

ИЗВЕСТИЯ
ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

*Северо-Кавказский
регион*

ЕСТЕСТВЕННЫЕ

НАУКИ

2018

4

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 ВШЭ 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. Фаттал – доктор наук, профессор, Университет Нанта, Франция
Ю.А. Федоров – доктор геогр. наук, профессор, Южный федеральный университет, Россия
А.Д. Хованский – кандидат геол.-мин. наук, доктор геогр. наук, профессор, Южный федеральный университет, Россия
С.П. Чернышева – кандидат физ.-мат. наук, доцент Южный федеральный университет, Россия

Учредители:

Дагестанский государственный технический университет, Дагестанский государственный университет, Донской государственный технический университет, Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова, Кубанский государственный технологический университет, Кубанский государственный 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 17.12.2018. Формат 60×84 1/8. Бумага офсетная.
Шрифт Times. Усл. печ. л. 15,81. Уч.-изд. л. 16,27. Тираж 250 экз. Заказ № 6799

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. Karamurzov - 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. Saghatelian - 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

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 17.12.2018. Format 60×84 1/8. Offset paper. Font Times.
Conv. print. sheets 15,81. Publ. sign. 16,27. Edition 250 copies. Order number 6799.

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@sfnu.ru
Web Address: www.izvestiya.sfnu.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 10.23683/0321-3005-2018-4

Регистрационный номер 011019
Комитета Российской Федерации по печати
Научно-образовательный и прикладной журнал
Издаётся с 1973 г.
Периодичность серии 4 номера в год
№ 4 (200) 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. 4 (200) 2018.

ЕСТЕСТВЕННЫЕ НАУКИ

NATURAL SCIENCE

СОДЕРЖАНИЕ

CONTENTS

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ

PHYSICAL AND MATHEMATICAL SCIENCES

- Белявский Г.И., Кондратьева Т.Н.** Две модели нейронных сетей для одношагового прогноза нестационарных временных рядов..... 4
- Деундяк В.М., Кокшаров Д.И.** О свойствах подгрупп группы Гейзенберга над простым полем Галуа 12
- Казарников А.В., Ревина С.В.** Монотонная неустойчивость в системе Фитцхью – Нагумо с диффузией..... 18
- Карякин М.И., Обрезков Л.П.** Устойчивость нелинейно-упругого цилиндра с клиновой дисклинацией при радиальном обжатии 25
- Коробейник Ю.Ф.** О наследовании некоторых свойств аналитической функции её производной 32
- Рустанов А.Р.** C_{10} -многообразия точно постоянной голоморфной конгармонической кривизны 35
- Скалиух А.С., Герасименко Т.Е.** Моделирование сегнетоэластиков в двумерном случае..... 40
- Чебаков М.И., Данильченко С.А., Ляпин А.А.** Моделирование контактного взаимодействия железнодорожного колеса и тормозной колодки с учетом износа, тепловыделения от трения и зависимости механических параметров от температуры 49

- Belavsky G.I., Kondrateva T.N.** Two Models of Neural Networks for a One-Step Forecast of Nonstationary Time Series.....4
- Deundyak V.M., Koksharov D.I.** On Properties of Subgroups of the Heisenberg Group over a Prime Galois Field 12
- Kazarnikov A.V., Revina S.V.** Monotonous Instability in FitzHugh-Nagumo Reaction-Diffusion System 18
- Karyakin M.I., Obrezkov L.P.** Stability of a Nonlinear-Elastic Cylinder with Wedge Disclination Under Radial Compression.....25
- Korobeinik Yu.F.** On Inheritance of Some Properties of an Analytic Function by Its Derivative 32
- Rustanov A.R.** C_{10} -Manifolds of a Pointwise Constant Holomorphic Conharmonic Curvature 35
- Skaliukh A.S., Gerasimenko T.E.** Modeling of Ferroelastics in the Two-Dimensional Case 40
- Chebakov M.I., Danilchenko S.A., Lyapin A.A.** Modeling of the Contact Interaction of the Railway Wheel and Brake Pad Taking into Account Wear, Heat Separation from Friction and Dependence of Mechanical Parameters on the Temperature 49

НАУКИ О ЗЕМЛЕ

SCIENCE OF EARTH

- Авакова А.Г., Беспалова Л.А., Иошпа А.Р., Цыганкова А.Е.** Опасные погодные явления на побережье Азовского и Черного морей 54

- Avakova A.G., Beshpalova L.A., Ioshpa A.R., Tsygankova A.E.** Hazardous Weather Phenomena on the Azov and Black Sea Coasts 54

Васильева О.Е., Дмитриева А.А., Макеев И.В. Особенности развития внутреннего водного транспорта России на современном этапе	64	Vasilyeva O.E., Dmitrieva A.A., Makeev I.V. Features of Development of Inland Water Transport in Russia at the Present Stage	64
Дахова О.О., Хучунаев Б.М., Мустафаева З.А., Куповых Г.В., Даов И.С. Экологические проблемы Кабардино-Балкарской Республики.....	72	Dakhova O.O., Khuchunaev B.M., Mustafaeva Z.A., Kupovykh G.V., Daov I.S. Ecological Problems of Kabardino-Balkar Republic.....	72
Денисов В.И., Латун В.В. Потоки химических элементов в составе осаждающегося взвешенного вещества на шельфе Чёрного моря (по данным седиментационных ловушек)	77	Denisov V.I., Latun V.V. Flows of Chemical Elements in Suspended Matter Fluxes in the Shallow Area of the Black Sea Shelf (According to the Sediment Traps Data)	77
Кузнецова И.Д., Федоров Ю.А. Влияние солёности и водного стока на распространённость черноморско-азовской проходной сельди в Азовском море.....	86	Kuznecova I.D., Fedorov Yu.A. Influence of Salt and Water Stock on the Distribution of the Black Sea-Azov Passing Herring in the Azov Sea	86
Мехтиев Г.Д. Минералогический состав сероземных почв Нахичеванской Автономной Республики	92	Mehtiyev H.D. Mineralogical Structures of Serozem Soils in Nakhchivan Autonomic Republic	92
Федоров Ю.А., Гарькуша Д.Н., Трубник Р.Г., Талпа Б.В. Гидрохимия группы солёных озёр Ставропольского края	100	Fedorov Yu.A., Gar'kusha D.N., Trubnik R.G., Talpa B.V. The Hydrochemistry a Few Salt Lakes of the Stavropol Region.....	100
Хашукоева М.Н. Влияние экологической ситуации на здоровье населения (на примере Кабардино-Балкарской Республики)	107	Khashukoeva M.N. Influence of the Ecological Situation on the Health of the Population (Case Study of the Kabardino-Balkar Republic)	107
Хучунаев Б.М., Куповых Г.В., Ташилова А.А., Теунова Н.В., Хучунаев А.Б., Будаев А.Х. Исследование льдообразующих свойств нанотрубок оксида цинка	111	Khuchunaev B.M., Kupovykh G.V., Tashilova A.A., Teunova N.V., Khuchunaev A.B., Budaev A.Kh. Study of Ice-Forming Properties of Zinc Oxide Nanotubes	111

БИОЛОГИЧЕСКИЕ НАУКИ

Биттиров А.М., Хуламханова М.М., Мирзоева Н.М., Эльмурзаева Дж.А., Накова Л.В., Балаева С.М., Гринева Л.Г., Биттирова А.А., Бегиева С.А. Результаты санитарно-гигиенического мониторинга уровня загрязнения горных пастбищ Кабардино-Балкарии яйцами трематоды <i>Dicrocoelium lanceatum</i> (Stilles et Hassall, 1896).....	116	Bittirov A.M., Khulamkhanova M.M., Mirzoeva N.M., Elmurzaeva J.A., Nakova L.V., Balaeva S.M., Grineva L.G., Bittirova A.A., Begieva S.A. Results of Sanitary and Hygienic Monitoring of Level of Pollution of Mountain Pastures of Kabardino-Balkaria Eggs Trematoda <i>Dicrocoelium lanceatum</i> (Stilles et Hassall, 1896).....	116
Ситковская А.О., Златник Е.Ю., Новикова И.А., Колпак С.А., Колпакова Е.П., Потемкин Д.С., Васильченко Н.Г., Триандафилиди Е.И., Быкадорова О.В. Исследование возможности онколитических эффектов in vitro вирусов из семейств <i>Reoviridae</i> и <i>Paramyxoviridae</i>	124	Sitkovskaya A.O., Zlatnik E.Yu., Novikova I.A., Kolpakov S.A., Kolpakova E.P., Potemkin D.S., Vasilchenko N.G., Triandafilidi E.I., Bykadorova O.V. Study of the Possibility of Oncolytic Effects in Vitro of Viruses from the <i>Reoviridae</i> and <i>Paramyxoviridae</i> Families	124

НАУЧНАЯ ЖИЗНЬ

Миноранский В.А. Участие ассоциации «Живая природа степи» в Международной конференции «Биологическое разнообразие: изучение, сохранение, восстановление, рациональное использование» (Керчь, 19–23 сентября 2018 г.)	130	Minoranskiy V.A. Participation of the Association «Living Nature of the Steppe» in the International Conference “Biological Diversity: Study, Preservation, Restoration, Rational Use” (Kerch, September 19-23, 2018)	130
Указатель материалов, опубликованных в журнале «Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Естественные науки» в 2018 г.	133	Index of Articles Published in the Journal “Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Severo-Kavkazskii Region. Estestvennye Nauki” in 2018.....	133

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ PHYSICAL AND MATHEMATICAL SCIENCES

УДК 519.2

DOI 10.23683/0321-3005-2018-4-4-11

ДВЕ МОДЕЛИ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ ОДНОШАГОВОГО ПРОГНОЗА НЕСТАЦИОНАРНЫХ ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ*

© 2018 г. Г.И. Белявский¹, Т.Н. Кондратьева²

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

²Донской государственный технический университет, Ростов-на-Дону, Россия

TWO MODELS OF NEURAL NETWORKS FOR A ONE-STEP FORECAST OF NONSTATIONARY TIME SERIES

G.I. Belavsky¹, T.N. Kondrateva²

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

²Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russia

Белявский Григорий Исаакович – доктор технических наук, профессор, кафедра высшей математики и исследования операций, Институт математики, механики и компьютерных наук имени И.И. Воровича, Южный федеральный университет, ул. Мильчакова, 8а, г. Ростов-на-Дону, 344090, Россия, e-mail: gbelyavski@sfnu.ru

Grigorii I. Belavsky - Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of High Mathematics and Operations Research, Vorovich Institute of Mathematics, Mechanics and Computer Science, Southern Federal University, Milychakova St., 8a, Rostov-on-Don, 344090, Russia, e-mail: gbelyavski@sfnu.ru

Кондратьева Татьяна Николаевна – кандидат технических наук, доцент, кафедра прикладной информатики и вычислительной техники, Донской государственный технический университет, пл. Гагарина, 1, г. Ростов-на-Дону, 344000, Россия

Tatiana N. Kondrateva - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of the Applied Informatics and Computer Engineering, Don State Technical University, Gagarina Sq., 1, Rostov-on-Don, 344000, Russia

Рассматриваются две различные модели временных рядов, предназначенных для одношагового прогноза в нестационарном случае. Для каждой из них исследуется нейросетевая реализация, предлагаются и обосновываются специальные алгоритмы обучения, учитывающие специфику моделей. На реальных данных демонстрируются возможности нейронных сетей. Первая модель относится к типу моделей с долгой памятью и использует свойства автомодельных процессов. Для ее реализации применяется перцептрон с одним внутренним слоем с расширяющейся архитектурой. На каждой итерации обучения добавляется один нейрон внутреннего слоя и производится вычисление весов. Процесс продолжается до выполнения условия стабилизации. Вторая модель использует процессы со сменой режимов. Нейронная сеть, реализующая эту модель, состоит из слоя рекуррентных нейронных сетей, объединенных с помощью селектора. Каждая рекуррентная нейронная сеть обучается самостоятельно, а селектор – в режиме онлайн-обучения.

Ключевые слова: долгая память, показатель Харста, самообучение, обучение в реальном времени.

The paper considers two different models of time series intended for a one-step forecast in the nonstationary case. For each of the models, their neural network implementation is considered; special learning algorithms are proposed and justified. Algorithms take into account the specifics of the models. On real data, the possibilities of neural networks are demonstrated. The

*Исследование поддержано РФФИ, научный проект № 17-01-00888а.

first model is a model with a long memory and uses the properties of self-similar processes. To implement it, a perceptron with one inner layer with an expanding architecture is used. At each iteration of training, one neuron of the inner layer is added and the new weights are calculated. The process continues until the stabilization conditions are met. The second model uses processes with regime change. The neural network implementing this model consists of a layer of recurrent neural networks combined with a selector. Each recurrent neural network is trained independently, and the selector is trained in online mode.

Keywords: long memory, Harst's index, self-learning, online learning.

Введение

Рассматривается сложная задача прогнозирования нестационарного временного ряда. При вычислении прогноза необходимо решить три задачи: выбор и анализ модели, идентификация её параметров, проверка модели на адекватность. Каждая из этих задач является сложной проблемой в нестационарном случае. На наш взгляд, наиболее подходящими моделями являются самоподобные процессы двух типов: с долгой памятью и со сменой режимов. Каждому из этих процессов уделяется внимание в нашем исследовании.

Основная задача заключается в построении обобщенных вычислительных алгоритмов прогноза и их нейросетевой реализации, предоставляющей дополнительные возможности при нелинейном оценивании.

Структура работы такова. Рассматриваются самоподобные процессы с долгой памятью. Основная проблема заключается в том, что для этих процессов ковариационная функция стремится к нулю со степенной скоростью. При этом возможна ситуация, когда ковариационная функция несуммируемая. Поэтому при вычислении прогноза требуется учитывать длинное прошлое.

Изучаются процессы со сменой режима. Сменой режима управляет случайный параметр, который является ненаблюдаемым. Поэтому и возникает дополнительная сложность при вычислении прогноза, поскольку неизвестно значение параметра, управляющего сменой режима. В некотором смысле задача прогноза для процесса со сменой режима похожа на задачу обнаружения разладки случайного процесса.

Демонстрируются возможности предложенных нейросетевых алгоритмов на сложном примере прогнозирования поведения акции энергетической компании.

В заключении подводятся итоги исследования и намечаются перспективы.

На протяжении всей работы мы будем считать, что процесс X адаптирован по отношению к стандартному стохастическому базису $\langle \Omega, (F_n)_{n \geq 0}, F, P \rangle$. Используются обозначения: Ω – пространство последовательностей; $(F_n)_{n \geq 0}$ – расширяющийся по-

ток сигма-алгебр, пополненных событиями с нулевой вероятностью; $F = \sigma(\bigcup_{n \geq 0} F_n)$; P – вероятность на сигма-алгебре F .

Нестационарность и долгая память

Любой прогноз строится на базе математической модели случайного процесса. Построить модель нестационарного случайного процесса в полном смысле этого слова на основе классических моделей, таких как AR, ARMA и другие, невозможно просто из-за того, что это – модели стационарных случайных процессов. Более того, ковариационные функции для этих моделей $R_n = E x_0 x_n$ стремятся к нулю с экспоненциальной скоростью. Во многих работах, например [1], в качестве моделей нестационарных процессов предлагается использовать процессы с долгой памятью (long memory), для которых ковариационная функция иногда абсолютно несуммируемая. Эти процессы, оставаясь стационарными, являются пограничными при переходе от стационарных к нестационарным.

Примером процесса с долгой памятью может служить фрактальный белый шум ΔX , которым обычно называют гауссовский процесс с корреляционной функцией

$$R_H(n) = \sigma^2 \rho_H(n), \rho_H(n) = \frac{1}{2} (|n+1|^{2H} - 2|n|^{2H} + |n-1|^{2H}) \quad (1)$$

при допущении, что $0^{2H} = 0$. Корреляция $\rho_H(n)$ эквивалентна $H(2H-1)|n|^{-(2-2H)}$ при $n \rightarrow \infty$. Параметр H называется показателем Харста. Для того чтобы функция $R_H(n)$ была неотрицательно определена, необходимо и достаточно, чтобы $0 < H \leq 1$. При $H > 1/2$ получаем процесс с несуммируемой ковариацией. Процесс с показателем Харста $H > 1/2$ был впервые изучен и использован Бенуа Мандельбротом [2]. Наилучший в среднеквадратичном смысле прогноз при известном параметре H выглядит следующим образом:

$$\Delta \bar{X}_{n+1} = \sum_{j=0}^n \alpha_j^n \Delta x_{n-j} \quad (2)$$

Коэффициенты в (2) зависят от n и являются решением расширяющейся системы линейных уравнений:

$$\rho_H(k+1) = \sum_{j=0}^n \alpha_j^n \rho_H(k-j), \quad k=0, \dots, n. \quad (3)$$

Матрица коэффициентов системы (3) является теплоцевой положительно определенной. Поэтому для решения системы (3) при любом фиксированном n может использоваться метод итераций Гаусса – Зейделя. Рассмотрим растянутый во времени метод итераций со следующей процедурой вычисления коэффициентов в формуле (2):

$$\begin{aligned} \bar{\alpha}_k^{n+1} &= \rho_H(k+1) - \\ &- \sum_{j=k+1}^n \rho_H(k-j) \bar{\alpha}_j^n + \sum_{j=0}^{k-1} \rho_H(k-j) \bar{\alpha}_j^{n+1}, \\ k &= 0, \dots, n+1. \end{aligned} \quad (4)$$

То есть на каждой итерации добавляется один коэффициент и производится вычисление новых значений коэффициентов (одна итерация Гаусса – Зейделя). Приведем без доказательства два утверждения.

Утверждение 1. Если показатель Харста $H < 1/2$, то для всех конечных k существует предел $\lim_{n \rightarrow \infty} \alpha_k^n = \alpha_k^*$.

Первое утверждение следует из сходимости ряда $\sum \rho_H(n)$.

Утверждение 2. Для всех конечных k существует предел $\lim_{n \rightarrow \infty} \bar{\alpha}_k^n = \alpha_k^*$.

Второе утверждение следует из первого и сходимости итерационного метода Гаусса – Зейделя для симметричных положительно определенных матриц.

Таким образом, на основе формул (2) и (4) может быть предложен реализуемый алгоритм прогноза для процесса с долгой памятью типа фрактального броуновского движения. Алгоритм состоит из двух повторяющихся элементов:

1. Оценка коэффициентов по формуле (4).
2. Одношаговый прогноз по формуле (2).

Замечание 1. Данный алгоритм может применяться как для прогнозирования фрактального броуновского движения, поскольку процесс его приращений – это фрактальный белый шум, так и для автомодельного процесса, поскольку процесс его приращений – стационарный в широком смысле с ковариационной функцией вида (4) [3]. Для автомодельных процессов данный прогноз является оптимальным среди линейных прогнозов.

Рассмотренный алгоритм может быть реализован персептроном с одним внутренним слоем. Нейроны внутреннего слоя имеют вид

$y_j = f(a_j x_{k-j})$, т.е. имеют один вход и один выход.

$$\text{Выходной нейрон } \bar{x} = \varphi \left(\sum_{j=0}^k b_j y_j \right).$$

Алгоритм обучения нейронной сети состоит из двух стадий.

На каждой итерации первой стадии алгоритма обучения добавляется один нейрон внутреннего слоя и пересчитываются веса a по формулам (4). Обучение продолжается до момента стабилизации (утверждения 1 и 2). Тем самым определяются число нейронов внутреннего слоя и их веса. Обучающая выборка используется для того, чтобы оценить параметр Харста H [4].

На второй стадии алгоритма обучения вычисляются веса b .

Ниже будет рассмотрен другой класс моделей процессов – процессы со сменой режимов.

Процессы со сменой режимов. Онлайн-обучение

Процессы со сменой режимов X^α – это процессы, поведение которых определяется параметрическим семейством моделей или параметрическим семейством вероятностных мер. Развитие процесса со сменой режимов происходит на стохастическом базисе $\langle \Omega, (F_t), F, (P_\alpha)_{\alpha \in M} \rangle$. Здесь вместо единственной вероятностной меры рассматривается семейство вероятностных мер. Наиболее известной моделью этого типа является модель Хестона, широко применяемая в финансовой математике для описания флуктуаций цен рискованных активов [5]:

$$\begin{aligned} dS_t &= S_t (\mu dt + \sigma \sqrt{\alpha_t} (dW_t^1 + \rho dW_t^2)), \\ d\alpha_t &= k(\theta - \alpha_t) dt + \beta \sqrt{\alpha_t} dW_t^2. \end{aligned} \quad (5)$$

В (5) W^1 и W^2 – независимые броуновские движения. Дискретный аналог (5) в форме Эйлера выглядит следующим образом:

$$\begin{aligned} S_t &= S_{t-1} \left(1 + \mu \Delta t + \sigma \sqrt{\alpha_t} \Delta t (\varepsilon_t^1 + \rho \varepsilon_t^2) \right), \\ \alpha_t &= \alpha_{t-1} + k(\theta - \alpha_{t-1}) \Delta t + \beta \sqrt{\alpha_{t-1}} \Delta t \varepsilon_t^2. \end{aligned} \quad (6)$$

В (6) ε^1 и ε^2 – независимые белые шумы. Модель Хестона является частным случаем семейства моделей стохастической волатильности, к которым, в частности, относится модель ARCH. В модели ARCH волатильность является предсказуемой по отношению к процессу X . В работе [6] рассматривалась нейронная сеть, базирующаяся на вейвлет-ядре, в которой использовался нелинейный аналог модели AR/ARCH:

$$x_t = \varphi \left(a_0 + \sum_{i=1}^q a_i x_{t-i} \right) + \psi \left(b_0 + \sum_{i=1}^p b_i x_{t-i}^2 \right) \varepsilon_t.$$

Эти модели, хотя и обладают определенной ограниченностью по отношению к моделям, в которых волатильность не является предсказуемым процессом, имеют неоспоримое преимущество при решении задач прогноза. Для непредсказуемой волатильности возникает дополнительная трудная задача вычисления её прогноза, поскольку волатильность является ненаблюдаемым процессом.

Решение проблемы непредсказуемой волатильности может быть в следующем. Будем считать, что параметрическая последовательность $\alpha = (\alpha_n)_{n \geq 1}$ является последовательностью случайных величин со значениями из конечного множества M . В момент времени t будем использовать для прогноза закон распределения вероятностей $p_t(\alpha_t = m_j)$, $j = 1, 2, \dots, |M|$. На его основе сначала вычисляются условные прогнозы $\bar{x}_t^{\alpha_t}$ для всех возможных значений α_t , а затем – безусловный прогноз по формуле

$$\bar{x}_t = \sum_{j=1}^{|M|} \bar{x}_t^{m_j} p_t(\alpha = m_j) \quad (7)$$

или при помощи случайного селектора, который выбирает прогноз из условных прогнозов, используя распределение вероятностей p_t .

Для вычисления по формуле (7) необходимо всякий раз пересчитывать $p_t(\alpha = m_j)$. Для этого применима процедура, хорошо зарекомендовавшая себя в кластерном анализе (самообучении):

$$p_t^s(\alpha = m_j) = \frac{p_t(x_{t-1}, \dots, x_{t-1} / m_j) p_t^{s-1}(\alpha = m_j)}{\sum_{k=1}^{|M|} p_t(x_{t-1}, \dots, x_{t-1} / m_k) p_t^{s-1}(\alpha = m_k)}, \quad (8)$$

$$j = 1, \dots, |M|.$$

Справедливо

Утверждение 3. Для любых начальных данных последовательность, вычисляемая по формуле (8), сходится к решению системы уравнений

$$z_j = \frac{p_t(x_{t-1}, \dots, x_{t-1} / m_j) z_j}{\sum_{k=1}^{|M|} p_t(x_{t-1}, \dots, x_{t-1} / m_k) z_k} \quad (9)$$

при условии, что решение системы $z_k^* > 0$. В свою очередь, система уравнений (9) является необходимым и достаточным условием максимума логарифма правдоподобия $(\ln \sum_{k=1}^{|M|} p_t(x_{t-1}, \dots, x_{t-1} / m_k) z_k)$

на симплексе $\sum_{k=1}^{|M|} z_k = 1, z_k \geq 0$.

В начале прогноза в качестве начальных значений можно использовать равномерное распределение вероятностей $p_1^0(\alpha = m_j) = \frac{1}{|M|}$, при вычислении по формуле (8) – $p_{t-1}(\alpha = m_j)$. Подробней с алгоритмом самообучения можно познакомиться в работе [7].

Пример. В качестве модели рассмотрим $AR(1)$: $x_t = a_0 + \alpha_t x_{t-1} + \sigma \varepsilon_t$. Не нарушая общности, будем считать, что $a_0 = 0$. Параметр $\alpha_t \in M = (m_1, \dots, m_k)$, где m_j – точки равномерного разбиения интервала: $-1 < m_1 < \dots < m_k < 1$. Для этой модели оценки (7), (8) приобретают следующий вид:

$$\begin{aligned} \bar{x}_t^{\alpha} &= \alpha x_{t-1}, \\ p_t^s(\alpha = m_j) &= \frac{\exp\left(-\frac{1}{2\sigma^2} \sum_{i=t-l+1}^{t-1} (x_i - m_j x_{i-1})^2\right) p_t^{s-1}(\alpha = m_j)}{\sum_{l=1}^{m_k} \exp\left(-\frac{1}{2\sigma^2} \sum_{i=t-l+1}^{t-1} (x_i - m_l x_{i-1})^2\right) p_t^{s-1}(\alpha = m_l)}. \end{aligned} \quad (10)$$

С оценками типа (10) тесно связано онлайн-обучение. Его технология – одна из востребованных в настоящее время. Онлайн-обучению посвящены многочисленные монографии и статьи, например [8–10]. Приведем краткий анализ технологии, которая в дальнейшем будет использована. Имеется текущий момент времени $t-1$. Требуется найти оценку $\bar{x}_t$ значения x_t . При этом, как и раньше, могут быть использованы значения x_s для $s \leq t-1$. Следующим элементом алгоритма прогнозирования является функция $l(x, y)$, измеряющая качество прогноза, – функция потерь, где $x \in X$ – множеству значений случайного процесса; $y \in Y$ – множеству значений оценок. Множества X и Y могут совпадать. Примерами таких функций могут быть $l(x, y) = (x - y)^2$ или $l(x, y) = |x - y|$, если рассматривается прогноз одномерного случайного процесса. Алгоритм прогноза сначала вычисляет условные оценки, которые могут иметь, например, следующий вид:

$$\bar{x}_t^{\alpha} = \arg \min_a E_{\alpha}(l(x_t, a) / F_{t-1}). \quad (11)$$

Среднее в (11) – $E_{\alpha}(\cdot)$ – вычисляется по мере P_{α} . Затем при помощи функции потерь алгоритм вычисляет качество оценок $L_{\alpha}(x_1^{t-1}) = \sum_{i=1}^{t-1} l(x_i, \bar{x}_i^{\alpha})$, на основе которого определяется текущее распределение

вероятностей $p_t(\alpha = m_j)$. Далее алгоритм вычисляет безусловную оценку, используя формулу (7) или селектор.

