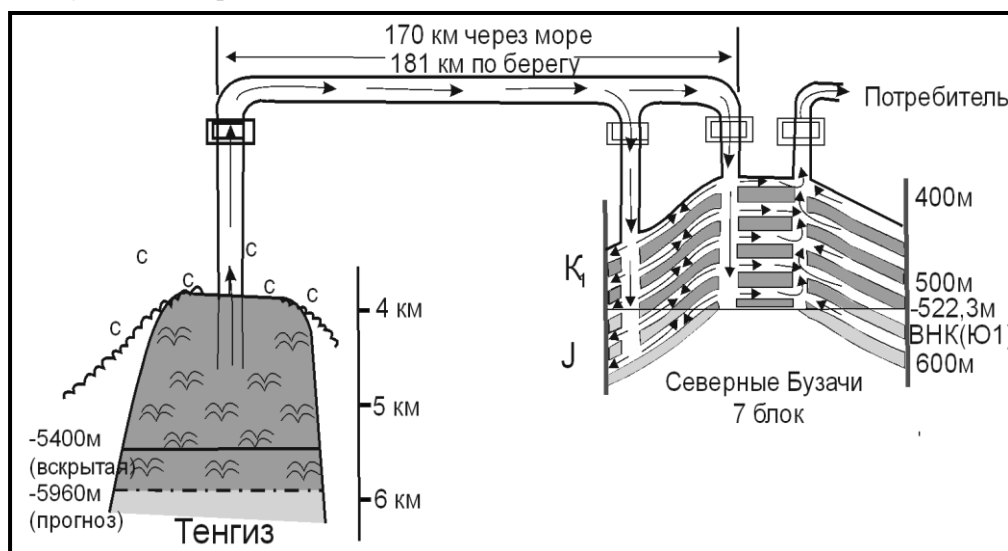


Рис. 2. Схема разработки трудноизвлекаемых нефтей месторождения Северные Бузачи за счёт внедрения в юрско-меловые пласты палеозойской нефти месторождения Тенгиз
 / Fig. 2. Scheme for the development of hard-to-recover oil from the Severnyye Buzachi deposit due to the introduction into the Jurassic-Cretaceous strata of the Paleozoic oil of the Tenzhiz field

Литература

1. Бочкарев А.В., Бочкарев В.А. Катагенез и прогноз нефтегазоносности недр. М. : ВНИИОЭНГ, 2006. 324 с.
2. Бочкарев А.В., Бочкарев В.А. Сбросы и нефтегазоносность. М. : ВНИИОЭНГ, 2016. 428 с.
3. Бочкарев В.А., Остроухов С.Б., Крашакова А.В. Изучение возможности полного извлечения трудноизвлекаемой нефти // Вестн. Волгогр. гос. ун-та. Сер. 10: Иннов. деят. 2012. Вып. 7. С. 57–61.
4. Бочкарев В.А., Остроухов С.Б., Бочкарев А.В., Крашакова А.В. Условия формирования углеводородных скоплений месторождения Укатное Северного Каспия // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. 2011. № 11. С. 3–7.
5. Доценко В.В., Сианисян Э.С. Показатели продолжающегося процесса формирования залежей нефти и газа на Юге России // Геология, география и глобальная энергия. 2014. № 1 (52). С. 35–49.
6. Остроухов С.Б., Бочкарев В.А. Геохимический анализ процессов формирования залежей УВ Среднекаспийского нефтегазоносного бассейна // Успехи органической геохимии. Новосибирск : ИНГ СО РАН, 2010. С. 251–255.

References

1. Bochkarev A.V., Bochkarev V.A. *Katagenez i prognoz neftegazonosnosti neдр* [Catagenesis and forecast

of oil and gas mineral resources]. Moscow: VNIIOENG, 2006, 324 p.

2. Bochkarev A.V., Bochkarev V.A. *Sbrosy i neftegazonosnost'* [Discharges and petroleum potential]. Moscow: VNIIOENG, 2016, 428 p.

3. Bochkarev V.A., Ostroukhov S.B., Krashakova A.V. *Izuchenie vozmozhnosti polnogo izvlecheniya trudnoizvlekaemoi nefiti* [The study of the possibility of complete extraction of tight oil]. *Vestn. Volgogr. gos. un-ta. Ser. 10: Innov. deyat.* 2012, iss. 7, pp. 57-61.

4. Bochkarev V.A., Ostroukhov S.B., Bochkarev A.V., Krashakova A.V. *Usloviya formirovaniya uglevodородnykh skoplenii mestorozhdeniya Ukatnoe Severnogo Kaspiya* [Conditions of formation of hydrocarbon accumulations Ukatnoe deposits of Northern Caspian sea]. *Geologiya, geofizika i razrabotka neftyanykh i gazovykh mestorozhdenii.* 2011, No. 11, pp. 3-7.

5. Dotsenko V.V., Sianisyan E.S. *Pokazateli prodolzhayushchegosya protsesssa formirovaniya zalezhei nefiti i gaza na Yuge Rossii* [Indicators of the ongoing process of formation of oil and gas deposits in the South of Russia]. *Geologiya, geografiya i global'naya energiya.* 2014, No. 1 (52), pp. 35-49.

6. Ostroukhov S.B., Bochkarev V.A. [Geochemical analysis of processes of formation of hydrocarbon deposits of Medium Caspian oil-gas basin]. *Uspekhi organicheskoi geokhimii* [Advances in organic geochemistry]. Novosibirsk: ING SO RAN, 2010, pp. 251-255.

УДК 627.81:556.1

DOI 10.23683/0321-3005-2018-2-95-99

Приглашаем к дискуссии

КЛАССИФИКАЦИЯ РЕЧНЫХ БАССЕЙНОВ ПО ИХ РЫБОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ЦЕННОСТИ

© 2018 г. В.Н. Шкура¹, Е.Е. Островская¹

¹Донской государственной аграрный университет, Новочеркасск, Россия

CLASSIFICATION OF RIVERS BASINS ACCORDING TO THEIR FISHERY VALUE

V.N. Shkura¹, E.E. Ostrovskaya¹

¹Don State Agrarian University, Novocherkassk, Russia

Шкура Владимир Николаевич – кандидат технических наук, профессор, кафедра водоснабжения и использования водных ресурсов, Новочеркасский инженерно-мелиоративный институт им. А.К. Кортунова, Донской государственной аграрный университет, ул. Пушкинская, 111, г. Новочеркасск, Ростовская область, 346428, Россия, e-mail: proektgts@rambler.ru

Vladimir N. Shkura - Candidate of Technical Sciences, Professor, Department of Water Supply and Use of Water Resources, Kortunov Novocherkassk Reclamation Engineering Institute, Don State Agrarian University, Puchkinskaya St., 111, Novocherkassk, Rostov region, 346428, Russia, e-mail: proektgts@rambler.ru

Островская Екатерина Евгеньевна – аспирант, Новочеркасский инженерно-мелиоративный институт им. А.К. Кортунова, Донской государственной аграрный университет, ул. Пушкинская, 111, г. Новочеркасск, Ростовская область, 346428, Россия, e-mail: avtnmv@yandex.ru

Ekaterina E. Ostrovskaya - Postgraduate, Kortunov Novocherkassk Reclamation Engineering Institute, Don State Agrarian University, Puchkinskaya St., 111, Novocherkassk, Rostov region, 346428, Russia, e-mail: avtnmv@yandex.ru

Речные бассейны являются важнейшей природной составляющей, обеспечивающей условия для нерестовых миграций и естественного воспроизводства наиболее ценных анадромных видов рыб, обитающих в морях, озерах и их опресненных лиманах. Под воздействием антропогенных факторов речные экологические системы превратились в природно-техногенные системы, которые во многом потеряли свои природные свойства, в том числе и способность обеспечения миграций и естественного воспроизводства особенно ценных и ценных видов анадромных видов рыб. В результате ихтиофауна многих речных бассейнов претерпела серьезные видовые изменения.

Действующая классификация водных объектов по их рыбохозяйственной ценности не учитывает современных изменений, произошедших в речных бассейнах, в связи с чем разработана новая классификация речных бассейнов по их рыбохозяйственной ценности.

Ключевые слова: речной бассейн, природно-техногенная система, классификация по рыбохозяйственной ценности.

River basins are the most important natural component, providing conditions for spawning migrations and natural reproduction of the most valuable anadromous fish species living in the seas, lakes and their desalinated estuaries. Under the influence of anthropogenic factors, river ecological systems have become natural and man-made systems, which have largely lost their natural properties, including the ability to ensure migration and natural reproduction of particularly valuable and valuable species of anadromous fish. As a result of the ichthyofauna of many river basins has undergone serious species changes.

The current classification of water bodies according to their fishery value does not take into account modern changes in river basins, and therefore a new classification of river basins according to their fishery value has been developed.

Keywords: rivers basins, natural and technical system, classification according to fishery value.

Введение

Речные бассейны являются важнейшей природной составляющей, обеспечивающей условия для нерестовых миграций и естественного воспроизводства наиболее ценных анадромных видов рыб, обитающих в морях, озерах и их опресненных лиманах. Одновременно эти речные бассейны интенсивно вовлечены в хозяйственную деятельность, являясь источниками орошения участков земли, выработки электроэнергии, водозабора на коммунальные и промышленные нужды и приемниками нормативно-очищенных сточных вод [1]. Характеризуя современное состояние речных бассейнов, обоснованным является утверждение о том, что они превратились в природно-техногенные системы, которые включают в себя гидрографическую сеть, технические средства, обеспечивающие управление регулирование и использованием водных ресурсов [2, 3].

Природно-техногенные системы рек характеризуются наличием водных, энергетических, минерально-сырьевых, биотических, рекреационных и других видов ресурсов [4]. Именно наличие природных ресурсов в совокупности определяют ценность речного бассейна, его хозяйственное, рекреационное, экологическое, рыбохозяйственное значение. Последнее является весьма актуальным, так как рыбохозяйственный потенциал наиболее важных речных бассейнов – Волги, Дона, Кубани – снизился за последние 30–40 лет более чем в 10 раз [5].

Цель исследований – оценка рыбохозяйственной значимости речных бассейнов с учетом масштабов их техногенного освоения на основе современной и максимально полнофакторной классификации и разработка на её основе необходимых мероприятий, реализация которых в современных условиях способствовала бы повышению рыбохозяйственной значимости и ценности рек.

Материал и методика

Природные ресурсы речных бассейнов тесно взаимосвязаны между собой, и изменение одного ресурса под влиянием природных или антропогенных факторов приводит к изменению других. Так, например, рыбохозяйственная продуктивность речной поймы во многом определяется продолжительностью и частотой ее затопления, что напрямую зависит от водности, внутригодового распределения водного стока в речном бассейне и косвенно от качества воды в реке.

Видовое разнообразие рыбных ресурсов в реке и её рыбохозяйственная значимость зависят от воздействия системы факторов, включая водность, внутригодовое распределение стока, качество воды,

объем и режим водопользования, эффективности функционирования сооружений для прохода производителей рыб через подпорные сооружения, наличия естественных нерестилищ, интенсивности судоходства, рекреационного использования рек, эффективной рыбозащиты на водозаборах и других природных и антропогенных факторов. Необходимо отметить, что отклонение от оптимального режима хотя бы одного или нескольких из перечисленных факторов приводит к снижению рыбопродуктивности, а соответственно, и рыбохозяйственной ценности (значимости) водного объекта. Отметим, что в настоящее время термин «рыбохозяйственная ценность (значимость) водного объекта (речного бассейна)» толкуется и понимается специалистами неоднозначно.

По нашему мнению, рыбохозяйственная ценность (значимость) речного бассейна характеризуется многолетним и устойчивым видовым разнообразием обитающей ихтиофауны, сохранением (несмотря на интенсивное дорожное и гидротехническое строительство, регулирование и многоцелевое использование водных ресурсов) условий для нерестовых миграций и естественного воспроизводства, ската и нагула молоди анадромных и других обитающих в них рыб. При этом условия для нерестовых миграций и естественного воспроизводства анадромных рыб сохраняются вне зависимости от фактического наличия (или временного отсутствия) их в водном объекте по независящим от водного объекта обстоятельствам.

Приведенное определение ориентировано на оценку речного бассейна в части развития рыбного хозяйства в условиях осуществления в бассейне реки хозяйственной деятельности, что вносит принципиальное изменение в действующую до настоящего времени классификацию рыбохозяйственной значимости объектов. ГОСТ 17.1.2.04-77, в соответствии с которым осуществляется классификация пресноводных объектов по рыбохозяйственной значимости, существует уже более 40 лет [6]. Из названия ГОСТа следует, что в этом нормативном документе основное внимание уделяется вопросам качества воды, составу донных отложений, гидрологическому режиму стока, состоянию водной растительности и наличию особо ценных и ценных промысловых видов ихтиофауны. Соглашаясь с важностью перечисленных факторов, констатируем, что ГОСТ практически не учитывает снижения численности производителей анадромных видов рыб (нерестовые миграции осетровых в Дону практически прекратились из-за катастрофического снижения их численности), изменившихся условий нерестовых миграций, наличия, достаточности и качественного состояния нерестилищ. При этом ГОСТ категорирование

водоемов по рыбохозяйственной значимости осуществляет по потенциально возможному обитанию в них особо ценных и ценных видов рыб исходя из природных свойств водного объекта. К группе особо ценных видов отнесены лососевые и осетровые виды рыб, к группе – лещ, сазан, вобла и судак. Согласно ГОСТу, водные объекты или их отдельные участки подразделяются на объекты высшей, первой и второй категории в соответствии с приведенными в нем определениями. По нашему мнению, эти определения носят общий характер, в результате чего большого отличия между реками высшей и первой категории практически нет. Кроме того, в критериях таксации говорится о водоемах, пригодных для обитания по природным свойствам, но в первой части статьи мы уже отметили, что экологические системы рек уже давно превратились в природно-техногенные системы, в результате чего природные свойства многих рек сильно изменились. Вслед за этим изменились условия захода в реки производителей рыб, возможности совершения ими достаточных по протяженности нерестовых миграций, наличие естественных нерестилищ, возможности длительного создания на них требуемого скоростного и температурного режимов, формирование кормовой базы для нагула и последующего ската молоди рыб и т.д. [6].

Последствием хозяйственной деятельности в бассейнах рек явилось также изменение видового состава обитающих в них наиболее ценных видов рыб, определяющих, согласно действующей таксации, категорию водоема. Так, ещё в 50–60-е гг. в бассейне Дона обитали 75 видов рыб, в его дельте и в нижнем течении – 61 и 65. В реке Маныч, Веселовском и Пролетарском водохранилищах, включая Маныч-Гудило, обитал 41 вид рыб [7]. По данным [8], в бассейне р. Кундрючьей в 1954 г. наблюдался 21 вид рыб, а в 1982 г. осталось только 13, из них 5 ценных, в бассейне р. Быстрой по сравнению с 1954 г. уловы леща, густеры и плотвы снизились на 37,5, 55 и 76,5 % соответственно. Одновременно почти в два раза возросли уловы малоценных уклей, густеры и красноперки. При проведении обследования бассейна р. Тузлов в 1983–1984 гг. было установлено, что ихтиофауна бассейна представлена 22 видами рыб, наибольшее количество принадлежит семейству карповых (13 видов) и окуневых – 3 вида. По одному виду – в уловах семейства щуковых, сельдевых (тюлька), бычковых и морских игл. Основу уловов в бассейне составляли малоценные и сорные виды рыб – красноперка и укляя. Как отмечают в своих исследованиях И.Ф. Ковтун, А.А. Корнеев [8], преобладание в уловах этих двух видов рыб является для указанных рек показателем ухудшения

условий воспроизводства и превращения этих рек в водотоки дистрофного типа, характерной чертой которых является бедность видового состава ихтиофауны.

Приведенные выше данные свидетельствуют о фактическом снижении рыбопродуктивности всех рек Донского бассейна (от главной реки до её притоков 2-го и 3-го порядка), но при этом все перечисленные реки, согласно действующей классификации, по своим природным свойствам отнесены к рекам высшей рыбохозяйственной категории.

Фактически же приведенные данные показывают, что современная техническая, гидрологическая, биологическая ситуация в речных бассейнах сильно изменилась, что должно найти отражение в их классификации.

Для этого необходимо разработать и учитывать дополнительные критерии в классификации (таксации) водных объектов по категориям рыбохозяйственной значимости, которые учитывают не только природную возможность обитания в них особо ценных, ценных или не имеющих промыслового значения видов рыб, но и изменившиеся и (или) созданные за счет работы специальных сооружений возможности осуществления ими нерестовых миграций, естественного нереста (в том числе и на искусственно построенных нерестилищах), нагула и ската молоди рыб.

В разработанной и предлагаемой для применения классификации рек (речных бассейнов) их рыбохозяйственная значимость основывается на показателях их природного состояния, но также учитывает и характеристику современного состояния природно-техногенных систем, и наличие условий для нерестовых миграций и естественного воспроизводства рыбных ресурсов (таблица).

Согласно данной классификации, к рекам высшей категории рыбохозяйственной значимости относятся водотоки, являющиеся главной рекой бассейна, впадающей в море, опресненный лиман, озеро, крупное водохранилище с обитающими в них рыбами, относящимися к ценным и особенно ценным видам. Производители этих рыб, несмотря на интенсивное гидротехническое строительство (наличие каскада гидротехнических сооружений), совершают в них нерестовые миграции благодаря наличию в составе гидроузлов специальных рыбоходных или рыбопропускных сооружений. Водохранилища многолетнего или сезонного регулирования стока создают возможность осуществления управляемого рыбохозяйственного попуска для создания на естественных или искусственно построенных русловых или пойменных нерестилищах необходимого гидрологического режима.