Вероятности $p_t(\alpha = m_j)$ пересчитываются. Важным понятием при пересчете вероятностей является «сожаление»: $R(x_1^t) = L(x_1^t) - \min_{\alpha} L_{\alpha}(x_1^t)$. Алгоритм прогноза считается приемлемым, если среднее сожаление $\frac{1}{t} R(x_1^t) \rightarrow 0$ при $t \rightarrow \infty$. Стандартный алгоритм экспоненциального взвешивания, см., например, [8], обладает этим свойством. Алгоритм вычисляет прогноз следующим образом. Для каждого α вычисляются

$$w_{\alpha}(x_1^t) = \exp(-hL_{\alpha}(x_1^t)) \approx w_{\alpha}(x_1^{t-1})(1 - hl(x_t, y_{\alpha,t}))$$

$$\text{и веса } p_{\alpha}(x_1^t) = \frac{w_{\alpha}(x_1^t)}{\sum_{\beta \in M} w_{\beta}(x_1^t)}. \quad (12)$$

Начальные значения весов полагаем равными единице. То есть первый прогноз вычисляется с равными весами. Предполагается, что $1 - hl(x_t, y_{\alpha,t}) > 0$. Если положить $h = 1/2$, то сожаление $R(x_1^t) \leq 2 \ln |M|$. Несмотря на то что экспоненциальное взвешивание является одним из наиболее употребительных методов онлайн-обучения, оно обладает одним существенным недостатком. Сожаление отражает стремление алгоритма несильно отличаться от наилучшего апостериорного прогноза $\min_{\alpha} L_{\alpha}(x_1^T)$. Весьма сомнительное свойство для прогноза нестационарных рядов. Из-за этого данный алгоритм прогноза нуждается в коррекции. Прежде всего, необходимо более тесно связать вычисление весов с последними потерями. Сделать это можно различными способами, например формированием множества

$$M_{t-1} = \{\alpha \in M : l_{\alpha}(x_{t-1}, \bar{x}_{t-1}) < \bar{l}(x_{t-1}, \bar{x}_{t-1})\}, \text{ где}$$

$$\bar{l}(x_{t-1}, \bar{x}_{t-1}) = \frac{1}{|M|} \sum_{\alpha \in M} l_{\alpha}(x_{t-1}, \bar{x}_{t-1}). \text{ Далее для всех}$$

$$\alpha \in M_t \text{ вычисляются веса } p_{\alpha}(x_1^{t-1}) = \frac{w_{\alpha}(x_1^{t-1})}{\sum_{\beta \in M_t} w_{\beta}(x_1^{t-1})}$$

$$\text{и прогноз } \bar{x}_t = \sum_{\beta \in M_{t-1}} p_{\beta}(x_1^{t-1}) \bar{x}_t^{\beta}.$$

Состав множества M_t изменяется с течением времени. Это позволяет учесть нестационарность процесса.

Нейронная сеть, реализующая прогнозирование в режиме онлайн-обучения, состоит из рекуррентных

нейронных сетей, вычисляющих оценки $\bar{x}_t^{\alpha}$, и селектора. Далее через x обозначается входной поток; через $\bar{x}^{\alpha}$ – выходные потоки рекуррентных нейронных сетей; через $\bar{x}$ – выходной поток селектора. Функционирование рекуррентных нейронных сетей описывается семейством разностных уравнений:

$$\bar{x}_t^{\alpha} = f_{\alpha} \left(w_{\alpha,0} \bar{x}_{t-1}^{\alpha} + \sum_{i \geq 1} w_{\alpha,i} x_{i,t-1} \right), \alpha = 1, 2, \dots, M. \quad (13)$$

В (13) $w_{\alpha,i}$ – веса; f_{α} – функции активации; x и $\bar{x}_{\alpha}$ – входные потоки селектора. Селектор вычисляет веса $p_{\alpha}(x_1^{t-1})$, множество M_t и взвешенный прогноз $\bar{x}_t = \sum_{\alpha \in M_t} p_{\alpha}(x_1^{t-1}) \bar{x}_t^{\alpha}$.

Обучение нейронной сети с селектором производится в два этапа. На первом каждая рекуррентная нейронная сеть обучается независимо от других с целью настройки весов w_{α} , затем в режиме онлайн обучается селектор. Подробнее – см. работу [11].

Реальный эксперимент

Прогноз осуществлялся при помощи нейронной сети, приведенной выше. При прогнозе нерегулярного случайного процесса следует учитывать две составляющие случайного процесса – тренд и волатильность. Тренд может сохраняться в течение длительного времени, а волатильность может изменяться часто под воздействием дискретного вмешательства случая. Поэтому при прогнозировании следует учитывать это обстоятельство и конструировать алгоритм, в котором будут использованы разные техники прогнозирования тренда и волатильности.

Для вычисления тренда использована оконная медиана. Медиана является робастной статистикой и поэтому устойчива по отношению к дискретному вмешательству случая.

В результате работы алгоритма на основе базового процесса z вычисляются два процесса:

$$m_t = \text{Med}(z_{t-1-k}, \dots, z_{t-1}) \text{ и } x_t = (z_t - m_t)^2.$$

Процесс m – тренд, входной процесс x – волатильность. Прогноз волатильности вычислялся в результате использования нейронной сети, описанной ранее. В алгоритме прогноза оценки вычисляются по формулам

$$\bar{x}_t^{\alpha} = \alpha x_{t-1} + (1 - \alpha) \bar{x}_{t-1}^{\alpha}, M_0 = \left\{ \frac{1}{k}, \frac{2}{k}, \dots, \frac{k-1}{k} \right\},$$

т.е. в рекуррентных нейронных сетях веса:

$w_{\alpha,0} = 1 - \alpha$, $w_{\alpha,1} = \alpha$, функции активации f_α – тождественные.

Ниже приводятся результаты прогноза поведения стоимости акции «Газпрома» с периодом 1 ч. На рис. 1 – вычисление тренда с медианным окном, равным 5.

Пунктирная линия изображает логарифмический возврат акции, сплошная – тренд. Масштаб временной шкалы равен 1 ч. Можно сделать вывод, что тренд дает смутное представление о поведении акции. На рис. 2 приведена медианная оценка волатильности с тем же медианным окном.

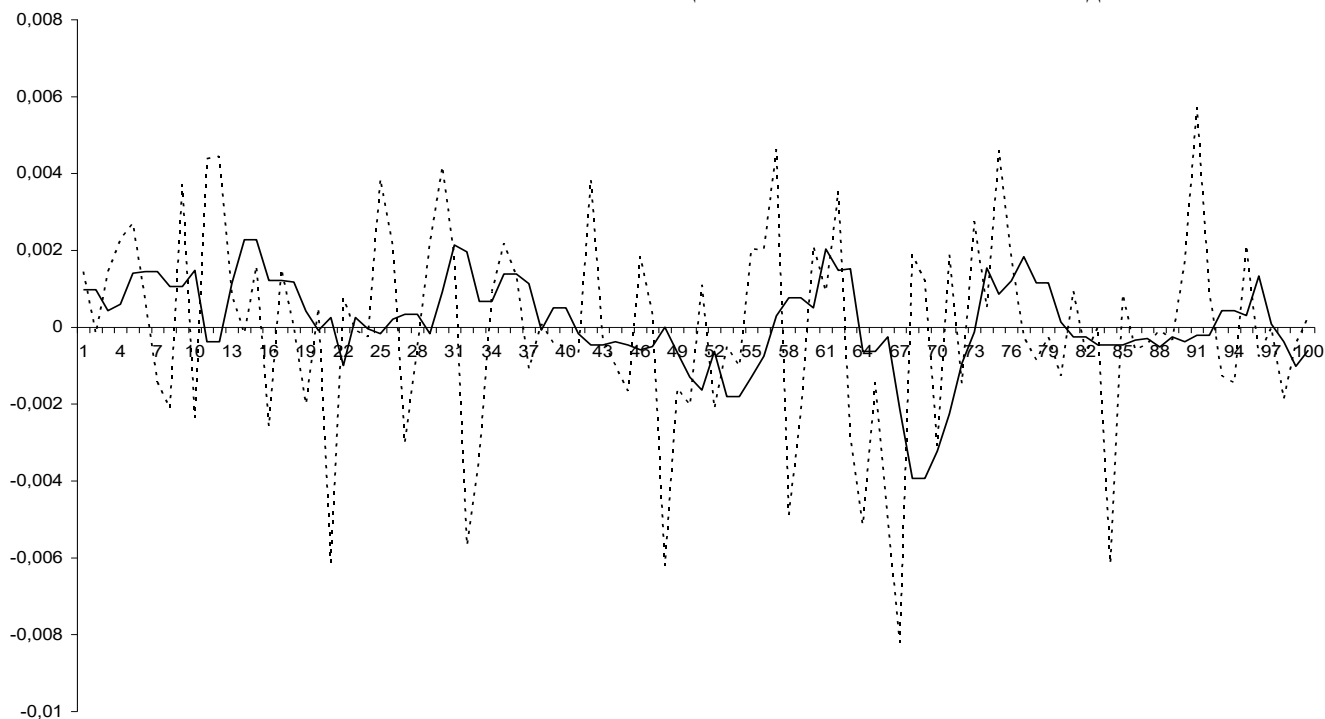


Рис. 1. Медиана и логарифмический возврат / Fig. 1. Median and log return

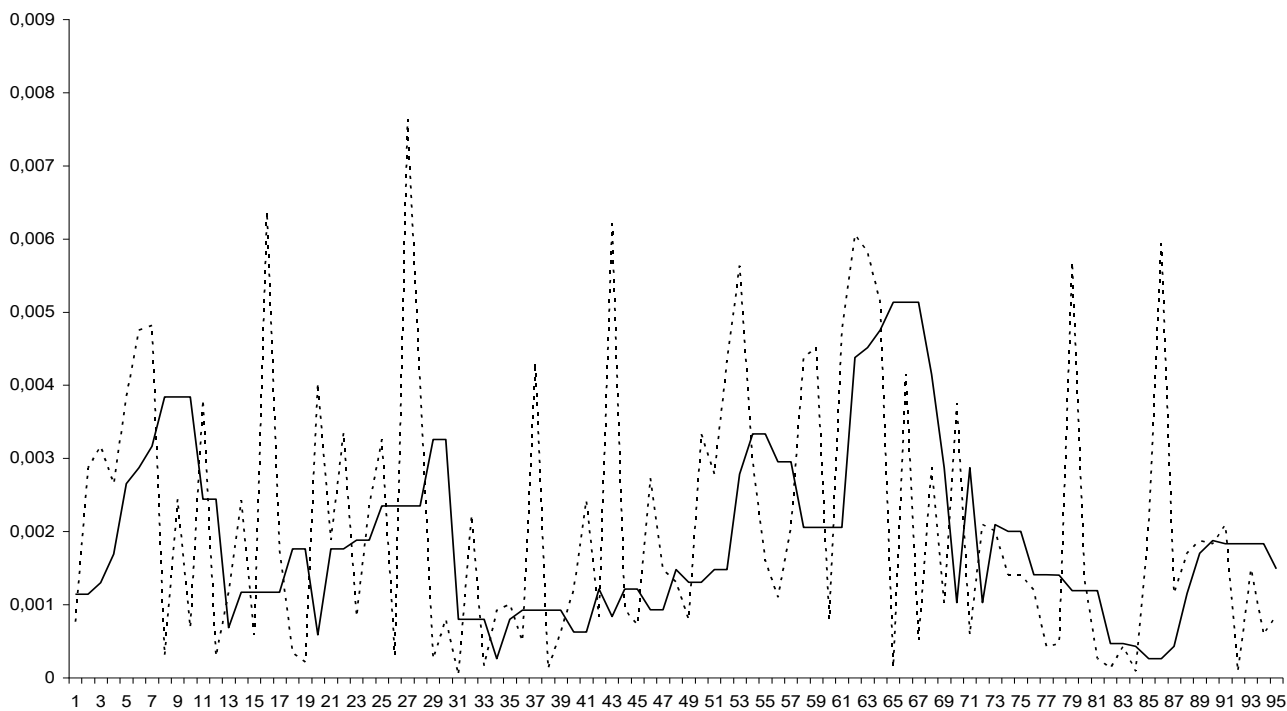


Рис. 2. Медианная оценка / Fig. 2. Median score

Медианную оценку волатильности трудно назвать приемлемой.

Из рис. 3 следует, что предлагаемый способ оценки можно считать приемлемым. Следует отметить, что реакция алгоритма на дискретное вмеша-

тельство случая (большие пики) происходит с незначительным запаздыванием (1–2 отсчета). Онлайн-алгоритм значительно превосходит медианный алгоритм, который считается хорошим методом оценки.

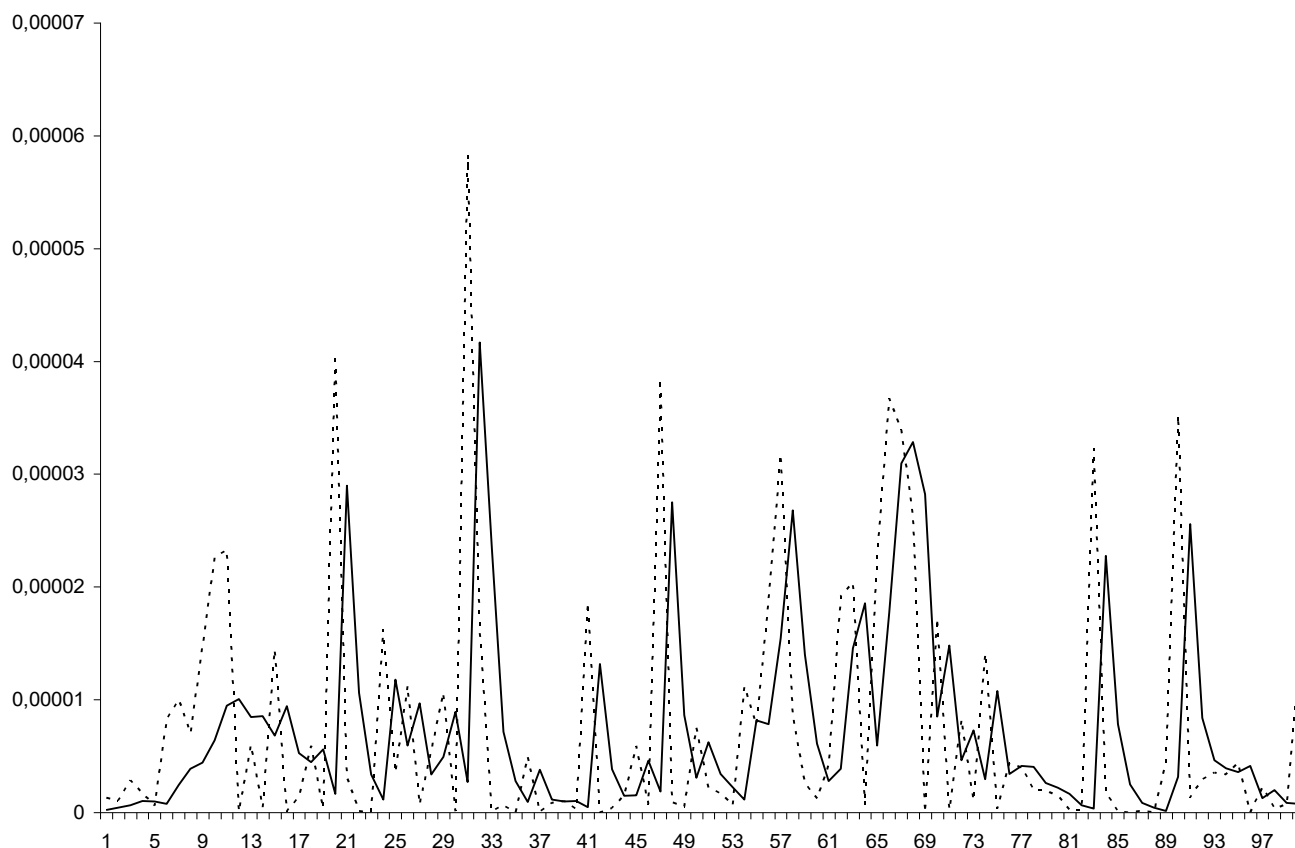


Рис. 3. Онлайн-алгоритм / Fig. 3. Online algorithm

Заключение

В работе были решены поставленные во введении задачи и получены результаты, связанные с разработкой нейросетевых алгоритмов одношагового прогнозирования нестационарных процессов.

Первая нейронная сеть представляет собой персептрон с одним внутренним слоем с расширяющейся архитектурой. Математическая основа этой нейронной сети – самоподобные процессы с долгой памятью типа фрактального броуновского движения. Внутренний слой персептрона может содержать большое число нейронов, число которых заранее неизвестно. Поэтому его обучение – сложная задача, относящаяся к глубокому обучению (deep learning). Трудность преодолена за счет специаль-

ного итерационного алгоритма решения расширяющейся системы линейных алгебраических уравнений. Установлена сходимость этого алгоритма.

Моделью второй нейронной сети послужил процесс со сменой режимов. Вторая нейронная сеть – гибридная. Она включает в себя устройство под названием селектор и семейство рекуррентных нейронных сетей. Каждая рекуррентная нейронная сеть обучается самостоятельно и независимо от других. Для обучения селектора возможно использование алгоритма самообучения или алгоритма типа онлайн learning. Важной особенностью алгоритмов является зависимость параметрического множества от времени, что делает оценки нестационарными.

Приведен пример реального прогноза, в котором получены обнадеживающие результаты.

Литература

1. Samorodnitsky G. Long memory and self-similar processes // *Annales la faculte des sciences de Toulous Mathematiques*. 2006. Vol. 15, № 1. P. 107–126.
2. Mandelbrot B., Ness J., van. Fractional Brownian motions, fractional noises and applications // *SIAM Review*. 1968. Vol. 10. P. 422–437.
3. Samorodnitsky G., Taqqu M. *Stable Non-Gaussian Random Processes*. N.Y.: Chapman and Hall, 1994. 632 p.
4. Ширяев А. Основы стохастической финансовой математики. М.: Фазис, 1998. Т. 1. 512 с.
5. Heston S.L. A closed-form solution for options with stochastic volatility with applications to bond and currency options // *Review of Financial Studies*. 1993. Vol. 6. P. 327–344.
6. Belyavskiy G., Misyura V., Puchkov E. Prediction intervals for time series using neural networks based on wavelet-core // *Far East J. of Mathematical Sciences*. 2016. Vol. 100, № 3. P. 413–425.
7. Шлезингер М. Взаимосвязь обучения и самообучения в распознавании образов // *Кибернетика*. 1968. № 2. С. 81–88.
8. Cesa-Bianchi N., Lugosi G. *Prediction, Learning, and Games*. Cambridge University Press, 2006. 394 p.
9. Cesa-Bianchi N., Freund Y., Haussler D., Helmbold D., Shapire R., Warmuth M. How to Use Expert Advice // *J. of the ACM*. 1997. Vol. 44, № 3. P. 427–485.
10. Abernethy J., Agarwal A., Bartlett P., Rakhlin A. A stochastic view of optimal regret through minimax duality // *Proceedings of the 22nd Annual Conference on Learning Theory*. 2009. P. 234–246.
11. Belyavskiy G., Puchkov E. Separate training of hybrid neural network // *International J. of Pure and Applied Mathematics*. 2017. Vol. 115, № 4. P. 883–893.

References

1. Samorodnitsky G. Long memory and self-similar processes. *Annales la faculte des sciences de Toulous Mathematiques*. 2006, vol. 15, No 1, pp. 107-126.
2. Mandelbrot B., Ness J. van. Fractional Brownian motions, fractional noises and applications. *SIAM Review*. 1968, vol. 10, pp. 422-437.
3. Samorodnitsky G., Taqqu M. *Stable Non-Gaussian Random Processes*. New York: Chapman and Hall, 1994, 632 p.
4. Shiryayev A. *Osnovy stokhasticheskoi finansovoi matematiki* [The basics of stochastic financial mathematics]. Moscow: Fazis, 1998, vol. 1, 512 p.
5. Heston S.L. A closed-form solution for options with stochastic volatility with applications to bond and currency options. *Review of Financial Studies*. 1993, vol. 6, pp. 327-344.
6. Belyavskiy G., Misyura V., Puchkov E. Prediction intervals for time series using neural networks based on wavelet-core. *Far East J. of Mathematical Sciences*. 2016, vol. 100, No. 3, pp. 413-425.
7. Shlezinger M. *Vzaimosvyaz' obucheniya i samoobucheniya v raspoznavanii obrazov* [The relationship of learning and self-learning in pattern recognition]. *Kibernetika*. 1968, No. 2, pp. 81-88.
8. Cesa-Bianchi N., Lugosi G. *Prediction, Learning, and Games*. Cambridge University Press, 2006, 394 p.
9. Cesa-Bianchi N., Freund Y., Haussler D., Helmbold D., Shapire R., Warmuth M. How to Use Expert Advice. *J. of the ACM*. 1997, vol. 44, No. 3, pp. 427-485.
10. Abernethy J., Agarwal A., Bartlett P., Rakhlin A. A stochastic view of optimal regret through minimax duality. *Proceedings of the 22nd Annual Conference on Learning Theory*. 2009, pp. 234-246.
11. Belyavskiy G., Puchkov E. Separate training of hybrid neural network. *International J. of Pure and Applied Mathematics*. 2017, vol. 115, No. 4, pp. 883-893.

УДК 512.54

DOI 10.23683/0321-3005-2018-4-12-17

О СВОЙСТВАХ ПОДГРУПП ГРУППЫ ГЕЙЗЕНБЕРГА НАД ПРОСТЫМ ПОЛЕМ ГАЛУА

© 2018 г. В.М. Деундяк^{1,2}, Д.И. Кокишаров¹

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

²НИИ «Спецвузавтоматика», Ростов-на-Дону, Россия

ON PROPERTIES OF SUBGROUPS OF THE HEISENBERG GROUP OVER A PRIME GALOIS FIELD

V.M. Deundyak^{1,2}, D.I. Koksharov¹

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

²Spetsvuzavtomatika, Rostov-on-Don, Russia

Деундяк Владимир Михайлович – кандидат физико-математических наук, доцент, кафедра алгебры и дискретной математики, Институт математики, механики и компьютерных наук имени И.И. Воровича, Южный федеральный университет, ул. Мильчакова, 8а, г. Ростов-на-Дону, 344090, Россия; старший научный сотрудник, НИИ «Спецвузавтоматика», пер. Газетный, 51, г. Ростов-на-Дону, 344002, Россия, e-mail: vl.deundyak@gmail.com

Vladimir M. Deundyak - Candidate of Physics and Mathematics, Associate Professor, Department of Algebra and Discrete Mathematics, Vorovich Institute of Mathematics, Mechanics and Computer Science, Southern Federal University, Milchakova St., 8a, Rostov-on-Don, 344090, Russia; Senior Researcher, Spetsvuzavtomatika, Gazetnyi Lane, 51, Rostov-on-Don, 344002, Russia, e-mail: vl.deundyak@gmail.com

Кокишаров Дмитрий Ильич – студент, кафедра алгебры и дискретной математики, Институт математики, механики и компьютерных наук имени И.И. Воровича, Южный федеральный университет, ул. Мильчакова, 8а, г. Ростов-на-Дону, 344090, Россия, e-mail: koksharovd06@yandex.ru

Dmitry I. Koksharov - Student, Department of Algebra and Discrete Mathematics, Vorovich Institute of Mathematics, Mechanics and Computer Science, Southern Federal University, Milchakova St., 8a, Rostov-on-Don, 344090, Russia, e-mail: koksharovd06@yandex.ru

Стойкость большинства асимметричных криптосистем основана на сложности задач дискретного логарифмирования или факторизации целых чисел. Но с развитием квантовых компьютеров становятся актуальными кодовые криптосистемы, в основе которых лежит применение помехоустойчивых кодов. Некоторые существующие кодовые криптосистемы были взломаны. Их стойкость может улучшить использование кодов, индуцированных групповыми кодами на некоммутативных группах. Для реализации такого подхода и построения групповых кодов возникает задача классификации подгрупп некоммутативных групп. В работе исследуется конечная группа Гейзенберга над простым полем Галуа. Для этой неабелевой группы получена полная классификация всех ее собственных подгрупп, выделены нормальные подгруппы, построены соответствующие факторгруппы. Полученные результаты позволяют ставить вопрос о конструировании кодовых криптосистем на группе Гейзенберга.

Ключевые слова: группа Гейзенберга, простое поле Галуа, собственная подгруппа, нормальная подгруппа, факторгруппа, индуцированный код.

The strength of most asymmetric cryptosystems is based on the complexity of the problem of discrete logarithm or factorization of integers. But with the development of quantum computers code cryptosystems become relevant, which is based on the use of noise-resistant codes. Some of the existing code cryptosystem has been compromised. Their strength can be improved by using codes induced by group codes on noncommutative groups. To implement this approach and construct group codes, the problem of classifying subgroups of noncommutative groups arises. In this paper we investigate a finite Heisenberg group over a prime Galois field. For this non-Abelian group, a complete classification of all its own subgroups is obtained, normal subgroups are distinguished, and the corresponding factor groups are constructed. The results obtained allow us to raise the question of the construction of code cryptosystems on the Heisenberg group.

Keywords: Heisenberg group, prime Galois field, proper subgroup, normal subgroup, quotient group, induced code.

Введение

В настоящее время стойкость применяемых на практике асимметричных криптосистем, как правило, основана на сложности задач факторизации целых чисел или дискретного логарифмирования в конечной группе [1]. Однако в [2] показано, что эти задачи решаются на квантовом компьютере за полиномиальное время, поэтому в качестве альтернативы для таких криптосистем в настоящее время предлагаются системы, в основе которых лежит применение помехоустойчивых кодов, – кодовые криптосистемы. Недостатком кодовых криптосистем является большой размер ключа, например, для предложенной в [3] Мак-Элисом кодовой криптосистемы, базирующейся на кодах Гоппы, размер ключа составляет около 65 Кбайт.

Стойкость кодовых криптосистем в настоящее время интенсивно изучается. Например, взломаны такие криптосистемы, как криптосистема Нидеррайтера [4], Сидельникова [5]. Существует предположение, что усилить стойкость кодовых криптосистем может использование помехоустойчивых кодов, которые не обладают ярко выраженной алгебраической структурой. Такой подход применен в [6], где предлагается в криптосистеме типа Мак-Элиса использовать коды, индуцированные групповыми кодами на некоммутативных группах. Для реализации этого подхода возникают задачи описания структуры подгрупп на некоммутативных группах и построения соответствующих групповых кодов. С этой точки зрения коды на конечной диэдральной группе изучены в [7, 8]. Настоящая работа посвящена исследованию подгрупп группы Гейзенберга $\mathbb{H}(\mathbb{F}_p)$ над простым полем Галуа $\mathbb{F}_p$, что позволит строить новые криптосистемы на группе $\mathbb{H}(\mathbb{F}_p)$.

Конечная группа Гейзенберга

Рассмотрим $\mathbb{F}_p$ – поле Галуа мощности p , где p – произвольное простое число, $p > 2$. Группа Гейзенберга $\mathbb{H}(\mathbb{F}_p)$ определяется как множество (3×3) -

матриц вида $\begin{pmatrix} 1 & x & t \\ 0 & 1 & y \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$, $x, y, t \in \mathbb{F}_p$, [9, с. 293].

Для удобства элементы группы будем обозначать тройками (x, y, t) . В качестве групповой операции используется обычное умножение матриц:

$$(x, y, t) \cdot (\hat{x}, \hat{y}, \hat{t}) = (x + \hat{x}, y + \hat{y}, t + \hat{t} + x\hat{y}).$$

Нейтральным элементом является $e = (0, 0, 0)$, а обратный элемент вычисляется по формуле

$$(x, y, t)^{-1} = (-x, -y, xy - t).$$

Легко заметить, что группа Гейзенберга не является абелевой. Быстрое преобразование Фурье и решение сверточных уравнений на группе $\mathbb{H}(\mathbb{F}_p)$ изучены в [10].

Основная теорема о структуре подгрупп

Теорема 1. В группе Гейзенберга $\mathbb{H}(\mathbb{F}_p)$ содержатся следующие собственные подгруппы:

1) подгруппа $\mathcal{H}_1 = \{(0, 0, t) \mid t \in \mathbb{F}_p\}$, изоморфная группе $\mathbb{Z}_p$ и являющаяся центром группы $\mathbb{H}(\mathbb{F}_p)$;

2) серия подгрупп $\mathcal{H}_{\{2;x,y,t\}} = \langle (x, y, t) \rangle$, где $x \neq 0$ или $y \neq 0$, каждая из которых изоморфна группе $\mathbb{Z}_p$, при этом

$$\mathcal{H}_{\{2;x,y,t\}} = \mathcal{H}_{\{2;\hat{x},\hat{y},\hat{t}\}} \Leftrightarrow \exists k \in \{1, 2, \dots, p\}:$$

$$(\hat{x}, \hat{y}, \hat{t}) = \left(kx, ky, kt + \frac{(k-1)k}{2}xy \right).$$

Различных подгрупп этой серии имеется $p^2 + p$;

3) подгруппа $\mathcal{H}_3 = \{(x, 0, t) \mid x, t \in \mathbb{F}_p\}$, которая разлагается в прямую сумму $\mathcal{H}_1 \oplus \mathcal{H}_{\{2;1,0,0\}}$ и изоморфна группе $\mathbb{Z}_p \oplus \mathbb{Z}_p$;

4) серия подгрупп $\mathcal{H}_{\{4;i\}} = \{(iy, y, t) \mid y, t \in \mathbb{F}_p\}$, $i \in \mathbb{F}_p$, каждая из которых разлагается в прямую сумму $\mathcal{H}_1 \oplus \mathcal{H}_{\{2;i,1,0\}}$ и изоморфна группе $\mathbb{Z}_p \oplus \mathbb{Z}_p$, при этом все подгруппы этой серии различны.

Других собственных подгрупп группы Гейзенберга нет.

Доказательство. 1. Рассмотрим подмножество $\mathcal{H}_1$ группы $\mathbb{H}(\mathbb{F}_p)$. Нетрудно показать, что $\mathcal{H}_1$ является подгруппой группы Гейзенберга $\mathbb{H}(\mathbb{F}_p)$ и отображение $\varphi: \mathcal{H}_1 \rightarrow \mathbb{Z}_p$, заданное формулой $\varphi((0, 0, t)) = t$, является изоморфизмом.

Подгруппа $\mathcal{H}_1$ является центром группы Гейзенберга – множеством элементов группы, которые коммутируют со всеми ее элементами, т.е.

$$\mathcal{H}_1 = \{z \in \mathbb{H}(\mathbb{F}_p) \mid \forall g \in \mathbb{H}(\mathbb{F}_p) \, zg = gz\}.$$

Действительно, найдем все такие $z = (x, y, t)$, чтобы для любых $g = (\hat{x}, \hat{y}, \hat{t})$ выполнялось равенство $zg = gz$. Преобразуем последнее равенство:

$$g^{-1}zg = z,$$

$$\begin{aligned} (-\hat{x}, -\hat{y}, \hat{x}\hat{y} - \hat{t}) \cdot (x, y, t) \cdot (\hat{x}, \hat{y}, \hat{t}) &= \\ = (x, y, t + x\hat{y} - \hat{x}\hat{y}) &= (x, y, t). \end{aligned}$$

Значит, для любых $\hat{x}, \hat{y}, \hat{t} \in \mathbb{F}_p$ должно выполняться равенство $t = t + x\hat{y} - \hat{x}\hat{y}$, т.е. $x\hat{y} = \hat{x}\hat{y}$. При $\hat{x} = 0$, $\hat{y} = 1$ получим, что $x = 0$, а при $\hat{x} = 1$, $\hat{y} = 0$ получим, что $y = 0$. Следовательно, $x = y = 0$, $t \in \mathbb{F}_p$, и подгруппа $\mathcal{H}_1$ является центром группы Гейзенберга.

2. Рассмотрим элемент группы $\mathbf{a} = (x, y, t) \in \mathbb{H}(\mathbb{F}_p)$, где $x \neq 0$ или $y \neq 0$, и подгруппу $\mathcal{H}_{\{2;x,y,t\}}$, порожденную этим элементом. Индукцией доказывается, что

$$\mathbf{a}^k = (kx, ky, kt + \frac{(k-1)k}{2}xy). \quad (1)$$

Минимальное k , для которого $\mathbf{a}^k$ является единичным элементом группы Гейзенберга, равно p . Действительно, так как $x \neq 0$ или $y \neq 0$, то минимальное k , для которого kx и ky будут равны нулю, равно p . Следовательно, порядок подгруппы $\mathcal{H}_{\{2;x,y,t\}}$ равен p . Так как эта подгруппа является циклической группой, она изоморфна $\mathbb{Z}_p$.

Докажем импликацию

$$\mathcal{H}_{\{2;x,y,t\}} = \mathcal{H}_{\{2;\hat{x},\hat{y},\hat{t}\}} \Rightarrow \exists k \in \{1, 2, \dots, p\}:$$

$$(\hat{x}, \hat{y}, \hat{t}) = (kx, ky, kt + \frac{(k-1)k}{2}xy).$$

Если $\mathcal{H}_{\{2;x,y,t\}} = \mathcal{H}_{\{2;\hat{x},\hat{y},\hat{t}\}}$, то $(\hat{x}, \hat{y}, \hat{t}) \in \mathcal{H}_{\{2;x,y,t\}}$. Из (1) следует, что существует $k \in \{1, 2, \dots, p\}$ такое, что $(\hat{x}, \hat{y}, \hat{t}) = (kx, ky, kt + \frac{(k-1)k}{2}xy)$. Таким образом, импликация доказана.

Вясним, сколько всего различных подгрупп такого типа. Все подгруппы этой серии равномощны – в каждой p элементов, причем все различные подгруппы пересекаются только по единичному элементу. Действительно, предположим, что найдутся две подгруппы, у которых есть общий элемент, отличный от единичного. Но так как $\mathcal{H}_{\{2;x,y,t\}}$ – это циклическая группа порядка p и p – простое число, то у нее есть $p - 1$ порождающих элементов – все, кроме единичного. Тогда любые две подгруппы, у которых есть общий элемент, отличный от единичного, будут совпадать.

Теперь докажем импликацию

$$\mathcal{H}_{\{2;x,y,t\}} = \mathcal{H}_{\{2;\hat{x},\hat{y},\hat{t}\}} \Leftarrow \exists k \in \{1, 2, \dots, p\}:$$

$$(\hat{x}, \hat{y}, \hat{t}) = (kx, ky, kt + \frac{(k-1)k}{2}xy).$$

Рассмотрим два элемента группы Гейзенберга:

$$\mathbf{a} = (x, y, t), \quad \mathbf{b} = (\hat{x}, \hat{y}, \hat{t}) = (kx, ky, kt + \frac{(k-1)k}{2}xy).$$

Из формулы (1) следует, что $\mathbf{b} \in \mathcal{H}_{\{2;x,y,t\}}$, а так как в группе $\mathcal{H}_{\{2;x,y,t\}}$ все элементы, кроме единичного, являются порождающими, то подгруппа $\mathcal{H}_{\{2;\hat{x},\hat{y},\hat{t}\}}$, порожденная элементом $\mathbf{b}$, совпадает с $\mathcal{H}_{\{2;x,y,t\}}$. Импликация доказана.

Количество элементов, которые порождают группы вида $\mathcal{H}_{\{2;x,y,t\}}$, равно $p^3 - p$ (из всех элементов группы Гейзенберга вычитаем те, у которых $x = 0$ и $y = 0$). Чтобы найти количество различных подгрупп, нужно разделить количество всех возможных порождающих элементов на количество порождающих элементов в одной подгруппе. Тогда количество различных подгрупп будет равно $(p^3 - p)/(p - 1) = p^2 + p$.

3. Рассмотрим подмножество $\mathcal{H}_3$ группы $\mathbb{H}(\mathbb{F}_p)$. Нетрудно показать, что $\mathcal{H}_3$ является подгруппой группы Гейзенберга $\mathbb{H}(\mathbb{F}_p)$ и отображение $\varphi: \mathcal{H}_3 \rightarrow \mathbb{Z}_p \oplus \mathbb{Z}_p$, заданное формулой $\varphi((x, 0, t)) = (x, t)$, является изоморфизмом.

Подгруппа $\mathcal{H}_3$ разлагается в прямую сумму $\mathcal{H}_1 \oplus \mathcal{H}_{\{2;1,0,0\}}$. Действительно, любой элемент подгруппы можно представить в виде $(0, 0, t) \times (x, 0, 0) = (x, 0, t) \in \mathcal{H}_3$, где $(0, 0, t) \in \mathcal{H}_1$, $(x, 0, 0) \in \mathcal{H}_{\{2;1,0,0\}}$.

4. Рассмотрим подмножество $\mathcal{H}_{\{4;i\}}$ группы $\mathbb{H}(\mathbb{F}_p)$. Нетрудно показать, что $\mathcal{H}_{\{4;i\}}$ является подгруппой группы Гейзенберга $\mathbb{H}(\mathbb{F}_p)$. Покажем, что отображение $\varphi: \mathcal{H}_{\{4;i\}} \rightarrow \mathbb{Z}_p \oplus \mathbb{Z}_p$, заданное формулой $\varphi((iy, y, t)) = (y, t - i\frac{y(y-1)}{2})$, является изоморфизмом. Сначала проверим, что φ является биективным отображением. Зададим отображение $\psi: \mathbb{Z}_p \oplus \mathbb{Z}_p \rightarrow \mathcal{H}_{\{4;i\}}$ формулой

$$\psi((y, t)) = (iy, y, t + i\frac{y(y-1)}{2}).$$

Отображение ψ является обратным к φ . Действительно,

$$(\psi \circ \varphi)((iy, y, t)) = \psi((y, t - i\frac{y(y-1)}{2})) = (iy, y, t);$$

$$(\varphi \circ \psi)((y, t)) = \varphi((iy, y, t + i\frac{y(y-1)}{2})) = (y, t).$$

Покажем, что φ является гомоморфизмом:

$$\begin{aligned} \varphi((iy, y, t)) + \varphi((i\hat{y}, \hat{y}, \hat{t})) &= \\ &= (iy, y, t + i\frac{y(y-1)}{2}) + (i\hat{y}, \hat{y}, \hat{t} + i\frac{\hat{y}(\hat{y}-1)}{2}) = \\ &= (i(y + \hat{y}), y + \hat{y}, t + \hat{t} + iy\hat{y} - i\frac{(y+\hat{y})(y+\hat{y}-1)}{2}) = \\ &= \varphi((i(y + \hat{y}), y + \hat{y}, t + \hat{t} + iy\hat{y})) = \\ &= \varphi((iy, y, t) \cdot (i\hat{y}, \hat{y}, \hat{t})). \end{aligned}$$

Следовательно, φ – изоморфизм.

Подгруппа $\mathcal{H}_{\{4;i\}}$ разлагается в прямую сумму $\mathcal{H}_1 \oplus \mathcal{H}_{\{2;i,1,0\}}$. Действительно, пусть

$$(i, 1, 0)^{\tilde{y}} = (iy, y, i\frac{y(y-1)}{2}) \in \mathcal{H}_{\{2;i,1,0\}},$$

$$(0, 0, t - i\frac{y(y-1)}{2}) \in \mathcal{H}_1,$$

где $\tilde{y}$ принадлежит множеству $\{0, 1, \dots, p-1\}$. Как элемент этого множества, он формально совпадает с $y \in \mathbb{F}_p$. Следовательно,

$$\begin{aligned} (0, 0, t - i\frac{y(y-1)}{2}) \cdot (iy, y, i\frac{y(y-1)}{2}) &= \\ &= (iy, y, t) \in \mathcal{H}_{\{4;i\}}. \end{aligned}$$

Все подгруппы из серии $\mathcal{H}_{\{4;i\}}$ различны для различных i . Действительно, предположим, что существуют $i, j \in \mathbb{F}_p$ такие, что $\mathcal{H}_{\{4;i\}} = \mathcal{H}_{\{4;j\}}$. Тогда найдется такой элемент $\mathbf{a} = (x, y, t)$, $\mathbf{a} \in \mathcal{H}_{\{4;i\}}$, $\mathbf{a} \in \mathcal{H}_{\{4;j\}}$, у которого $y \neq 0$, причем $x = iy$, $x = jy$, значит, $i = j$.

5. Докажем теперь, что других подгрупп, кроме описанных выше, у группы Гейзенберга нет. Рассмотрим произвольную собственную подгруппу $\mathcal{H}$ группы Гейзенберга. Так как порядок подгруппы всегда делит порядок группы, а порядок группы Гейзенберга равен p^3 , то порядок собственной подгруппы группы Гейзенберга равен p или p^2 .

Рассмотрим случай, когда порядок подгруппы $\mathcal{H}$ равен p . Так как порядок любого элемента делит порядок группы, а p – простое число, найдется такое $\mathbf{a} \in \mathcal{H}$, порядок которого равен p . Это значит, что для любого $k \in \{1, 2, \dots, p\}$ $\mathbf{a}^k \in \mathcal{H}$, причем все $\mathbf{a}^k$ различны и $\mathbf{a}^p$ равен единичному элементу. А так как порядок подгруппы равен p , то других элементов в подгруппе нет. Тогда если для элемента $\mathbf{a} = (x, y, t)$ верно, что $x = 0$ и $y = 0$, то $\mathcal{H} = \mathcal{H}_1$, а если $x \neq 0$ или $y \neq 0$, то $\mathcal{H} = \mathcal{H}_{\{2; x, y, t\}}$.

Теперь рассмотрим случай, когда порядок подгруппы $\mathcal{H}$ равен p^2 . Возьмем некоторый элемент $\mathbf{a} = (x, y, t) \in \mathcal{H}$, не равный единичному элементу. Его порядок не может быть равен p^2 , так как для любого элемента $\mathbf{a} \in \mathcal{H}$ справедливо равенство $\mathbf{a}^p = x, py, pt + \frac{(p-1)p}{2}xy = (0, 0, 0) = \mathbf{e}$. Значит, порядок элемента $\mathbf{a}$, не равного единичному элементу, равен p . Отметим, что для любого $k \in \{1, 2, \dots, p\}$ имеет место $\mathbf{a}^k \in \mathcal{H}$, причем все $\mathbf{a}^k$ различны. Возьмем еще один элемент $\mathbf{b} = (\tilde{x}, \tilde{y}, \tilde{t}) \in \mathcal{H}$, не совпадающий ни с каким $\mathbf{a}^k$ для любого $k \in \{1, 2, \dots, p\}$. Значит, элемент $\mathbf{b}$ также не равен единичному, и для любого $k \in \{1, 2, \dots, p-1\}$ верно: $\tilde{x} \neq kx$, $\tilde{y} \neq ky$, $\tilde{t} \neq kt + \frac{(k-1)k}{2}xy$. Такой элемент $\mathbf{b}$ найдется, так как порядок подгруппы равен p^2 , а порядок элемента $\mathbf{a}$ равен p . Нетрудно показать, что порядок элемента $\mathbf{b}$ равен p , и для любого $m \in \{1, 2, \dots, p\}$ имеет место $\mathbf{b}^m \in \mathcal{H}$, причем все $\mathbf{b}^m$ различны и не совпадают ни с какими $\mathbf{a}^k$ для $k \in \{1, 2, \dots, p-1\}$. Рассмотрим множество $X = \{\mathbf{a}^k \cdot \mathbf{b}^m \mid k, m \in \{1, 2, \dots, p\}\} \subset \mathcal{H}$. Все элементы множества X различны. Действительно, пусть $\mathbf{a}^k \cdot \mathbf{b}^m = \mathbf{a}^{\tilde{k}} \cdot \mathbf{b}^{\tilde{m}}$. Умножим справа на $\mathbf{b}^{-\tilde{m}}$, слева – на $\mathbf{a}^{-\tilde{k}}$. Получим $\mathbf{b}^{m-\tilde{m}} = \mathbf{a}^{\tilde{k}-k}$. Так как все $\mathbf{b}^m$ не совпадают ни с какими $\mathbf{a}^k$, кроме $\mathbf{a}^p$, то $m - \tilde{m} = \tilde{k} - k = 0 \Rightarrow m = \tilde{m}, k = \tilde{k}$. Значит, во множестве X ровно p^2 элементов и $X = \mathcal{H}$, т.е.

$$\mathcal{H} = \{\mathbf{a}^k \mathbf{b}^m \mid k, m \in \{1, 2, \dots, p\}\}. \quad (2)$$

Так как $\mathbf{ba} \in \mathcal{H}$, то $\mathbf{ba} = \mathbf{a}^k \mathbf{b}^m$ для некоторых $k, m \in \{1, 2, \dots, p\}$. Тогда

$$\begin{aligned} \mathbf{ba} &= (\tilde{x}, \tilde{y}, \tilde{t}) \cdot (x, y, t) = (x + \tilde{x}, y + \tilde{y}, t + \tilde{t} + \tilde{x}y), \\ \mathbf{a}^k \mathbf{b}^m &= \left(kx, ky, kt + \frac{(k-1)k}{2}xy\right) \times \\ &\times (m\tilde{x}, m\tilde{y}, m\tilde{t} + \frac{(m-1)m}{2}\tilde{x}\tilde{y}) = \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &= \left(kx + m\tilde{x}, ky + m\tilde{y}, kt + m\tilde{t} + \frac{(k-1)k}{2}xy + \right. \\ &\left. + \frac{(m-1)m}{2}\tilde{x}\tilde{y} + kmx\tilde{y}\right). \end{aligned}$$

Таким образом, имеет место следующая система уравнений:

$$\begin{cases} (k-1)x + (m-1)\tilde{x} = 0, \\ (k-1)y + (m-1)\tilde{y} = 0, \\ (k-1)t + (m-1)\tilde{t} - \tilde{x}y + \frac{(k-1)k}{2}xy + \\ + \frac{(m-1)m}{2}\tilde{x}\tilde{y} + kmx\tilde{y} = 0. \end{cases} \quad (3)$$

Предположим, что $m-1 = 0$. В силу того, что $k \in \{1, 2, \dots, p\}$, из первого уравнения получаем, что либо $k-1 = 0$, либо $x = 0$. Из второго уравнения – либо $k-1 = 0$, либо $y = 0$. Если предположим, что $k-1 \neq 0$, тогда $x = 0$, $y = 0$, и третье уравнение примет вид $(k-1)t = 0$.

В силу того, что элемент $\mathbf{a} = (x, y, t)$ не равен единичному элементу, получаем, что $k-1 = 0$. Таким образом, $k = 1$, $m = 1$ и, следовательно,

$$\mathbf{ba} = \mathbf{ab}.$$

Теперь предположим, что $m-1 \neq 0$. Тогда систему уравнений (3) можно переписать в виде

$$\begin{cases} \tilde{x} = -\frac{(k-1)}{(m-1)}x, \\ \tilde{y} = -\frac{(k-1)}{(m-1)}y, \\ \tilde{t} = -\frac{k-1}{m-1}t + \frac{1}{m-1}\left(\tilde{x}y - \frac{(k-1)k}{2}xy - \right. \\ \left. - \frac{(m-1)m}{2}\tilde{x}\tilde{y} - kmx\tilde{y}\right). \end{cases} \quad (4)$$

В этом случае $k-1$ не может равняться нулю, так как тогда из системы (4) получим, что $\tilde{x} = 0$, $\tilde{y} = 0$, $\tilde{t} = 0$, а это противоречит тому, что элемент $\mathbf{b}$ не равен единичному элементу. Рассмотрим третье уравнение системы (4), из которого следует

$$\tilde{t} = -\frac{k-1}{m-1}t + \frac{\left(-\frac{k-1}{m-1}\right)\left(-\frac{k-1}{m-1}-1\right)}{2}xy.$$

Если $l = -\frac{(k-1)}{(m-1)}$, то система (4) примет вид

$$\begin{cases} \tilde{x} = lx \\ \tilde{y} = ly \\ \tilde{t} = lt + \frac{l(l-1)}{2}xy \end{cases}.$$

Это противоречит тому, что по условию элемент $\mathbf{b}$ не совпадает ни с каким $\mathbf{a}^j$ для любого $j \in \{1, 2, \dots, p\}$. Следовательно, предположение о том, что $m-1 \neq 0$, неверно. Таким образом, $m = k = 1$ и, как показано выше, $\mathbf{ba} = \mathbf{ab}$. Из этого следует, что подгруппа $\mathcal{H}$ абелева.

Остается показать, что подгруппа $\mathcal{H}$ совпадает либо с $\mathcal{H}_3$, либо с $\mathcal{H}_{\{4; i\}}$. Из третьего уравнения системы (3) при $k = 1$, $m = 1$ получается, что

$$x\tilde{y} = \tilde{x}y. \quad (5)$$

Рассмотрим несколько случаев.

i. $y = 0$, $\tilde{y} = 0$. Тогда $\mathbf{a} = (x, 0, t) \in \mathcal{H}_3$, $\mathbf{b} = (\tilde{x}, 0, \tilde{t}) \in \mathcal{H}_3$. В силу (2) подгруппа $\mathcal{H}$ вложена в подгруппу $\mathcal{H}_3$. Так как их мощности совпадают, то $\mathcal{H} = \mathcal{H}_3$.

ii. $y = 0$, $\tilde{y} \neq 0$. Тогда из (5) $x = \frac{\tilde{x}}{\tilde{y}}y = 0$. Из условия $\tilde{y} \neq 0$ вытекает, что $\tilde{x} = i\tilde{y}$ для некоторого $i \in \mathbb{F}_p$. Тогда элементы $\mathbf{a}$ и $\mathbf{b}$ представимы в виде $\mathbf{a} = (0, 0, t) \in \mathcal{H}_{\{4;i\}}$, $\mathbf{b} = (i\tilde{y}, \tilde{y}, \tilde{t}) \in \mathcal{H}_{\{4;i\}}$, и подгруппа $\mathcal{H}$ вложена в подгруппу $\mathcal{H}_{\{4;i\}}$. Аналогично случаю 1 получаем, что $\mathcal{H} = \mathcal{H}_{\{4;i\}}$.

iii. $y \neq 0$, $\tilde{y} = 0$. Тогда из (5) $\tilde{x} = \frac{x}{y}\tilde{y} = 0$. Из условия $y \neq 0$ вытекает, что $x = iy$ для некоторого $i \in \mathbb{F}_p$. Тогда элементы $\mathbf{a}$ и $\mathbf{b}$ представимы в виде $\mathbf{a} = (iy, y, t) \in \mathcal{H}_{\{4;i\}}$, $\mathbf{b} = (0, 0, \tilde{t}) \in \mathcal{H}_{\{4;i\}}$, и подгруппа $\mathcal{H}$ вложена в подгруппу $\mathcal{H}_{\{4;i\}}$. Аналогично случаю 1 получаем, что $\mathcal{H} = \mathcal{H}_{\{4;i\}}$.

iv. $y \neq 0$, $\tilde{y} \neq 0$. Тогда из (5) $x = \frac{\tilde{x}}{\tilde{y}}y$. Обозначим $i = \frac{\tilde{x}}{\tilde{y}}$. Тогда соотношение (5) примет вид $iy\tilde{y} = \tilde{x}y$. Так как $y \neq 0$, можно разделить левую и правую части на y : $\tilde{x} = i\tilde{y}$. Тогда элементы $\mathbf{a}$ и $\mathbf{b}$ представимы в виде $\mathbf{a} = (iy, y, t) \in \mathcal{H}_{\{4;i\}}$, $\mathbf{b} = (i\tilde{y}, \tilde{y}, \tilde{t}) \in \mathcal{H}_{\{4;i\}}$, и подгруппа $\mathcal{H}$ вложена в подгруппу $\mathcal{H}_{\{4;i\}}$. Аналогично случаю 1 получаем, что $\mathcal{H} = \mathcal{H}_{\{4;i\}}$.

Таким образом, подгруппа $\mathcal{H}$ совпадает либо с подгруппой $\mathcal{H}_3$, либо с подгруппой $\mathcal{H}_{\{4;i\}}$, т.е. собственных подгрупп группы Гейзенберга, отличных от $\mathcal{H}_1$, $\mathcal{H}_{\{2;x,y,t\}}$, $\mathcal{H}_3$, $\mathcal{H}_{\{4;i\}}$, нет. ■

Замечание. Отметим, что хотя сама группа Гейзенберга $\mathbb{H}(\mathbb{F}_p)$ абелевой не является, все ее собственные подгруппы абелевы.