**Классификация рек по степени рыбохозяйственной значимости
 / Classification of rivers according to the degree of fishery importance**

Категория рыбохозяйственной значимости реки (участка реки)		
высшая	первая	вторая
<ul style="list-style-type: none"> • имеет гидравлическую связь с морем, заливом, лиманом, из которых совершают нерестовые миграции производители ценных и особенно ценных видов рыб и в которых в соответствии с биологическим циклом происходят нагул и рост молоди; • наличие на гидроузлах специальных рыбоходных и рыбопропускных сооружений позволяет беспрепятственно совершать нерестовые миграции широкому спектру анадромных видов рыб; • существуют пригодные для нереста естественные пойменные и русловые нерестилища, а при их недостатке – искусственно построенные нерестилища; • водохранилища многолетнего и сезонного регулирования стока позволяют осуществлять рыбохозяйственные попуски и управлять гидрологическим режимом на нерестилищах 	<ul style="list-style-type: none"> • имеет гидравлическую связь с основной рекой, является притоком 1-го порядка; • основу современной биоты составляют ценные анадромные и туводные виды рыб; • сток рек зарегулирован гидротехническими комплексами, не имеющими в составе специальных рыбоходных или рыбопропускных сооружений; • ценные виды анадромных рыб, учитывая отсутствие специальных рыбоходных и рыбопропускных сооружений, заходят на нерест и совершают нерестовые миграции только в низовьях рек; • водохранилища в бассейне реки позволяют осуществлять рыбохозяйственные попуски и управлять гидрологическим режимом нерестилищ, включая и искусственно построенные в низовьях рек; • для доступа производителей ценных видов рыб к нерестилищам в среднем течении требуется строительство специальных рыбоходных и рыбопропускных сооружений 	<ul style="list-style-type: none"> • имеет гидравлическую связь с основной рекой через притоки 1-го порядка; • реки превращены в каскады подпорных сооружений, не имеющих в своем составе специальных рыбоходных или рыбопропускных сооружений; • в речном бассейне осуществляют воспроизводство туводных видов рыб; • проходные и полупроходные виды в крайне ограниченном масштабе заходят для естественного воспроизводства в низовья рек; • наряду с естественным воспроизводством туводных видов рыб имеется возможность искусственного зарыбления прудов с ограниченной миграцией до вышерасположенного сооружения

К рекам первой категории по рыбохозяйственной значимости относятся притоки основных рек 1-го порядка. Это могут быть крупные, средние и малые реки, в которых основу современной биоты составляют ценные и туводные виды рыб, совершающие нерестовые миграции. Естественное воспроизводство ценных и особенно ценных анадромных видов рыб в результате интенсивной хозяйственной деятельности и гидротехнического строительства осуществляется в ограниченном масштабе, в основном в их среднем течении и низовьях, где регулирующие сооружения строятся реже, чем в верховьях. Гидрологический режим таких рек в нижнем течении определяется подпором уровней реками высшего порядка, а имеющиеся на водосборе водохранилища и пруды позволяют осуществлять специальные рыбохозяйственные попуски для управления режимом работы нерестилищ в их низовьях и средней части.

Реки, в которых биота определяется туводными и малоценными видами рыб, сток которых полностью зарегулирован каскадом прудов и водохранилищ, не имеющих специальных рыбоходных сооружений, на которых полностью утрачена возможность нерестовых миграций производителей рыб,

отнесены ко второй категории рыбохозяйственных водоемов.

На таких реках каждый из прудов или водохранилищ представляет самостоятельную экологическую систему обитания рыб, в том числе созданную путем их искусственного зарыбления посадочным материалом. Такие русловые пруды или водохранилища допускают как использование естественной кормовой базы, так и вскармливание рыб. К этой категории водотоков отнесены малые реки, притоки основной реки 2-го, 3-го и более высокого порядка.

Проведенная классификация свидетельствует о том, что отсутствие в составе речных гидроузлов специальных рыбоходных и рыбопропускных сооружений ведет к снижению категории рыбохозяйственной значимости реки. В то же время строительство в составе каждого подпорного гидротехнического сооружения специальных рыбоходных или рыбопропускных сооружений, искусственных нерестилищ, позволяющих в речных бассейнах реализовать принцип «даже один производитель должен иметь возможность достигнуть нерестилища и осуществить естественное воспроизводство», позволяет поддерживать высокую рыбохозяйственную ценность рек.

Выводы

Разработанная классификация позволяет определить рыбохозяйственную категорию речного бассейна с учетом его современного состояния. Естественное воспроизводство проходных и полупроходных видов рыб, составляющих наибольшую генетическую ценность для речных бассейнов, возможно в реках всех категорий при условии строительства на них специальных рыбохозяйственных сооружений, искусственных нерестилищ, осуществления специальных попусков из водохранилищ для управления гидрологическим режимом нерестилищ.

Литература

1. Косолапов А.Е., Шкура В.Н., Калиманов Т.А. Водохозяйственные проблемы бассейна Дона // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2005. Т. 7, № 2. С. 117–140.
2. Лапшенков В.С., Отверченко Н.К., Мордвицев М.М. Мелиорация малых и средних рек. Новочеркасск : НИМИ, 1994. 302 с.
3. Мордвицев М.М. Речные водохозяйственные системы на малых степных реках. Ростов н/Д. : Изд-во СКНЦ ВШ, 2001. 382 с.
4. Салтанкин В.П. Предложения об организации ресурсного блока концепции охраны малых рек // Малые реки России. М., 1994. С. 33–37.
5. Косолапов А.Е., Воловик С.П. Современная водохозяйственная политика и проблемы восстановления рыбопродуктивности Азово-Донского бассейна // Проблемы сохранения экосистем и рационального использования биоресурсов Азово-Черноморского бассейна : материалы междунар. науч. конф. Ростов н/Д. : Госкомрыболовство РФ, АЗНИРХ, ВНИРО, 2001. С. 112–114.
6. ГОСТ 17.1.2.04-77. Показатели состояния и правила таксации рыбохозяйственных водных объектов. М. : Изд-во стандартов, 1978. 12 с.
7. Шкура В.Н. Рыбоводные мелиорации малых и средних степных рек (обоснование путей и средств их реализации). Новочеркасск : Новочерк. инж.-мелиор. ин-т ДГАУ, 2015. 198 с.
8. Малые реки Донского района : аналитический обзор научно-исследовательских работ АЗНИИРХ, вы-

полненных в 1980–1992 гг. по малым рекам Донского района. Ростов н/Д. : Медиа-полис, 2007. 83 с.

References

1. Kosolapov A.E., Shkura V.N., Kalimanov T.A. Vodokhoziaistvennye problemy basseina Dona [Water problems of the Don basin]. *Vodnoe khoziaistvo Rossii: problemy, tekhnologii, upravlenie*. 2005, vol. 7, No. 2, pp. 117-140.
2. Lapshenkov V.S., Otverchenko N.K., Mordvintsev M.M. *Melioratsiya malykh i srednikh rek* [Melioration of small and medium rivers]. Novocherkassk: NIMI, 1994, 302 p.
3. Mordvintsev M.M. *Rechnye vodokhoziaistvennye sistemy na malykh stepnykh rekakh* [River water management systems on small steppe rivers]. Rostov-on-Don: Izd-vo SKNTs VSh, 2001, 382 p.
4. Saltankin V.P. [Proposals for the organization of the resource block of the concept of protection of small rivers]. *Malye reki Rossii* [Small rivers of Russia]. Moscow, 1994, pp. 33-37.
5. Kosolapov A.E., Volovik S.P. [Modern water management policy and problems of restoration of fishery capacity of the Azov-Don basin]. *Problemy sokhraneniya ekosistem i ratsional'nogo ispol'zovaniya bioresursov Azovo-Chernomorskogo basseina* [Problems of conservation of ecosystems and rational use of biological resources of the Azov-Black sea basin]. Proceedings of the international scientific conference. Rostov-on-Don: Goskomrybolovstvo RF, AzNIRKh, VNIRO, 2001, pp. 112-114.
6. *GOST 17.1.2.04-77. Pokazатели sostoyaniya i pravila taksatsii rybokhoziaistvennykh vodnykh ob"ektov* [GOST 17.1.2.04-77. Indicators of status and rules of taxation of fishery water bodies]. Moscow: Izd-vo standartov, 1978, 12 p.
7. Shkura V.N. *Rybovodnye melioratsii malykh i srednikh stepnykh rek (obosnovanie putei i sredstv ikh realizatsii)* [Fish reclamation of small and medium rivers of the steppe (justification of the ways and means of their implementation)]. Novocherkassk: Novocherk. inzh.-melior. int DGAU, 2015, 198 p.
8. *Malye reki Donskogo raiona* [Small rivers of the Don region]. Analytical review of research works of AzNIRKh, carried out in 1980-1992 on small rivers of the don region. Rostov-on-Don: Media-polis, 2007, 83 p.

БИОЛОГИЧЕСКИЕ НАУКИ

BIOLOGICAL SCIENCES

УДК 616-006.66+616-079.4

DOI 10.23683/0321-3005-2018-2-100-105

УСИЛЕНИЕ ЦИТОТОКСИЧЕСКОГО ДЕЙСТВИЯ 5-ФТОРУРАЦИЛА ПРИ СОЧЕТАННОМ ПРИМЕНЕНИИ С УЛЬТРАЗВУКОМ

© 2018 г. Д.И. Водолажский¹, Н.А. Назаралиева¹, Т.И. Моисеенко¹, Е.М. Франциянц¹,
Д.С. Потемкин¹, Н.Г. Васильченко¹, А.П. Меньшенина¹

¹Ростовский научно-исследовательский онкологический институт, Ростов-на-Дону, Россия

INTENSIFICATION OF CYTOTOXIC ACTIVITY OF 5-FLUOROURACIL IN COMBINED USE WITH ULTRASOUND

D.I. Vodolazhsky¹, N.A. Nazaralieva¹, T.I. Moiseenko¹, E.M. Frantsiyants¹,
D.S. Potemkin¹, N.G. Vasilchenko¹, A.P. Menshenina¹

¹Rostov Research Institute of Oncology, Rostov-on-Don, Russia

Водолажский Дмитрий Игоревич – кандидат биологических наук, руководитель лаборатории молекулярной онкологии, Ростовский научно-исследовательский онкологический институт, ул. 14-я линия, 63, г. Ростов-на-Дону, 344037, Россия, e-mail: dvodolazhsky@gmail.com

Dmitry I. Vodolazhsky - Candidate of Biological Sciences, Head of the Laboratory of Molecular Oncology, Rostov Research Institute of Oncology, 14-ya Liniya St., 63, Rostov-on-Don, 344037, Russia, e-mail: dvodolazhsky@gmail.com

Назаралиева Нелли Альбертовна – аспирант, отделение гинекологии, Ростовский научно-исследовательский онкологический институт, ул. 14-я линия, 63, г. Ростов-на-Дону, 344037, Россия, e-mail: super.gormon@ya.ru

Nelli A. Nazaralieva - Postgraduate, Department of Gynecology, Rostov Research Institute of Oncology, 14-ya Liniya St., 63, Rostov-on-Don, 344037, Russia, e-mail: super.gormon@ya.ru

Моисеенко Татьяна Ивановна – доктор медицинских наук, профессор, главный научный сотрудник, отделение опухолей репродуктивной системы, Ростовский научно-исследовательский онкологический институт, ул. 14-я линия, 63, г. Ростов-на-Дону, 344037, Россия, e-mail: super.gormon@ya.ru

Tatiana I. Moiseenko - Doctor of Medicine, Professor, Main Researcher, Department of Reproductive System Tumors, Rostov Research Institute of Oncology, 14-ya Liniya St., 63, Rostov-on-Don, 344037, Russia, e-mail: super.gormon@ya.ru

Франциянц Елена Михайловна – доктор биологических наук, профессор, руководитель лаборатории изучения патогенеза злокачественных опухолей, Ростовский научно-исследовательский онкологический институт, ул. 14-я линия, 63, г. Ростов-на-Дону, 344037, Россия, e-mail: super.gormon@ya.ru

Elena M. Frantsiyants - Doctor of Biological Sciences, Professor, Head of Laboratory of Malignant Tumor Pathogenesis Study, Rostov Research Institute of Oncology, 14-ya Liniya St., 63, Rostov-on-Don, 344037, Russia, e-mail: super.gormon@ya.ru

Потемкин Дмитрий Сергеевич – младший научный сотрудник, лаборатория молекулярной онкологии, Ростовский научно-исследовательский онкологический институт, ул. 14-я линия, 63, г. Ростов-на-Дону, 344037, Россия, e-mail: desmonddimon@gmail.com

Dmitry S. Potemkin - Junior Researcher, Laboratory of Malignant Tumor Pathogenesis Study, Rostov Research Institute of Oncology, 14-ya Liniya St., 63, Rostov-on-Don, 344037, Russia, e-mail: desmonddimon@gmail.com

Васильченко Никита Геннадьевич – младший научный сотрудник, лаборатория молекулярной онкологии, Ростовский научно-исследовательский онкологический институт, ул. 14-я линия, 63, г. Ростов-на-Дону, 344037, Россия, e-mail: wnikita37@gmail.com

Nikita G. Vasilchenko - Junior Researcher, Laboratory of Molecular Oncology, Rostov Research Institute of Oncology, 14-ya Liniya St., 63, Rostov-on-Don, 344037, Russia, e-mail: wnikita37@gmail.com

Меньшенина Анна Петровна – кандидат медицинских наук, ведущий научный сотрудник, отделение опухолей репродуктивной системы, Ростовский научно-исследовательский онкологический институт, ул. 14-я линия, 63, г. Ростов-на-Дону, 344037, Россия, e-mail: super.gormon@ya.ru

Anna P. Menshenina - Candidate of Medicine, Leading Researcher, Department of Reproductive System Tumors, Rostov Research Institute of Oncology, 14-ya Liniya St., 63, Rostov-on-Don, 344037, Russia, e-mail: super.gormon@ya.ru

Актуальной проблемой современной онкологии является понижение цитотоксических эффектов на здоровые органы и ткани при использовании химиотерапевтических препаратов. Это достигается подбором оптимальных условий и дозировок использования химиотерапевтических препаратов.

В рамках нашего исследования была изучена возможность усиления локального цитотоксического эффекта при сочетанном влиянии 5-фторурацила (5ФУ) и ультразвука (УЗ) на клетки линии HeLa в модельных условиях.

Представленные данные позволяют сделать вывод об эффективности терапии онкологических заболеваний, основанной на сочетанном применении 5ФУ с УЗ. Использование УЗ в сочетании с 5ФУ позволяет более чем в 2 раза локально, в месте нахождения опухоли, увеличить эффективность химиотерапевтических подходов.

Ключевые слова: 5-фторурацил, ультразвук, химиотерапия, клетки линии HeLa.

Today the reduction of cytotoxic effects on healthy organs and tissues with the use of chemotherapeutic drugs is an urgent problem of modern oncology. This is achieved by selecting the optimal conditions and dosages for the use of chemotherapeutic drugs. In our study, the possibility of enhancing the local cytotoxic effect with the combined effect of 5-fluorouracil (5-FU) and ultrasound (US) on HeLa cells under model conditions was studied.

The presented data allow to draw a conclusion about the effectiveness of therapy for oncological diseases, based on the combined use of 5-FU with ultrasound. The use of ultrasound in combination with 5FU allows more than 2 times locally, at the location, for example, to increase the effectiveness of chemotherapeutic approaches.

Keywords: 5-fluorouracil, ultrasound, chemotherapy, HeLa cells.

Введение

Подбор оптимальных условий и дозировок использования химиотерапевтических препаратов при лечении опухолевых заболеваний сегодня является актуальной проблемой в онкологии. В первую очередь эта проблема решается путём подбора наиболее эффективного лекарственного препарата, а во-вторых – способом доставки лекарственных средств и повышением эффективности их воздействия на опухолевую ткань. В рамках решения данной задачи главной целью нашего исследования было изучение возможности усиления локального цитотоксического эффекта при сочетанном влиянии 5-фторурацила (5ФУ) и ультразвука (УЗ) на клетки линии HeLa в модельных условиях.

5ФУ – противоопухолевый препарат из группы антиметаболитов, антагонистов пиримидинов. Используется для лечения рака анального, грудного, колоректального, пищеводного, желудочного, панкреатического, кожного (особенно рака головы и шеи) и болезни Боуэна [1]. Это – цитостатический агент, ингибирующий процесс деления клеток путём блокирования синтеза ДНК и образования структурно несовершенной РНК. Под воздействием

5ФУ клетки, находящиеся в разных фазах клеточного цикла, тормозятся перед вступлением в фазу S и, предположительно, вместе вступают в нее, вместе достигая фазы митоза G2, наиболее чувствительной к повреждающим воздействиям [2, 3].

Основная мишень для действия 5ФУ – тимидилат-синтаза, ключевой фермент в процессе синтеза ДНК, катализирующий реакцию образования de novo тимидилата, предшественника тимидин-трифосфата, нуклеотида, необходимого для синтеза ДНК. Введение 5ФУ вызывает дефицит дезокси-тимидин-монофосфата (dTMP), из-за чего быстро делящиеся раковые клетки погибают [4]. 5ФУ встраивается в клеточную РНК в процессе ее синтеза вместо уридин-монофосфата, что приводит к нарушению стабильности молекулы РНК, ошибкам при синтезе белков, необходимых для жизнедеятельности клетки и сохранения пространственной структуры ДНК [5].

Для усиления действия противоопухолевых препаратов применяется множество подходов: синергия с другими лекарственными средствами [6], химическая модификация действующих веществ, составляющих основу лекарственного препарата; синергия лекарственных препаратов с физическими воздействиями (локальное повышение температуры

в опухолевой ткани, радиолучевая терапия, УЗ и др.). При этом необходимо отметить, что апоптоз-связанные сигнальные пути активируются при наличии такого фактора, как ультразвуковое воздействие определенной модальности [7].

Первое предложение применения УЗ для усиления действия лекарственных препаратов при терапии опухолевых заболеваний было высказано Хиллом в 1967 г., при его работе с азотистым ипритом [5]. Однако в ходе его исследований не был выявлен эффект усиления действия азотистого иприта в сочетании с УЗ. Спустя девять лет Кремкау с сотрудниками [7] обнаружил, что если мышам ввести опухолевые клетки (линии L 1210), обработанные до инъекции УЗ и азотистым ипритом, то эти мыши живут дольше, чем при введении клеток, обработанных только одним из этих агентов [8], но никакого объяснения этому явлению так и не было дано.

Известно, что УЗ вызывает повреждение тканей в результате множественного воздействия: кавитации; влияния на сигнальные пути; изменения температуры, увеличения текучести клеточных мембран и др. [9]. В ряде работ было продемонстрировано усиление противоопухолевой активности при синергии УЗИ и 5ФУ. Так, в одной из них у самцов мышей, несущих асцитную опухоль Эрлиха, комбинация 5ФУ с УЗ (0,8 МГц) вызвала значительное усиление противоопухолевой активности [3]. В другой использование УЗ низкой интенсивности (1,1 МГц; 1,0 Вт/см²) значительно улучшало поглощение 5ФУ клетками, а также 5ФУ-опосредованное повреждение ДНК и образование активных форм кислорода. Вследствие этих процессов происходила активация апоптозассоциированных белков [10].

Материалы и методы

Исследование проводилось на базе лаборатории молекулярной онкологии ФГБУ «Ростовский научно-исследовательский онкологический институт» МЗ Российской Федерации. Использована адгерентная культура клеток человека – карцинома шейки матки линии HeLa CCL-2, которая является аденокарциномой эпителия шейки матки человека, содержит вирус папилломы человека (HPV-18, 2-й уровень биобезопасности). В 98 % клеток имеется телоцентрическая хромосома, анеуплоидия – в 100. Возможна цитогенетическая нестабильность.

Инкубирование шло в условиях контролируемого 5%-го CO₂ и 95%-й влажности при 37 °С в мультигазовом инкубаторе СВ 150 (Binder, Германия). Культивирование клеток проводилось в среде RPMI-1640 («Биолот», Россия) с добавлением 10%-й фетальной телячьей сыворотки (Thermo Scientific Nuclone, США) и при концентрации гентамицина 50 мкг/мл («Биолот», Россия). Для эксперимента использовался 12-луночный планшет.

Для воздействия на клетки ультразвукового излучения использовался аппарат для УЗ-терапии УЗТ-1-ОЗУ (Россия) с частотой ультразвуковых колебаний 0,88 МГц.

Клетки засеивались в 12-луночные планшеты в количестве 300 000 клеток на 3 мл питательной среды. После достижения клетками 70–80%-го уровня конfluenceности производили обработку УЗ, 5ФУ и сочетанным воздействием УЗ и 5ФУ.

Подсчет общего количества клеток и анализ соотношения живых и мертвых клеток проводились в камере Горяева с использованием 0,4%-го раствора красителя трипанового синего в соотношении 1:1.

Полученные результаты были обработаны методами математической статистики с помощью программного пакета STATISTICA 10.

Результаты

Подбор рабочей концентрации 5ФУ и дозы УЗ. Для выявления наличия или отсутствия сочетанного влияния 5ФУ и УЗ в начале работы были подобраны временные экспозиции и концентрации данных факторов.

Выбор рабочих доз УЗ-излучения (УЗИ) и 5ФУ осуществлялся по следующему принципу: выбирались те дозы, при которых не достигался высокий показатель смертности клеток (ЛД50), но при этом полученное значение по количеству мертвых клеток достоверно отличалось от контроля (табл. 1).

Таблица 1

Влияние различных доз УЗ и 5ФУ на показатели культуры клеток HeLa (расчет через средние значения) / The effect of different doses of ultrasound and 5-fluorouracil on the HeLa cell culture (mean values)

Условия эксперимента	Количество клеток				
	живых	мертвых	общее	живых, %	мертвых, %
Контроль	2 036 000	66 000	2 102 000	97	3
5ФУ, мкМ					
0,3	2 336 400	178 200	2 514 600	93	7
0,5	1 491 600	151 800	1 643 400	91	9
0,7	1 141 800	211 200	1 353 000	84	16
УЗ, мин					
1	2 204 400	99 000	2 303 400	96	4
5	2 197 800	134 000	2 331 800	94	6
10	2 277 000	210 000	2 487 000	92	8
15	2 277 000	215 000	2 492 000	91	9

В результате проведенных экспериментов нами были выбраны дозы: 5ФУ в концентрации 0,7 мкМ и УЗ – 10 мин. Влияние данных факторов достоверно оказывало действие на показатели клеток культуры HeLa (рис. 1).

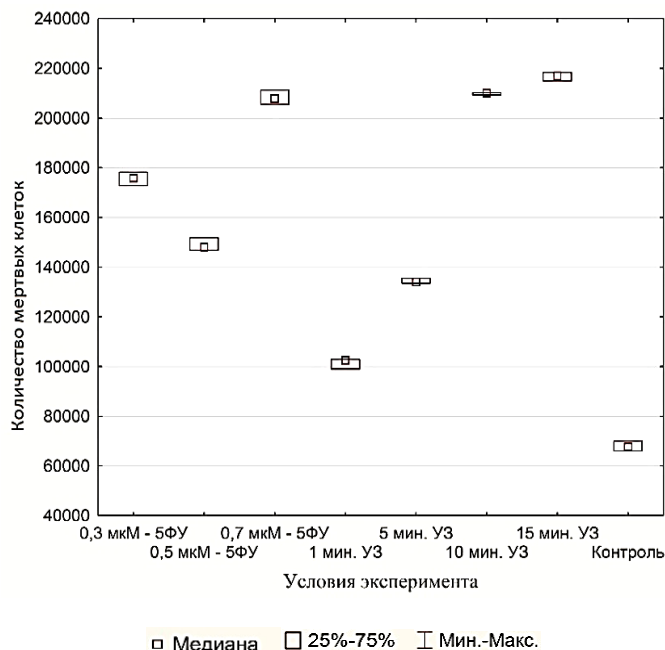


Рис. 1. Влияние ультразвука и 5ФУ на клетки культуры HeLa, достоверно при уровне значимости $p < 0,05$ / Fig. 1. The effect of ultrasound and 5-fluorouracil on HeLa cells, $p < 0.05$

Различные дозы 5ФУ и УЗ достоверно оказывали влияние на клетки HeLa по сравнению с контролем. При этом доза 5ФУ (0,7 мкМ) была выбрана нами для дальнейшей работы по причине ярко выраженного цитотоксического эффекта на клетки (рис. 1). Доза УЗ-воздействия продолжительностью 10 мин выбрана вследствие выраженного цитотоксического воздействия на клетки HeLa после 10 мин УЗ-обработки, а также в силу того, что 15-минутная обработка клеток УЗ отличалась от 10-минутной обработки статистически недостоверно (рис. 1).

Оценка эффективности влияния факторов по отдельности и при синергии. В дальнейшем после подбора рабочих доз и концентраций был проведен эксперимент по следующей схеме:

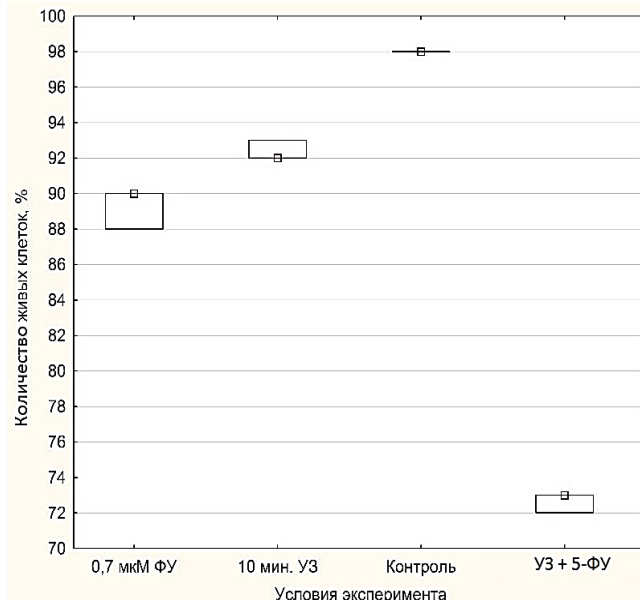
- 1) контроль – клетки линии HeLa без какой-либо обработки;
- 2) обработка клеток линии HeLa только УЗ;
- 3) обработка клеток линии HeLa только 5ФУ;
- 4) обработка клеток линии HeLa УЗ и 5ФУ в сочетании.

В ходе эксперимента при сочетании воздействия 5ФУ и УЗ мертвые клетки составили 28 %. В группе, обработанной только 5ФУ, – 12, а при воздействии

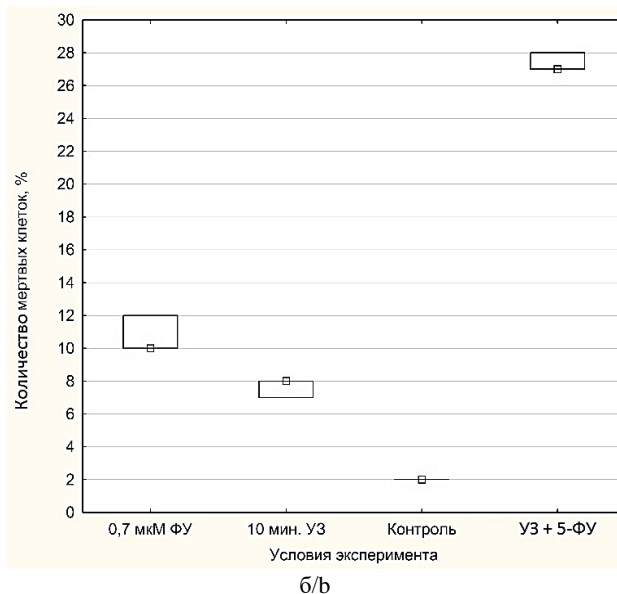
только УЗ в указанном режиме – 7 %. В контрольных же пробах смертность составляла 2 % (табл. 2).

Как можно видеть, УЗ усиливает цитотоксический эффект 5ФУ более чем в 2 раза.

Полученные данные были подвергнуты статистическому анализу с использованием программного пакета STATISTICA 10 (рис. 2).



a/a



b/b

Рис. 2. Влияние используемых в работе факторов (5ФУ и УЗ) и их сочетанного использования на показатель количества живых клеток – а; мертвых – б (по отношению к общему количеству клеток, %) / Fig. 2. Factors used in the work (5FU and ultrasound) and their combined use on the indicator of the number of living cells - a; dead - b; relative to the total number of cells, %

Таблица 2

Влияние различных факторов, а также их синергии на процентное соотношение количества мертвых и живых клеток культуры HeLa / The influence of various factors, as well as their synergy on the percentage of dead and living cells of HeLa culture

Вариант опыта	Показатели состояния клеток (средние арифметические значения)				
	Количество клеток				
	живых	мертвых	общее	живых, %	мертвых, %
5ФУ	1 155 000	132 000	1 287 000	89,00	11,00
УЗ, 10 мин	1 683 000	132 000	1 815 000	92,50	7,50
УЗ, 10 мин, 5ФУ, 0,7 мкМ	825 000	231 000	1 056 000	72,50	27,50
Контроль	3 036 000	66 000	3 102 000	98,00	2,00

Можно заметить, что наибольший цитотоксический эффект достигается при сочетанном использовании 5ФУ и УЗ (рис. 2). При использовании этих факторов по отдельности достигается намного менее выраженный цитостатический эффект.

Для подтверждения полученных данных был проведен дисперсионный анализ (ANOVA-тест) по выявлению как влияния различных факторов и их комбинации на общее количество клеток (рис. 3а), так и их влияния на количество только мертвых клеток (рис. 3б).

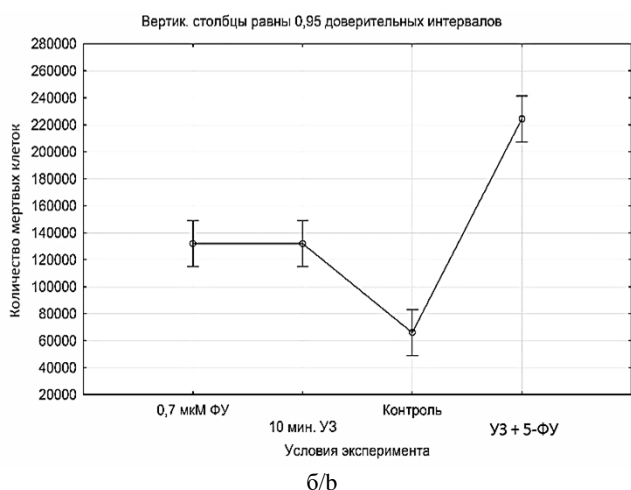
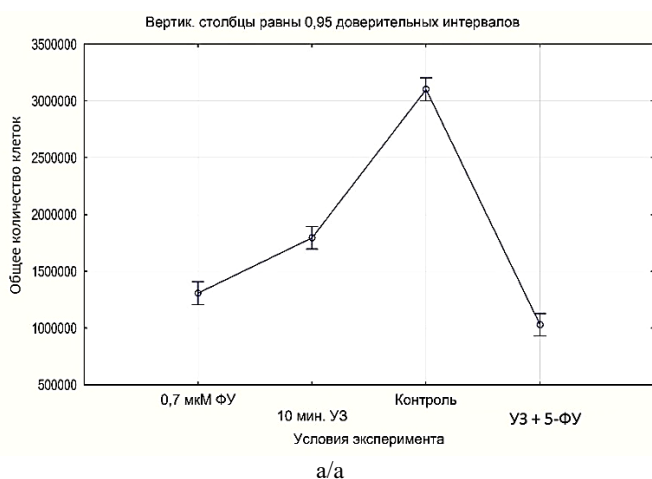


Рис. 3. ANOVA. Влияние использованных в эксперименте факторов на общее количество клеток культуры HeLa для уровня значимости $p < 0,05$ – а; мертвых – б / Fig. 3. ANOVA. The effect of the factors used in the experiment on the total number of HeLa culture, significance level $p < 0.05$ - a; dead cells - b

Как можно видеть из приведенных данных, различие между влиянием 5ФУ и УЗ по отдельности на цитостатические показатели клеток культуры HeLa минимально (различие составляет не более 30 %), хотя и статистически достоверно. 5ФУ в концентрации 0,7 мкМ оказывает выраженный цитостатический эффект, более чем в 2 раза подавляя рост клеточной культуры.

При дисперсионном анализе влияния данных факторов на показатели количества мертвых клеток (рис. 3б) было выявлено отсутствие различий между УЗ и 5ФУ.

В данном случае влияние факторов по отдельности на количество мертвых клеток почти одинаково и статистически достоверно отличается от контрольного показателя. Однако при их сочетанном использовании удается достичь более выраженного цитотоксического эффекта: по сравнению с аналогичными показателями при раздельном использовании 5ФУ и УЗ количество мертвых клеток при сочетанном использовании 5ФУ и УЗ увеличивается более чем в 2 раза.

Представленные данные позволяют сделать вывод об эффективности терапии онкологических заболеваний, основанной на сочетанном применении 5ФУ с УЗИ. Использование УЗ в сочетании с 5ФУ позволяет более чем в 2 раза локально, в месте нахождения опухоли, увеличить эффективность химиотерапевтических подходов.

Литература

1. Álvarez P., Marchal J.A., Boulaiz H., Carrillo E., Vélez C., Rodríguez-Serrano F., Melguizo C., Prados J. 5-Fluorouracil derivatives: a patent review // Expert opinion on therapeutic patents. 2012. Vol. 22, № 2. P. 107–123.
2. Bai W. K., Shen E., Hu B. Induction of the apoptosis of cancer cell by sonodynamic therapy: a review // Chinese J. of Cancer Research. 2012. Vol. 24, № 4. P. 368–373.
3. Ciavatta M. L., Lefranc F., Carbone M., Mollo E., Gavagnin M., Betancourt T., Kornienko A., Kiss R. Marine Mollusk-Derived Agents with Antiproliferative Activity as

Promising Anticancer Agents to Overcome Chemotherapy Resistance // *Med. Research Reviews*. 2017. Vol. 37 (4). P. 702–801.

4. Dowsett M., Archer C., Assersohn L., Gregory R.K., Ellis P. A., Salter J., Chang J., Mainwaring P. Clinical studies of apoptosis and proliferation in breast cancer // *Endocr. Relat. Cancer*. 1999. Vol. 6. P. 25–28.

5. Hill C.R. Changes in tissue permeability produced by ultrasound // *Brit. J. Radiol.* 1967. Vol. 40. P. 317.

6. Hu Z., Lv G., Li Y., Li E., Li H., Zhou Q., Cao W., Yang B. Enhancement of anti-tumor effects of 5-fluorouracil on hepatocellular carcinoma by low-intensity ultrasound // *J. of Experimental & Clinical Cancer Research*. 2016. Vol. 35, № 1. P. 71.

7. Kremkau F.W., Kaufmann J.S., Walker M.M., Burch P.G., Spurr C.L. Ultrasonic enhancement of nitrogen mustard cytotoxicity in mouse leukaemia // *Cancer*. 1976. Vol. 37. P. 1643–1647.

8. Mohamed M.M., Mohamed M.A., Fikry N.M. Enhancement of antitumor effects of 5-fluorouracil combined with ultrasound on Ehrlich ascites tumor in vivo // *Ultrasound Med. Biol.* 2003. Vol. 29. P. 1635–1643.

9. Rossi S. *Australian Medicines Handbook*, Adelaide: The Australian Medicines Handbook Unit Trust, 2013.

10. Корман Д.Б. Основы противоопухолевой химиотерапии. М.: Практическая медицина, 2006. 503 с.

References

1. Álvarez P., Marchal J.A., Boulaiz H., Carrillo E., Vélez C., Rodríguez-Serrano F., Melguizo C., Prados J. 5-Fluorouracil derivatives: a patent review. *Expert opinion on therapeutic patents*. 2012, vol. 22, No. 2, pp. 107-123.

2. Bai W. K., Shen E., Hu B. Induction of the apoptosis of cancer cell by sonodynamic therapy: a review. *Chinese J. of Cancer Research*. 2012, vol. 24, No. 4, pp. 368-373.

3. Ciavatta M. L., Lefranc F., Carbone M., Mollo E., Gavagnin M., Betancourt T., Kornienko A., Kiss R. Marine Mollusk-Derived Agents with Antiproliferative Activity as Promising Anticancer Agents to Overcome Chemotherapy Resistance. *Med. Research Reviews*. 2017, vol. 37 (4), pp. 702-801.

4. Dowsett M., Archer C., Assersohn L., Gregory R.K., Ellis P. A., Salter J., Chang J., Mainwaring P. Clinical studies of apoptosis and proliferation in breast cancer. *Endocr. Relat. Cancer*. 1999, vol. 6, pp. 25-28.

5. Hill C.R. Changes in tissue permeability produced by ultrasound. *Brit. J. Radiol.* 1967, vol. 40, p. 317.

6. Hu Z., Lv G., Li Y., Li E., Li H., Zhou Q., Cao W., Yang B. Enhancement of anti-tumor effects of 5-fluorouracil on hepatocellular carcinoma by low-intensity ultrasound. *J. of Experimental & Clinical Cancer Research*. 2016, vol. 35, No. 1, p. 71.

7. Kremkau F.W., Kaufmann J.S., Walker M.M., Burch P.G., Spurr C.L. Ultrasonic enhancement of nitrogen mustard cytotoxicity in mouse leukaemia. *Cancer*. 1976, vol. 37, pp. 1643-1647.

8. Mohamed M.M., Mohamed M.A., Fikry N.M. Enhancement of antitumor effects of 5-fluorouracil combined with ultrasound on Ehrlich ascites tumor in vivo. *Ultrasound Med. Biol.* 2003, vol. 29, pp. 1635-1643.

9. Rossi S. *Australian Medicines Handbook*. Adelaide: The Australian Medicines Handbook Unit Trust, 2013.

10. Korman D.B. *Osnovy protivopukholevoi khimioterapii* [Fundamentals of cancer chemotherapy]. Moscow: Prakticheskaya meditsina, 2006, 503 p.