Структура факторгрупп

Следующая теорема проверяется прямыми выкладками.

Теорема 2. Подгруппы $\mathcal{H}_1$, $\mathcal{H}_3$ и $\mathcal{H}_{\{4;i\}}$ являются нормальными подгруппами, подгруппы вида $\mathcal{H}_{\{2;x,y,t\}}$ не являются нормальными.

Рассмотрим факторгруппы группы $\mathbb{H}(\mathbb{F}_p)$.

Теорема 3. Рассмотрим в группе Гейзенберга $\mathbb{H}(\mathbb{F}_p)$ нормальные подгруппы $\mathcal{H}_1$, $\mathcal{H}_3$, $\mathcal{H}_{\{4;i\}}$, где $i \in \mathbb{F}_p$. Тогда:

1. Факторгруппа $\mathbb{H}(\mathbb{F}_p)/\mathcal{H}_1$ изоморфна $\mathbb{Z}_p \oplus \mathbb{Z}_p$.
2. Факторгруппа $\mathbb{H}(\mathbb{F}_p)/\mathcal{H}_{\{4;i\}}$, где $i \in \mathbb{F}_p$, изоморфна $\mathbb{Z}_p$.
3. Факторгруппа $\mathbb{H}(\mathbb{F}_p)/\mathcal{H}_3$ изоморфна $\mathbb{Z}_p$.

Доказательство.

1. Рассмотрим факторгруппу $\mathbb{H}(\mathbb{F}_p)/\mathcal{H}_1$. Пусть $\mathbf{a} = (x, y, t) \in \mathbb{H}(\mathbb{F}_p)$. Тогда $\mathbf{a}\mathcal{H}_1 = \{(x, y, t) \cdot (0, 0, \hat{t}) \mid \hat{t} \in \mathbb{F}_p\} = \{(x, y, \hat{t}) \mid \hat{t} \in \mathbb{F}_p\}$.

Покажем, что факторгруппа $\mathbb{H}(\mathbb{F}_p)/\mathcal{H}_1$ изоморфна $\mathbb{Z}_p \oplus \mathbb{Z}_p$. Отображение $\varphi: \mathbb{H}(\mathbb{F}_p)/\mathcal{H}_1 \rightarrow \mathbb{Z}_p \oplus \mathbb{Z}_p$ корректно определяется следующим образом: $\varphi(\mathbf{a}\mathcal{H}_1) = \varphi(\{(x, y, \hat{t}) \mid \hat{t} \in \mathbb{F}_p\}) = (x, y)$.

Ясно, что φ – биективное отображение.

$$\varphi^{-1}((x, y)) = \{(x, y, \hat{t}), \hat{t} \in \mathbb{F}_p\}.$$

Покажем, что φ является гомоморфизмом. Пусть $\mathbf{a} = (x, y, t)$, $\mathbf{b} = (\tilde{x}, \tilde{y}, \tilde{t}) \in \mathbb{H}(\mathbb{F}_p)$. Тогда $\varphi(\mathbf{a}\mathcal{H}_1) + \varphi(\mathbf{b}\mathcal{H}_1) = (x, y) + (\tilde{x}, \tilde{y}) = (x + \tilde{x}, y + \tilde{y}) = \varphi(\{(x + \tilde{x}, y + \tilde{y}, \hat{t}) \mid \hat{t} \in \mathbb{F}_p\}) = \varphi(\mathbf{ab}\mathcal{H}_1)$.

Итак, φ – изоморфизм, а факторгруппа $\mathbb{H}(\mathbb{F}_p)/\mathcal{H}_1$ изоморфна $\mathbb{Z}_p \oplus \mathbb{Z}_p$.

2. Рассмотрим факторгруппу $\mathbb{H}(\mathbb{F}_p)/\mathcal{H}_{\{4;i\}}$, где $i \in \mathbb{F}_p$. Пусть $\mathbf{a} = (x, y, t) \in \mathbb{H}(\mathbb{F}_p)$. Тогда $\mathbf{a}\mathcal{H}_{\{4;i\}} = \{(x, y, t) \cdot (i\hat{y}, \hat{y}, \hat{t}) \mid \hat{y}, \hat{t} \in \mathbb{F}_p\} = \{(x + i\hat{y}, y + \hat{y}, \hat{t}) \mid \hat{y}, \hat{t} \in \mathbb{F}_p\}$.

Заменим в последней формуле $\hat{y} + y$ на $\hat{y}$. Тогда $\mathbf{a}\mathcal{H}_{\{4;i\}} = \{(x - iy + i\hat{y}, \hat{y}, \hat{t}) \mid \hat{y}, \hat{t} \in \mathbb{F}_p\}$. Получаем, что порядок факторгруппы равен p , так как различных значений $x - iy + i\hat{y}$ всего p . Факторгруппа является абелевой, так как $\mathbf{a}\mathcal{H}_{\{4;i\}} \cdot \mathbf{b}\mathcal{H}_{\{4;i\}} = \mathbf{ab}\mathcal{H}_{\{4;i\}} = \mathbf{ba}\mathcal{H}_{\{4;i\}} = \mathbf{b}\mathcal{H}_{\{4;i\}} \cdot \mathbf{a}\mathcal{H}_{\{4;i\}}$ в силу свойств поля $\mathbb{F}_p$. Но произвольная абелева группа порядка p изоморфна $\mathbb{Z}_p$. Следовательно, факторгруппа $\mathbb{H}(\mathbb{F}_p)/\mathcal{H}_{\{4;i\}}$ изоморфна $\mathbb{Z}_p$.

Аналогично рассматривается факторгруппа $\mathbb{H}(\mathbb{F}_p)/\mathcal{H}_3$. ■

Заключение

В работе для конечной группы Гейзенберга над простым полем Галуа найдены все собственные подгруппы. Определено, какие из них нормальные. Вычислены соответствующие факторгруппы. Развитием этих результатов может быть решение задачи исследования подгрупп многомерных групп Гейзенберга над произвольным полем Галуа. На циклических подгруппах группы Гейзенберга можно моделировать циклические коды, в частности коды Риды – Соломона. Использование индуцированных кодов позволяет переносить эти коды на группу Гейзенберга, что дает возможность строить новые кодовые криптосистемы, стойкость которых обсуждается в [6].

Литература

1. Шнайер Б. Прикладная криптография. Протоколы, алгоритмы, исходные тексты на языке си. М.: Триумф, 2002. 815 с.
2. Shor P.W. Algorithms for quantum computation: Discrete logarithms and factoring // *Proceedings of the 35th Annual Symposium on Foundations of Computer Science*. Los Alamitos, CA: IEEE Computer Society Press, 1994. P. 124–134.
3. McEliece R.J. A Public-Key Cryptosystem Based on Algebraic Coding Theory // *JPL Deep Space Network Progress Report*. 1978. Vol. 42. P. 114–116.
4. Niederreiter H. Knapsack-Type Cryptosystem and Algebraic Coding Theory // *Problems of Control and Information Theory*. 1986. Vol. 15. P. 159–166.
5. Сидельников В.М. Открытое шифрование на основе двоичных кодов Риды – Маллера // *Дискретная математика*. 1994. Т. 6, вып. 2. С. 3–20.
6. Деундяк В.М., Косолапов Ю.В. Криптосистема на индуцированных групповых кодах // *Моделирование и анализ информ. систем*. 2016. Т. 23, вып. 2. С. 137–152.
7. Веденев К.В., Деундяк В.М. Коды в диэдральной групповой алгебре // *Моделирование и анализ информ. систем*. 2018. Т. 25, вып. 2. С. 232–245.
8. Веденев К.В., Деундяк В.М. Решётки подгрупп и кодов на диэдральной группе // *Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки*. 2018. № 3. С. 18–24.
9. Terras A. *Fourier Analysis on Finite Groups and Applications*. Cambridge: Cambridge University Press, 2001. 442 p.
10. Деундяк В.М., Леонов Д.А. Быстрое преобразование Фурье и решение сверточных уравнений на группе Гейзенберга над простым полем Галуа // *Экол. вестн. науч. центров ЧЭС*. 2016. № 2. С. 46–53.

References

1. Shnaier B. *Prikladnaya kriptografiya. Protokoly, algoritmy, iskhodnye teksty na yazyke si* [Applied cryptography. Protocols, algorithms and source code in C]. Moscow: Triumf, 2002, 815 p.
2. Shor P.W. Algorithms for quantum computation: Discrete logarithms and factoring. *Proceedings of the 35th Annual Symposium on Foundations of Computer Science*. Los Alamitos, CA: IEEE Computer Society Press, 1994, pp. 124-134.
3. McEliece R.J. A Public-Key Cryptosystem Based on Algebraic Coding Theory. *JPL Deep Space Network Progress Report*. 1978, vol. 42, pp. 114-116.
4. Niederreiter H. Knapsack-Type Cryptosystem and Algebraic Coding Theory. *Problems of Control and Information Theory*. 1986, vol. 15, pp. 159-166.
5. Sidel'nikov V.M. Otkrytoe shifrovaniye na osnove dvoichnykh kodov Rida – Mallera [Open coding based on Reed-Muller binary codes]. *Diskretnaya matematika*. 1994, vol. 6, Iss. 2, pp. 3-20.
6. Deundyak V.M., Kosolapov Yu.V. Kriptosistema na indutsirovannykh gruppovykh kodakh [Cryptosystem Based on Induced Group Codes]. *Modelirovaniye i analiz inform. sistem*. 2016, vol. 23, Iss. 2, pp. 137-152.
7. Vedenev K.V., Deundyak V.M. Kody v die-dral'noi gruppovoi algebre [Codes in dihedral group algebra]. *Modelirovaniye i analiz inform. sistem*. 2018, vol. 25, Iss. 2, pp. 232-245.
8. Vedenev K.V., Deundyak V.M. Reshetki pod-grupp i kodov na diedral'noi gruppe [The lattices of subgroups and codes over dihedral group]. *Izv. vuzov. Sev.-Kavk. region. Estestv. nauki*. 2018, No. 3, pp. 18-24.
9. Terras A. *Fourier Analysis on Finite Groups and Applications*. Cambridge: Cambridge University Press, 2001, 442 p.
10. Deundyak V.M., Leonov D.A. Bystroe preobra-zovaniye Fur'e i resheniye svertochnykh uravnenii na gruppe Geizenberga nad prostym poley Galua [Fast Fourier transform and solution of convolution equations on the Heisenberg group over the simple Galois field]. *Ekol. vestn. nauch. tsentrov ChES*. 2016, No. 2, pp. 46-53.

УДК 517.955.8

DOI 10.23683/0321-3005-2018-4-18-24

МОНОТОННАЯ НЕУСТОЙЧИВОСТЬ В СИСТЕМЕ ФИТЦХЬЮ – НАГУМО С ДИФФУЗИЕЙ

© 2018 г. А.В. Казарников¹, С.В. Ревина^{1,2}

¹Южный математический институт – филиал Владикавказского научного центра РАН, Владикавказ, Россия,

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

MONOTONOUS INSTABILITY IN FITZHUGH-NAGUMO REACTION-DIFFUSION SYSTEM

A.V. Kazarnikov¹, S.V. Revina^{1,2}

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

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

Казарников Алексей Владимирович – младший научный сотрудник, Южный математический институт Владикавказского научного центра Российской академии наук, пр. Маркуса, 22, г. Владикавказ, РСО – Алания, 362000, Россия, e-mail: kazarnikov@gmail.com

Aleksei V. Kazarnikov - Junior Researcher, Southern Mathematical Institute – Branch, Vladikavkaz Scientific Center, Russian Academy of Sciences, Marcusa St., 22, Vladikavkaz, RNO - Alania, 362027, Russia, e-mail: kazarnikov@gmail.com

Ревина Светлана Васильевна – кандидат физико-математических наук, доцент, Институт математики, механики и компьютерных наук имени И.И. Воровича, Южный федеральный университет, ул. Мильчакова, 8а, г. Ростов-на-Дону, 344090, Россия; научный сотрудник, Южный математический институт – филиал Владикавказского научного центра Российской академии наук, пр. Маркуса, 22, г. Владикавказ, РСО–Алания, 362000, e-mail: svrevina@srfedu.ru

Svetlana V. Revina - Candidate of Physics and Mathematics, Associate Professor, Vorovich Institute of Mathematics, Mechanics and Computer Science, Southern Federal University, Milchakova St., 8a, Rostov-on-Don, 344090, Russia; Researcher, Southern Mathematic Institute - Branch, Vladikavkaz Scientific Center, Russian Academy of Sciences, Marcusa St., 22, Vladikavkaz, RNO - Alania, 362027, Russia, e-mail: svrevina@srfedu.ru

Уравнения реакция – диффузия служат для описания математических моделей явлений различной природы. В настоящей работе рассматривается система Фитцхью – Нагумо с диффузией в случае одной пространственной переменной и краевых условий Неймана. Эта модель представляет собой пространственно-распределенный аналог двухкомпонентной редукции модели Ходжкина – Хаксли распространения нервного импульса в гигантском аксоне кальмара и является классической моделью возбудимой среды. Цель настоящей работы – исследование бифуркационного поведения стационарных решений системы, ответвляющихся от тривиального (нулевого) решения в результате монотонной потери устойчивости. Найдены критические значения управляющего параметра, отвечающие монотонной и колебательной потере устойчивости. Методом Ляпунова – Шмидта в форме, развитой в работах В.И. Юдовича, явно найдены первые члены разложения вторичных стационарных решений в степенные ряды. Показано, что в системе происходит мягкая потеря устойчивости. Численно исследовано разрушение вторичных стационарных решений при отходе управляющего параметра в область надкритичности. Система аппроксимировалась методом прямых на равномерной сетке, её численное интегрирование проводилось методом Дормана – Принса. Обнаружено, что с ростом значений надкритичности вторичные решения сменяются тьюринговыми структурами.

Ключевые слова: система Фитцхью – Нагумо, метод Ляпунова – Шмидта, монотонная неустойчивость, стационарные решения, асимптотический анализ, системы реакция – диффузия, формирование структур, бифуркации положений равновесия.

The reaction-diffusion equations are widely used as mathematical models of phenomena of a different nature. In this paper we consider the FitzHugh-Nagumo reaction-diffusion system in the case of one spatial variable and Neumann boundary conditions. This model is a spatially distributed analog of the two-component reduction of the Hodgkin-Huxley model of nerve impulse

propagation in the giant axon of squid and is a classical model of an excitable medium. The aim of this paper is to study the bifurcation behavior of stationary solutions of the system branching off from a trivial (zero) solution as a result of a monotonic loss of stability. Critical values of the control parameter corresponding to monotonic and oscillatory loss of stability are found. By applying Lyapunov-Schmidt reduction in the form developed in the works of V.I. Yudovich, the first terms in the expansion of the secondary stationary solutions into power series are explicitly found. It is shown that there is a soft loss of stability in the system. The destruction of secondary stationary solutions due to the growth of control parameter values is numerically studied. The system was approximated by the method of lines on a uniform grid, the numerical integration of the system of equations for the method of lines was carried out by the Dormand-Prince method. It is found that with increasing values of supercriticality, secondary solutions are replaced by Turing patterns.

Keywords: FitzHugh-Nagumo system, Lyapunov-Schmidt reduction, monotonic instability, stationary solutions, asymptotic analysis, reaction-diffusion systems, pattern formation, steady state bifurcations.

Постановка задачи

Системы реакция – диффузия находят широкое применение при моделировании химических реакций [1], описании процессов роста и развития биологических популяций [2, 3], исследовании динамики искусственных нейронных сетей [4] и др. В настоящей работе рассматривается система Фитцхью – Нагумо с диффузией

$$\begin{aligned} v_t &= v_1 v_{xx} + w - \alpha v; \\ w_t &= v_2 w_{xx} - v + \mu w - w^3, \end{aligned} \quad (1)$$

где $v = v(x, t)$, $w = w(x, t)$ – неизвестные функции; пространственная переменная $x \in (0, 1)$; $t > 0$ – время; $\mu \in R$ – управляющий параметр; $\alpha > 0$ – фиксированный параметр реакции; $v_1 > 0$, $v_2 > 0$ – фиксированные коэффициенты диффузии.

Предполагается, что на концах отрезка заданы краевые условия Неймана:

$$\frac{\partial v}{\partial x} \Big|_{x=0,1} = 0, \quad \frac{\partial w}{\partial x} \Big|_{x=0,1} = 0. \quad (2)$$

Система Фитцхью – Нагумо первоначально возникла как модель распространения нервного импульса в гигантском аксоне кальмара [5, 6] и является классической моделью возбудимой среды. Положив в (1) $\alpha = 0$, получим систему Рэля с диффузией [7], которую можно рассматривать как бесконечномерный аналог классической системы обыкновенных дифференциальных уравнений (ОДУ) Рэля. В [7–9] исследовалось бифуркационное поведение системы Рэля с диффузией.

При всех значениях параметра μ у системы Фитцхью – Нагумо (1), (2) существует нулевое решение $(v_0, w_0) = (0, 0)$, а при $\mu \geq \frac{1}{\alpha}$ – еще пара нетривиальных пространственно однородных решений:

$$(v_1, w_1); (-v_1, -w_1), \quad w_1 = \alpha v_1, \quad v_1 = \sqrt{\frac{\mu - \frac{1}{\alpha}}{\alpha}}. \quad (3)$$

Целью данной работы является нахождение критических значений управляющего параметра μ , отвечающих монотонной и колебательной потере устойчивости нулевого решения системы Фитцхью – Нагумо с диффузией (1), (2); представлений для вторичных стационарных решений в виде степенных рядов в случае одной пространственной переменной и краевых условий Неймана. Для построения вторичных решений применен метод Ляпунова – Шмидта в форме, развитой в работах В.И. Юдовича [10, 11]. Другой подход, основанный на вариационном принципе, применен к системе реакция – диффузия в [12].

Операторный вид системы

Сведем систему Фитцхью – Нагумо с диффузией (1) к ОДУ в гильбертовом пространстве H вектор-функций $\mathbf{u} = (v, w)$, компоненты которых принадлежат $L_2(0, 1)$. Рассмотрим линейный оператор $A_\alpha(\mu) : H \rightarrow H$, действующий по правилу

$A_\alpha(\mu)\mathbf{u} = -A_0\mathbf{u} + B_\alpha\mathbf{u} + \mu C\mathbf{u}$, где $A_0 = \frac{d^2}{dx^2}$ и операторы $B_\alpha, C, D : R^2 \rightarrow R^2$ заданы матрицами

$$B_\alpha = \begin{pmatrix} -\alpha & 1 \\ -1 & 0 \end{pmatrix}, \quad C = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad D = \begin{pmatrix} v_1 & 0 \\ 0 & v_2 \end{pmatrix}.$$

В области определения оператора $A_\alpha(\mu)$ учитываются краевые условия. Будем предполагать, что оператор $A_\alpha(\mu)$ задан на множестве $D(A_0)$ вектор-функций $\mathbf{u} = (v, w)$, $v, w \in W_2^2(0, 1)$, удовлетворяющих условиям (2).

Пусть трилинейный оператор $K(\mathbf{a}, \mathbf{b}, \mathbf{c}) : H \times H \times H \rightarrow H$ действует на $D(A_0)$ по правилу $K(\mathbf{a}, \mathbf{b}, \mathbf{c}) = (0, a_2, b_2, c_2)$, где

$$\mathbf{a} = (a_1(x, t), a_2(x, t));$$

$$\mathbf{b} = (b_1(x, t), b_2(x, t));$$

$$\mathbf{c} = (c_1(x, t), c_2(x, t)).$$

По неравенству Гёльдера для оператора $K(\mathbf{a}, \mathbf{b}, \mathbf{c})$ справедлива оценка

$$\|K(\mathbf{a}, \mathbf{b}, \mathbf{c})\|_{L_2} \leq \|a_2(x, t)\|_{L_6} \|b_2(x, t)\|_{L_6} \|c_2(x, t)\|_{L_6}.$$

Из теорем вложения Соболева следует, что $W_2^2(0,1) \subset C[0,1]$, причем вложение вполне непрерывно. Следовательно, справедливо неравенство

$$\|K(\mathbf{a}, \mathbf{b}, \mathbf{c})\|_{L_2} \leq M \|a_2(x, t)\|_{W_2^2} \|b_2(x, t)\|_{W_2^2} \|c_2(x, t)\|_{W_2^2}.$$

Тогда систему (1) можно записать в операторном виде

$$\dot{\mathbf{u}} = A_\alpha(\mu)\mathbf{u} - K(\mathbf{u}, \mathbf{u}, \mathbf{u}); \quad \mathbf{u} \in H. \quad (4)$$

Линейный анализ устойчивости

Определение. Критическим значением параметра μ будем называть такое μ_{cr} , при котором спектр оператора $A_\alpha(\mu)$ лежит в замкнутой левой полуплоскости, причем существует хотя бы одно собственное значение σ , лежащее на мнимой оси, и $\frac{dRe(\sigma)}{d\mu}|_{\mu=\mu_{cr}} \neq 0$. При этом, если при $\mu = \mu_{cr}$ на мнимой оси лежит лишь нулевое собственное значение, то говорят, что имеет место монотонная потеря устойчивости. Если же при $\mu = \mu_{cr}$ на мнимой оси лежит лишь пара комплексно-сопряженных собственных значений $\pm i\omega_0$ ($\omega_0 \neq 0$), то говорят, что происходит колебательная потеря устойчивости.

Для исследования устойчивости по линейному приближению нулевого решения системы Фитцхью – Нагумо с диффузией (4) рассмотрим линейную спектральную задачу

$$A_\alpha(\mu)\mathbf{u} = \sigma\mathbf{u}, \quad \mathbf{u} \neq 0. \quad (5)$$

Известно [13, 14], что в гильбертовом пространстве H существует ортонормированный базис $\{e_1\psi_k, e_2\psi_k\}_{k=0}^{+\infty}$, где $\psi_0 = 1$, $\psi_k = \sqrt{2}\cos(\pi kx)$, $k \in N$, являются собственными функциями скалярного оператора $-\frac{d^2}{dx^2}$ с краевыми условиями (2), отвечающими собственным значениям $\lambda_k = (\pi k)^2$, причем все λ_k являются простыми [13].

Будем разыскивать собственные функции оператора $A_\alpha(\mu)$ в виде рядов по базису пространства H

$$\mathbf{u} = \sum_{k=0}^{+\infty} \mathbf{c}_k \psi_k(x). \quad (6)$$

Подставляя (6) в (5) и приравнявая коэффициенты при соответствующих членах, получим набор линейных систем

$$A_k \mathbf{c}_k = \sigma \mathbf{c}_k, \quad A_k = \begin{pmatrix} -\lambda_k v_1 - \alpha & 1 \\ -1 & -\lambda_k v_2 + \mu \end{pmatrix}, \quad (7)$$

$$k = 0, 1, 2, \dots$$

Собственные значения σ_k оператора $A_\alpha(\mu)$ имеют вид $\sigma_k = \frac{1}{2} Tr(A_k) \pm \frac{1}{2} \sqrt{Tr(A_k)^2 - 4 Det(A_k)}$, и лежат строго в левой полуплоскости тогда и только тогда, когда выполнены условия

$$\begin{cases} Tr(A_k) = -\lambda_k(v_1 + v_2) - \alpha + \mu < 0, \\ Det(A_k) = (\lambda_k v_1 + \alpha)\lambda_k v_2 - (\lambda_k v_1 + \alpha)\mu + 1 > 0, \\ k = 0, 1, 2, \dots \end{cases} \quad (8)$$

Очевидно, что при $\mu < 0$ неравенства (8) выполняются. Следовательно, критическое значение параметра μ_{cr} неотрицательно. Для определения μ_{cr} введем в рассмотрение функции $f_1(\lambda)$ и $f_2(\lambda)$ вещественного аргумента $\lambda \geq 0$.

$$f_1(\lambda) = \lambda(v_1 + v_2) + \alpha; \quad f_2(\lambda) = \lambda v_2 + \frac{1}{\lambda v_1 + \alpha}.$$

Рассмотрим также функцию $F(\lambda) = \min(f_1(\lambda), f_2(\lambda))$. Тогда μ_{cr} может быть определено по формуле $\mu_{cr} = \min_{\lambda \in \{\lambda_k\}_{k=0}^{+\infty}} F(\lambda)$. Функция

$f_1(\lambda)$ монотонно возрастает при $\lambda \geq 0$, причем $f_1(0) = \alpha$. Функция $f_2(\lambda)$ монотонно убывает при $\lambda \in [0, \lambda_{min}]$, где $\lambda_{min} = -\frac{\alpha}{v_1} + \frac{1}{\sqrt{v_1 v_2}}$, и монотонно возрастает при $\lambda > \lambda_{min}$. Функции $f_1(\lambda)$ и $f_2(\lambda)$ имеют единственную точку пересечения $\lambda_{eq} = -\frac{\alpha}{v_1} + \frac{1}{v_1}$.

Лемма 1. Пусть $v_1 \leq v_2$. Тогда существует единственное $\lambda = \lambda_0 = 0$, $\mu_{cr} = F(\lambda_0)$. Если $\alpha < 1$, то в системе (4) происходит колебательная потеря устойчивости нулевого решения и $\mu_{cr} = \alpha$, в противном случае возникает монотонная потеря устойчивости и $\mu_{cr} = \frac{1}{\alpha}$.

Случай $\alpha = 1$ является вырожденным (существует присоединенный вектор) и далее в работе не рассматривается.

Лемма 2. Пусть $v_1 > v_2$. Тогда для $\alpha < \alpha_1$, где $\alpha_1 = \frac{2\sqrt{v_1 v_2}}{v_1 + v_2}$, в системе (4) происходит колебательная потеря устойчивости нулевого решения и $\mu_{cr} = \alpha$. При $\alpha_1 \leq \alpha < 1$ в системе возникает колебательная потеря устойчивости, если $\exists k: f_2(\lambda_k) < f_1(0)$ и $\mu_{cr} = \alpha$. В противном случае $\mu_{cr} = \lambda_{k_0} v_2 + \frac{1}{\lambda_{k_0} v_1 + \alpha}$ и в системе (4) происходит монотонная потеря устойчивости нулевого решения. При $\alpha > 1$ в системе происходит только монотонная потеря устойчивости.