УДК 616.-006.81-092.9-091.8

DOI 10.23683/0321-3005-2018-2-106-116

**ВЛИЯНИЕ ХРОНИЧЕСКОЙ БОЛИ НА УРОВЕНЬ ПОЛОВЫХ ГОРМОНОВ,
ПРОЛАКТИНА И ГОНАДОТРОПНЫХ ГОРМОНОВ В СЫВОРОТКЕ КРОВИ
И ПАТОЛОГИЧЕСКИ ИЗМЕНЕННОЙ КОЖЕ У САМОК МЫШЕЙ
В ДИНАМИКЕ РОСТА ЗЛОКАЧЕСТВЕННОЙ МЕЛАНОМЫ**

© 2018 г. И.М. Котиева¹, О.И. Кит¹, Е.М. Франциянц¹, В.А. Бандовкина¹, И.В. Каплиева¹,
Л.К. Трепитакки¹, Н.Д. Черярина¹, Ю.А. Позорелова¹, М.В. Бликян¹

¹Ростовский научно-исследовательский онкологический институт, Ростов-на-Дону, Россия

**EFFECT OF CHRONIC PAIN ON THE LEVEL OF SEX HORMONES, PROLACTIN
AND GONADOTROPINS IN SERUM AND PATHOLOGICALLY CHANGED SKIN
OF FEMALE MICE IN DYNAMICS OF MALIGNANT MELANOMA GROWTH**

*I.M. Kotieva¹, O.I. Kit¹, E.M. Frantsiyants¹, V.A. Bandovkina¹, I.V. Kaplieva¹,
L.K. Trepitaki¹, N.D. Cheryarina¹, Yu.A. Pogorelova¹, M.V. Blikjan¹*

¹Rostov Research Institute of Oncology, Rostov-on-Don, Russia

Кит Олег Иванович – доктор медицинских наук, профессор, член-корреспондент РАН, генеральный директор Ростовского научно-исследовательского онкологического института, ул. 14-я линия, 63, г. Ростов-на-Дону, 344037, Россия, e-mail: rnoi@list.ru

Oleg I. Kit - Doctor of Medicine, Professor, Corresponding Member, RAS, General Director, Rostov Research Institute of Oncology, 14-ya Liniya St., 63, Rostov-on-Don, 344037, Russia, e-mail: rnoi@list.ru

Котиева Инга Мовлиевна – кандидат медицинских наук, старший научный сотрудник, лаборатория изучения патогенеза злокачественных опухолей, Ростовский научно-исследовательский онкологический институт, ул. 14-я линия, 63, г. Ростов-на-Дону, 344037, Россия, e-mail: super.gormon@ya.ru

Inga M. Kotieva - Candidate of Medicine, Senior Researcher, Laboratory of Malignant Tumor Pathogenesis Study, Rostov Research Institute of Oncology, 14-ya Liniya St., 63, Rostov-on-Don, 344037, Russia, e-mail: super.gormon@ya.ru

Франциянц Елена Михайловна – доктор биологических наук, профессор, руководитель лаборатории изучения патогенеза злокачественных опухолей, Ростовский научно-исследовательский онкологический институт, ул. 14-я линия, 63, г. Ростов-на-Дону, 344037, Россия, e-mail: super.gormon@ya.ru

Elena M. Frantsiyants - Doctor of Biological Sciences, Professor, Head of Laboratory of Malignant Tumor Pathogenesis Study, Rostov Research Institute of Oncology, 14-ya Liniya St., 63, Rostov-on-Don, 344037, Russia, e-mail: super.gormon@ya.ru

Бандовкина Валерия Ахтямовна – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, лаборатория изучения патогенеза злокачественных опухолей, Ростовский научно-исследовательский онкологический институт, ул. 14-я линия, 63, г. Ростов-на-Дону, 344037, Россия, e-mail: super.gormon@ya.ru

Valeriya A. Bandovkina - Candidate of Biological Sciences, Senior Researcher, Laboratory of Malignant Tumor Pathogenesis Study, Rostov Research Institute of Oncology, 14-ya Liniya St., 63, Rostov-on-Don, 344037, Russia, e-mail: super.gormon@ya.ru

Каплиева Ирина Викторовна – кандидат медицинских наук, старший научный сотрудник, лаборатория изучения патогенеза злокачественных опухолей, Ростовский научно-исследовательский онкологический институт, ул. 14-я линия, 63, г. Ростов-на-Дону, 344037, Россия, e-mail: kaplirina@yandex.ru

Irina V. Kaplieva - Candidate of Medicine, Senior Researcher, Laboratory of Malignant Tumor Pathogenesis Study, Rostov Research Institute of Oncology, 14-ya Liniya St., 63, Rostov-on-Don, 344037, Russia, e-mail: kaplirina@yandex.ru

Трепитак Лидия Константиновна – научный сотрудник, лаборатория изучения патогенеза злокачественных опухолей, Ростовский научно-исследовательский онкологический институт, ул. 14-я линия, 63, г. Ростов-на-Дону, 344037, Россия, e-mail: super.gormon@ya.ru

Lidiya K. Trepitaki - Researcher, Laboratory of Malignant Tumor Pathogenesis Study, Rostov Research Institute of Oncology, 14-ya Liniya St., 63, Rostov-on-Don, 344037, Russia, e-mail: super.gormon@ya.ru

Черярина Наталья Дмитриевна – врач-лаборант, лаборатория изучения патогенеза злокачественных опухолей, Ростовский научно-исследовательский онкологический институт, ул. 14-я линия, 63, г. Ростов-на-Дону, 344037, Россия, e-mail: super.gormon@ya.ru

Natal'ya D. Cheryarina - Doctor - Laboratory Assistant, Laboratory of Malignant Tumor Pathogenesis Study, Rostov Research Institute of Oncology, 14-ya Liniya St., 63, Rostov-on-Don, 344037, Russia, e-mail: super.gormon@ya.ru

Погорелова Юлия Александровна – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, лаборатория изучения патогенеза злокачественных опухолей, Ростовский научно-исследовательский онкологический институт, ул. 14-я линия, 63, г. Ростов-на-Дону, 344037, Россия, e-mail: super.gormon@ya.ru

Yuliya A. Pogorelova - Candidate of Biological Sciences, Senior Researcher, Laboratory of Malignant Tumor Pathogenesis Study, Rostov Research Institute of Oncology, 14-ya Liniya St., 63, Rostov-on-Don, 344037, Russia, e-mail: super.gormon@ya.ru

Бликян Марина Владимировна – кандидат медицинских наук, ассистент, кафедра патологической физиологии, Ростовский научно-исследовательский онкологический институт, ул. 14-я линия, 63, г. Ростов-на-Дону, 344037, Россия, e-mail: super.gormon@ya.ru

Marina V. Blikjan - Candidate of Medicine, Assistant, Department of Pathological Physiology, Rostov Research Institute of Oncology, 14-ya Liniya St., 63, Rostov-on-Don, 344037, Russia, e-mail: super.gormon@ya.ru

Признается роль гормонального фактора как в развитии меланомы, так и в реализации болевого синдрома. Влияние хронической боли на рост и развитие меланомы практически не исследовано. Цель статьи – изучение влияния хронической боли на центральный и локальный гормональные фоны кожи в динамике роста меланомы B16/F10 у самок мышей. Работа выполнена на самках мышей линии C57BL/6 (n=64) 8-недельного возраста с начальной массой 21–22 г. Животным основной группы с моделью хронической боли подкожно перевивали меланому B16/F10. Группой сравнения являлись самки мышей с перевитой меланомой B16/F10. В сыворотке крови, а также гомогенатах, полученных из кожи, опухоли и перифокальной зоны ИФА- и РИА-методами, определяли уровень эстрогенов, тестостерона, прогестерона, пролактина, ЛГ и ФСГ. Установлен системный и локальный дисбаланс эстрогенов, андрогенов и прогестина, а также гипофизарных гормонов у самок мышей с хроническим болевым синдромом. Выявленные изменения оказались во многом сходными с локальным гормональным фоном, вызванным ростом меланомы у самок мышей. После перевивки меланомы B16/F10 мышам с хронической болью выход опухоли и метастазирование происходят значительно раньше, чем в группе сравнения, а продолжительность жизни животных меньше. Хронический болевой синдром изменяет гормональный фон органа-мишени – кожи, в результате чего создается благоприятное поле для развития злокачественного процесса.

Ключевые слова: меланома, половые гормоны, гонадотропные гормоны, пролактин, хроническая боль.

The role of the hormonal factor is recognized in the development of both melanoma and pain syndrome. The effect of chronic pain on the growth and development of melanoma is poorly studied. The purpose of the study was to reveal the effect of chronic pain on the central and local hormonal profile of the skin in dynamics of the B16/F10 melanoma growth in female mice. The study included female C57BL/6 mice (n=64) aged 8 weeks weighing initially 21-22 g. B16/F10 melanoma was transplanted subcutaneously to animals of the main group with chronic pain. The control group included female mice with transplanted B16/F10 melanoma. Levels of estrogens, testosterone, progesterone, prolactin, LH and FSH were determined by ELISA and RIA in the blood serum and in homogenates of the skin, tumor and perifocal area. Results. We revealed systemic and local imbalance of estrogens and androgens and progesterins, as well as pituitary hormones, in female mice with chronic pain. The changes were largely similar to the local hormonal profile caused by the melanoma growth in female mice. After the transplantation of B16/F10 melanoma to mice with chronic pain, tumor onset and metastasis occurred much earlier than in the controls, and the survival of animals was lower. Chronic pain changes the hormonal profile in the target organ, the skin, which results in a creation of conditions favorable for the development of the malignant process.

Keywords: melanoma, sex hormones, gonadotropins, prolactin, chronic pain.

Введение

Нейропатическая боль является серьезным хроническим заболеванием, которое может развиваться при поражении как центральной нервной системы, так и периферических нервов. Учитывая, что в настоящее время методы лечения хронической нейропатической боли являются неудовлетворительными, исследование механизмов, с помощью которых повреждение нерва вызывает боль, остается в центре внимания исследователей [1, 2]. Имеется много доказательств различной чувствительности к экспериментальной боли и ответа на анальгетики в зависимости от половой принадлежности. Эстроген, прогестерон и другие половые гормоны играют сложную роль в ответе на боль. Несмотря на то что основные механизмы их влияния еще не выяснены, логическая возможность влияния половых гормонов на ноцицепцию привлекает внимание [3]. Взаимосвязь между концентрацией эстрогенов и болевой чувствительностью плохо изучена [4]. Клетки микроглии в центральной нервной системе, которые имеют половые рецепторы гормонов, активируются в ответ на раздражители, высвобождая цитокины и другие медиаторы, обладающие проноцицептивным действием, и могут усиливать ответ на боль. Хотя механизмы, лежащие в основе половых различий, не были полностью выяснены, считается, что в этот процесс могут быть вовлечены и периферические нервы, и центральная нервная система [5]. В частности, прогестерон является перспективным в качестве важного защитного средства против различных повреждений нервной системы [6]. Исследования на животных также показали, что тестостерон обладает обезболивающим и успокаивающим эффектом и модулирует опиоидную анальгезию [7, 8].

Базальные механические болевые пороги у самцов и самок крыс изменяются эстрогенозависимым способом [9]. Введение эстрогена, как было показано, приводит к сенсibilизации ноцицептивных нейронов, что уменьшает болевой порог [10, 11].

По данным исследований, кожа представляет собой эндокринный орган, клетки которого способны к локальному синтезу различных нейромедиаторов, стероидных гормонов и их пептидных регуляторов. Это делает ее аналогом гипоталамо-гипофизарно-надпочечниковой и гонадной систем [12, 13]. Универсальность и многофункциональность позволяют коже участвовать в поддержании гомеостаза всего организма и в то же время дают возможность для развития самой агрессивной и гетерогенной злокачественной опухоли, какой является меланома. Известно также, что стимуляцию меланогенеза вызывают, помимо прочего, гормоны половых желез [14, 15]. В ряде исследований сообщают о наличии корреляционных связей между риском возникновения

злокачественной меланомы и некоторыми репродуктивными факторами [16]. Кроме того, в меланоме обнаружены рецепторы эстрогенов [17]. Установлено, что рецептор меланоцитстимулирующего гормона MC1-R может принимать участие в развитии анальгетического ответа только у мышей-самок [18]. Таким образом, с учётом гормональной зависимости меланомы и хронического болевого синдрома сочетание этих двух патологий может привести к существенным изменениям в течение онкологического заболевания и повлиять на результаты лечения.

Целью исследования явилось изучение в эксперименте влияния хронической боли на уровень половых и тропных гормонов в сыворотке крови, опухоли и окружающих ее тканях у самок мышей линии C57BL/6 в динамике роста перевивной меланомы B16/F10.

Материалы и методы исследования

Работа выполнена на самках мышей линии C57BL/6 (n=64) 8-недельного возраста с начальной массой 21–22 г. Животные были получены из ФГБУН «Научный центр биомедицинских технологий, филиал Андреевка» ФМБА (Московская область). В работе использовали клеточную линию метастазирующей в легкие мышшиной меланомы B16/F10, полученную из РОНЦ им. Н.Н. Блохина РАМН (г. Москва). Животные содержались при естественном режиме освещения со свободным доступом к воде и пище. Все исследования проводились в соответствии с требованиями и условиями, изложенными в Международных рекомендациях по проведению медико-биологических исследований с использованием животных и приказе Минздрава РФ № 267 от 19.06.03 «Об утверждении правил лабораторной практики».

Все самки находились в состоянии диэструса. Животные были распределены на группы: две контрольные (интактные (n=7) и контрольные мыши (контроль) с воспроизведением модели хронической боли (n=7)), группу сравнения (B16/F10) (мышы со стандартной подкожной перевивкой меланомы B16/F10 (n=22)) и основную (Хр Б+B16/F10) (мышы, которым меланому B16/F10 перевивали через 2 недели после создания модели хронической боли (n=28)). Мышам основной группы перевязывали седалищный нерв с двух сторон под ксила-золетилловым наркозом. Через 2 недели после заживления операционной раны подкожно под правую лопатку вводили 0,5 мл взвеси опухолевых клеток меланомы B16/F10 в физиологическом растворе в разведении 1:10. Животным из группы сравнения перевивали меланому B16/F10 подкожно в той же дозе и объёме, что и в основной группе, но без воспроизведения модели хронической боли. При стандартной перевивке

опухоль появляется в 100 % случаев, достаточно быстро растёт и на 12–16-е сут роста метастазирует преимущественно гематогенно в легкие (60–90 %), реже – в печень и селезенку. Контрольными для основной группы животных служили мыши с двусторонней перевязкой седалищного нерва без онкопроцесса (контроль); для группы сравнения – интактные мыши. Контрольных животных, а также мышей из основной и группы сравнения через 1, 2 и 3 недели эксперимента декапитировали на гильотине. Опухоль, перифокальную зону и кожу выделяли на льду. Из тканей получали 10%-е гомогенаты, приготовленные на 0,1М калий-фосфатном буфере pH 7,4, содержащем 0,1%-й Твин-20 и 1%-й БСА, в которых с помощью стандартных тест-систем ИФА- и РИА-методами определяли уровни пролактина, ЛГ, ФСГ, эстрадиола, тестостерона, прогестерона.

Статистический анализ результатов проводили с помощью пакета STATISTICA 6.0 (Stat-Soft, 2001). Результаты представлены в виде $M \pm m$, где M – арифметическое среднее значение; m – стандартная ошибка среднего. Оценка достоверности произведена с использованием t-критерия Стьюдента, уровень $p < 0,05$ принимали как значимый. При этом соблюдались общие рекомендации для медицинских исследований.

Результаты

После перевивки меланомы опухоль у мышей группы сравнения появлялись на 10–12-й день в 100 % случаев, а средняя продолжительность жизни самок составила $30,3 \pm 1,68$ дня. У мышей основной группы опухоль появилась в 100 % случаев через 5–7 дней, при этом метастазы у мышей основной группы регистрировались уже через неделю после перевивки, а у мышей из группы сравнения – только через 4 недели. Средняя продолжительность жизни для мышей основной группы составила $19,17 \pm 1,35$ дня.

Прежде всего, представляло интерес изучить влияние хронической боли на состояние системного гормонаногенеза. В сыворотке крови у контрольных мышей с хронической болью, но без меланомы (табл. 1) уровни исследованных гормонов отличались от показателей у интактных мышей. Содержание эстрадиола, тестостерона и прогестерона в сыворотке у контрольных мышей превышало показатели интактных в 1,7, 5 и 7,8 раза соответственно ($p < 0,05$). Кроме того, у контрольных самок с хронической болью в сыворотке крови оказался в 2,9 раза выше уровень ЛГ; у интактных животных коэффициент ЛГ/ФСГ также оказался повышен в 2,8 раза ($p < 0,05$).

Таблица 1

Содержание половых гормонов, пролактина и гонадотропных гормонов в сыворотке крови самок мышей в динамике роста злокачественной меланомы / The contents of sex hormones, prolactin and gonadotropins in the serum of female mice in the dynamics of growth of malignant melanoma

Гормоны	Интактные мыши	После перевивки B16/F10, неделя		
	Контрольные мыши с болью	1-я	2-я	3-я
Эстрадиол, пг/мл	1979,07±181	3156,15±287 ¹	2420,67±202 ^{1,3}	2001,02±174
	3313,94±275 ¹	2573,53±182 ²	2087,56±186 ^{2,3}	1964,19±161 ²
Тестостерон, нг/мл	0,01±0,001	0,01±0,001	0,01±0,001	0,04±0,001 ^{1,3}
	0,05±0,004 ¹	0,04±0,003 ²	0,01±0,001 ^{2,3}	0,01±0,001 ²
Прогестерон, нг/мл	0,49±0,03	0,96±0,07 ¹	0,95±0,06 ¹	0,29±0,02 ^{1,3}
	3,81±0,31 ¹	3,31±0,28	1,79±0,15 ^{2,3}	0,75±0,05 ^{2,3}
Пролактин, нг/мл	0,12±0,01	0,41±0,03 ¹	0,5±0,04 ¹	0,24±0,02 ^{1,3}
	0,15±0,02	0,2±0,019 ²	0,2±0,02 ²	0,29±0,022 ^{2,3}
ЛГ, мМЕ/мл	0,3±0,029	0,11±0,01 ¹	0,13±0,011 ¹	0,13±0,01 ¹
	0,86±0,07 ¹	0,17±0,014 ²	0,15±0,012 ^{1,2}	0,13±0,011 ²
ФСГ, мМЕ/мл	0,16±0,014	0,1±0,01 ¹	0,1±0,01 ¹	0,13±0,01
	0,16±0,015	0,24±0,018 ²	0,23±0,017 ²	0,59±0,04 ^{2,3}
Коэффициент ЛГ/ФСГ	1,9±0,14	1,1±0,10 ¹	1,3±0,12 ¹	1,0±0,09 ¹
	5,4±0,41 ¹	0,7±0,045 ²	0,7±0,06 ²	0,22±0,019 ^{2,3}

Примечание. ¹ – достоверно по сравнению с интактными мышами; достоверно по отношению к показателям; ² – в ткани контрольных животных ($p < 0,05$); ³ – в предыдущий срок исследования ($p < 0,05$).

Значимых отличий в содержании пролактина в сыворотке крови у интактных и контрольных самок не установлено. После перевивки меланомы В16/F10 в сыворотке крови у самок основной группы по сравнению с контролем (боль без меланомы) отмечено с 1-й недели прогрессивное снижение эстрадиола и тестостерона, а со 2-й недели – прогестерона. Так, уровень эстрадиола снизился через 1 неделю на 22,3 % ($p<0,05$), через 2 недели – на 37 ($p<0,05$), через 3 недели – на 40,7 ($p<0,05$). Содержание тестостерона в 1-ю неделю упало на 20 %, во 2-ю и 3-ю уменьшилось в 5 раз. Количество прогестерона в сыворотке крови снизилось во 2-ю неделю в 2,1 раза, в 3-ю – в 5,1 ($p<0,05$). Что касается гормонов гипофиза, то начиная с 1-й недели эксперимента установлено их падение в сыворотке крови мышей основной группы, сохраняющееся вплоть до 3-й недели; уровня ЛГ – более чем в 5 раз, тогда как содержание ФСГ, напротив, возросло через 1 и 2 недели в среднем в 1,5 ($p<0,05$), через 3 недели – в 3,7 раза. Уровень коэффициента ЛГ/ФСГ резко уменьшился: через 1 и 2 недели – в 7,7 и в 8,3 раза соответственно, через 3 недели – в 24,5. В сыворотке крови у животных из группы сравнения иначе изменялся уровень половых гормонов в динамике роста меланомы по сравнению с мышами основной группы. Так, у мышей с меланомой В16/F10 без хронической боли (группа сравнения) уровень эстрадиола в крови увеличился через 1 неделю на 59,5 % ($p<0,05$), через 2 – на 22,3 ($p<0,05$) по сравнению с интактными мышами, а через 3 недели возвращался к исходным значениям. На концентрацию тестостерона в сыворот-

ке рост меланомы не оказывал никакого влияния первые 2 недели, но через 3 недели был установлен рост в 4 раза. В то же время содержание прогестерона возросло через 1–2 недели после перевивки в среднем в 2, а затем снизилось в 1,7 раза к концу 3-й недели роста меланомы. В сыворотке крови животных группы сравнения в динамике роста экспериментальной меланомы уровень ЛГ и ФСГ снизился начиная с первой недели в 2,7 и в 1,6 раза соответственно, оставаясь на таком уровне вплоть до 3-й недели. Уровень коэффициента ЛГ/ФСГ в этом случае на протяжении всего срока эксперимента оставался ниже контрольных значений в среднем в 1,7 раза.

Далее представляло интерес изучение уровня гормонов в интактной и патологически измененной опухолевым ростом коже мышей с хронической болью. Установлено, что в коже контрольных мышей с хронической болью (табл. 2) уровень эстрадиола был повышен относительно ткани интактных животных в 3 раза, эстрогена – в 2,9, прогестерона – в 2,1 раза. Содержание общего тестостерона, свободного тестостерона и пролактина в коже мышей с хронической болью было снижено в 1,3 ($p<0,05$), 1,8 ($p<0,05$) и 4,7 раза соответственно. В основной группе в динамике развития экспериментальной меланомы за 3 недели исследования в коже, не затронутой патологическим процессом, не обнаружено достоверного изменения относительно соответствующего контроля (контроль с болью) уровней эстрадиола, общего и свободного тестостерона, прогестерона и пролактина (табл. 2).

Таблица 2

Уровень половых гормонов и пролактина в непораженной коже самок мышей с меланомой В16/ F10 и меланомой, сочетанной с хронической болью / The level of sex hormones and prolactin in the unaffected skin of female mice with the melanoma В16/ F10 melanoma and associated with chronic pain

Группа	Эстрадиол, нмоль/г тк.	Эстрон, пмоль/г тк.	Тестостерон, нмоль/г тк.	Тестостерон свободный, пмоль/г тк.	Прогестерон, нмоль/г тк.	Пролактин, мМЕ/г тк.
Интактные животные						
Кожа интактная	0,57±0,04	262,4±21,1	12,8±1,0	0,78±0,05	1,0±0,07	6,6 ±0,50
Контроль	1,7±0,14 ¹	769,0±62 ¹	9,8±0,8 ¹	0,43±0,04 ¹	2,1±0,2 ¹	1,4±0,12 ¹
1-я неделя роста меланомы В16/F10						
В16/F10	0,62±0,03	321,5±28,1	18,2±1,5 ¹	0,85±0,07	0,95±0,05	10,5±1,06 ¹
ХрБ+В16/F10	2,0±0,2 ³	919,3±76 ^{2,3}	9,7±0,9 ³	0,42±0,03 ³	2,5±0,24 ³	1,4±0,14 ³
2-я неделя роста меланомы В16/F10						
В16/F10	0,68±0,05	353±25,2 ¹	14,4±1,3	0,55±0,04 ¹	0,96±0,06	9,03±0,6 ¹
ХрБ+В16/F10	2,0±0,2 ³	1076,1±98 ^{1,2,3}	10,4±1,0 ³	0,47±0,04 ¹	2,8±0,26 ³	1,5±0,14 ³
3-я неделя роста меланомы В16/F10						
В16/F10	0,74±0,05 ¹	403,2±33,2 ¹	14,7±1,1	0,45±0,04 ¹	1,02±0,09	3,13±0,25 ¹
ХрБ+В16/F10	2,1±0,2 ^{1,3}	692,7±59 ^{1,3}	10,0±0,9 ³	0,45±0,04	2,7±0,25 ³	1,4±0,12 ³

Примечание. Достоверно по отношению: ¹ – к показателям в ткани интактных животных; ² – к контролю ($p<0,05$); ³ – достоверно по сравнению с показателями в группе сравнения.

Только уровень эстрогена увеличился через 1 и 2 недели в 1,2 ($p<0,05$) и 1,4 раза ($p<0,05$) относительно контрольных величин, но через 3 недели с момента перевивки опухоли вернулся к исходным значениям. Вместе с тем некоторые показатели кожи мышечной основной группы значительно отличались от показателей в непораженной коже самок мышечной группы сравнения. Уровень эстрадиола с 1-й по 3-ю неделю роста меланомы превосходил аналогичный показатель в группе сравнения в среднем в 2,9, эстрогена – в 3 раза в течение 2 недель и в 1,7 ($p<0,05$) – через 3 недели, прогестерона – в 2,7 раза. Уровни общего тестостерона и пролактина с 1-й по 3-ю недели роста меланомы, напротив, были ниже, чем у животных группы сравнения: общего тестостерона – в 1,9, 1,4 и 1,5 раза ($p_{1,2,3}<0,05$);

пролактина – в 7,5, 6 и 2,2 раза. Содержание свободного тестостерона через одну неделю было в 2 раза ниже, чем у животных группы сравнения, а в дальнейшем не имело достоверных отличий от показателей в группе сравнения.

В ткани опухоли у мышечной основной группы в динамике роста меланомы не обнаружено значимых изменений уровней эстрадиола, общего и свободного тестостерона относительно показателей соответствующего контроля (табл. 3).

Однако относительно показателей в ткани опухоли мышечной группы сравнения содержание эстрадиола было выше через 2 недели – в 2,9, через 3 недели – в 2,7 раза, а уровень общего тестостерона, напротив, ниже через 3 недели – в 1,3 раза ($p<0,05$).

Таблица 3

Уровень половых гормонов и пролактина в ткани опухоли самок мышечной группы с меланомой B16/ F10 и меланомой, сочетанной с хронической болью / The level of sex hormones and prolactin in the tumor tissue in female mice with the melanoma B16/ F10 melanoma and associated with chronic pain

Группа	Эстрадиол, нмоль/г тк.	Эстроген, пмоль/г тк.	Тестостерон, нмоль/г тк.	Тестостерон свободный, пмоль/г тк.	Прогестерон, нмоль/г тк.	Пролактин, мМЕ/г тк.
Интактные животные						
Кожа интактная	0,57±0,04	262,4±21,1	12,8±1,0	0,78±0,05	1,0±0,07	6,6 ±0,50
Контроль	1,7±0,14 ¹	769,0±62 ¹	9,8±0,8 ¹	0,43±0,04 ¹	2,1±0,2 ¹	1,4±0,12 ¹
1-я неделя роста меланомы B16/F10						
ХрБ+В16/F10	1,9±0,15	515,4±45 ²	10,4±1,0	0,43±0,03	1,9±0,15	4,7±0,38 ²
2-я неделя роста меланомы B16/F10						
В16/F10	0,63±0,04	519,3±29,5 ¹	13,1±1,1	0,72±0,06	1,4±0,06 ¹	13,6±1,1 ¹
ХрБ+В16/F10	1,8±0,15 ³	594,7±48,5 ²	11,0±1,1	0,50±0,04 ³	3,2±0,28 ^{2,3}	6,1±0,54 ^{2,3}
3-я неделя роста меланомы B16/F10						
В16/F10	0,74±0,04 ¹	494,5±30,8 ¹	12,8±1,2	0,37±0,03 ¹	1,1±0,1	5,5±0,2
ХрБ+В16/F10	2,0±0,2 ³	1037±99,5 ^{2,3}	10,3±0,97 ³	0,4±0,03	3,4±0,28 ^{2,3}	3,3±0,3 ^{2,3}

Примечание. Достоверно по отношению: ¹ – к показателям в ткани интактных животных; ² – к контролю ($p<0,05$); ³ – достоверно по сравнению с показателями в группе сравнения.

Содержание прогестерона у животных основной группы нарастало в ткани опухоли относительно показателей соответствующего контроля начиная со 2-й недели эксперимента – в 1,5 раза ($p<0,05$), через 3 недели – в 1,6 раза ($p<0,05$). При этом во все сроки исследования уровень прогестерона превышал показатели в ткани опухоли мышечной группы сравнения в 2,3 и в 3,3 раза через 2 и 3 недели (табл. 2). Уровень пролактина в ткани опухоли мышечной основной группы изменялся неодно-

значно: через 1 неделю – возрос в 3,4 раза относительно соответствующего контроля; через 2 недели отмечено дальнейшее возрастание относительно предыдущего срока в 1,3 раза ($p<0,05$). Затем через 3 недели уровень пролактина в ткани опухоли снизился относительно показателя через 2 недели в 1,8 раза ($p<0,05$), но оставался выше значений соответствующего контроля в 2,4 раза (табл. 3). При этом во все сроки исследования содержание пролактина в ткани опухоли мышечной основной группы остава-

лось ниже значений в опухоли животных группы сравнения. Уровень эстрогена в течение первых 2 недель роста опухоли у мышей основной группы снижался в среднем в 1,4 раза ($p < 0,05$) относительно показателей соответствующего контроля, а через 3 недели возрос в 1,3 раза ($p < 0,05$). При этом содержание эстрогена в ткани опухоли мышей основной группы через 2 недели эксперимента достоверно не отличалось от показателей в опухоли животных группы сравнения, а через 3 недели эксперимента превышало их в 2,1 раза.

В ткани перифокальной зоны у мышей основной группы (табл. 4) показатели эстрадиола и тестостерона (общая и свободная формы) принципиально не отличались от значений в ткани опухоли. Значимые различия касались уровня эстрогена, прогестерона и пролактина. При этом содержание эстрогена в перифокальной зоне у мышей основной группы через 1 и 2 недели оказалось выше в 2 раза, чем в меланоме ($p < 0,05$), а через 3 недели уровень в исследуемых образцах сравнивался. Следует отметить, что концентрация эстрогена в перифокальной зоне во все исследуемые сроки превышала показатели не только по от-

ношению к соответствующим контрольным величинам в среднем в 1,5 раза ($p < 0,05$), но и аналогичные показатели у мышей группы сравнения в среднем в 3,1 раза. Уровень прогестерона в перифокальной зоне мышей основной группы с 1-й по 3-ю недели опухолевого роста оказался выше соответствующего контроля в среднем в 1,5 раза, при этом превышая показатели в опухоли только через одну неделю роста меланомы.

На протяжении всего роста меланомы концентрация прогестерона в перифокальной зоне у мышей основной группы превосходила значения у мышей группы сравнения в среднем в 3 раза. Уровень пролактина в перифокальной зоне повысился через 2–3 недели в 1,4 раза ($p < 0,05$) по сравнению с контролем, но все равно был ниже, чем в соответствующей опухолевой ткани, через 1 и 2 недели – в 3,1 раза, а через 3 недели – в 1,7. Следует отметить, что в группе сравнения уровень пролактина на протяжении всего эксперимента превышал показатели основной группы в 4,8 раза (через 2 недели) и в 2,3 – через 3 недели.

Таблица 4

Уровень половых гормонов и пролактина в ткани перифокальной зоны опухоли самок мышей с меланомой B16 / F10 и меланомой, сочетанной с хронической болью / The level of sex hormones and prolactin in the tissue of perifocal zone of the tumor in female mice with the melanoma B16/ F10 melanoma and associated with chronic pain

Группа	Эстрадиол, нмоль/г тк.	Эстрон, пмоль/г тк.	Тестостерон, нмоль/г тк.	Тестостерон свободный, пмоль/г тк.	Прогестерон, нмоль/г тк.	Пролактин, мМЕ/г тк.
Интактные животные						
Кожа интактная	0,57±0,04	262,4±21,1	12,8±1,0	0,78±0,05	1,0±0,07	6,6 ±0,50
Кожа, контроль	1,7±0,14 ¹	769,0±62 ¹	9,8±0,8 ¹	0,43±0,04 ¹	2,1±0,2 ¹	1,4±0,12 ¹
1-я неделя роста меланомы B16/F10						
ХрБ+В16/F10	2,1±0,19	1106,7±96,2 ²	10,5±0,9	0,43±0,04	2,8±0,21 ²	1,4±0,12
2-я неделя роста меланомы B16/F10						
В16/F10	0,63±0,04	361,5±31,1 ¹	12,7±1,0	0,53±0,04 ¹	0,99±0,08	9,5±0,71 ¹
ХрБ+В16/F10	2,0±0,17 ³	1181,6±98 ^{2,3}	10,0±1,0	0,5±0,04	3,3±0,31 ^{2,3}	2,0±0,18 ^{2,3}
3-я неделя роста меланомы B16/F10						
В16/F10	0,72±0,05 ¹	389,1±26,7 ¹	15,4±1,0	0,5±0,03 ¹	1,02±0,07	4,6±0,3 ¹
ХрБ+В16/F10	2,1±0,20 ³	1175,1±110 ^{2,3}	10,0±0,9 ³	0,5±0,04	3,1±0,28 ^{2,3}	2,0±0,15 ^{2,3}

Примечание. Достоверно по отношению: ¹ – к показателям в ткани интактных животных; ² – к контролю ($p < 0,05$); ³ – достоверно по сравнению с показателями в группе сравнения.

Обсуждение

В результате исследования выявлено, что кожа у мышей с хронической болью по сравнению с интактными животными перенасыщена эстрогенами – эстрадиолом и эстроном, а также прогестероном, но испытывает недостаток тестостерона. При этом

в сыворотке крови у животных с хронической болью содержатся повышенные количества эстрадиола, тестостерона, прогестерона и ЛГ. Роль половых и гипофизарных гормонов в ноцицептивных процессах окончательно неясна [4]. Многие исследования показывают увеличение в плазме крови

или в локальных очагах уровней эстрогенов параллельно увеличению ноцицептивной чувствительности [19–21]. В [22] использовалась модель воспаления для изучения роли прогестерона в развитии стойкой боли и гипералгезии у лактирующих крыс с сохраненными яичниками и у овариэктомированных крыс. Результаты свидетельствуют о том, что прогестерон способен модулировать ранние нейрогенные события, инициированные травмой, и его применение может представлять собой полезную стратегию предотвращения развития центральной хронической боли [23]. Общий вывод из многих исследований состоит в том, что тестостерон, предположительно, с помощью рецепторов андрогенов является защитным, или антиноцицептивным. Влияние тестостерона на развитие боли не так широко изучено, как эстрадиола, однако большинство исследований поддерживают его антиноцицептивную, или защитную, роль. В то же время в исследовании установлено, что у мышей из группы сравнения рост перевивной меланомы B16/F10 сопровождался повышением содержания эстрадиола и эстрогена в коже, опухоли и периферической зоне и снижением уровней общей и свободной форм тестостерона. Кроме того, в сыворотке крови в динамике роста меланомы B16/F10 выявлен рост концентрации эстрадиола в 1-ю неделю после перевивки, прогестерона и пролактина – на протяжении всего эксперимента, а также снижение содержания ЛГ. В итоге по ряду параметров эндокринный фон кожи у мышей с хронической болью оказался схожим с фоном кожи у мышей группы сравнения с растущей меланомой. Как показал эксперимент, перевивка меланомы B16/F10 самкам мышей с хроническим болевым синдромом привела к резкой активации злокачественного процесса, что выразилось в раннем появлении опухоли (уже через 7 дней) и в быстром метастазировании (через одну неделю) без существенного роста объемов опухолевых узлов. Можно сказать, что меланома была перевита на подготовленную хроническим болевым синдромом почву, позволившую злокачественным клеткам максимально быстро реализовать свое развитие. Ряд исследований показывает, что различные клеточные линии меланомы содержат половые гормоны. В частности, SK-MEL-28 и UACC-257 содержат самые высокие уровни эстрогена (21,50 и 36,36 пг/10⁶ клеток соответственно) и эстрадиола (146,59 и 130,70 пг/10⁶ клеток соответственно) [24]. В клеточных линиях ПВ-MEL-LES и ПВ-MEL-IAN тестостерон, дигидротестостерон, эстрадиол и прогестерон значительно сти-

мулировали пролиферацию клеток [25]. В [26] показано, что клетки SNA меланомы непосредственно реагируют на введение тестостерона и что этот эффект модулируется светом. Интересным оказался тот факт, что как в реализации болевого эффекта у самок мышей, так и в синтезе меланина принимает участие рецептор меланокортина-1 (MC1R) [18]. Ранее нами было показано, что развитие и рост перевивной меланомы B16/F10 являются сложным многостадийным процессом, изменяющим гормональный баланс не только непосредственно в злокачественной опухоли, но и в организме в целом. Нарушения гормоногенеза возникают на начальных стадиях путем аутокринных механизмов регуляции клетками перевитой и растущей меланомы, а затем паракринным способом распространяют свое влияние на близлежащие ткани и центральные регуляторные системы организма [27]. Выявленные изменения эндокринного баланса в коже самок мышей под влиянием хронической боли оказались однонаправленными с теми, которые были вызваны ростом перевивной меланомы B16/F10. Безусловно, требуются дальнейшие исследования, однако на основании полученных результатов можно предположить, что некоторые хронические заболевания, в число которых входит и хронический болевой синдром, способны повышать не только риск возникновения меланомы кожи, но и агрессивность заболевания, подготавливая почву для возникновения и роста злокачественной опухоли.