Заметим, что критическое значение параметра μ в случае колебательной потери устойчивости определяется по формуле $\mu_{cr} = \alpha$. В этом случае $\frac{dRe(\sigma_{1,2}^0)}{d\mu}|_{\mu=\mu_{cr}} = \frac{1}{2} \neq 0$. Для случая монотонной потери устойчивости $\mu_{cr} = \lambda_{k_0} v_2 + \frac{1}{\lambda_{k_0} v_1 + \alpha}$,

$$\frac{dRe(\sigma_{k_0}^1)}{d\mu}|_{\mu=\mu_{cr}} = \frac{(v_1 \lambda_{k_0} + \alpha)^2}{(v_1 \lambda_{k_0} + \alpha)^2 - 1} \neq 0, \quad \text{причем}$$

$(v_1 \lambda_{k_0} + \alpha)^2 - 1 > 0$, так как в этом случае $\lambda_{k_0} > \lambda_{eq}$. Таким образом, выполняется требование трансверсальности пересечения мнимой оси.

Бифуркационное поведение стационарных решений

При $\alpha > 0$ в системе (1) может возникать монотонная потеря устойчивости, что невозможно в предельном случае системы Рэлея с диффузией при $\alpha = 0$ [9]. Применим метод Ляпунова – Шмидта для нахождения ответвляющихся от нуля стационарных решений системы (4). Заметим, что если $k_0 = 0$, то от нуля ответвляется пара пространственно однородных стационарных решений, в противном случае вторичные решения неоднородны по пространственной переменной x . В дальнейшем будем считать, что $k_0 > 0$.

Лемма 3. Пусть существует такое натуральное число k_0 , что $F(\lambda_{k_0})$ есть точка минимума $F(\lambda)$, т.е. $F(\lambda_{k_0}) = \min_{\lambda \in \{\lambda_k\}_{k=0}} F(\lambda)$. Предположим, что

$\lambda_{k_0} > \lambda_{eq}$ и выполняется неравенство

$$v_2 \neq \frac{1}{(\lambda_{k_0} + \frac{\alpha}{v_1})(\lambda_{k_0+1} + \frac{\alpha}{v_1})v_1}. \quad (9)$$

Тогда в системе Фитцхью – Нагумо с диффузией (4) происходит монотонная потеря устойчивости нулевого решения и критическое значение параметра μ определяется по формуле

$$\mu_{cr} = \lambda_{k_0} v_2 + \frac{1}{\lambda_{k_0} v_1 + \alpha}, \quad (10)$$

причем нулевое собственное значение оператора $A_\alpha(\mu)$ – простое.

Доказательство. По условию $\lambda_{k_0} > \lambda_{eq}$. Тогда $f_1(\lambda_{k_0}) > f_2(\lambda_{k_0})$, $Det(\mathbf{A}_{k_0})|_{\mu=\mu_{cr}} = 0$,

$$Tr(\mathbf{A}_{k_0})|_{\mu=\mu_{cr}} = 0, \quad Tr(\mathbf{A}_{k_0})|_{\mu=\mu_{cr}} = \frac{(v_1 \lambda_{k_0} + \alpha)^2}{(v_1 \lambda_{k_0} + \alpha)^2 - 1} \neq 0,$$

$Re(\sigma_{1,2}^k) < 0$ при $k \neq k_0$ и в системе (4) происходит монотонная потеря устойчивости нулевого решения. Критическое значение параметра μ определяется по формуле (10).

Докажем простоту нулевого собственного значения $\sigma = 0$ оператора $A_\alpha(\mu_{cr})$, т.е. единственность соответствующего ему собственного вектора (с точностью до умножения на скалярную величину) и отсутствие присоединенных векторов.

Рассмотрим оператор $A_\alpha(\mu_{cr})$. Будем разыскивать собственный вектор Φ в виде ряда (6). Получим последовательность линейных систем (7) для определения неизвестных коэффициентов c_k . Определители матриц $\mathbf{A}_k$ в данном случае имеют вид $Det(\mathbf{A}_k) = v_1^2(\lambda_k - \lambda_{k_0})(\lambda_{k_0} + \frac{\alpha}{v_1}) \times$

$$\times (\lambda_k + \frac{\alpha}{v_1})v_2 - \frac{1}{v_1}.$$

Заметим, что условие

$(\lambda_{k_0} + \frac{\alpha}{v_1})(\lambda_k + \frac{\alpha}{v_1})v_2 - \frac{1}{v_1} = 0$ эквивалентно условию $f_2(\lambda_k) = f_2(\lambda_{k_0})$. Не теряя общности, будем предполагать, что $\lambda_{k_0} \leq \lambda_{min}$. Тогда при $\lambda_k < \lambda_{k_0}$ выполняется неравенство $f_2(\lambda_k) > f_2(\lambda_{k_0})$. Из условия (9) и определения k_0 получаем, что $f_2(\lambda_k) > f_2(\lambda_{k_0})$ при $k > k_0$. Следовательно, с учетом простоты λ_k в одномерном случае [13] получаем, что $Det(\mathbf{A}_k)$ обращается в нуль только при $k = k_0$ и $c_k = 0$ при $k \neq k_0$. Собственный вектор Φ можно записать в виде

$$\Phi = C_\Phi \begin{pmatrix} 1 \\ v_1 \lambda_{k_0} + \alpha \end{pmatrix} \psi_{k_0}(x), \quad C_\Phi \neq 0.$$

Покажем, что не существует другого линейно независимого собственного вектора для данной задачи. Допустим противное. Тогда, не теряя общности, можно предположить, что $(\Phi, \hat{\Phi}) = 0$. Разложим $\hat{\Phi}$ в ряд (6). Получим, что при $k \neq k_0$ $Det(\mathbf{A}_k) > 0$ и $d_k = 0$, а коэффициенты вектора $\mathbf{d}_{k_0}$ связаны соотношением $d_{k_0}^2 = (v_1 \lambda_{k_0}) d_{k_0}^1$. С другой стороны, из условия ортогональности $(\Phi, \hat{\Phi}) = 0$ вытекает, что $(\Phi, \hat{\Phi}) = c_{k_0}^2 d_{k_0}^2 + c_{k_0}^2 d_{k_0}^2 = 0$.

С учетом того, что $c_{k_0}^2 = (v_1 \lambda_{k_0}) c_{k_0}^1$, получаем соотношение для $d_{k_0}^1$ и $d_{k_0}^2$: $d_{k_0}^2 = -(v_1 \lambda_{k_0}) d_{k_0}^1$.

Тогда коэффициенты $d_{k_0}^1$ и $d_{k_0}^2$ должны одновременно удовлетворять соотношениям $d_{k_0}^2 = (v_1 \lambda_{k_0}) d_{k_0}^1$, $d_{k_0}^2 = -(v_1 \lambda_{k_0}) d_{k_0}^1$, откуда вытекает, что $d_{k_0}^1 = d_{k_0}^2 = 0$.

Аналогичными рассуждениями можно показать, что у сопряженного оператора $A_\alpha^*(\mu_{cr})$ существует единственный (с точностью до умножения на скалярную величину) собственный вектор Φ , $A_\alpha^*(\mu_{cr})\Phi = 0$, который представим в виде

$$\Phi = C_\Phi \begin{pmatrix} 1 \\ -v_1 \lambda_{k_0} - \alpha \end{pmatrix} \psi_{k_0}(x), \quad C_\Phi \neq 0.$$

Заметим, что $(\Phi, \Phi) = C_\Phi C_\Phi (1 - v_1^2 \lambda_{k_0}^2) \neq 0$ при $\lambda_{k_0} > \lambda_{eq}$. Отсюда вытекает отсутствие присоединенных векторов.

Выполним нормировку собственных функций Φ и Φ . Получим

$$\Phi = \frac{1}{\lambda_{k_0} v_1 + \alpha + 1} \begin{pmatrix} 1 \\ \lambda_{k_0} v_1 + \alpha \end{pmatrix} \psi_{k_0}(x),$$

$$\Phi = \frac{1}{-\lambda_{k_0} v_1 - \alpha + 1} \begin{pmatrix} 1 \\ -\lambda_{k_0} v_1 - \alpha \end{pmatrix} \psi_{k_0}(x).$$

Рассмотрим систему (4) и введем замену переменных

$$-A_\alpha(\mu_{cr})\mathbf{u} = \varepsilon^2 C\mathbf{u} - K(\mathbf{u}, \mathbf{u}, \mathbf{u}), \quad (11)$$

где $\varepsilon = \mu - \mu_{cr}$. Будем разыскивать $\mathbf{u}$ в виде ряда по целым степеням параметра ε

$$\mathbf{u} = \sum_{k=1}^{+\infty} \varepsilon^k \mathbf{u}_k. \quad (12)$$

Подставляя (12) в (11) и приравнявая коэффициенты при одинаковых степенях ε , получим цепочку уравнений

$$\varepsilon^1: -A_\alpha(\mu_{cr})\mathbf{u}_1 = 0, \quad (13)$$

$$\varepsilon^2: -A_\alpha(\mu_{cr})\mathbf{u}_2 = 0,$$

$$\varepsilon^3: -A_\alpha(\mu_{cr})\mathbf{u}_3 = C\mathbf{u}_1 - K(\mathbf{u}_1, \mathbf{u}_1, \mathbf{u}_1) \equiv \mathbf{f}_3, \quad (14)$$

$$\varepsilon^4: -A_\alpha(\mu_{cr})\mathbf{u}_4 = C\mathbf{u}_2 - 3K(\mathbf{u}_1, \mathbf{u}_1, \mathbf{u}_2) \equiv \mathbf{f}_4, \quad (15)$$

$$\varepsilon^5: -A_\alpha(\mu_{cr})\mathbf{u}_5 = C\mathbf{u}_3 - 3K(\mathbf{u}_1, \mathbf{u}_1, \mathbf{u}_3) - 3K(\mathbf{u}_1, \mathbf{u}_1, \mathbf{u}_2). \quad (16)$$

Последовательно решим уравнения (13)–(16). Решения однородных уравнений (13) имеют вид

$$\mathbf{u}_1 = \beta_1 \Phi = \frac{\beta_1}{\lambda_{k_0} v_1 + \alpha + 1} \left(\frac{1}{\lambda_{k_0} v_1 + \alpha} \right) \psi_{k_0}(x),$$

$$\mathbf{u}_2 = \beta_2 \Phi = \frac{\beta_2}{\lambda_{k_0} v_1 + \alpha + 1} \left(\frac{1}{\lambda_{k_0} v_1 + \alpha} \right) \psi_{k_0}(x).$$

Условие разрешимости для уравнения (14) имеет вид $\beta_1(C\Phi, \Phi) - \beta_1^3(K(\Phi, \Phi, \Phi), \Phi) = 0$, где

$$(C\Phi, \Phi) = \frac{(v_1 \lambda_{k_0} + \alpha)^2}{(v_1 \lambda_{k_0} + \alpha + 1)(v_1 \lambda_{k_0} + \alpha - 1)} > 0,$$

$$(K(\Phi, \Phi, \Phi), \Phi) = \frac{(v_1 \lambda_{k_0} + \alpha)^4}{(v_1 \lambda_{k_0} + \alpha + 1)^3 (v_1 \lambda_{k_0} + \alpha - 1)} \|\psi_{k_0}^2\|_{L_2}^2 > 0.$$

Отсюда находим, что $\beta_1^2 = \frac{(C\Phi, \Phi)}{(K(\Phi, \Phi, \Phi), \Phi)} > 0$ и вторичные решения отбрасываются от нуля при $\mu > \mu_{cr}$.

Из выполнения условия $(C\Phi, \Phi) > 0$ следует, что вторичные решения устойчивы относительно малых возмущений [11]. Формула для β_1 имеет вид

$$\beta_1 = \frac{\sqrt{3}\sqrt{2}(\lambda_{k_0} v_1 + \alpha + 1)\sqrt{l}}{3(\lambda_{k_0} v_1 + \alpha)}. \text{ Частное решение уравнения (14) можно записать в виде } \mathbf{u}_3 = \beta_3 \Phi + \mathbf{u}_3^p,$$

$$-A(\mu_{cr})\mathbf{u}_3^p = \mathbf{f}_3, \text{ где } \mathbf{u}_3^p = \begin{pmatrix} a_{3p} \\ b_{3p} \end{pmatrix} \psi_{3k_0}(x).$$

Коэффициенты a_{3p} , b_{3p} задаются формулами

$$a_{3p} = \frac{f_{32}(v_1 \lambda_{k_0} + \alpha)}{v_2(v_1 \lambda_{k_0} + \alpha)(v_1 \lambda_{k_0} + \alpha)(\lambda_{3k_0} - \lambda_{k_0}) + (v_1 \lambda_{k_0} + \alpha) - 1},$$

$$b_{3p} = (v_1 \lambda_{k_0} + \alpha) a_{3p}, \quad (17)$$

причем знаменатель в (17) отличен от нуля в силу того, что $\lambda_{k_0} > \lambda_{eq}$.

Из условия разрешимости для уравнения (15) находим, что $\beta_2 = 0$. Тогда $\mathbf{f}_4 \equiv 0$, $\mathbf{u}_2 \equiv 0$ и $\mathbf{u}_4 = \beta_4 \Phi$. Условие разрешимости для уравнения

$$(16) \text{ имеет вид } (\mathbf{f}_5, \Phi) = \frac{2(\lambda_{k_0} v_1 + \alpha)\beta_3}{\lambda_{k_0} v_1 + \alpha + 1} + b_{3p} = 0.$$

Следовательно, $\beta_3 = -\frac{(\lambda_{k_0} v_1 + \alpha + 1)b_{3p}}{2(\lambda_{k_0} v_1 + \alpha)}$. Первые члены разложения вторичных стационарных решений в степенной ряд определяются соотношениями

$$v(x) = \pm \varepsilon \frac{2\sqrt{3}(\lambda_{k_0} v_1 + \alpha + 1)}{3(\lambda_{k_0} v_1 + \alpha)} \cos(\pi k_0 x) \pm$$

$$\pm \varepsilon^3 \left(-\frac{(\lambda_{k_0} v_1 + \alpha + 1)b_{3p}}{\sqrt{2}(\lambda_{k_0} v_1 + \alpha)} \cos(\pi k_0 x) + \right.$$

$$\left. + a_{3p} \cos(3\pi k_0 x) \right) + O(\varepsilon^4), \quad (18)$$

$$w(x) = \pm \varepsilon \frac{2}{3} \sqrt{3} (\lambda_{k_0} v_1 + \alpha + 1) \cos(\pi k_0 x) \pm$$

$$\pm \varepsilon^3 \left(-\frac{\sqrt{2}(\lambda_{k_0} v_1 + \alpha + 1)b_{3p}}{2} \cos(\pi k_0 x) + \right.$$

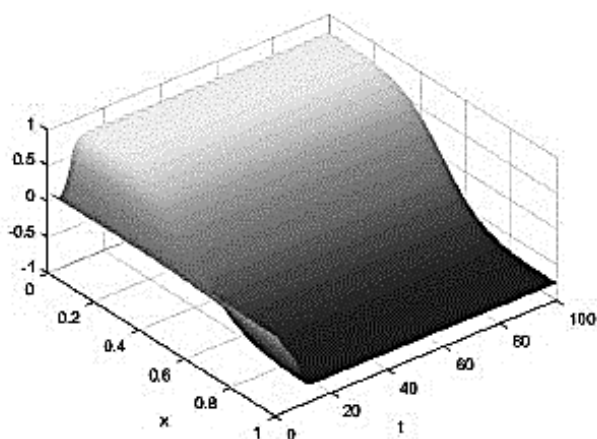
$$\left. + b_{3p} \cos(3\pi k_0 x) + O(\varepsilon^4) \right).$$

Теорема. Пусть выполняются условия леммы 3. Тогда найдется $\mu_{cr} = \lambda_{k_0} v_2 + \frac{1}{\lambda_{k_0} v_1 + \alpha}$ такое, что при $\mu < \mu_{cr}$ нулевое решение системы Фитцхью – Нагумо с диффузией (4) асимптотически устойчиво. При $\mu = \mu_{cr}$ в системе происходит мягкая монотонная потеря устойчивости нулевого решения. При малых $\varepsilon = \mu - \mu_{cr} > 0$ существует пара устойчивых стационарных решений системы. Первые члены разложения вторичных стационарных решений в степенной ряд имеют вид (18).

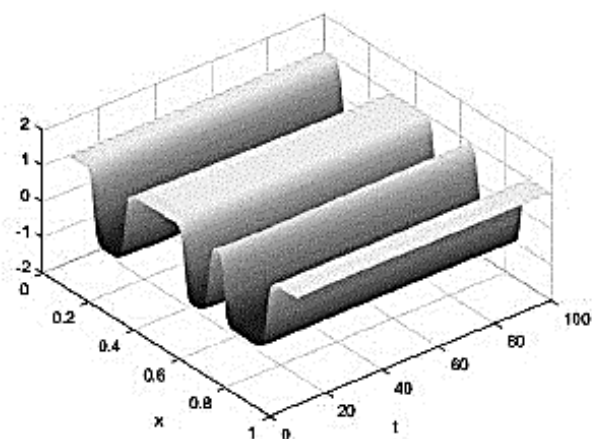
Для исследования разрушения вторичных стационарных решений системы (4) при возрастании значений ε были проведены вычислительные эксперименты. Для всех экспериментов рассматривался случай $\alpha = 1$. Коэффициенты диффузии выбирались равными $v_1 = 1$, $v_2 = 10^{-2}$; $v_1 = 1$, $v_2 = 10^{-4}$ и $v_1 = 1$, $v_2 = 10^{-5}$. Для всех рассматриваемых значений параметров выполнено неравенство (9). Численное решение строилось для различных значений надкритичности ε . Начальные данные задавались формулами (18); уравнение (4) аппроксимировалось методом прямых на равномерной сетке; численное интегрирование системы уравнений метода прямых проводилось методом Дормана – Принса. Было обнаружено, что для $\varepsilon < 1$ вторичные решения сохраняют свой профиль (рисунок). При увеличении ε вторичные решения сменяются тьюринговыми структурами. Далее, с ростом ε решения стремятся к равновесиям (3).

Заключение

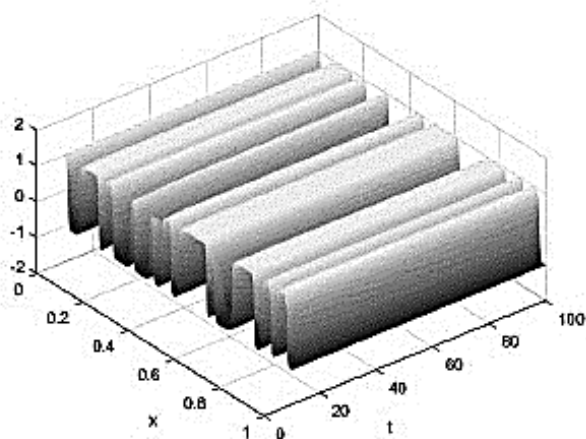
В работе проведено исследование бифуркационного поведения стационарных решений системы Фитцхью – Нагумо с диффузией в случае одной пространственной переменной и краевых условий Неймана. Получены условия, при которых в системе возникает монотонная и колебательная потеря устойчивости нулевого решения. Найдены критические значения параметра μ . Для нахождения вторичных стационарных решений применен метод Ляпунова – Шмидта в форме, развитой в работах В.И. Юдовича. Установлено, что в системе происходит мягкая потеря устойчивости, и приведены явные выражения для первых членов разложения вторичных стационарных решений в степенной ряд, численно исследовано разрушение вторичных режимов.



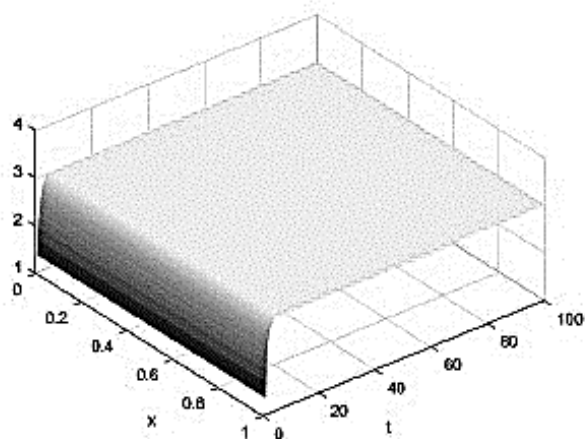
(a) $\nu_1 = 1, \nu_2 = 10^{-2}, \varepsilon = 0.5$



(b) $\nu_1 = 1, \nu_2 = 10^{-4}, \varepsilon = 1$



(c) $\nu_1 = 1, \nu_2 = 10^{-5}, \varepsilon = 1$



(d) $\nu_1 = 1, \nu_2 = 10^{-5}, \varepsilon = 10$

Вторая компонента решения $w(x,t)$ при различных значениях коэффициентов диффузии и надкритичности ε
/ The second component $w(x,t)$ of the solution at different values of diffusion coefficients and subcritical value ε

Литература

1. Jiang W., Wang H., Cao X. Turing instability and Turing-Hopf bifurcation in diffusive Schnakenberg systems with gene expression time delay // arXiv. 2018. URL: <https://arxiv.org/abs/1803.00164> (дата обращения: 30.08.2018).
2. Castillo J.A., Sanchez-Garduno F., Padilla P. A Turing-Hopf bifurcation scenario for pattern formation on growing domains // Bulletin of Mathematical Biology. 2016. Vol. 78, № 7. P. 1410–1449.
3. Епифанов А.В., Цибулин В.Г. О динамике ко-симметричных систем хищников и жертв // Компьютерные исследования и моделирование. 2017. Т. 9, № 5. С. 799–813.
4. Zhao H., Huang X. Turing instability and pattern formation of neural networks with reaction-diffusion terms // Nonlinear Dynamics. 2014. Vol. 76, № 1. P. 115–124.
5. FitzHugh R. Impulses and Physiological States in Theoretical Models of Nerve Membrane // Biophysical J. 1961. Vol. 1, № 6. P. 445–466.
6. Nagumo J., Arimoto S., Yoshizawa S. An Active Pulse Transmission Line Simulating Nerve Axon // Proceedings of the IRE. 1962. Vol. 50, № 10. P. 2061–2070.
7. Казарников А.В., Ревина С.В. Асимптотика стационарных решений системы Рэля с диффузией // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2016. № 191. С. 13–19.
8. Казарников А.В., Ревина С.В. Возникновение автоколебаний в системе Рэля с диффузией // Вестн.

ЮУрГУ. Мат. моделирование и программирование. 2016. Т. 9, № 2. С. 16–28.

9. Казарников А.В., Ревина С.В. Бифуркации в системе Рэлея с диффузией // Вестн. Удмуртского ун-та. Математика. Механика. Компьютерные науки. 2017. Т. 27, № 4. С. 499–514.

10. Юдович В.И. Исследование автоколебаний сплошной среды, возникающих при потере устойчивости стационарного режима // Прикладная математика и механика. 1972. Т. 36, № 3. С. 450–459.

11. Юдович В.И. Пример потери устойчивости и рождения вторичного течения жидкости в замкнутом сосуде // Мат. сб. 1967. Т. 74, № 116. С. 565–579.

12. Коротких А.С. Стационарные точки уравнения «реакция – диффузия» и переходы в стабильные состояния // Вестн. ЮУрГУ. Мат. моделирование и программирование. 2017. Т. 10, № 1. С. 125–137.

13. Михлин С.Г. Линейные уравнения в частных производных. М.: Высшая школа, 1977. 431 с.

14. Михайлов В.П. Дифференциальные уравнения в частных производных. М.: Наука, 1976. 391 с.

References

1. Jiang W., Wang H., Cao X. Turing instability and Turing-Hopf bifurcation in diffusive Schnakenberg systems with gene expression time delay. *arXiv*. 2018. Available at: <https://arxiv.org/abs/1803.00164> (accessed 30.08.2018).

2. Castillo J.A., Sanchez-Garduno F., Padilla P. A Turing-Hopf bifurcation scenario for pattern formation on growing domains. *Bulletin of Mathematical Biology*. 2016, vol. 78, No. 7, pp. 1410-1449.

3. Epifanov A.V., Tsibulin V.G. O dinamike kosimmetrichnykh sistem khishchnikov i zhertv [On the dynamics of cosymmetric systems of predators and victims]. *Komp'yuternye issledovaniya i modelirovanie*. 2017, vol. 9, No. 5, pp. 799-813.

4. Zhao H., Huang X. Turing instability and pattern formation of neural networks with reaction - diffusion terms. *Nonlinear Dynamics*. 2014, vol. 76, No. 1, pp. 115-124.

5. FitzHugh R. Impulses and Physiological States in Theoretical Models of Nerve Membrane. *Biophysical J*. 1961, vol. 1, No. 6, pp. 445-466.

6. Nagumo J., Arimoto S., Yoshizawa S. An Active Pulse Transmission Line Simulating Nerve Axon. *Proceedings of the IRE*. 1962, vol. 50, No. 10, pp. 2061-2070.

7. Kazarnikov A.V., Revina S.V. Asimptotika statsionarnykh reshenii sistemy Releya s diffuziei [Asymptotics of stationary solutions of the system of the Rayleigh diffusion]. *Izv. vuzov. Sev.-Kavk. region. Estestv. nauki*. 2016, No. 1, pp. 13-19.

8. Kazarnikov A.V., Revina S.V. Vozniknovenie avtokolebaniy v sisteme Releya s diffuziei [The emergence of self-oscillations in the Rayleigh system with diffusion]. *Vestn. YuUrGU. Mat. modelirovanie i programmirovaniye*. 2016, vol. 9, No. 2, pp. 16-28.

9. Kazarnikov A.V., Revina S.V. Bifurkatsii v sisteme Releya s diffuziei [Bifurcations in the system of the Rayleigh diffusion]. *Vestn. Udmurtskogo un-ta. Matematika. Mekhanika. Komp'yuternye nauki*. 2017, vol. 27, No. 4, pp. 499-514.

10. Yudovich V.I. Issledovanie avtokolebaniy sploshnoi sredy, vznikayushchikh pri potere ustoichivosti statsionarnogo rezhima [The study of self-oscillations of a continuous medium arising from the loss of stability of a stationary regime]. *Prikladnaya matematika i mekhanika*. 1972, vol. 36, No. 3, pp. 450-459.

11. Yudovich V.I. Primer poteri ustoichivosti i rozheniya vtorichnogo techeniya zhidkosti v zamknutom sosude [An example of the loss of stability and the birth of a secondary fluid flow in a closed vessel]. *Mat. sb.* 1967, vol. 74, No. 116, pp. 565-579.

12. Kоротких А.С. Стационарные точки уравнения «реакция – диффузия» и переходы в стабильные состояния [Stationary points of the reaction-diffusion equation and transitions to stable states]. *Vestn. YuUrGU. Mat. modelirovanie i programmirovaniye*. 2017, vol. 10, No. 1, pp. 125-137.