Заключение

Анализ полученных в настоящем исследовании результатов показал, что хроническая боль изменяет системный и локальный гормоногенез, вероятно, за счет влияния как на функцию гипофиза, о чем свидетельствует резкое изменение в крови коэффициента ЛГ/ФСГ, так и на местный синтез гормонов. Состояние гормонального баланса в коже мышей под действием хронической боли готовит орган-мишень для развития в нем злокачественного процесса, так как именно такие перестройки локального гормоногенеза в коже развивались в динамике роста меланомы без хронической боли в группе сравнения. Требуются дальнейшие исследования влияния хронической боли на развитие меланомы кожи, так как в свете полученных результатов можно предположить неблагоприятный прогноз течения заболевания и риск раннего метастазирования у больных даже на ранних стадиях в случае сопутствующего хронического болевого синдрома.

Литература

1. Крыжановский Г.Н. Важное событие в отечественной медицине // Боль. 2003. № 1 (1). С. 4–5.
2. Machelska H., Chelik M.Ö. Recent advances in understanding neuropathic pain: glia, sex differences, and epigenetics // F1000Res. 2016. Vol. 5. P. 2743. DOI 10.12688/f1000research.9621.1.PMCID PMC5224690.
3. Maurer A.J., Lissounov, Knezhevich I., Candido K.D., Knezhevich N.N. Pain and sex hormones: an overview of modern understanding // Pain Manag. 2016. Vol. 6. (3). P. 285–296. DOI 10.2217/PMT-2015-0002.
4. Linn H.N., Conlon A., Kidwell K.M., Griffith K., Smerage J.B., Schott A.F., Hayes D.F., Williams D.A., Clough D.J., Garth S.E. The effect of estrogens on the depletion of pain sensitivity in aromatase inhibitor-treated women with early stage breast cancer // J. Pain. 2014. Vol. 15 (5). P. 468–475. DOI 10.1016/j.jpain.2014.01.487. PMCID PMC4063362. NIHMSID NIHMS560398.
5. Manson J.E. Pain: Sexual differences and consequences for treatment // Metabolism. 2010. Vol. 59, Suppl. 1. P. 16–20. DOI 10.1016/j.metabol.2010.07.013.
6. Jarahi M., Shebani V., Safakhah H.A., Torkmandi H., Manson J.E. The effect of progesterone on neuropathic pain responses in the experimental animal model for peripheral neuropathy in rats: behavioral and electrophysiological studies // Neuroscience. 2014. Vol. 256. P. 403–411. DOI 10.1016/j.neuroscience.2013.10.043.
7. Creating R.M., Mogil J.S., Aloisi A.M. Sexual differences in pain and analgesia: the role of sex hormones // Eur. J. Pain. 2004. Vol. 8. P. 397–411.
8. Edinger K.L., Fry C.A. Soothing and analgesic effects Testosterone may be in part due to the action of its 5alpha-reduced metabolites in the hippocampus // Psycho-neuroendocrinology. 2005. Vol. 30. P. 418–430.
9. Khazarsky S.G., Dina O.A., Zeleny P., Levin J.D. Estrogen regulates adrenal medullary function to produce sexual dimorphism in the nociceptive threshold and beta-adrenergic receptor-mediated hyperalgesia in rats // Eur. J. Neurosci. 2005. Vol. 21. P. 3379–3386. DOI 10.1111/j.1460-9568.2005.04158.x.
10. Taymen T., Levin J.D. Signaling pathway in sensitization: to the nociceptor of cell biology // Neuron. 2007. Vol. 55. P. 365–376. DOI 10.1016/j.neuron.2007.07.008.
11. Woolf C.J., Ma Q. Nociceptors-pain stimuli detectors // Neuron. 2007. Vol. 55. P. 353–364. DOI 10.1016/j.neuron.2007.07.016.
12. Slominski A. Neuroendocrine activity of the melanocyte // Exp. Dermatol. 2009. Vol. 18, № 9. P. 760–763.
13. Slominski A.T., Zmijewski M.A., Skobowiat C., Zbytek B., Slominski R.M., Stekettee J.D. Sensing the environment: regulation of local and global homeostasis by the skin's neuroendocrine system // Adv. Anat. Embryol. Cell. Biol. 2012. Vol. 212. P. 1–115.
14. Кичигина Т.Н., Грушин В.Н., Беликова И.С., Мяделец О.Д. Меланоциты: строение, функции, методы выявления, роль в кожной патологии // Вестн. ВГМУ. 2007. Т. 6, № 4. С. 1–16.
15. Jang Y.H., Lee J.Y., Kang H.Y., Lee E.S., Kim Y.C. Oestrogen and progesterone receptor expression in melasma: an immunohistochemical analysis // J. Eur. Acad. Dermatol Venereol. Forthcoming. 2010. Vol. 24 (11). P. 1312–1316. DOI 10.1111/j.1468-3083.2010.03638.x.
16. Karagas M.R., Zens M.S., Stukel T.A., Swerdlow A.J., Rosso S., Osterlind A. Pregnancy history and incidence in melanoma in women : a pooled analysis // Cancer Causes Control. 2006. Vol. 17. P. 11–19.
17. De Giorgi V., Mavilia C., Massi D., Gozzini A., Aragona P., Tanini A., Sestini S., Paglierani M., Boddi V., Brandi M.L., Lotti T. Estrogen receptor expression in cutaneous melanoma: a real-time reverse transcriptase-polymerasechain reaction and immunohistochemical study // Arch. Dermatol. 2009. Vol. 145 (1). P. 30–36. DOI 10.1001/archdermatol.2008.537.
18. Mogil J.S., Ritchie J., Smith S.B., Strasburg K., Kaplan L., Wallace M.R., Romberg R.R., Bijl H., Sartton E.Y., Fillingim R.B., Dahan A. Melanocortin-1 receptor gene variants affect pain and mu-opioid analgesia in mice and humans // J. Med. Genet. 2005. Vol. 42 (7). P. 583–587. PMID 15994880. PMCID PMC1736101. DOI 10.1136/jmg.2004.027698.
19. Allen L., McCarson K.E. Estrogen increases nociception-induced brain derived neurotrophic gene expression factor in the female rat // Neuroendocrinology. 2005. Vol. 81. P. 193–199.
20. Liu B., Eisenach J.C., Tong S. Chronic estrogen sensitizes a subset of mechanosensitive afferents of the innervating cervix // J. Neurophysiol. 2005. Vol. 93. P. 2167–2173.
21. Evrard N.S. Synthesis of Estrogen in the dorsal horn: a new central mechanism of hormonal regulation of pain // Am. J. Physiol. Regul. Integr. Comp. Physiol. 2006. Vol. 291. P. R291–R299. DOI 10.1152/ajpregu.00930.2005.
22. Ren K., Wei F., Dubner R., Murphy A., Hoffman G.E. Progesterone weakens persistent inflammatory hyperalgesia in female rats: involvement of the spinal NMDA receptor mechanisms // Brain Res. 2000. Vol. 865 (2). P. 272–277.
23. Coronel M.F., Labombarda F., De Nicola A.F., Gonzalez S.L. Progesterone reduces the expression of spinal cyclooxygenase-2 and inducible nitric oxide synthase and prevents allodynia in a rat model of central neuropathic pain // Eur. J. Pain. 2014. Vol. 18 (3). P. 348–359. DOI 10.1002/j.1532-2149.2013.00376.x.
24. Xu Xia, Veenstra T.D. The concentration of endogenous estrogens and estrogen metabolites in the lines of human tumor cells NCI-60 // Genome Med. 2012. Vol. 4 (4). DOI 10.1186/gm330. PMCID PMC3446259.

25. Morvillo V., Luthy I.A., Bravo A.I., Capurro M.I., Portels P., Calander R.S., Mordoh J. Androgen receptors in the human melanoma cell lines IIB-MEL-LES and IIB-MEL-IAN and human melanoma metastases // *Melanoma Res.* 2002. Vol. 12 (6). P. 529–538.

26. Allil P.A., Visconti M.A., Castrucci A.M., Isoldi M.C. The photoperiod and testosterone modulate the growth and melanogenesis of s91 murine melanoma // *Med. Chem.* 2008. Vol. 4 (2). P. 100–105.

27. Бандовкина В.А., Франциянц Е.М., Погорелова Ю.А., Черярина Н.Д. Особенности стероидогенеза при экспериментальной меланоме В16 // *Молекулярная медицина.* 2015. № 5. С. 47–51.

References

1. Kryzhanovskii G.N. Vazhnoe sobytie v otechestvennoi meditsine [An important event in domestic medicine]. *Bol'.* 2003, No. 1 (1), pp. 4-5.

2. Machel'ska H., Chelik M.Ö. Recent advances in understanding neuropathic pain: glia, sex differences, and epigenetics. *F1000Res.* 2016, vol. 5, p. 2743. DOI 10.12688/f1000research.9621.1. PMID PMC5224690.

3. Maurer A.J., Lissounov, Knezhevich I., Candido K.D., Knezhevich N.N. Pain and sex hormones: an overview of modern understanding. *Pain Manag.* 2016, vol. 6 (3), pp. 285-296. DOI 10.2217/PMT-2015-0002.

4. Linn H.N., Conlon A., Kidwell K.M., Griffith K., Smerage J.B., Schott A.F., Hayes D.F., Williams D.A., Clough D.J., Garth S.E. The effect of estrogens on the depletion of pain sensitivity in aromatase inhibitor-treated women with early stage breast cancer. *J. Pain.* 2014, vol. 15 (5), pp. 468-475. DOI 10.1016/j.jpain.2014.01.487. PMID PMC4063362. NIHMSID NIHMS560398.

5. Manson J.E. Pain: Sexual differences and consequences for treatment. *Metabolism.* 2010, vol. 59, suppl. 1, pp. 16-20. DOI 10.1016/j.metabol.2010.07.013.

6. Jarahi M., Sheibani V., Safakhah H.A., Torkmandi H., Manson J.E. The effect of progesterone on neuropathic pain responses in the experimental animal model for peripheral neuropathy in rats: behavioral and electrophysiological studies. *Neuroscience.* 2014, vol. 256, pp. 403-411. DOI 10.1016/j.neuroscience.2013.10.043.

7. Creating R.M., Mogil J.S., Aloisi A.M. Sexual differences in pain and analgesia: the role of sex hormones. *Eur. J. Pain.* 2004, vol. 8, pp. 397-411.

8. Edinger K.L., Fry C.A. Soothing and analgesic effects Testosterone may be in part due to the action of its 5alpha-reduced metabolites in the hippocampus. *Psychoneuroendocrinology.* 2005, vol. 30, pp. 418-430.

9. Khazarsky S.G., Dina O.A., Zeleny P., Levin J.D. Estrogen regulates adrenal medullary function to produce sexual dimorphism in the nociceptive threshold and beta-adrenergic receptor-mediated hyperalgesia in rats. *Eur. J. Neurosci.* 2005, vol. 21, pp. 3379-3386. DOI 10.1111/j.1460-9568.2005.04158.x.

10. Taymen T., Levin J.D. Signaling pathway in sensitization: to the nociceptor of cell biology. *Neuron.* 2007, vol. 55, pp. 365-376. DOI 10.1016/j.neuron.2007.07.008.

11. Woolf C.J., Ma Q. Nociceptors-pain stimuli detectors. *Neuron.* 2007, vol. 55, pp. 353-364. DOI 10.1016/j.neuron.2007.07.016.

12. Slominski A. Neuroendocrine activity of the melanocyte. *Exp. Dermatol.* 2009, vol. 18, No. 9, pp. 760-763.

13. Slominski A.T., Zmijewski M.A., Skobowiat C., Zbytek B., Slominski R.M., Stetee J.D. Sensing the environment: regulation of local and global homeostasis by the skin's neuroendocrine system. *Adv. Anat. Embryol. Cell. Biol.* 2012, vol. 212, pp. 1-115.

14. Kichigina T.N., Grushin V.N., Belikova I.S., Myadelets O.D. Melanotsity: stroenie, funktsii, metody vyavleniya, rol' v kozhnoi patologii [Melanocytes: structure, functions, methods of detection, role in skin pathology]. *Vestn. VGMU.* 2007, vol. 6, No. 4, pp. 1-16.

15. Jang Y.H., Lee J.Y., Kang H.Y., Lee E.S., Kim Y.C. Oestrogen and progesterone receptor expression in melasma: an immunohistochemical analysis. *J. Eur. Acad. Dermatol. Venereol. Forthcoming.* 2010, vol. 24 (11), pp. 1312-1316. DOI 10.1111/j.1468-3083.2010.03638.x.

16. Karagas M.R., Zens M.S., Stukel T.A., Swerdlow A.J., Rosso S., Osterlind A. Pregnancy history and incidence in melanoma in women: a pooled analysis. *Cancer Causes Control.* 2006, vol. 17, pp. 11-19.

17. De Giorgi V., Mavilia C., Massi D., Gozzini A., Aragona P., Tanini A., Sestini S., Paglierani M., Boddi V., Brandi M.L., Lotti T. Estrogen receptor expression in cutaneous melanoma: a real-time reverse transcriptase-polymerase chain reaction and immunohistochemical study. *Arch. Dermatol.* 2009, vol. 145 (1), pp. 30-36. DOI 10.1001/archdermatol.2008.537.

18. Mogil J.S., Ritchie J., Smith S.B., Strasburg K., Kaplan L., Wallace M.R., Romberg R.R., Bijl H., Sarton E.Y., Fillingim R.B., Dahan A. Melanocortin-1 receptor gene variants affect pain and mu-opioid analgesia in mice and humans. *J. Med. Genet.* 2005, vol. 42 (7), pp. 583-587. PMID 15994880. PMID PMC1736101. DOI 10.1136/jmg.2004.027698.

19. Allen L., McCarron K.E. Estrogen increases nociception-induced brain derived neurotrophic gene expression factor in the female rat. *Neuroendocrinology.* 2005, vol. 81, pp. 193-199.

20. Liu B., Eisenach J.C., Tong S. Chronic estrogen sensitizes a subset of mechanosensitive afferents of the innervating cervix. *J. Neurophysiol.* 2005, vol. 93, pp. 2167-2173.

21. Evrard N.S. Synthesis of Estrogen in the dorsal horn: a new central mechanism of hormonal regulation of pain. *Am. J. Physiol. Regul. Integr. Comp. Physiol.* 2006, vol. 291, pp. R291-R299. DOI 10.1152/ajpregu.00930.2005.

22. Ren K., Wei F., Dubner R., Murphy A., Hoffman G.E. Progesterone weakens persistent inflammatory hyperalgesia in female rats: involvement of the spinal NMDA receptor mechanisms. *Brain Res.* 2000, vol. 865 (2), pp. 272-277.

23. Coronel M.F., Labombarda F., De Nicola A.F., Gonzalez S.L. Progesterone reduces the expression of spinal cyclooxygenase-2 and inducible nitric oxide synthase and prevents allodynia in a rat model of central neuropathic pain. *Eur. J. Pain.* 2014, vol. 18 (3), pp. 348-359. DOI 10.1002/j.1532-2149.2013.00376.x.

24. Xu Xia, Veenstra T.D. The concentration of endogenous estrogens and estrogen metabolites in the lines of human tumor cells NCI-60. *Genome Med.* 2012, vol. 4 (4). DOI 10.1186/gm330. PMID PMC3446259.

25. Morvillo V., Luthy I.A., Bravo A.I., Capurro M.I., Portels P., Calander R.S., Mordoh J. Androgen receptors in the human melanoma cell lines IIB-MEL-LES and IIB-MEL-IAN and human melanoma metastases. *Melanoma Res.* 2002, vol. 12 (6), pp. 529-538.

26. Allil P.A., Visconti M.A., Castrucci A.M., Isoldi M.C. The photoperiod and testosterone modulate the growth and melanogenesis of s91 murine melanoma. *Med. Chem.* 2008, vol. 4 (2), pp. 100-105.

27. Bandovkina V.A., Frantsiyants E.M., Pogorelo-va Yu.A., Cheryarina N.D. Osobennosti steroidogeneza pri eksperimental'noi melanome V16 [Features of steroidogenesis in experimental melanoma B16]. *Molekulyarnaya meditsina.* 2015, No. 5, pp. 47-51.

Поступила в редакцию / Received

12 декабря 2017 г. / December 12, 2017

УДК 572+612.766.1-053.5<<1980-2012>>

DOI 10.23683/0321-3005-2018-2-117-122

ДИНАМИКА ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ГОРОДСКИХ ШКОЛЬНИКОВ БЕЛАРУСИ (С КОНЦА 1980-х ДО 2010–2012 гг.)

© 2018 г. В.А. Мельник¹, С.Н. Мельник¹

¹Гомельский государственный медицинский университет, Гомель, Республика Беларусь

THE DYNAMICS OF FUNCTIONAL PARAMETERS OF CITY SCHOOL CHILDREN OF BELARUS (FROM THE END OF THE 1980s TILL 2010–2012)

V.A. Melnik¹, S.N. Melnik¹

¹Gomel State Medical University, Gomel, Republic of Belarus

Мельник Виктор Александрович – кандидат биологических наук, доцент, кафедра нормальной физиологии, декан факультета по подготовке специалистов для зарубежных стран, Гомельский государственный медицинский университет, ул. Ланге, 5, г. Гомель, 246050, Республика Беларусь, e-mail: melnik76@tut.by

Viktor A. Melnik - Candidate of Biological Sciences, Associate Professor, Department of Normal Physiology, Dean of the Faculty of General Medicine for Overseas Students, Gomel State Medical University, Lange St., 5, Gomel, 246050, Republic of Belarus, e-mail: melnik76@tut.by

Мельник Светлана Николаевна – кандидат биологических наук, доцент, кафедра нормальной физиологии, Гомельский государственный медицинский университет, ул. Ланге, 5, г. Гомель, 246050, Республика Беларусь, e-mail: melnik76@tut.by

Svetlana N. Melnik - Candidate of Biological Sciences, Associate Professor, Department of Normal Physiology, Gomel State Medical University, Lange St., 5, Gomel, 246050, Republic of Belarus, e-mail: melnik76@tut.by

Представлены результаты сравнительного анализа функциональных показателей кардиореспираторной системы городских школьников с 1989 по 2012 г. Для оценки функционального состояния организма школьников в 2010–2012 гг. проведено обследование 1452 мальчиков и 1653 девочек города Гомеля. У исследуемых измерялись следующие показатели: сила мышц кистей рук и мышц-разгибателей спины, уровень систолического и диастолического артериального давления, жизненная емкость легких. Для оценки динамики изучаемых показателей использовались данные, полученные в конце 80-х – начале 90-х гг. XX столетия при обследовании городских детей и подростков. Установлено, что обследованные в 2010–2012 гг. школьники характеризуются снижением силовых возможностей скелетной мускулатуры, показателей респираторной системы при более высоких значениях уровней систолического и диастолического артериального давления по сравнению с ровесниками, обследованными в 1989–1994 гг.