13. Михлин С.Г. Линейные уравнения в частных производных [Linear equations in partial derivatives]. Moscow: Vysshaya shkola, 1977, 431 p.

14. Михайлов В.П. Дифференциальные уравнения в частных производных [Partial differential equations]. Moscow: Nauka, 1976, 391 p.

УДК 539.3

DOI 10.23683/0321-3005-2018-4-25-31

УСТОЙЧИВОСТЬ НЕЛИНЕЙНО-УПРУГОГО ЦИЛИНДРА С КЛИНОВОЙ ДИСКЛИНАЦИЕЙ ПРИ РАДИАЛЬНОМ ОБЖАТИИ

© 2018 г. М.И. Карякин^{1,2}, Л.П. Обрезков¹

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

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

STABILITY OF A NONLINEAR-ELASTIC CYLINDER WITH WEDGE DISCLINATION UNDER RADIAL COMPRESSION

M.I. Karyakin^{1,2}, L.P. Obrezkov¹

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

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

Карякин Михаил Игоревич – доктор физико-математических наук, доцент, кафедра теории упругости, директор Института математики, механики и компьютерных наук им. И.И. Воровича, Южный федеральный университет, ул. Мильчакова, 8а, г. Ростов-на-Дону, 344090, Россия; старший научный сотрудник, отдел дифференциальных уравнений, Южный математический институт – филиал Владикавказского научного центра РАН, ул. Маркуса, 22, г. Владикавказ, РСО – Алания, 362027, Россия, e-mail: karyakin@sfnedu.ru

Mikhail I. Karyakin - Doctor of Physics and Mathematics, Associate Professor, Department of Elasticity Theory, Director of the Vorovich Institute of Mathematics, Mechanics and Computer Sciences, Southern Federal University, Milchakova St., 8a, Rostov-on-Don, 344090, Russia; Senior Researcher, Department of Differential Equations, Southern Mathematical Institute - Branch, Vladikavkaz Scientific Center, Russian Academy of Sciences, Marcusa St., 22, Vladikavkaz, RNO - Alania, 362027, Russia, e-mail: karyakin@sfnedu.ru

Обрезков Леонид Павлович – аспирант, 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: leonidobrezkov@bk.ru

Leonid P. Obrezkov - Postgraduate, 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: leonidobrezkov@bk.ru

Исследовано влияние клиновой дисклинации на процесс плоской потери устойчивости полого цилиндра, нагруженного по внешней боковой поверхности равномерным давлением. Для описания механических свойств материала цилиндра использовано несколько общеупотребительных моделей – упрощенный вариант материала Блейтца и Ко, материал Кирхгофа – Сен-Венана, пятиконстантная модель Мурнагана. Посредством полуобратного метода трехмерная задача о равновесии цилиндра сведена к исследованию нелинейной краевой задачи для обыкновенного дифференциального уравнения второго порядка. Анализ устойчивости проводился с использованием бифуркационного подхода, основанного на линеаризации уравнений равновесия в окрестности построенного решения с использованием метода наложения малой деформации на конечную. Значение той или иной деформационной характеристики, при котором существовали нетривиальные решения однородной краевой задачи для получаемых в процессе линеаризации уравнений нейтрального равновесия, отождествлялось с критическим значением параметра нагружения, т.е. значением, при котором система теряет устойчивость. В качестве таких параметров использовались параметр дисклинации и безразмерная характеристика приложенного давления. На плоскости параметров нагружения определены области устойчивости. Проанализировано влияние соотношения внутреннего и внешнего радиусов цилиндра на номер моды потери устойчивости, исследована возможность сгущения бифуркационных кривых.

Ключевые слова: дисклинация, устойчивость, неустойчивость, полуобратный метод, бифуркация, большие деформации.

The influence of the wedge disclination on the process of plane buckling of a hollow cylinder loaded on an external side surface with uniform pressure is investigated. To describe the mechanical properties of the cylinder material, several commonly used models are used - a simplified version of the Blatz and Ko material, the Kirchhoff-Saint-Venant material, and the five-constant Murnaghan model. Using the semi-inverse method, the three-dimensional problem of cylinder equilibrium is reduced to the study of a nonlinear boundary value problem for an ordinary second-order differential equation. The stability analysis

was carried out using a bifurcation approach based on linearization of the equilibrium equations in the neighborhood of the constructed solution using the method of imposing a small strain on a finite one. The value of a particular deformation characteristic, in which non-trivial solutions of a homogeneous boundary-value problem existed for the equations of neutral equilibrium obtained in the linearization process, is identified with the critical value of the loading parameter, i.e. the value at which the system loses stability. As such parameters, the disclination parameter and the dimensionless characteristic of the applied pressure were used. On the plane of loading parameters, the stability regions are determined. The influence of the ratio of the inner and outer radius of the cylinder on the number of the mode of instability is analyzed; the possibility of thickening bifurcation curves is investigated.

Keywords: disclination, stability, buckling, semi-inverse method, bifurcation, finite strains.

Введение

Концепция дисклинаций (поворотных дислокаций), возникшая при исследовании некоторых свойств жидких кристаллов [1], позже нашла применение при описании различных биологических объектов, например белковых полимеров [2], конденсационных пленок белка [3], древесины [4], нематоидных структур кожи человека [5] и др. Новая волна интереса к нелинейной теории упругих дисклинаций в последние годы связана с активным использованием дисклинационных моделей при описании наноструктур различного рода. Недавние эксперименты [6] показали возможность инициаций самосборки трехмерной структуры из плоского упругого листа. В [7] высказано предположение о возможности аналогичных процессов на молекулярном уровне, что позволит использовать такие поверхности, как графен с дополнительными связями на краях, для изгиба в трехмерную структуру. В [8] обсуждаются перспективы использования теории дисклинаций для описания механических свойств и структуры фуллеренов. Сказанным определяется интерес к изучению подобных моделей методами теории упругости. Начало изучению дисклинаций в рамках нелинейной теории упругости положила работа [9], ряд положений и идей которой были позднее уточнены и развиты в работах Л.М. Зубова и его учеников [10–14].

Использование моделей и методов нелинейной теории упругости позволяет не только анализировать напряженно-деформированное состояние тела с дефектом и изучать влияние, которое на это состояние оказывают характеристики дефекта [15], но также исследовать вопросы устойчивости построенных решений. Традиционная схема исследования устойчивости [16, 17] основывается на линеаризации трехмерных нелинейных краевых задач в окрестности построенного решения и изучении возможности существования нетривиального решения этих линейных задач в зависимости от параметров – тех или иных характеристик деформированного состояния или внешних воздействий. Некоторые вопросы влияния внутренних напряжений, вызванных винтовой

дислокацией, на устойчивость равновесия кругового цилиндра представлены в [18]. Настоящая работа может рассматриваться как продолжение исследований, начатых в [12] и связанных с изучением равновесия и устойчивости цилиндра, содержащего клиновую дисклинацию, и сравнительным анализом применения в этой связи различных моделей нелинейно-упругого поведения сжимаемых сред.

Равновесное состояние и устойчивость цилиндра с дисклинацией

Рассмотрим равновесие полого кругового цилиндра высотой h , находящегося под действием внешнего давления p , приложенного к его боковой поверхности. Внутренние напряжения вызваны клиновой дисклинацией.

Пусть r, φ, z и R, Φ, Z – цилиндрические координаты в отсчетной (недеформированной) и текущей конфигурациях; $\mathbf{e}_r, \mathbf{e}_\varphi, \mathbf{e}_z$ и $\mathbf{e}_R, \mathbf{e}_\Phi, \mathbf{e}_Z$ – соответствующие им ортонормированные базисы. Дифференциальные уравнения равновесия при отсутствии массовых сил и граничные условия на боковых поверхностях цилиндра имеют вид [19]

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = 0, \quad \mathbf{e}_r \cdot \mathbf{D}|_{r=r_0} = 0, \quad \mathbf{e}_r \cdot \mathbf{D}|_{r=r_1} = -p \mathbf{J} \mathbf{C}^{-1} \cdot \mathbf{e}_r,$$

$$\nabla = \mathbf{e}_r \frac{\partial}{\partial r} + \mathbf{e}_\varphi \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \varphi} + \mathbf{e}_z \frac{\partial}{\partial z}, \quad (1)$$

$$\mathbf{C} = \nabla \mathbf{R}, \quad \mathbf{J} = \det \mathbf{C}, \quad \mathbf{D} = \frac{\partial W}{\partial \mathbf{C}}.$$

Здесь r_0 и r_1 – внутренний и внешний радиусы цилиндра соответственно; $\mathbf{R}$ – радиус-вектор точки тела; $\mathbf{D}$ – несимметричный тензор напряжений Пиолы. На торцах цилиндра будем полагать отсутствие касательных напряжений

$$D_{zR} = 0, \quad D_{z\Phi} = 0. \quad (2)$$

Начальную докритическую деформацию полого цилиндра будем искать в виде [10]

$$R = P(r), \quad \Phi = \chi \varphi, \quad Z = z, \quad (3)$$

где χ – параметр дисклинации. Если $\chi > 1$, то преобразование (3) соответствует деформации, возникающей при удалении из цилиндра сектора

$2\pi\chi^{-1} \leq \varphi \leq 2\pi$ и повороте сечения $\varphi = 2\pi\chi^{-1}$ вокруг оси цилиндра до совмещения с плоскостью $\varphi = 0$. Случай $0 < \chi < 1$ соответствует деформации, когда в разрезанный цилиндр вставляется клин с углом раствора $2\pi(1 - \chi)$ [10].

Анализ устойчивости построенных решений осуществляется в рамках бифуркационного подхода на основе исследований уравнений нейтрального равновесия, которые получаются в рамках теории наложения малой деформации на конечную [19, 20]. Ограничиваясь плоскими формами потери устойчивости, добавим в (3) малые возмущения, положив

$$R = P(r) + \varepsilon u(r, \varphi), \Phi = \chi\varphi + \varepsilon v(r, \varphi), Z = z. \quad (4)$$

После вычисления градиента деформации и его линеаризации по формуле $\dot{\mathbf{C}} = \frac{\partial}{\partial \varepsilon} \mathbf{C} |_{\varepsilon=0}$ выражение для тензора напряжений Пиолы в (1) также заменяется его линеаризованным вариантом $\dot{\mathbf{D}}$. Итогом является линейная однородная краевая задача для системы дифференциальных уравнений

$$\nabla \cdot \dot{\mathbf{D}} = 0 \quad (5)$$

с краевыми условиями

$$\mathbf{e}_r \cdot \dot{\mathbf{D}} = 0, \quad \mathbf{e}_r \cdot \dot{\mathbf{D}} = -p(\mathbf{J}\mathbf{C}^{-1} + \mathbf{J}\dot{\mathbf{C}}^{-1}) \cdot \mathbf{e}_r.$$

Анализ полученной системы проводится методом разделения переменных: $u(r, \varphi) = U(r) \cos(n\chi\varphi)$, $v(r, \varphi) = V(r) \sin(n\chi\varphi)$, где n – натуральное число, называемое номером моды потери устойчивости. Такое разделение позволяет автоматически удовлетворить условиям (2); предметом анализа становится линейная однородная система обыкновенных дифференциальных уравнений относительно функций $U(r), V(r)$. При этом случай $n=0$ исключается из рассмотрения; $n=1$ соответствует движению абсолютно твердого тела, поэтому также не рассматривается. Таким образом, далее полагаем $n \geq 2$ [12]. Значение параметра дисклинации или величины безразмерного тем или иным способом внешнего давления, при котором у построенной линейной однородной краевой задачи существуют нетривиальные решения, будем считать критическим для параметра нагружения, т.е. при нём система теряет устойчивость.

Модели материалов

В настоящей работе рассмотрены три употребительные модели нелинейно-упругого поведения сжимаемых сред. Наиболее простой вид нелинейная краевая задача равновесия для функции $P(r)$ принимает в случае использования упрощенного варианта

материала Блейтца и Ко, функция удельной потенциальной энергии которого имеет вид [19]

$$W = \frac{1}{2} \mu \left(\frac{I_2}{I_3} + 2\sqrt{I_3} - 5 \right).$$

Здесь I_k – инварианты меры деформации Коши

$\mathbf{G} = \mathbf{C} \cdot \mathbf{C}^T$; материальный параметр μ при малых деформациях имеет смысл модуля сдвига. Учитывая (3), получаем, что каждое из векторных соотношений (1) сведется только к одному скалярному. Краевая задача о равновесии цилиндра с дисклинацией примет вид

$$P'' = -\frac{1}{3} \frac{(r^3 P'^3 - \chi^2 P^3) P'}{\chi^2 r P^3}; \quad (6)$$

$$\chi P(r_0)^3 P(r_0) = r_0, \quad \chi P(r_1)^3 P(r_1)(q+1) = r_1.$$

Здесь и далее $q = p/\mu$ – безразмерное давление.

Запишем линеаризованную с учетом (4) систему уравнений нейтрального равновесия (5) в виде

$$\begin{aligned} U'' = & \left(\frac{1}{3r} - \frac{4P'^3 r^2}{3\chi^2 P^3} \right) U' + \left(\frac{P'^4 r^2}{\chi^2 P^4} + \frac{P'^2 n^2}{3P^2} \right) U - \\ & - \left(\frac{P'^3 r^2 n}{3\chi^2 P^2} + \frac{P' n}{3} \right) V' + \frac{2P'^4 r^2 n}{3\chi^2 P^3} V, \\ V'' = & \left(\frac{\chi^2 n}{r^2 P'} + \frac{P' n}{P^2} \right) U' + \left(\frac{P'^2 n}{P^3} + \frac{P'^4 r^2 n}{3\chi^2 P^5} \right) U - \\ & - \left(\frac{2r^2 P'^3}{3\chi^2 P^3} + \frac{7}{3r} \right) \left(\frac{\chi^2 n}{r^2 P'} + \frac{P' n}{P^2} \right) V' + \frac{3P'^2 n^2}{P^2} V. \end{aligned}$$

Краевыми условиями для нее будут равенства:

при $r = r_0$

$$\begin{aligned} \frac{3}{P'^4} U' + \frac{\chi}{r} U + \frac{\chi P n}{r} V = 0, \\ \left(\frac{\chi}{r} - \frac{r^2}{\chi^2 P^3 P'} - \frac{1}{P P^3} \right) n U + \frac{r^2}{\chi^2 P^2 P'^2} V = 0, \end{aligned}$$

при $r = r_1$

$$\begin{aligned} \frac{3}{P'^4} U' + \frac{\chi(q+1)}{r} U + \frac{\chi(q+1)n}{r} V = 0, \\ \left(\frac{\chi(q+1)}{r} - \frac{r^2}{\chi^2 P^3 P'} - \frac{1}{P P^3} \right) n U + \frac{r^2}{\chi^2 P P'^2} V = 0. \end{aligned}$$

Несмотря на достаточно компактную форму, краевая задача (6) является существенно нелинейной, и построить ее решение в явном аналитическом виде не удастся. Поэтому переменные коэффициенты линеаризованной краевой задачи также не могут быть записаны аналитически. На каждом шаге вычислительной схемы (т.е. для каждой пары значений параметра дисклинации и внешнего давления)

сначала численно решалась краевая задача (6), а потом это численное решение использовалось для задания коэффициентов и исследования возможности существования нетривиального решения у линейризованной задачи.

В качестве второй модели материала в работе была использована модель Кирхгофа – Сен-Венана [21], функция удельной потенциальной энергии деформации которой является квадратичной относительно тензора деформации $\mathbf{K} = (\mathbf{G} - \mathbf{E})/2$ ($\mathbf{E}$ – единичный тензор):

$$W = \frac{1}{2}(\lambda + 2\mu)I_1^2(\mathbf{K}) - 2\mu I_2(\mathbf{K}).$$

Параметры λ , μ этой модели при малых деформациях имеют смысл коэффициентов Ляме линейной теории упругости. Краевая задача равновесия в этом случае будет заметно более громоздкой

$$P'' = F_1 / F_2,$$

$$F_1 = \lambda \chi^2 r P^2 P' - \lambda \chi^2 r^2 P'^2 - (\lambda + 2\mu) r^3 P^3 - 2(\lambda + \mu) \chi^2 r^2 P + (\lambda + 2\mu) \chi^4 P^3,$$

$$F_2 = r^2 (3(\lambda + 2\mu) r^2 P'^2 - 2(\lambda + \mu) r^2 + \lambda \chi^2 P'^2);$$

$$2(\lambda + \mu) P'(r_0) = (\lambda + 2\mu) P'(r_0)^3 + \frac{\lambda \chi^2 P(r_0)^2 P'(r_0)}{r_0^2},$$

$$2(\lambda + \mu) P'(r_1) = (\lambda + 2\mu) P'(r_1)^3 + \frac{\lambda \chi^2 P(r_1)^2 P'(r_1)}{r_1^2} + 2 \frac{\mu \chi q P(r_1)}{r_1}.$$

Пятиконстантная модель материала Мурнагана может рассматриваться как обобщение предыдущей на случай кубической зависимости энергии от тензора деформаций:

$$W = \frac{1}{2}(\lambda + 2\mu)I_1^2(\mathbf{K}) - 2\mu I_2(\mathbf{K}) + \frac{1}{3}(l + 2m)I_1^3(\mathbf{K}) - 2mI_1(\mathbf{K})I_2(\mathbf{K}) + nI_3(\mathbf{K}).$$

Материальные параметры λ, μ , как и ранее, имеют смысл коэффициентов Ляме; l, m, n – постоянные Мурнагана.

Уравнения равновесия для материала Мурнагана и линейризованные краевые задачи для последних двух моделей приведены не будут в силу их громоздкости.

Численные результаты

В качестве примера решения нелинейных краевых задач о равновесии цилиндра на рис. 1 представлены графики распределения нормального напряжения σ_R / μ для различных значений параметра дисклинации. Рисунок соответствует материалу Кирхгофа – Сен-Венана, параметры Ляме которого были выбраны по данным, приведенным в [19] для материала типа оргстекло: $\lambda = 3,9 \cdot 10^4$ МПа, $\mu = 1,86 \cdot 10^4$ МПа. Этот выбор связан, в частности, с тем, что для данного набора параметров Мурнагана известны диапазоны деформаций, при которых выполняется условие сильной эллиптичности [22].

Необходимо отметить, что выбор модели не показал качественного влияния на напряженно-деформированное состояние. Если параметры моделей выбирались так, чтобы в линейном приближении они соответствовали одному и тому же материалу, то различие в распределении нормальных напряжений – не более 10 %.

На рис. 2 представлены области устойчивости цилиндра на плоскости двух параметров нагружения – внешнего давления и дисклинации для модели Блейтца и Ко. Рис. 2а соответствует цилиндру, который близок к сплошному ($r_0 / r_1 = 0,1$), на рис. 2б представлены результаты для толстостенной трубы ($r_0 / r_1 = 0,9$).

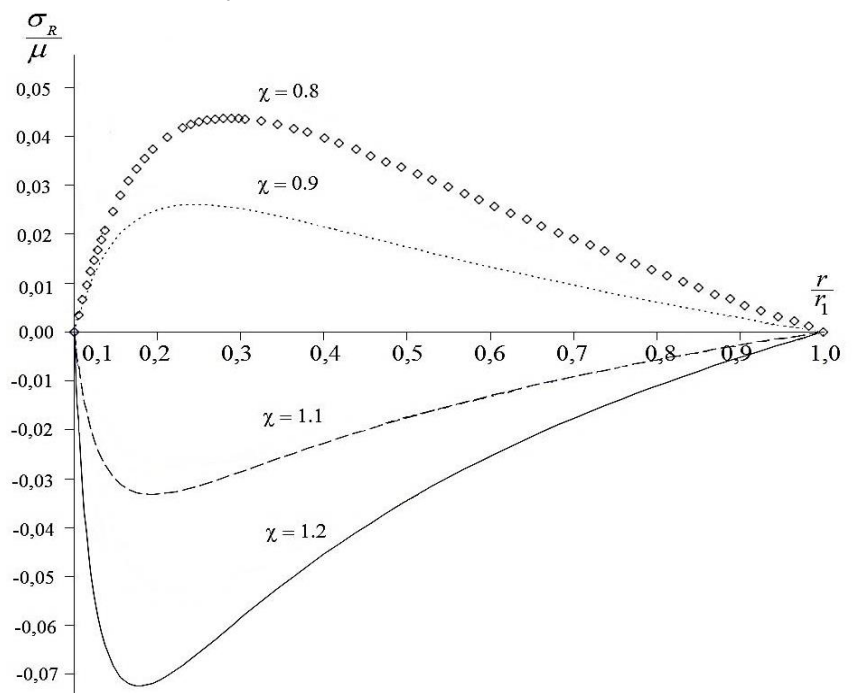


Рис. 1. Распределение радиального напряжения по толщине цилиндра. Материал Кирхгофа – Сен-Венана, $r_0 / r_1 = 0,1$ / Fig. 1. Radial stress distribution along the cylinder depth. St.Venant-Kirchhoff material. $r_0 / r_1 = 0.1$

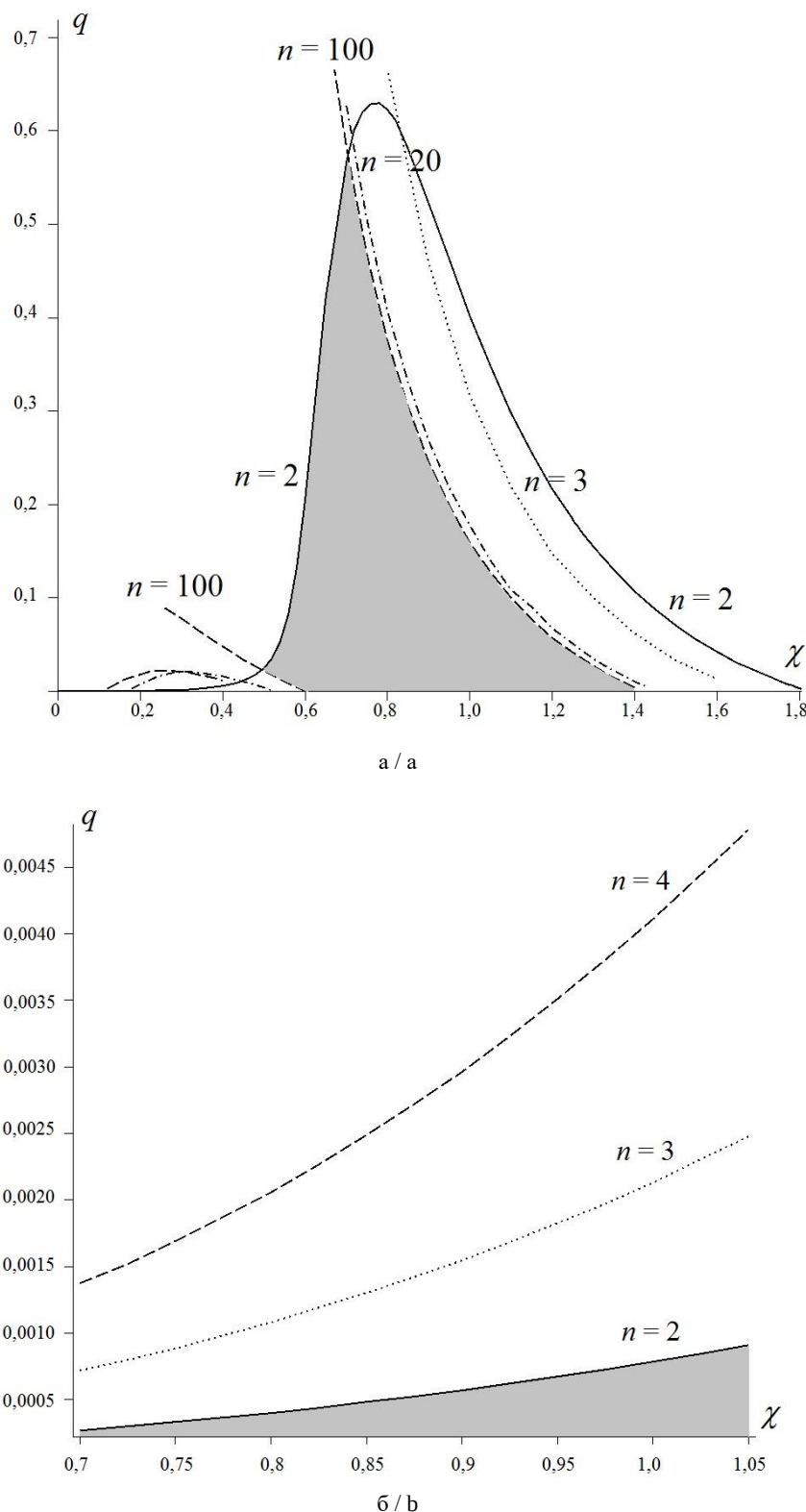


Рис. 2. Область устойчивости цилиндра с дисклинацией. Материал Блейтца и Ко.
а - $r_0/r_1 = 0,1$; б - $r_0/r_1 = 0,9$ / Fig. 2. Stability region of the cylinder
with disclination. Blatz and Ko model. а - $r_0/r_1 = 0,1$; б - $r_0/r_1 = 0,9$

Важным отличием первого случая является тот факт, что область устойчивости описывается кривыми с разными номерами мод. Кроме того, отмечается сгущение бифуркационных кривых на одной из границ области устойчивости. Увеличение номера моды n , начиная с некоторого значения (порядка пятидесяти), практически не изменяет величины критического давления. Данный факт согласуется с результатами, полученными ранее в [12] для полулинейного материала. Это, в частности, означает, что для такого тела предсказать форму потери устойчивости на основе анализа линеаризованных уравнений невозможно. Для более тонкого цилиндра мода $n=2$ всегда является предпочтительной; соответствующее ей критическое давление минимально. Еще одной особенностью цилиндров большой толщины является существование зоны, где потеря устойчивости может происходить только за счет наличия дисклинации без приложения внешнего давления. В более тонких цилиндрах такая область может отсутствовать.