Ключевые слова: динамика, функциональные показатели, школьники.

The article presents the results of the comparative analysis of the data of the functional parameters of cardiorespiratory system of city school children during the period from 1989 till 2012. For the assessment of the functional state of the school children's organism over 2010-2012 we performed the examination of 1452 boys and 1653 girls of the city of Gomel. The following parameters of the examined children were measured: strength of hand muscles and extensor muscles of the back, levels of systolic and diastolic arterial blood pressure, vital capacity of lungs. To assess the dynamics of the studied parameters over time we used the data obtained at the end of 1980s and the beginning of 1990s during the examination of city school children and adolescents. It has been found that the school children examined over 2010-2012 were characterized by the decreased strength capacities of the skeletal muscular system, parameters of the respiratory system in higher values of the levels of systolic and diastolic arterial blood pressure in comparison with the peers examined over 1989-1994.

Keywords: dynamics, functional parameters, school children.

Введение

Мониторинг функциональных показателей физического развития (ФР) на восходящем этапе онтогенеза является одной из основных задач ауксологии и возрастной физиологии. Расширение научных представлений о формировании растущего организ-

ма в меняющихся природных и социальных условиях жизни имеет большое значение для разработки теории адаптации с онтогенетических позиций [1]. При этом ФР является одним из важнейших показателей, отражающих состояние здоровья детского населения.

Одной из наиболее важных особенностей возрастной динамики функциональных показателей ФР детей и подростков является неравномерность изменений скорости ростовых процессов [2, 3]. Изучению динамики этих показателей у школьников посвящено немало исследований во многих странах мира [4–6]. При этом анализ литературы по данной проблеме указывает на то, что в различных странах в зависимости от экологической и социально-экономической обстановки имеют место разнонаправленные процессы изменения морфофункциональных показателей школьников [5–8].

Оценка функциональных показателей развития ребенка – важный критерий состояния его здоровья. Отклонение этих показателей от нормы часто является первым важным признаком как нарушения функционального состояния организма ребенка, так и уже имеющегося у него заболевания. Данные о функционировании органов и систем используют в качестве критериев ФР.

Важнейшими характеристиками функционального состояния организма ребенка являются показатели мышечной, сердечно-сосудистой и дыхательной систем.

Необходимость постоянного наблюдения за морфофункциональным статусом подрастающего поколения в различных регионах трудно переоценить. Многие исследователи рекомендуют уточнять региональные стандарты ФР через каждые 5–10 лет, так как со временем они изменяются.

Цель исследования – изучить изменения во времени функциональных показателей ФР городских школьников Беларуси с 1989 по 2010–2012 гг.

Материал и методика исследований

Для изучения изменений во времени функционального статуса городских школьников проведен сравнительный анализ данных, полученных в конце 80-х – начале 90-х гг. XX столетия при обследовании детей и подростков г. Витебска (1-я группа: 1432 мальчика и 1386 девочек) [7, 9], с материалами собственных исследований, полученных в 2010–2012 гг. при обследовании школьников г. Гомеля (2-я группа: 1452 мальчика и 1653 девочки).

Для оценки функционального состояния организма школьников стандартными методами измерялись сила мышц кистей рук и мышц-разгибателей спины, уровень систолического и диастолического артериального давления (САД и ДАД), жизненная емкость легких (ЖЕЛ). Все исследования проводились с письменного согласия родителей, разрешения

Управления здравоохранения Гомельского областного исполнительного комитета, а также на основании заключенных договоров о сотрудничестве между УО «Гомельский государственный медицинский университет» и средними образовательными школами г. Гомеля.

Статистическая обработка осуществлялась с использованием пакета прикладных статистических программ STATISTICA 7.0. Полученные результаты представлены в виде средних арифметических величин (M) и стандартного отклонения (SD). Результаты анализа считались статистически значимыми при $p < 0,05$ [10].

Результаты исследований и их обсуждение

Динамика показателей кистевой и становой динамометрии городских школьников 7–16 лет. У обследуемых мальчиков г. Гомеля в возрастном интервале от 7 до 16 лет сила мышц кисти правой руки увеличилась от $10,33 \pm 2,35$ кг у 7-летних до $38,02 \pm 6,84$ у 16-летних. У исследуемых девочек данный показатель в изучаемом возрастном диапазоне изменялся от $9,09 \pm 2,40$ до $25,53 \pm 4,87$ кг соответственно (табл. 1). Во всех возрастных группах сила мышц кисти правой руки статистически значимо больше у гомельских мальчиков по сравнению с девочками-сверстницами ($p < 0,05–0,001$).

Сила мышц кисти левой руки у гомельских мальчиков в возрастном интервале от 7 до 16 лет увеличилась от $8,93 \pm 1,86$ кг у 7-летних до $33,89 \pm 7,16$ кг у 16-летних, у исследуемых девочек – от $8,12 \pm 2,16$ до $22,23 \pm 4,62$ кг соответственно. Во всех возрастных группах сила мышц кисти левой руки значимо больше у гомельских мальчиков по сравнению с девочками-ровесницами ($p < 0,05–0,001$). При этом с возрастом значимость различий между изучаемыми показателями мальчиков и девочек-одногодок увеличилась.

Средние значения показателей становой силы мальчиков и девочек, обследованных в г. Гомеле в 2010–2012 гг., в исследуемом возрастном диапазоне возросли от $32,71 \pm 9,84$ кг у мальчиков 7 лет до $112,99 \pm 29,16$ у 16-летних; у девочек соответственно от $25,91 \pm 10,25$ до $54,51 \pm 18,03$ кг. Во всех возрастных группах изучаемый показатель значимо больше у гомельских мальчиков по сравнению с девочками-ровесницами ($p < 0,05–0,001$).

С целью изучения динамики силовых возможностей городских учащихся 7–16 лет были сопоставлены данные, полученные Г.Ф. Беренштейном с соавт. в 1989–1990 гг. (1-я группа) [9], с материалами собственных исследований в 2010–2012 гг. (2-я группа).

Таблица 1

Статистические параметры показателей кистевой динамометрии, кг, у городских школьников 7–16 лет, обследованных в 1989–1990 и 2010–2012 гг. / The statistic indices of parameters of hand dynamometry, kg in city school children aged 7-16 examined in 1989-1990 and 2010-2012

Возраст, лет	Сила мышц кисти правой руки				Сила мышц кисти левой руки			
	Витебск (1989–1990)		Гомель (2010–2012)		Витебск (1989–1990)		Гомель (2010–2012)	
	М	±SD	М	±SD	М	±SD	М	±SD
Мальчики								
7	13,60	3,10	10,33	2,35	11,30	3,20	8,93	1,86
8	13,80	3,20	12,68	2,56	12,20	2,10	11,08	2,50
9	15,90	3,00	13,44	2,84	14,30	4,00	12,23	2,26
10	22,50	7,30	14,75	3,94	20,30	7,60	13,92	3,52
11	24,10	6,30	17,76	4,00	23,10	5,30	15,91	3,39
12	28,60	5,00	18,98	4,52	28,10	4,20	16,87	4,15
13	34,00	6,10	23,10	6,02	31,00	5,30	20,53	5,25
14	39,70	7,60	27,17	6,93	36,90	7,50	24,08	6,90
15	48,30	6,70	32,86	7,59	44,30	5,50	29,89	6,83
16	53,30	5,50	38,02	6,84	49,30	9,30	33,89	7,16
Девочки								
7	10,70	3,20	9,09	2,40	9,70	2,50	8,12	2,16
8	11,30	3,20	10,13	2,52	10,50	3,30	8,47	2,05
9	12,50	3,30	12,41	3,03	11,60	2,90	10,24	2,71
10	14,60	4,60	13,13	2,72	12,80	3,30	11,40	2,76
11	18,30	3,40	15,01	4,11	16,50	3,10	13,68	3,74
12	20,50	4,80	17,53	4,92	20,10	4,80	15,07	4,22
13	24,40	4,20	20,59	4,12	22,20	4,60	18,21	4,13
14	27,80	4,90	22,06	5,18	24,30	5,30	19,23	4,65
15	31,20	4,40	24,25	4,53	28,00	4,30	21,09	4,07
16	32,50	4,30	25,53	4,87	31,60	4,30	22,23	4,62

В результате проведенного сравнительного анализа установлено, что городские мальчики и девочки 2-й группы в возрастном интервале от 7 до 16 лет (практически во всех возрастных группах) статистически значимо ($p < 0,05 - 0,001$) отличались более низкими показателями силы мышц кисти левой и правой рук, а также показателями становой силы от ровесников первой группы. При этом значимость различий увеличивалась от 7 к 16 годам (табл. 1).

Динамика показателей САД и ДАД у городских школьников 7–17 лет. У обследуемых мальчиков г. Гомеля в возрастном интервале от 7 до 17 лет уровень САД повышался от $101,81 \pm 11,06$ мм рт. ст. у 7-летних до $120,51 \pm 9,75$ у 17-летних. У исследуемых девочек данный показатель в изучаемом возрастном диапазоне изменялся от $102,62 \pm 11,03$ мм рт. ст. до $113,29 \pm 8,85$.

Уровень ДАД у гомельских мальчиков в возрастном интервале от 7 до 17 лет увеличился от $62,46 \pm 10,10$ у 7-летних до $74,69 \pm 7,80$ мм рт. ст. у 17-летних; у исследуемых девочек – от $62,92 \pm 9,31$ до $70,05 \pm 7,56$ мм рт. ст. соответственно.

С целью изучения динамики уровней САД и ДАД у городских школьников 7–17 лет были сопоставлены данные, полученные Г.Ф. Беренштейном с соавторами в 1992–1994 гг. (1-я группа) [7], с данными наших исследований (2010–2012 гг. (2-я группа)).

В результате проведенного сравнительного анализа установлено, что городские мальчики и девочки второй группы в возрастном интервале от 7 до 17 лет имели более высокие значения уровня САД и ДАД (табл. 2). Статистически значимые различия ($p < 0,05 - 0,001$) выявились между показателями САД мальчиков 1-й и 2-й групп в возрасте 7–12 и 14 лет, а между показателями ДАД – 7–14 и 17 лет ($p < 0,05 - 0,001$).

Уровень САД у городских девочек, обследованных в начале XXI в., был статистически значимо выше в 7 и 9–14 лет, ДАД – с 7 до 11 лет, в 13, 14 и 17 лет ($p < 0,05–0,001$). Увеличение уровня АД у го-

родских мальчиков и девочек 2-й группы, возможно, является компенсаторной реакцией организма на увеличение длины тела у учащихся, обследованных в 2010–2012 гг. [3], по сравнению с данными, полученными 20 лет назад.

Таблица 2

Статистические параметры уровня САД и ДАД, мм рт.ст., у городских школьников 7–17 лет, обследованных в 1992–1994 и 2010–2012 гг. / The statistic indices of parameters of the levels of systolic and diastolic arterial pressure, mm of mercury, in city school children aged 7-17 examined in 1992-1994 and 2010-2012

Возраст, лет	Уровень САД				Уровень ДАД			
	Витебск (1992–1994)		Гомель (2010–2012)		Витебск (1992–1994)		Гомель (2010–2012)	
	М	±SD	М	±SD	М	±SD	М	±SD
Мальчики								
7	97,20	9,50	101,81	11,06	53,60	7,80	62,46	10,10
8	101,80	8,30	105,61	10,49	59,60	7,40	66,74	10,41
9	101,00	6,40	106,08	9,11	58,20	6,40	64,53	7,79
10	101,90	7,00	106,47	8,13	58,80	5,20	65,56	7,22
11	105,80	6,40	108,31	8,84	63,40	7,30	66,06	8,17
12	102,80	7,90	108,44	10,77	61,10	8,80	65,39	7,49
13	108,60	7,60	110,46	9,41	63,10	6,70	66,21	8,58
14	111,10	8,00	114,34	9,57	65,20	7,20	68,39	8,05
15	114,10	9,10	115,64	8,22	69,70	7,30	70,24	7,58
16	116,40	11,10	117,35	10,36	71,00	7,40	71,13	8,02
17	117,80	10,80	120,51	9,75	71,50	8,30	74,69	7,80
Девочки								
7	96,70	7,70	102,62	11,03	53,60	9,60	62,92	9,31
8	100,00	8,80	101,58	8,58	57,80	7,60	62,13	7,19
9	99,60	6,60	103,26	8,64	56,50	5,70	64,36	7,50
10	100,80	6,80	107,44	7,96	57,80	5,10	65,13	8,39
11	103,20	7,00	108,77	10,55	62,00	8,00	65,94	8,03
12	104,20	10,00	108,08	9,58	63,80	8,00	65,16	7,60
13	107,20	9,80	110,38	9,84	61,60	7,80	67,76	8,06
14	107,90	7,30	112,33	9,27	63,90	7,30	67,98	7,75
15	111,10	7,30	112,37	8,66	67,40	5,50	67,85	7,12
16	112,50	8,20	112,51	10,46	68,50	5,50	67,82	7,45
17	111,90	8,30	113,29	8,85	67,90	5,20	70,05	7,56

Динамика показателей ЖЕЛ у городских школьников 7–16 лет. Средние величины ЖЕЛ у гомельских мальчиков в возрастном интервале от 7 до 16 лет увеличилась от $1,49 \pm 0,22$ л у 7-летних до $3,79 \pm 0,59$ у 16-летних; у девочек – от $1,42 \pm 0,25$ до $2,88 \pm 0,43$ л соответственно. В возрастных группах 14-, 15- и 16-летних школьников показатели ЖЕЛ у гомельских мальчиков статистически значимо выше по сравнению с девочками-ровесницами ($p < 0,05–0,001$).

С целью изучения динамики показателей ЖЕЛ у городских учащихся 7–16 лет были сопоставлены данные, полученные Г.Ф. Беренштейном с соавторами в 1989–1990 гг. (1-я группа) [9], с данными наших исследований, полученными в 2010–2012 гг. (2-я группа).

В результате проведенного сравнительного анализа установлено, что городские мальчики и девочки 2-й группы в возрастном интервале от 7 до 16 лет (практически во всех группах исследуемых) имели статистически значимо ($p < 0,05–0,001$) более низкие

показатели ЖЕЛ, чем исследуемые 1-й группы. Значимость различий между сравниваемыми показателями учащихся двух групп увеличивалась от 7 к 16 годам (табл. 3).

Таблица 3

Статистические параметры показателей ЖЕЛ, л, у городских школьников 7–16 лет, обследованных в 1989–1990 и 2010–2012 гг. / The statistic indices of parameters of the vital capacity, l, in city school children aged 7-16 examined in 1989-1990 and 2010-2012

Возраст, лет	ЖЕЛ			
	Витебск (1989–1990)		Гомель (2010–2012)	
	М	±SD	М	±SD
Мальчики				
7	1,65	0,21	1,49	0,22
8	1,83	0,19	1,70	0,22
9	2,18	0,32	1,72	0,28
10	2,14	0,15	1,94	0,29
11	2,24	0,48	2,16	0,39
12	2,70	0,41	2,31	0,38
13	2,98	0,46	2,67	0,55
14	3,55	0,65	3,02	0,65
15	4,10	0,60	3,39	0,51
16	4,65	0,46	3,79	0,59
Девочки				
7	1,57	0,18	1,42	0,25
8	1,64	0,19	1,48	0,23
9	1,80	0,31	1,76	0,27
10	1,85	0,26	1,84	0,26
11	2,16	0,31	2,03	0,34
12	2,32	0,36	2,14	0,41
13	2,70	0,36	2,47	0,39
14	2,92	0,49	2,60	0,42
15	3,07	0,36	2,69	0,45
16	3,17	0,36	2,88	0,43

Заключение

Таким образом, сравнительный анализ полученных данных позволил установить, что обследованные в 2010–2012 гг. городские школьники Беларуси характеризуются снижением силовых возможностей скелетной мускулатуры, показателей респираторной системы при более высоких значениях уровней САД и ДАД по сравнению с ровесниками конца 80-х – начала 90-х гг. XX столетия ($p < 0,05–0,001$). Повышение уровня артериального давления у современных городских школьников, возможно, является компенсаторной реакцией организма на увеличение длины и массы тела [3].

В результате разработаны, изданы и внедрены в учебный процесс и практическое здравоохранение Беларуси таблицы оценки морфофункциональных показателей физического развития городских школьников [7].

Литература

1. Антонова А.А., Ченцова С.Н., Сердюков В.Г. Сравнительная характеристика физического развития детей // Астраханский мед. журн. 2012. Т. 7, № 4. С. 26–29.
2. Кучма В.Р., Скоблина Н.А., Милушкина О.Ю., Бокарева Н.А. Сравнительный ретроспективный анализ физического и биологического развития школьников Москвы // Гигиена и санитария. 2012. № 4. С. 47–52.
3. Мельник В.А. Морфофункциональные показатели физического развития школьников в перипубертатный период. Гомель : ГомГМУ, 2014. 248 с.
4. Платонова А.Г. Изменения в физическом развитии киевских школьников за десятилетний период (1996–2008 гг.) // Гигиена и санитария. 2012. № 2. С. 69–73.
5. Kim J.Y. Anthropometric Changes in Children and Adolescents from 1965 to 2005 in Korea // Am. J. Phys. Anthropol. 2008. Vol. 136. P. 230–236.
6. Marques-Vida P. Secular trends in height and weight among children and adolescents of the Seychelles, 1956–2006 // BMC Publ. Health. 2008. Vol. 8. P. 166.
7. Беренштейн Г.Ф. Показатели артериального давления у городских школьников Витебской области // Здравоохранение Беларуси. 1995. № 7. С. 25–28.
8. Кучма В.Р., Скоблина Н.А., Милушкина О.Ю., Бокарева Н.А., Ямпольская Ю.А. Характеристика морфофункциональных показателей московских школьников 8–15 лет (по результатам лонгитудинальных исследований) // Вестн. МГУ. Сер. 23: Антропология. 2012. № 1. С. 76–83.
9. Беренштейн Г.Ф., Полевой Д.А., Нурбаева М.Н., Карноушенко Т.П. Физическое развитие школьников Витебска за последние 15 лет // Здравоохранение Белоруссии. 1991. № 12. С. 33–37.
10. Гланц С. Медико-биологическая статистика. М.: Практика, 1999. 459 с.