На рис. 3 представлена область устойчивости для цилиндра из материала Мурнагана, близкого к сплошному, характеристики которого также соответствуют оргстеклу из [19]:

$$\begin{aligned}\lambda &= 3,9 \cdot 10^4 \text{ МПа}, \\ \mu &= 1,86 \cdot 10^4 \text{ МПа}, \\ l &= 1,09 \cdot 10^4 \text{ МПа}, \\ m &= 2,4 \cdot 10^3 \text{ МПа}, \\ n &= 1,88 \cdot 10^4 \text{ МПа}.\end{aligned}$$

Литература

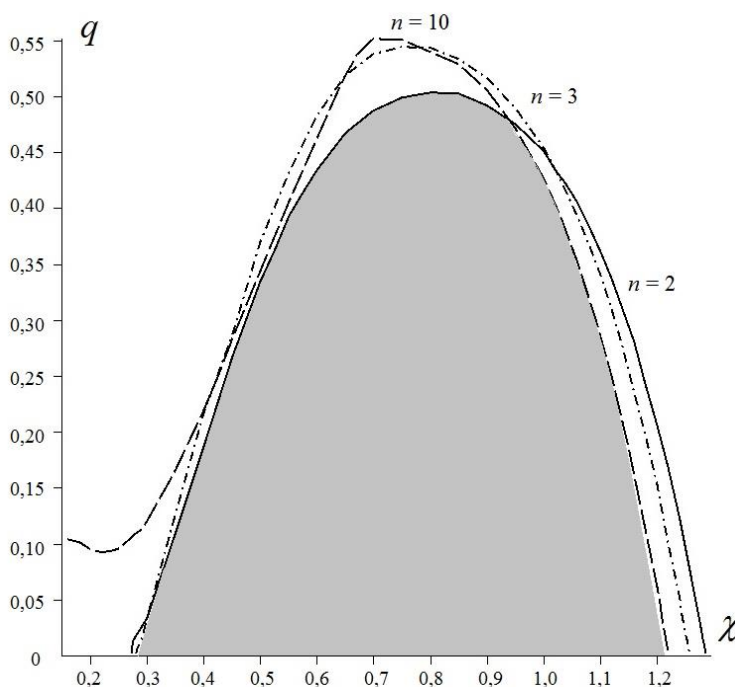


Рис. 3. Область устойчивости цилиндра с дисклинацией. Материал Мурнагана. $r_0/r_1 = 0,1$ / Fig. 3. Stability region of the cylinder with disclination. Murnaghan material. $r_0/r_1 = 0.1$

Заключение

В работе проведено исследование равновесия и устойчивости тела в форме полого кругового цилиндра из сжимаемого нелинейно-упругого материала. Внутренние напряжения в цилиндре вызваны наличием клиновой дисклинации, по боковой поверхности действует равномерно распределенная нормальная нагрузка. В качестве модели материала использовались упрощенный вариант материала Блейтца и Ко, модель Кирхгофа – Сен-Венана и пятиконстантная модель Мурнагана. Основным методом построения равновесного состояния являлся полуобратный метод нелинейной теории упругости. Исследование устойчивости осуществлялось в рамках статического бифуркационного подхода.

Проведенный сравнительный анализ использованных моделей при различных значениях параметров показал, в частности, что для толстостенных цилиндров характерно сгущение бифуркационных кривых, которое может происходить и для случаев отсутствия дисклинации, однако ее наличие делает области сгущения более обширными. Наличие дисклинации может являться как стабилизирующим фактором, так и наоборот – заметно понижать величину критического давления.

1. Владимиров В.И., Романов А.Е. Дисклинации в кристаллах. Л.: Наука, 1986. 224 с.
2. Das P., Roy J., Chakrabarti N., Basu S., Das U. Nematic textures in F-actin // J. of Chemical Physics. 2002. Vol. 116, № 20. P. 9028–9035.
3. Panuc E. Свойства и виды симметрии твердотельной кластерной фазы белка // Журн. техн. физики. 2001. Т. 71, № 10. С. 104–111.
4. Kramer E.M., Joseph V. Defect coarsening in a biological system: The vascular cambium of cottonwood trees // Physical Review. 2003. № 041914.1-041914.4. P. 67.
5. Kemkemer R., Kling D., Kaufmann D., Gruler H. Elastic properties of nematoid arrangements formed by amoeboid cells // The European Physical J. E. Soft Matter. 2000. Vol. 1, № 2–3. P. 715–722.
6. Boncheva M. Magnetic self-assembly of three-dimensional surfaces from planar sheets // Proc. Natl. Acad. Sci. USA. 2005. Vol. 11, № 102. P. 3924–3929.
7. Alben S., Brenner M.P. Self-assembly of flat sheets into closed surfaces // Physical Review. 2007. Vol. 5, № 75. P. 056113–056118.
8. Leleyter M., Olivi-Tran N. Tight-binding study of Si₂Cn (n = 3 to 42) fullerene-like or nanodiamonds microclusters // The European Physical J. D. EDP Sciences. 2008. Vol. 50. P. 153–163.
9. Вум П. Континуальная теория дислокаций. М.: Мир, 1977. 208 с.
10. Зубов Л.М. Изолированная дисклинация в нелинейно-упругом сжимаемом теле // Изв. АН СССР. МТТ. 1986. № 1. С. 69–73.
11. Зубов Л.М., Карякин М.И. Многочленные смещения и дислокации Вольтера в плоской нелинейной теории упругости // ПМТФ. 1987. № 6. С. 146–152.
12. Зеленин А.А., Зубов Л.М. Устойчивость и послекритическое поведение упругого цилиндра с дисклинацией // Изв. АН СССР. МТТ. 1989. № 1. С. 101–108.
13. Derezin S.V., Zubov L.M. Disclinations in nonlinear elasticity // ZAMM-Z. Angew. Math. Mech. 2011. Vol. 91, № 6. P. 433–442.
14. Zubov L.M. Continuum Theory of Dislocations and Disclinations in Nonlinearly Elastic Micropolar Media // Mechanics of Solids. 2011. Vol. 46, № 3. P. 348–356.
15. Карякин М.И., Поздняков И.В., Пустовалова О.Г., Шубчинская Н.Ю. О деформированном состоянии нелинейно-упругого цилиндра с внутренними напряжениями // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2013. № 6. С. 46–51.
16. Зубов Л.М., Шейдаков Д.И. Об устойчивости цилиндрической трубы при осевом растяжении и внутреннем давлении // Вестн. ЮНЦ РАН. 2006. Т. 2, № 3. С. 8–15.

17. Obrezkov L. Equilibrium and stability of nonlinearly elastic cylinder made of Blatz-Ko material // *Engineering Transactions*. 2016. Vol. 64, № 4. P. 457–463.

18. Карякин М.И., Шубчинская Н.Ю. Об устойчивости нелинейно-упругого цилиндра с собственными напряжениями при растяжении и сжатии // *Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки*. 2016. № 2. С. 56–62.

19. Лурье А.И. Нелинейная теория упругости. М.: Наука, 1980. 512 с.

20. Sivaloganathan J., Spector S.J. On the global stability of compressible elastic cylinders in tension // *J. of Elasticity*. 2015. Vol. 120, № 2. P. 161–195.

21. Ciarlet P.G. *Mathematical Elasticity*. 1988. Vol. I: Three-Dimensional Elasticity. Amsterdam : North-Holland. 451 pp.

22. Зингерман К.М. Проверка условия сильной эллиптичности для материала Мурнагана при всестороннем растяжении или сжатии // *Вестн. ТвГУ. Прикладная математика*. 2003. № 1. С. 65–70.

References

1. Vladimirov V. I., Romanov A. E. *Disklinatsii v kristallakh* [Disclinations in crystals]. Leningrad: Nauka, 1986, 224 p.

2. Das P., Roy J., Chakrabarti N., Basu S., Das U. Nematic textures in F-actin. *J. of Chemical Physics*. 2002, vol. 116, No. 20, pp. 9028-9035.

3. Rapis E. Svoistva i vidy simmetrii tverdotel'noi klasternoi fazy belka [Properties and types of symmetry of the solid-state cluster phase of a protein]. *Zhurn. tekhn. fiziki*. 2001, vol. 71, No. 10, pp. 104-111.

4. Kramer E.M., Joseph V. Defect coarsening in a biological system: The vascular cambium of cottonwood trees. *Physical Review*. 2003, No. 041914.1-041914.4, p. 67.

5. Kemkemer R., Kling D., Kaufmann D., Gruler H. Elastic properties of nematoid arrangements formed by amoeboid cells. *The European Physical J. E. Soft Matter*. 2000, vol. 1, No. 2-3, pp. 715-722.

6. Boncheva M. Magnetic self-assembly of three-dimensional surfaces from planar sheets. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*. 2005, vol. 11, No. 102, pp. 3924-3929.

7. Alben S., Brenner M.P. Self-assembly of flat sheets into closed surfaces. *Physical Review*. 2007, vol. 5, No. 75, pp. 056113-056118.

8. Leleyter M., Olivi-Tran N. Tight-binding study of Si₂Cn (n = 3 to 42) fullerene-like or nanodiamonds microclusters. *The European Physical J. D. EDP Sciences*. 2008, vol. 50, pp. 153-163.

9. Vit R. *Kontinual'naya teoriya dislokatsii* [The continuum theory of dislocations]. Moscow: Mir, 1977, 208 p.

10. Zubov L.M. Izolirovannaya disklinatsiya v nelineino-uprugom szhimaemom tele [Isolated disclination

in a nonlinear-elastic compressible body]. *Izv. AN SSSR. MTT*. 1986, No. 1, pp. 69-73.

11. Zubov L.M., Karyakin M.I. Mnogoznachnye smeshcheniya i dislokatsii Vol'terra v ploskoi nelineinoi teorii uprugosti [Multivalued displacements and Volterra dislocations in plane nonlinear elasticity theory]. *PMTF*. 1987, No. 6, pp. 146-152.

12. Zelenin A.A., Zubov L.M. Ustoichivost' i poslekriticheskoe povedenie uprugogo tsilindra s disklinatsiei [Stability and postcritical behavior of an elastic cylinder with disclination]. *Izv. AN SSSR. MTT*. 1989, No. 1, pp. 101-108.

13. Derezin S.V., Zubov L.M. Disclinations in nonlinear elasticity. *ZAMM-Z. Angew. Math. Mech*. 2011, vol. 91, No. 6, pp. 433-442.

14. Zubov L.M. Continuum Theory of Dislocations and Disclinations in Nonlinearly Elastic Micropolar Media. *Mechanics of Solids*. 2011, vol. 46, No. 3, pp. 348-356.

15. Karyakin M.I., Pozdnyakov I.V., Pustovalova O.G., Shubchinskaya N.Yu. O deformirovannom sostoyanii nelineino-uprugogo tsilindra s vnutrennimi napryazheniyami [On deformed state of nonlinearly-elastic cylinder with internal stresses]. *Izv. vuzov. Sev.-Kavk. region. Estestv. nauki*. 2013, No. 6, pp. 46-51.

16. Zubov L.M., Sheidakov D.I. Ob ustoichivosti tsilindricheskoi trubki pri osevom rastyazhenii i vnutrennem davlenii [On the stability of a cylindrical tube with axial tension and internal pressure]. *Vestn. Yuzhnogo nauch. tsentra RAN*. 2006, vol. 2, No. 3, pp. 8-15.

17. Obrezkov L. Equilibrium and stability of nonlinearly elastic cylinder made of Blatz-Ko material. *Engineering Transactions*. 2016, vol. 64, No. 4, pp. 457-463.

18. Karyakin M.I., Shubchinskaya N.Yu. Ob ustoichivosti nelineino-uprugogo tsilindra s sobstvennymi napryazheniyami pri rastyazhenii i szhatii [On stability of nonlinearly elastic cylinder with internal stresses under tension and compression]. *Izv. vuzov. Sev.-Kavk. region. Estestv. nauki*. 2016, No. 2, pp. 56-62.

19. Lur'e A.I. *Nelineinaya teoriya uprugosti* [Nonlinear theory of elasticity]. Moscow: Nauka, 1980, 512 p.

20. Sivaloganathan, J., Spector S. J. On the global stability of compressible elastic cylinders in tension. *J. of Elasticity*. 2015, vol. 120, No. 2, pp. 161-195.

21. Ciarlet P.G. *Mathematical Elasticity*. Vol. I: Three-Dimensional Elasticity. Amsterdam: North-Holland, 1988, 451 p.

22. Zingerman K.M. Proverka usloviya sil'noi elliptichnosti dlya materiala Murnagana pri vsestoronnem rastyazhenii ili szhatii [Verification of the condition of strong ellipticity for Murnaghan's nonlinear elastic material undergoing uniform volumetric tension or compression]. *Vestn. TvGU. Prikladnaya matematika*. 2003, No. 1, pp. 65-70.

УДК 517.9

DOI 10.23683/0321-3005-2018-4-32-34

О НАСЛЕДОВАНИИ НЕКОТОРЫХ СВОЙСТВ АНАЛИТИЧЕСКОЙ ФУНКЦИИ ЕЁ ПРОИЗВОДНОЙ

© 2018 г. Ю.Ф. Коробейник¹

¹Южный математический институт – филиал Владикавказского научного центра РАН, Владикавказ, Россия

ON INHERITANCE OF SOME PROPERTIES OF AN ANALYTIC FUNCTION BY ITS DERIVATIVE

Yu.F. Korobeinik¹

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

Коробейник Юрий Федорович – доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник, отдел математического анализа, Южный математический институт – филиал Владикавказского научного центра Российской академии наук, ул. Маркуса, 22, г. Владикавказ, PCO – Алания, 362027, Россия, e-mail: kor@math.sfedu.ru

Yurij F. Korobeinik - Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Main Researcher, Department of Mathematical Analysis, Southern Mathematical Institute - Branch, Vladikavkaz Scientific Center, Russian Academy of Sciences, Marcusa St., 22, Vladikavkaz, RNO-Alania, 362027, Russia, e-mail: kor@math.sfedu.ru

Рассматривается задача о наследовании некоторых важных свойств аналитических функций одной комплексной переменной их производными. Доказано, что если в некоторой симметричной относительно вещественной оси области комплексной плоскости аналитическая функция обладает свойством симметрии Римана – Шварца, то тем же самым свойством обладает и ее производная. В качестве следствия отмечено, что свойством симметрии Римана – Шварца обладает дзета-функция Римана. Исследована также задача о наследовании производной свойства аналитической функции быть решением дифференциально-разностного уравнения определенного вида (линейного или нелинейного) с заданной левой частью. Используя этот подход, установлено выводное уравнение для дзета-функции Римана, которое впоследствии предполагается использовать для исследования распределения нулей этой функции.

Ключевые слова: аналитическая функция, производная комплекснозначной функции одного комплексного переменного, дзета-функция, функциональное уравнение Римана, принцип симметрии Римана – Шварца.

We consider the problem on the heredity of the first derivative of some important properties of an analytic function of one complex variable. It is proved that if an analytic function has the Riemann-Schwarz reflection property in some domain of the complex plane that is symmetric with respect to the real axis, then its derivative has the same property. As a corollary, it is noted that the Riemann zeta function has the Riemann-Schwarz reflection proper. It is also studied the problem on the heredity of the first derivative of an analytic function to be a solution of a differential-difference equation of some kind (linear or nonlinear) with a given left side. By using this approach, it is established a determining equation for the Riemann zeta function. It is supposed to use this equation to the problem concerning the distribution of zeros of this function.

Keywords: analytical function, derivative of complex-valued function of one complex variable, zeta function, Riemann functional equation, symmetry property of Riemann-Schwarz.

Введение

Пусть $z = x + iy$, $x \in R = (-\infty, +\infty)$, $y \in R$; C – конечная комплексная плоскость ($C=C^1$). В настоящей статье показывается, что некоторые свойства аналитической функции могут передаваться по наследству ее производной. При этом, как обычно (см., например, [1, гл. II, §4, п.п. 1–2]), производной аналитической в точке z_0 функции f называется предел $\lim_{\delta \rightarrow 0} \frac{f(z_0 + \delta) - f(z_0)}{\delta}$, если этот предел конечен и не зависит от способа стремления к нулю комплексной величины δ , $\delta \in C$, $|\delta| < \delta(z_0)$.

В этом разделе приводится, возможно, известный результат о том, что производная аналитической в точке z_0 функции φ может (при некоторых дополнительных предположениях) наследовать свойство симметрии Римана – Шварца, если оно было у исходной функции φ .

Теорема. Пусть область G из C такова, что $\forall z \in G, \bar{z} \in G$ (т.е. $\bar{G} \subseteq G$). Пусть далее функция $g(z)$ определена в области G (т.е. принимает конечное комплексное значение в каждой точке из G) и аналитична в точке $z_0 \in G$ (т.е. $g'(z_0)$ существует в указанном выше смысле). Пусть, наконец, функция $g(z)$ обладает свойством симметрии Римана –

Шварца в некоторой (возможно, весьма малой) окрестности $v(z_0)$ точки z_0 , принадлежащей G .

Тогда $g'(z_0) = \overline{g'(z_0)}$.

Доказательство. Как уже отмечалось выше, если функция $g(z)$ аналитична в точке z_0 , то предел

$$\lim_{\delta \rightarrow 0} \frac{g(z_0 + \delta) - g(z_0)}{\delta} = g'(z_0) \text{ существует и конечен, а также не зависит от способа стремления к нулю комплексной величины } \delta, \delta \in C, |\delta| \leq \delta_0. \text{ В частности, если } \delta = h \in R, \text{ т.е. если } \delta \text{ будет чисто вещественным числом } h \text{ таким, что } |h| \leq \delta_0, \text{ то}$$

$g'(z_0) = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{g(z_0 + h) - g(z_0)}{h} = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{(g(z_0 + h) - g(z_0))}{h} =$

$$= \lim_{h \rightarrow 0} \left(\frac{\overline{g(z_0 + h) - g(z_0)}}{h} \right) = \overline{g'(z_0)}.$$

Следствие 1. Если функция g определена и аналитична в области G такой, что $\overline{G} \subseteq G$, и обладает в G свойством симметрии Римана – Шварца: $\forall z \in G, g(z) = \overline{g(\overline{z})}$, то ее производная $g'(z)$ также обладает в G свойством симметрии Римана – Шварца.

В частности, это следствие применимо к дзета-функции Римана $\zeta(z)$, которая, как известно (см., например, [2, 3]), аналитична в области $G_{\{1\}} := \{z \in C : 0 < |z - 1| < \infty\}$ (в точке $z = 1$ $\zeta(z)$ имеет полюс первого порядка). В данном случае в качестве области G можно взять область $G_{\{1\}}$ или любую ее подобласть G_1 такую, что $\overline{G_1} \subseteq G_1$. (Например, можно положить $G_1 = \Pi_{0,1} = \{z \in C : 0 < \operatorname{Re} z < 1\}$ или в качестве G_1 взять подобласть $G_{\{1\}}$, полученную удалением из C неограниченных прямолинейных промежутков $(-\infty, 0)$, $(1, +\infty)$, $(\frac{1}{2} + ai, \frac{1}{2} + i\infty)$, $(\frac{1}{2} - ai, \frac{1}{2} - i\infty)$, где $a \in (0, \infty)$ (последние два неограниченных промежутка линии $l_{1/2} := \left\{ z \in C : \operatorname{Re} z = \frac{1}{2} \right\}$, симметричные относительно оси $R := (-\infty, +\infty)$, могут вовсе отсутствовать).

Отметим еще одно следствие из теоремы.

Следствие 2. Пусть область G , функция g и точка z_0 из G удовлетворяют всем предположениям теоремы, и пусть еще $g(z_0) \neq 0$. Тогда

$$\frac{g'(z_0)}{g(z_0)} = \overline{\left(\frac{g'(z_0)}{g(z_0)} \right)}.$$

Действительно, так как по теореме $g'(z_0) = \overline{g'(z_0)}$ и, кроме того, $g(z_0) = \overline{g(z_0)} \neq 0$, то

$$\frac{g'(z_0)}{g(z_0)} = \overline{\left(\frac{g'(z_0)}{g(z_0)} \right)} = \left(\frac{\overline{g'(z_0)}}{\overline{g(z_0)}} \right).$$

В частности, равенство $\frac{\zeta'(z)}{\zeta(z)} = \overline{\frac{\zeta'(z)}{\zeta(z)}}$ выполнено в любой точке z из $G_{\{1\}}$, не являющейся нулем $\zeta(z)$.

Заметим, что здесь, как и в последующем тексте, символ $f'(z_1)$ обозначает (как обычно) значение производной функции $f(z)$ в точке $z = z_1$.

Аналитические функции, удовлетворяющие различным функциональным уравнениям. Выводное уравнение для дзета-функции Римана

Вопрос о наследовании каких-либо свойств аналитической функции f ее производной может возникнуть и в случае, когда функция f удовлетворяет некоторому функциональному уравнению. В этом разделе рассмотрены некоторые частные случаи этой довольно общей и сложной проблемы. Пусть $\gamma_j \in C, j = 0, 1, \dots, n$, область G в C такова, что $G + \gamma_{j_1} := \{z \in C : z = w + \gamma_{j_1}, w \in G\} \subseteq G$ при $\gamma_1 = 0, 1, \dots, n$. Предположим далее, что функция $g(z)$ аналитична в области G и удовлетворяет ($\forall z \in G$) линейному дифференциально-разностному уравнению

$$\sum_{j=0}^n a_j(z) f^{(j)}(z + \gamma_{n-j}) = b(z), \quad (1)$$

в котором функции $b(z)$ и $a_j(z), j = 0, 1, 2, \dots, n$, аналитичны в области G . Дифференцируя (по z) равенство (1), найдем, что $\forall z \in G$ выполняется соотношение

$$\sum_{k=0}^n a_k(z) f_1^{(k)}(z + \gamma_{n-k}) = b'(z) - \sum_{k=0}^n a'_k(z) f^{(k)}(z),$$

в котором $f_1(z) = f'(z)$. Таким образом, в рассматриваемом случае производная аналитической в G функции $f(z)$, удовлетворяющей уравнению (1) в области G , является аналитическим в G решением линейного дифференциально-разностного уравнения с той же левой частью, но уже с другой правой частью.

Ситуация усложнится при переходе к общему линейному дифференциально-разностному уравнению с аналитическими (в G) коэффициентами

$$\sum_{j=0}^n a_j(z) f^{(j)}(v_{n-j}z + \gamma_{n-j}) = b(z), \text{ где } v_s \in C,$$

$\gamma_s \in C, s = 0, 1, \dots, n < +\infty$. Не разбирая этой более сложной ситуации во всей ее общности, ограничимся

в данной статье двумя примерами, первый из которых довольно тривиален. Как известно, если $f(z)$ – целая четная функция одного комплексного переменного z , то ее производная будет нечетной целой функцией (и таким образом, свойство четности или нечетности не наследуется первой производной аналитической функции). В данном случае целая функция $f(z)$ удовлетворяет линейному функциональному уравнению $F(z) = F(-z)$, $\forall z \in C$, а ее первая производная $f'(z)$ (также при всех z из C) – линейному, но другому функциональному уравнению $F(z) = -F(-z)$ (или, соответственно, уравнениям $F(z) - F(-z) = 0$ и $F(z) + F(-z) = 0$).

Для построения второго примера обратимся к уже знакомой дзета-функции Римана $\zeta(z)$, которая, как известно (см., например, [2, 3]), аналитична в области $G_{\{1\}}$ и удовлетворяет в этой области функциональному уравнению Римана:

$$\forall z \in G_{\{1\}}, \quad \zeta(z) = a(z)\zeta(1-z),$$

$$a(z) = 2(2\pi)^{z-1} \sin \frac{\pi z}{2} \cdot \Gamma(1-z). \quad (2)$$

Как видно из только что приведенного явного выражения множителя $a(z)$ этого уравнения, он является мероморфной в C функцией с чисто вещественными полюсами (и нулями).

Пусть $z \in G_{\{1\}}$. Дифференцируя (по z) равенство (2) и применяя правило (при дифференцировании правой части (2)) дифференцирования сложной функции, а затем перенеся в левую часть полученного соотношения одно слагаемое его правой части, получим в итоге (еще линейное, но уже неоднородное) функциональное уравнение, которому в области $G_{\{1\}}$ удовлетворяет функция $\zeta'(z)$:

$$\Phi(z) + a(z)\Phi(1-z) = a'(z)\zeta(1-z) \quad (3)$$

(здесь $z \in G_{\{1\}}$ и $\Phi(z) = \zeta'(z)$).

Это равенство можно при некоторых дополнительных предположениях преобразовать в несколько иной вид. Именно если $z_0 \in G_{\{1\}}$ и если два каких-либо (произвольно взятых) числа из тройки $a(z_0)$, $\zeta(z_0)$, $\zeta(1-z_0)$, отличны от нуля (т.е. если $a(z_0) \cdot \zeta(1-z_0) \cdot \zeta(z_0) \neq 0$), то разделив (при $z = z_0$) каждую из двух частей равенства (3) на соответствующую часть уравнения Римана (2), получим соотношение

$$\frac{\zeta'(z_0)}{\zeta(z_0)} + \frac{\zeta'(1-z_0)}{\zeta(1-z_0)} = \frac{a'(z_0)}{a(z_0)}.$$

Таким образом,

$$\frac{\zeta'(z)}{\zeta(z)} + \frac{\zeta'(1-z)}{\zeta(1-z)} = \frac{a'(z)}{a(z)}, \quad z \in G_{\{1\}},$$

$$a(z) \cdot \zeta(1-z) \cdot \zeta(z) \neq 0. \quad (4)$$

Равенство (4) будет далее называться выводным уравнением для дзета-функции Римана $\zeta(z)$. Как выяснилось, это уравнение можно весьма эффективно применять при изучении распределения нулей функции $\zeta(z)$ в некоторых подобластях области $G_{\{1\}}$ (полученные на этом пути результаты готовятся к публикации в ближайших статьях автора).

Выводное уравнение (4) для $\zeta(z)$ можно получить и другим (близким) способом. Именно если $z_1 \in G_{\{1\}}$, то $\zeta'(z_1) = (a(z)\zeta(1-z))'_{z=z_1} =$

$$= \lim_{\delta \rightarrow 0} \frac{1}{\delta} (a(z_1 + \delta)\zeta(1-z_1 - \delta) - a(z_1)\zeta(1-z_1)), \text{ где}$$

$$\delta \in C, \quad |\delta| < \varepsilon_1. \text{ Но тогда } f'(z_1) =$$

$$= \lim_{\delta \rightarrow 0} \left\{ \frac{(a(z_1 + \delta)\zeta(1-z_1 - \delta) - a(z_1)\zeta(1-z_1))}{\delta} - \frac{(a(z_1)\zeta(1-z_1 - \delta) - a(z_1)\zeta(1-z_1))}{-\delta} \right\} =$$

$$= \zeta(1-z_1) \cdot \lim_{\delta \rightarrow 0} \frac{a(z_1 + \delta) - a(z_1)}{\delta} -$$

$$- a(z_1) \lim_{\delta \rightarrow 0} \frac{\zeta(1-z_1 - \delta) - \zeta(1-z_1)}{(-\delta)} =$$

$$= \zeta(1-z_1)a'(z_1) - a(z_1)\zeta'(1-z_1).$$

Далее, считая, что $a(z_1) \cdot \zeta(1-z_1) \cdot \zeta(z_1) \neq 0$,

приходим точно так, как ранее, к равенству

$$\frac{\zeta'(z_1)}{\zeta(z_1)} + \frac{\zeta'(1-z_1)}{\zeta(1-z_1)} = \frac{a'(z_1)}{a(z_1)}, \quad z_1 \in G_{\{1\}},$$

$$a(z_1) \cdot \zeta(1-z_1) \cdot \zeta(z_1) \neq 0.$$

Литература

1. Привалов И.И. Введение в теорию функций комплексного переменного. М.: ГИФМЛ, 1960. 443 с.
2. Титчмарш Е.К. Теория дзета-функции Римана. М.: ИЛ, 1957. 407 с.
3. Edwards H.M. Riemann's Zeta Function. N.Y.: Dover's Publications, Inc. Minnesota, 2001. 315 p.