References

1. Antonova A.A., Chentsova S.N., Serdyukov V.G. Sravnitel'naya kharakteristika fizicheskogo razvitiya detei [The comparative description of physical development of children]. *Astrakhanskii meditsinskii zhurnal*. 2012, vol. 7, No. 4, pp. 26-29.
2. Kuchma V.R., Skoblina N.A., Milushkina O.Yu., Bokareva N.A. Sravnitel'nyi retrospektivnyi analiz fizicheskogo i biologicheskogo razvitiya shkol'nikov Moskvy [The comparative retrospective analysis of physical and bi-

ological development of school children of Moscow]. *Gigiena i sanitariya*. 2012, No. 4, pp. 47-52.

3. Mel'nik V.A. *Morfofunktsional'nye pokazateli fizicheskogo razvitiya shkol'nikov v peripubertatnyi period* [The morphofunctional parameters of physical development of school children at peripuberty]. Gomel: GomGMU, 2014, 248 p.

4. Platonova A.G. *Izmeneniya v fizicheskom razviti kievskikh shkol'nikov za desyatiletanii period (1996–2008 gg.)* [Changes in physical development of Kiev school children over a period of ten years (1996-2008)]. *Gigiena i sanitariya*. 2012, No. 2, pp. 69-73.

5. Kim J.Y. Anthropometric Changes in Children and Adolescents from 1965 to 2005 in Korea. *Am. J. Phys. Anthropol.* 2008, vol. 136, pp. 230-236.

6. Marques-Vida P. Secular trends in height and weight among children and adolescents of the Seychelles, 1956-2006. *BMC Publ. Health*. 2008, vol. 8, p. 166.

7. Berenshtein G.F. *Pokazateli arterial'nogo davleniya u gorodskikh shkol'nikov Vitebskoi oblasti*

[Parameters of arterial pressure in city school children of Vitebsk region]. *Zdravookhranenie Belarusi*. 1995, No. 7, pp. 25-28.

8. Kuchma V.R., Skoblina N.A., Milushkina O.Yu., Bokareva N.A., Yampol'skaya Yu.A. *Kharakteristika morfofunktsional'nykh pokazatelei moskovskikh shkol'nikov 8–15 let (po rezul'tatam longitudinal'nykh issledovaniy)* [The description of morphofunctional parameters of Moscow school children aged 8-15 (according to the results of longitudinal studies)]. *Vestnik Moskovskogo Universiteta. Seriya 23: Antropologiya*. 2012, No. 1, pp 76-83.

9. Berenshtein G.F., Polevoi D.A., Nurbaeva M.N., Karnoushenko T.P. *Fizicheskoe razvitie shkol'nikov Vitebska za poslednie 15 let* [Physical development of school children of Vitebsk over the past 15 years]. *Zdravookhranenie Belorussii*. 1991, No. 12, pp. 33-37.

10. Glants S. *Mediko-biologicheskaya statistika* [Medical and biological statistics]. Moscow: Praktika, 1999, 459 p.

Поступила в редакцию / Received

2 марта 2018 г. / March, 2, 2018

НАУЧНАЯ ЖИЗНЬ

SCIENTIFIC LIFE

DOI 10.23683/0321-3005-2018-2-123-124

VII ДОНСКОЙ ЭКОЛОГИЧЕСКИЙ ФЕСТИВАЛЬ «ВОСПЕТАЯ СТЕПЬ» (20–23 апреля 2018 г.)

7th DON ECOLOGICAL FESTIVAL "SUNG STEPPE" (April 20-23, 2018)

В седьмой раз в Манычских степях проводится экологический фестиваль «Воспетая степь». Он приурочен к приходу на Дон весны, когда поля покрываются яркой зеленью посевов пшеницы, а нераспаханная степь – коврами с обилием ярких рисунков весенних цветов. Природа пробуждается после зимнего ненастья. Растения и животные за короткий благоприятный период спешат размножиться, оставить потомство, подготовить его к суровым условиям холодного периода и продолжить существование своих видов. Ждут весну, радостно её встречают и люди. Фестиваль открывает для основной массы школьников, студентов, исследователей и экологов Манычский природный комплекс, включающий заповедник «Ростовский», объекты Ассоциации «Живая природа степи» (далее Ассоциация) и Научно-экспедиционный стационар ЮНЦ РАН «Маныч». В теплый период его посещают многие тысячи людей для отдыха, участия в различных экологических акциях, исследований природы естественной степи с солеными водоемами.

С весной связаны практически все (за исключением II, приуроченного к осенним перелетам журавлей и др. птиц) фестивали «Воспетая степь», проходящие в Орловском р-не Ростовской области (РО), в окрестности оз. Маныч-Гудило. Первые 3 областных фестиваля (18–19.04, 10–11.10.13, и 19–20.09.14) были организованы Ассоциацией на территории полевого стационара и Центра редких животных европейских степей (далее Центр) Ассоциации в буферной зоне заповедника «Ростовский», который также принимал в них активное участие. С IV фестиваля его организаторами стали министерство природных ресурсов и экологии РО (минприроды РО), Ассоци-

ация, заповедник «Ростовский», администрация Орловского р-на и департамент по предупреждению и ликвидации чрезвычайных ситуаций РО (МЧС).

С годами организация и технология проведения фестиваля совершенствовались, увеличивалась его популярность, возрастало количество принимающих в нем участие организаций. Если на I фестиваль подали заявки около 300 чел., II – 500, III – 630, то на IV – уже 3500, V – 7 тыс., VI – более 7 тыс. Правительство РФ объявило 2017 г. Годом экологии и ООПТ. VI фестиваль «Воспетая степь» вошел в состав основных мероприятий федерального и областного планов по проведению данного года. Степи с естественной растительностью, помимо зарегистрированных участников фестивалей, ежегодно посещают многочисленные официально незарегистрированные экологов; время их пребывания здесь значительно увеличивается. Уже в дни проведения II фестиваля, помимо его участников, объекты Ассоциации и охранную зону заповедника посетили около 4 тыс. чел. Для снижения и более равномерного распределения нагрузки на степную растительность от пребывания большого количества участников период проведения VI фестиваля растянули со 2 по 29 апреля. Его посетили около 15 тыс. чел., из них на общую торжественную часть 29 апреля собрались свыше 7 тыс. зарегистрированных участников.

VII фестиваль, состоявшийся 20–23 апреля 2018 г., проходил при теплой солнечной погоде и совпал с массовым цветением тюльпанов, касатика. На центральной площадке 21.04.18 присутствовали более 7 тыс. участников, более 3 тыс. чел. отдыхали в степи самостоятельно. Доминировали школьники, студенты, молодежные творческие коллективы и экологов, приехали представители различных организаций из многих районов РО, из Калмыкии,

Москвы, Санкт-Петербурга и иных регионов России. Фестиваль посетили министры минприроды и транспорта РО и другие известные люди, главы районов, представители Центрального (В. Богма, И. Лапина, Ю. Лапин и др.), Ростовского («Дон-ТР») и Орловского телевидения, ООО «Газпром межрегионгаз Ростов-на-Дону», турфирм. Дороги покрылись сотнями автобусов и легковых автомобилей, безопасностью движения которых занимались сотрудники полиции. За порядком следили работники заповедника и Ассоциации, казаки, за состоянием здоровья – медицинские работники. В размещении, организации сцены, многочисленных палаток, красочной арки, баннеров, стоянок автотранспорта помогали сотрудники МЧС РО.

Участников и гостей фестиваля приветствовали член профильного комитета Совета Федерации Федерального собрания РФ Татьяна Гигель и министр минприроды РО Михаил Фишкин. Из выступления Т. Гигель: «Ростовская область занимает лидирующие позиции в России по экологическому образованию. Поэтому я специально приехала сюда увидеть все своими глазами. Хочу выразить благодарность руководству региона за огромную, потрясающую работу, которую вы проводите». В рамках фестиваля были организованы выступления творческих коллективов, экологические флешмобы. Посетителям представили свыше 200 мастер-классов, выставок, викторин, проектов экологической и творческой направленности. Свои экспозиции имели минприроды РО, Ассоциация, заповедник «Ростовский», вузы и академические структуры (ЮФУ, ДГТУ, ЮНЦ РАН), МЧС, музеи (Ростовский краеведческий, Музей-заповедник М.А. Шолохова, др.), Ростовская АЭС, 25 муниципальных образований РО с различными культурно-творческими направлениями дополнительного экологического образования, ряд других государственных и общественных организаций и иных структур. Фестиваль был направлен на познание богатств природы Дона, методов её изучения, разумного использования и охраны, экологизацию всех видов нашей деятельности и отдых населения в естественных условиях весенней степи. Организаторы содействовали развитию у участников, в первую очередь у молодежи, не пассивного туризма, а активного, познавательного.

Фестиваль предполагает не только знакомство с природой, но и обучение правилам правильного поведения в ней.

Участники фестиваля в районе соленых озер Лопуховатое, Круглое, Грузское и Маныч-Гудило познакомились с зелеными коврами молодого разнотравья с разбросанными на них яркими пятнами красных, желтых и белых цветов тюльпанов Шренка, Биберштейна и двуцветкового, фиолетовых и светло-желтых ирисов, желтого одуванчика и других весенних растений. В населенных пунктах, лесополосах посетители увидели огромные сверкающие белым снегом букеты цветущего терна, абрикоса и дикой жерделы, алычи, вишни и т.д. Весенний воздух наполнился незабываемым запахом этих растений, голосами ласточек, стрижей, жаворонков и сусликов, на водоемах появились пеликаны, бакланы, гуси, утки, поганки, чайки, кулики и т.д. В сопровождении специалистов побывавшие на стационаре и в центре экотуристы запечатлели в фотоаппаратах и мобильных телефонах пасущиеся в степи группы двугорбого верблюда, ламы, лошади Пржевальского, буйвола, яка, антилопы канны, сайгака и других животных, летающих в воздухе и плавающих на прудах особой лебедя-шипуня, серого гуся, серой цапли, камышового луны, различных уток, чаек, крачек, куликов и других птиц.

Ряд участников фестиваля посетили Научно-экспедиционный стационар ЮНЦ РАН «Маныч» (НЭС), которому в 2018 г. исполнилось 10 лет. Под руководством председателя ЮНЦ РАН д.г.н. С.В. Бердникова они познакомились с деятельностью НЭС в районе оз. Маныч-Гудило, прослушали научные сообщения сотрудников по программе «Природно-ресурсный потенциал долины Маныча: опыт исследований ЮНЦ РАН». Многие экотуристы с помощью экскурсоводов познакомились с выставочным залом в визит-центре заповедника, где хорошо показаны природа и деятельность сотрудников заповедника.

Фестиваль «Воспетая степь» широко известен за пределами Дона. С каждым годом растут его популярность и качество. Он играет заметную роль в природоохранном воспитании и образовании населения, прежде всего молодежи, в развитии экологического туризма в степной зоне страны.

*В.А. Миноранский, доктор сельскохозяйственных наук, профессор,
Южный федеральный университет*

DOI 10.23683/0321-3005-2018-2-125-126

ВСЕРОССИЙСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ «БИОМЕХАНИКА-2018»

(Дивноморское, 28 мая – 1 июня 2018 г.)

ALL-RUSSIAN CONFERENCE «BIOMECHANICS-2018»

(Divnomorskoe, May 28 - June 1, 2018)

В поселке Дивноморское Краснодарского края на базе спортлагеря «Радуга» с 28 мая по 1 июня проходила XIII Всероссийская конференция «Биомеханика-2018», проведение которой было поддержано Российским фондом фундаментальных исследований и Российским национальным комитетом по теоретической и прикладной механике. Среди её организаторов – Южный федеральный университет, Донской государственной технической университет, Институт проблем механики РАН (Москва), Институт механики МГУ.

Впервые ростовской школе механики было доверено провести Всероссийскую конференцию по биомеханике, что весьма почётно и является свидетельством ошутимого вклада ростовских ученых в эту область знания. Анализ заявок на участие в этом значимом научном мероприятии показал, что с каждым годом интерес к проблемам биомеханики и моделирования в этой области механики растет, о чём свидетельствуют и география участников конференции, и тематика представленных работ.

В работе конференции приняли участие ученые Москвы, Санкт-Петербурга, Иваново, Перми, Ростова-на-Дону, Саратова, Екатеринбурга, Владивостока, Владикавказа, Нижнего Новгорода, Краснодар, Казани, Долгопрудного, Пущино, Кургана, Иркутска, Кемерово, зарубежные исследователи из Аахена, Глазго, Минска, Гомеля, Тайнана, Хайдабада.

Цель конференции состояла в консолидации усилий учёных-механиков, практикующих врачей, биологов, физиологов, инженеров в области технических приложений в биомеханике и специалистов в области математического моделирования, в обсуждении широкого спектра междисциплинарных вопросов, в интенсификации обмена информацией между специалистами различного профиля для решения актуальных проблем биомеханики, в привлечении молодых ученых к научной деятельности в области моделирования биомеханических систем.

Работа конференции проходила в рамках следующих научных направлений: биомеханика тканей, биомеханика сердечно-сосудистой системы, биомеханика опорно-двигательной системы и её медицинские приложения, биомеханика зубочелюстной системы, биомеханика глаза, биомеханика системы

слуха, механика локомоций, математическое моделирование живых систем, биомеханика роста, вычислительная механика и ее приложения в биомеханике. Отметим несколько направлений, вызвавших особый интерес у участников конференции, по которым представлено наибольшее число докладов.

Направление биомеханики сердечно-сосудистой системы было посвящено различным проблемам моделирования больших и малых кровеносных сосудов, сердца и желудочков, процессов кровообращения, исследованию течений крови при наличии и отсутствии патологий в сосудах.

В направлении биомеханики опорно-двигательной системы и ее медицинских приложений рассмотрены различные аспекты моделирования костной ткани и имплантатов, вопросы оптимизации хирургического воздействия при ортопедических операциях.

Направление биомеханики роста посвящено исследованию различных факторов, влияющих на рост тканей – костной, мышечной, проблемам биомеханики растений.

В направлении биомеханики тканей глаза обсуждались вопросы моделирования заболеваний тканей глаза, изучения изменения свойств при наличии различного типа патологий и в послеоперационный период, новые методы неинвазивной диагностики, в первую очередь моделирование тонометрирования.

Достаточно представительными были направления, посвященные математическому моделированию живых систем и вычислительной биомеханики. Исследовались различные проблемы численного моделирования тканей и органов, выявления закономерностей поведения сложных живых систем при различных условиях. На основе использования современных методов конечно-элементных технологий рассмотрен широкий спектр задач по проведению вычислительных экспериментов моделирования различных процессов, протекающих в биологических тканях, с учетом их сложной структуры, а также ряд обратных задач по определению свойств тканей.

Во многих докладах, представленных на конференции, отражены результаты научных исследований, проведенных в рамках выполнения проектов РФФИ.

Параллельно с конференцией проходила традиционная для ростовской школы механики очередная школа-семинар «Математическое моделирование и биомеханика в современном университете». На ней были представлены доклады опытных лекторов, посвященные различным аспектам моделирования в

области биомеханики мышечного сокращения, биомеханики глаза и вычислительных схем реализации обратных задач применительно к определению свойств тканей, а также доклады молодых участников, в том числе студентов старших курсов и аспирантов.

А.О. Ватульян, доктор физико-математических наук, профессор, Южный федеральный университет

М.И. Карякин, доктор физико-математических наук, доцент, Южный федеральный университет

А.Н. Соловьев, доктор физико-математических наук, профессор, Южный федеральный университет

DOI 10.23683/0321-3005-2018-2-126-126

VIII МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ «СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ И ПРОБЛЕМЫ ТЕОРИИ ОПЕРАТОРОВ И ГАРМОНИЧЕСКОГО АНАЛИЗА И ИХ ПРИЛОЖЕНИЯ VIII (ОТНА 2018)»

(Ростов-на-Дону, 22 – 27 апреля 2018 г.)

8th INTERNATIONAL CONFERENCE "MODERN METHODS, PROBLEMS AND APPLICATIONS OF OPERATOR THEORY AND HARMONIC ANALYSIS, 8 (OTNA 2018)»

(Rostov-on-Don, April 22-27, 2018)

С 22 по 27 апреля в Ростове-на-Дону, Россия, состоялась восьмая Международная конференция ОТНА 2018. Конференция проводилась на базе Южного федерального и Донского государственного технического университетов, была поддержана Российским фондом фундаментальных исследований и международным сообществом ISAAC (Международное сообщество анализа, его приложений и исчисления). Данное мероприятие – фактически первое в рамках реализации программы развития созданного на базе Южного федерального университета Регионального математического центра.

В конференции приняли участие более 120 ученых из различных вузов и институтов России и зарубежных организаций. В том числе математики из Армении, Грузии, Азербайджана, Турции, Ирана, Йемена, ОАЭ, Израиля, Греции, Португалии, Германии, Канады, США, Мексики, Колумбии, Литвы, Белоруссии, Польши, Узбекистана, Швеции. Ядро программы конференции было сформировано 28 пленарными лекциями ведущих экспертов в различных областях математики: вещественном и комплексном анализе, теории операторов, возникающих в гармоническом анализе, теории приближений, теории

обыкновенных дифференциальных уравнений и уравнений в частных производных.

Все эти области математики возникли и развиваются в связи с многочисленными приложениями в естественных и технических науках. В докладах конференции обсуждались модели из классической математической физики, нанотехнологии, квантовой механики, а также из других прикладных областей.

Уже стало традицией, что практически все пленарные лекции и основная часть секционных докладов проводятся на английском языке, что способствует участию большого количества зарубежных математиков. В рамках сотрудничества с сообществом ISAAC и в знак признания научных достижений был организован конкурсный отбор среди молодых ученых по награждению специальной премией – пожизненным членством в сообществе ISAAC. Такой награды была удостоена молодой математик Эльза Бахтигареева из Москвы. Премию вручал президент ISAAC профессор М. Рейссиг. Также по итогам конференции в рамках сотрудничества с издательством Шпрингер готовится специальный выпуск серии «Математика и Статистика».

А.Н. Карапетянц, доктор физико-математических наук, профессор, Южный федеральный университет

**НАУЧНО-ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЙ И ПРИКЛАДНОЙ 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», Ulrich, EBSCO, Chemical Abstracts.

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. После заголовка указать индекс УДК.
2. Текст должен быть набран в редакторе Microsoft Office Word 2000, 2003, 2007, 2010 через 1,5 интервала, шрифтом Times New Roman, размером 14 пт, страницы пронумерованы.
3. Сопроводительное или рекомендательное письмо, если статья представляется от организации. Экспертное заключение.
4. Полное название организации и ее адрес на русском и английском языках.
5. Сведения об авторах с указанием адреса, по которому будет вестись переписка, на русском и английском языках.
6. Название статьи и фамилии авторов на русском и английском языках.
7. Аннотация на русском и английском языках (1000–1500 знаков / 150–200 слов).
8. Ключевые слова на русском и английском языках (8–10 слов).

Журнал распространяется по подписке – через ОАО «Роспечать». 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