References

1. Privalov I.I. Vvedenie v teoriyu funktsii kompleksnogo peremennogo [Introduction to the theory of functions of a complex variable]. Moscow: GIFML, 1960, 443 p.
2. Titchmarsh E.K. Teoriya dzeta-funktsii Rimana [Theory of the Zeta function of Riemann]. Moscow: IL, 1957, 407 p.
3. Edwards H.M. Riemann's Zeta Function. New York: Dover's Publications, Inc. Minnesota, 2001, 315 p.

УДК 514.76

DOI 10.23683/0321-3005-2018-4-35-39

C_{10} -МНОГООБРАЗИЯ ТОЧЕЧНО ПОСТОЯННОЙ ГОЛОМОРФНОЙ КОНГАРМОНИЧЕСКОЙ КРИВИЗНЫ

© 2018 г. А.Р. Рустанов¹

¹Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Москва, Россия

C_{10} -MANIFOLDS OF A POINTWISE CONSTANT HOLOMORPHIC CONHARMONIC CURVATURE

A.R. Rustanov¹

¹National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia

Рустанов Алигаджи Рабаданович – кандидат физико-математических наук, доцент, кафедра прикладной математики, Институт фундаментального образования, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Ярославское шоссе, 26, г. Москва, 129337, Россия, e-mail: aligadzhi@yandex.ru

Aligadzhi R. Rustanov - Candidate of Physics and Mathematics, Associate Professor, Department of Applied Mathematics, Institute of Fundamental Education, National Research Moscow State University of Civil Engineering, Yaroslavl'skoye Highway, 26, Moscow, 129337, Russia, e-mail: aligadzhi@yandex.ru

Рассматриваются почти контактные метрические многообразия класса C_{10} в классификации Чинья – Гонзалеза точечно постоянной голоморфной конгармонической кривизны. Вводится в рассмотрение тензор голоморфной конгармонической кривизны. Получены условия на этот тензор, когда C_{10} -многообразие является многообразием постоянной голоморфной конгармонической кривизны. Доказано, что точечное постоянство голоморфной конгармонической кривизны C_{10} -многообразия в размерности свыше трех равносильно глобальному постоянству его голоморфной конгармонической кривизны. Доказано, что если C_{10} -многообразие является точечно постоянной голоморфной конгармонической кривизны c , тогда либо M является косимплектическим многообразием, либо $c = -\frac{6}{5} \cdot \frac{9n^2+5n-1}{3n(2n-1)(n+1)} F_h^h > 0$.

Ключевые слова: C_{10} -многообразие, косимплектическое многообразие, тензор конгармонической кривизны, тензор голоморфной конгармонической кривизны, C_{10} -пространственная конгармоническая форма.

In this paper we consider almost contact metric manifolds of class C_{10} in the Chiney-Gonzalez classification, pointwise constant holomorphic conharmonic curvature. A tensor of holomorphic conharmonic curvature is introduced. Conditions are obtained for this tensor when the C_{10} -manifold is a manifold of constant holomorphic conharmonic curvature. It is proved that the pointwise constancy of the holomorphic conharmonic curvature of a C_{10} -manifold in dimension greater than three is equivalent to the global constancy of its holomorphic conharmonic curvature. It is proved that if a C_{10} -manifold is a pointwise constant holomorphic conharmonic curvature c , then either M is a cosymplectic manifold or $c = -\frac{6}{5} \cdot \frac{9n^2+5n-1}{3n(2n-1)(n+1)} F_h^h > 0$.

Keywords: C_{10} -manifold, cosymplectic manifold, tensor of conharmonic curvature, tensor of holomorphic conharmonic curvature, C_{10} -spatial conharmonic form.

Понятие голоморфной секционной кривизны является одним из наиболее фундаментальных в дифференциальной геометрии почти контактных метрических многообразий. Наиболее хорошо известно требование точечного постоянства секционной кривизны. Римановы многообразия, обладающие этим свойством, называются пространственными формами. Отметим, что классический результат дифференциальной геометрии утверждает, что любая про-

странственная форма локально изометрична евклидову пространству R^n , или n -мерной сфере S^n , или n -мерному гиперболическому пространству H^n . Этот результат наталкивает нас на исследование почти контактных метрических многообразий класса C_{10} , обладающих требованием точечного постоянства голоморфной конгармонической кривизны. Интерес к данному классу многообразий объясняется тем фактом, что они являются естественными обобщениями

косимплектических многообразий. Этот класс многообразий был введен в работе [1] и изучался в [2–7]. В данной статье продолжается изучение геометрии тензора конгармонической кривизны, начатое в [4].

Пусть M – гладкое почти контактное метрическое многообразие (АС-многообразие) размерности $2n + 1$ с почти контактной метрической структурой $\{\Phi, \eta, \xi, g\}$ [8, 9]; $\mathcal{X}(M) - C^\infty$ -модуль гладких векторных полей на многообразии M . В дальнейшем все многообразия, тензорные поля и т.п. объекты предполагаются гладкими класса C^∞ .

Определение 1 [2]. Почти контактная метрическая АС-структура, характеризуемая тождеством $\nabla_X(\Phi)Y = \xi \nabla_Y(\eta)\Phi X + \eta(Y)\nabla_{\Phi X}\xi$; $X, Y \in \mathcal{X}(M)$, называется C_{10} -структурой. АС-многообразие, снабженное C_{10} -структурой, называется C_{10} -многообразием.

Тождество $(A_{b[c}^{ah} - F^{ah}F_{b[c}F_{h|d]})F_{h|d]} = 0$ называется первым фундаментальным тождеством C_{10} -многообразий; $F_{a[b}F_{cd]} = 0$ – вторым [4].

Пусть $M^{2n+1} - C_{10}$ -многообразие. Тензор конгармонической кривизны почти контактной метрической структуры на пространстве расслоения всех реперов вычисляется по формуле [10]

$$\mathcal{K}_{jkl}^i = R_{jkl}^i + \frac{1}{2n-1}(\delta_k^i S_{jl} - \delta_l^i S_{jk} + g_{jl}S_k^i - g_{jk}S_l^i), \quad (1)$$

где R_{jkl}^i, S_k^i, g_{jl} – компоненты тензоров римановой кривизны, Риччи, метрического.

Легко показать из (1), что тензор конгармонической кривизны обладает всеми классическими свойствами симметрии тензора Римана – Кристоффеля.

Напомним, что на пространстве присоединенной G -структуры тензор конгармонической кривизны C_{10} -многообразия имеет следующие ненулевые компоненты [4]:

$$\begin{aligned} 1) \mathcal{K}_{a0b}^0 &= R_{a0b}^0 + \frac{1}{2n-1}(S_{a0} + S_{00}\delta_a^b) = \\ &= -F_{ac}F^{cb} + \frac{1}{2n-1}(A_{ac}^{bc} - F_{ac}F^{cb} - 2F_{cd}F^{dc}\delta_a^b); \\ 2) \mathcal{K}_{bcd}^a &= R_{bcd}^a + \frac{1}{2n-1}(S_{b\hat{a}}\delta_c^a + \delta_b^a S_{\hat{a}c}) = \\ &= A_{bc}^{ad} + \frac{1}{2n-1}\{\delta_c^a(A_{bh}^{dh} - F_{bh}F^{hd}) + \\ &\quad + \delta_b^a(A_{ch}^{ah} - F_{ch}F^{ha})\}; \\ 3) \mathcal{K}_{bcd}^a &= \frac{1}{2n-1}(S_{b\hat{a}}\delta_c^a - S_{\hat{b}c}\delta_d^a + \delta_a^b S_{\hat{a}c} - \delta_c^b S_{\hat{a}d}) = \\ &= \frac{1}{2n-1}\{\delta_c^a(A_{dh}^{bh} - F_{dh}F^{hb}) - \delta_d^a(A_{ch}^{bh} - F_{ch}F^{hb}) + \\ &\quad + \delta_d^b(A_{ch}^{ah} - F_{ch}F^{ha}) - \delta_c^b(A_{dh}^{ah} - F_{dh}F^{hd})\}; \\ 4) \mathcal{K}_{bcd}^{\hat{a}} &= R_{bcd}^{\hat{a}} = -F_{ab}F_{cd}. \end{aligned} \quad (2)$$

К (2) добавляются соотношения, полученные с учетом вещественности и свойств симметрии этого тензора как алгебраического тензора кривизны. Остальные компоненты тензора конгармонической кривизны равны нулю.

Определение 2. Почти контактное метрическое многообразие M называется многообразием точечно постоянной голоморфной конгармонической кривизны c , если

$$\begin{aligned} \forall X \in \mathcal{L} = \text{Im}\Phi = \text{ker}\eta &\Rightarrow \\ \Rightarrow \langle \mathcal{K}_m(X, \Phi X)\Phi X, X \rangle &= c\|X\|^4; \\ X \in \mathcal{L} = \text{Im}\Phi = \text{ker}\eta; c &\in C^\infty(M). \end{aligned} \quad (3)$$

Если к тому же $c = \text{const}$, многообразие называется многообразием глобально постоянной голоморфной конгармонической кривизны. C_{10} -многообразие точечно постоянной голоморфной конгармонической кривизны назовем C_{10} -пространственной конгармонической формой и будем обозначать через $M(c)$.

Пусть M – почти контактное метрическое многообразие точечно постоянной голоморфной конгармонической кривизны c . Расписывая соотношение (3) на пространстве присоединенной G -структуры, получим

$$\begin{aligned} \langle \mathcal{K}_m(X, \Phi X)\Phi X, X \rangle &= \\ = g_{ij}\mathcal{K}_{klm}^j(\Phi X)^k X^l(\Phi X)^m X^i &= \\ = -2\mathcal{K}_{bcd}^a X_a X^b X^c X^d + 4\mathcal{K}_{bcd}^a X_a X^b X^c X_d + \\ + 2\mathcal{K}_{b\hat{c}d}^a X_a X_b X_c X^d + 2\mathcal{K}_{bcd}^a X_a X_b X^c X^d - \\ - \mathcal{K}_{b\hat{c}d}^a X_a X_b X_c X_d - \mathcal{K}_{bcd}^{\hat{a}} X^a X^b X^c X^d. \end{aligned}$$

В силу свойств симметрии тензора конгармонической кривизны $\mathcal{K}_{bcd}^a X_a X^b X^c X^d = -\mathcal{K}_{bdc}^a X_a X^b X^c X^d = -\mathcal{K}_{bcd}^a X_a X^b X^c X^d$, т.е. $\mathcal{K}_{bcd}^a = 0$. Аналогично $\mathcal{K}_{b\hat{c}d}^a = 0$, $\mathcal{K}_{\hat{b}cd}^a = 0$, $\mathcal{K}_{b\hat{c}\hat{d}}^a = 0$, $\mathcal{K}_{bcd}^{\hat{a}} = 0$. С другой стороны, на пространстве присоединенной G -структуры

$$c\|X\|^2 = 4c g_{ab}g_{cd}X^b X^c X_a X_d = 4c\delta_b^a\delta_c^d X^b X^c X_a X_d.$$

Таким образом, соотношение (3) на пространстве присоединенной G -структуры запишется в форме $4\mathcal{K}_{bcd}^a X_a X^b X^c X_d = 4c\delta_b^a\delta_c^d X^b X^c X_a X_d$.

Поляризация этого соотношения приводит к теореме.

Теорема 1. Почти контактное метрическое многообразие является многообразием точечно постоянной голоморфной конгармонической кривизны c тогда и только тогда, когда на пространстве присоединенной G -структуры

$$\mathcal{K}_{(bc)}^{(a d)} = \frac{c}{2}\delta_{bc}^{ad}, \quad (4)$$

где $\delta_{bc}^{ad} = \delta_b^a\delta_c^d + \delta_b^d\delta_c^a$.

Исследуем теперь C_{10} -многообразие постоянной голоморфной конгармонической кривизны.

Поскольку $\mathcal{K}_{bcd}^a = A_{bc}^{ad} + \frac{1}{2n-1}(S_{b\hat{a}}\delta_c^a + \delta_b^a S_{\hat{a}c})$, с учетом кососимметричности структурного тензора

и теоремы 1 $A_{bc}^{ad} + \frac{1}{2(2n-1)}(S_{b\hat{a}}\delta_c^a + \delta_b^d S_{\hat{a}c} + S_{c\hat{a}}\delta_b^a + S_{b\hat{a}}\delta_c^d) = \frac{c}{2}\tilde{\delta}_{bc}^{ad}$. Введем в рассмотрение чистый тензор $\tilde{A}$ типа $\begin{pmatrix} 2 & 2 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$ с компонентами $\tilde{A}_{bc}^{ad} = A_{bc}^{ad} + \frac{1}{2(2n-1)}(S_{b\hat{a}}\delta_c^a + \delta_b^d S_{\hat{a}c} + S_{c\hat{a}}\delta_b^a + S_{b\hat{a}}\delta_c^d)$, симметричный по любой паре верхних и нижних индексов. Назовем его тензором голоморфной конгармонической кривизны. Тогда равенство (4) примет вид

$$\tilde{A}_{bc}^{ad} = \frac{c}{2}\tilde{\delta}_{bc}^{ad}. \quad (5)$$

Рассмотрим 4-форму

$$H(X, Y, Z, W) = \left(\tilde{A}_{bc}^{ad} - \frac{c}{2}\tilde{\delta}_{bc}^{ad}\right)X^b Y^c Z_a W_d = \\ = \left\{A_{bc}^{ad} + \frac{1}{2(2n-1)}(S_{b\hat{a}}\delta_c^a + \delta_b^d S_{\hat{a}c} + S_{c\hat{a}}\delta_b^a + S_{b\hat{a}}\delta_c^d) - \frac{c}{2}\tilde{\delta}_{bc}^{ad}\right\}X^b Y^c Z_a W_d; X, Y, Z, W \in \mathcal{X}(M).$$

Согласно (5), $H(X, X, X, X) = 0$. Более того, форма $H(X, X, X, X)$ обладает свойствами:

1. $H(X_1 + X_2, Y, Z, W) = \left\{A_{bc}^{ad} + \frac{1}{2(2n-1)}(S_{b\hat{a}}\delta_c^a + \delta_b^d S_{\hat{a}c} + S_{c\hat{a}}\delta_b^a + S_{b\hat{a}}\delta_c^d) - \frac{c}{2}\tilde{\delta}_{bc}^{ad}\right\} \times \\ \times (X_1 + X_2)^b Y^c Z_a W_d = \left\{A_{bc}^{ad} + \frac{1}{2(2n-1)}(S_{b\hat{a}}\delta_c^a + \delta_b^d S_{\hat{a}c} + S_{c\hat{a}}\delta_b^a + S_{b\hat{a}}\delta_c^d) - \frac{c}{2}\tilde{\delta}_{bc}^{ad}\right\} X_1^b Y^c Z_a W_d + \\ + \left\{A_{bc}^{ad} + \frac{1}{2(2n-1)}(S_{b\hat{a}}\delta_c^a + \delta_b^d S_{\hat{a}c} + S_{c\hat{a}}\delta_b^a + S_{b\hat{a}}\delta_c^d) - \frac{c}{2}\tilde{\delta}_{bc}^{ad}\right\} X_2^b Y^c Z_a W_d = H(X_1, Y, Z, W) + H(X_2, Y, Z, W).$
2. $H(X, Y, Z, W) = H(Y, X, Z, W) = H(X, Y, W, Z).$
3. $H(X, Y, Z_1 + Z_2, W) = H(X, Y, Z_1, W) + H(X, Y, Z_2, W).$
4. $H(\Phi X, Y, Z, W) = \sqrt{-1}H(X, Y, Z, W).$
5. $H(X, Y, \Phi Z, W) = -\sqrt{-1}H(X, Y, Z, W).$

Опираясь на приведенные свойства, можно легко показать, что $H(X, Y, Z, W) = 0$.

Таким образом, доказана

Теорема 2. C_{10} -многообразие является многообразием постоянной голоморфной конгармонической кривизны с тогда и только тогда, когда на пространстве присоединенной G -структуры

$$\tilde{A}_{bc}^{ad} = \frac{c}{2}\tilde{\delta}_{bc}^{ad}.$$

Введем обозначения:

$$A_b^a = A_{bc}^{ac}; E_b^a = F^{ac}F_{cb}. \quad (6)$$

Продифференцировав внешним образом соотношения (6), с учетом полной группы структурных уравнений C_{10} -многообразий [2] получим следующие соотношения:

$$dA_b^a + A_b^c \theta_c^a - A_c^a \theta_b^c = A_{b\hat{a}}^{ad} \omega^c + A_{b\hat{a}}^{ad} \omega_c; \\ dF_b^a + F_b^c \theta_c^a - F_c^a \theta_b^c = 0. \quad (7)$$

Продифференцируем внешним образом соотношение $\tilde{A}_{bc}^{ad} = \frac{c}{2}\tilde{\delta}_{bc}^{ad}$.

$$d\tilde{A}_{bc}^{ad} = \frac{1}{2}\tilde{\delta}_{bc}^{ad} dc,$$

$dA_{bc}^{ad} + \frac{1}{2(2n-1)}d\{(A_{bh}^{dh} - F_{bh}F^{hd})\delta_c^a + (A_{ch}^{ah} - F_{ch}F^{ha})\delta_b^d + (A_{ch}^{dh} - F_{ch}F^{hd})\delta_b^a + (A_{bh}^{ah} - F_{bh}F^{ha})\delta_c^d\} = \frac{1}{2}\tilde{\delta}_{bc}^{ad} dc$, т.е.

$dA_{bc}^{ad} + \frac{1}{2(2n-1)}\{(dA_b^d - dF_b^d)\delta_c^a + (dA_c^a - dF_c^a)\delta_b^d + (dA_c^d - dF_c^d)\delta_b^a + (dA_b^a - dF_b^a)\delta_c^d\} = \frac{1}{2}\tilde{\delta}_{bc}^{ad} dc$. С учетом (7) и полной группы структурных уравнений C_{10} -многообразий [2], последнее равенство переписывается в виде

$$A_{bch}^{ad} \omega^h + A_{bc}^{adh} \omega_h - A_{bc}^{hd} \theta_h^a - A_{bc}^{ah} \theta_h^d + A_{hc}^{ad} \theta_b^h + \\ + A_{bh}^{ad} \theta_c^h + \frac{1}{2(2n-1)}\{(A_{bgh}^{dg} \omega^h + A_{bg}^{dgh} \omega_h - A_b^h \theta_h^d + \\ + A_h^d \theta_b^h + F_b^h \theta_h^d - F_h^d \theta_b^h)\delta_c^a\} + \frac{1}{2(2n-1)}(A_{cgh}^{ag} \omega^h + \\ + A_{cg}^{agh} \omega_h - A_c^h \theta_h^a + A_h^a \theta_c^h + F_c^h \theta_h^a - F_h^a \theta_c^h)\delta_b^d + \\ + \frac{1}{2(2n-1)}(A_{cgh}^{dg} \omega^h + A_{cg}^{dgh} \omega_h - A_c^d \theta_h^d + A_h^d \theta_c^h + \\ + F_c^h \theta_h^d - F_h^d \theta_c^h)\delta_b^a + \frac{1}{2(2n-1)}(A_{bgh}^{ag} \omega^h + A_{bg}^{agh} \omega_h - \\ - A_b^h \theta_h^a + A_h^a \theta_b^h + F_b^h \theta_h^a - F_h^a \theta_b^h)\delta_c^d = \frac{1}{2}\tilde{\delta}_{bc}^{ad} dc, \text{ т.е.}$$

$$\left\{A_{bch}^{ad} + \frac{1}{2(2n-1)}A_{bgh}^{dg} \delta_c^a + \frac{1}{2(2n-1)}A_{cgh}^{ag} \delta_b^d + \frac{1}{2(2n-1)}A_{cgh}^{dg} \delta_b^a + \frac{1}{2(2n-1)}A_{bgh}^{ag} \delta_c^d\right\} \omega^h + \\ + \left\{A_{bc}^{adh} + \frac{1}{2(2n-1)}A_{bg}^{dgh} \delta_c^a + \frac{1}{2(2n-1)}A_{cg}^{agh} \delta_b^d + \frac{1}{2(2n-1)}A_{cgh}^{dg} \delta_b^a + \frac{1}{2(2n-1)}A_{bgh}^{ag} \delta_c^d\right\} \omega_h - \\ - \left[A_{bc}^{hd} + \frac{1}{2(2n-1)}\{(A_c^h - F_c^h)\delta_b^d + (A_b^h - F_b^h)\delta_c^d\}\right] \theta_h^a - \\ - \left[A_{bc}^{ah} + \frac{1}{2(2n-1)}\{(A_b^h - F_b^h)\delta_c^a + (A_c^h - F_c^h)\delta_b^a\}\right] \theta_h^d + \\ + \left[A_{hc}^{ad} + \frac{1}{2(2n-1)}\{(A_h^d - F_h^d)\delta_c^a + (A_a^h - F_a^h)\delta_c^d\}\right] \theta_b^h + \\ + \left[A_{bh}^{ad} + \frac{1}{2(2n-1)}\{(A_h^a - F_h^a)\delta_b^d + (A_a^h - F_a^h)\delta_b^a\}\right] \theta_c^h = \\ = \frac{1}{2}\tilde{\delta}_{bc}^{ad} dc, \text{ т.е.}$$

Поскольку $c \in C^\infty(M)$, то форма dc (точнее, $d(\pi^*c) = \pi^*(dc)$) является горизонтальной. Следовательно, $dc = c_a \omega^a + c^a \omega_a + c_0 \omega$. Тогда, в силу (7), последнее равенство примет вид

$$\left\{A_{bch}^{ad} + \frac{1}{2(2n-1)}A_{bgh}^{dg} \delta_c^a + \frac{1}{2(2n-1)}A_{cgh}^{ag} \delta_b^d + \frac{1}{2(2n-1)}A_{cgh}^{dg} \delta_b^a + \frac{1}{2(2n-1)}A_{bgh}^{ag} \delta_c^d\right\} \omega^h + \\ + \left\{A_{bc}^{adh} + \frac{1}{2(2n-1)}A_{bg}^{dgh} \delta_c^a + \frac{1}{2(2n-1)}A_{cg}^{agh} \delta_b^d + \frac{1}{2(2n-1)}A_{cgh}^{dg} \delta_b^a + \frac{1}{2(2n-1)}A_{bgh}^{ag} \delta_c^d\right\} \omega_h - \\ - \tilde{A}_{bc}^{hd} \theta_h^a - \tilde{A}_{bc}^{ah} \theta_h^d + \tilde{A}_{hc}^{ad} \theta_b^h + \tilde{A}_{bh}^{ad} \theta_c^h = \frac{1}{2}\tilde{\delta}_{bc}^{ad} dc.$$

$$\begin{aligned}
 & + \tilde{A}_{bh}^{ad} \theta_c^h = \frac{1}{2} \tilde{\delta}_{bc}^{ad} (c_a \omega^a + c^a \omega_a + c_0 \omega). \\
 & \text{Поскольку } -\frac{c}{2} \tilde{\delta}_{bc}^{hd} \theta_h^a - \frac{c}{2} \tilde{\delta}_{bc}^{ah} \theta_h^d + \frac{c}{2} \tilde{\delta}_{hc}^{ad} \theta_b^h + \\
 & + \frac{c}{2} \tilde{\delta}_{bh}^{ad} \theta_c^h = 0, \quad \text{то} \quad \left\{ A_{bch}^{ad} + \frac{1}{2(2n-1)} A_{bgh}^{dg} \delta_c^a + \right. \\
 & + \frac{1}{2(2n-1)} A_{cgh}^{ag} \delta_b^d + \frac{1}{2(2n-1)} A_{cgh}^{dg} \delta_b^a + \\
 & + \frac{1}{2(2n-1)} A_{bgh}^{ag} \delta_c^d \left. \right\} \omega^h + \left\{ A_{bc}^{adh} + \frac{1}{2(2n-1)} A_{bg}^{dgh} \delta_c^a + \right. \\
 & + \frac{1}{2(2n-1)} A_{cg}^{agh} \delta_b^d + \frac{1}{2(2n-1)} A_{cg}^{dgh} \delta_b^a + \\
 & + \frac{1}{2(2n-1)} A_{bg}^{agh} \delta_c^d \left. \right\} \omega_h = \frac{1}{2} \tilde{\delta}_{bc}^{ad} (c_a \omega^a + c^a \omega_a + c_0 \omega).
 \end{aligned}$$

Отсюда

$$\begin{aligned}
 & 1) A_{bch}^{ad} + \frac{1}{2(2n-1)} A_{bgh}^{dg} \delta_c^a + \frac{1}{2(2n-1)} A_{cgh}^{ag} \delta_b^d + \\
 & + \frac{1}{2(2n-1)} A_{cgh}^{dg} \delta_b^a + \frac{1}{2(2n-1)} A_{bgh}^{ag} \delta_c^d = \frac{1}{2} \tilde{\delta}_{bc}^{ad} c_h; \\
 & 2) A_{bc}^{adh} + \frac{1}{2(2n-1)} A_{bg}^{dgh} \delta_c^a + \frac{1}{2(2n-1)} A_{cg}^{agh} \delta_b^d + \\
 & + \frac{1}{2(2n-1)} A_{cg}^{dgh} \delta_b^a + \frac{1}{2(2n-1)} A_{bg}^{agh} \delta_c^d = \frac{1}{2} \tilde{\delta}_{bc}^{ad} c^h; \quad (8) \\
 & 3) c_0 = 0.
 \end{aligned}$$

Проальтернируем равенство (8:1) по индексам c и h . Тогда, поскольку $A_{b[ch]}^{ad} = 0$, получим

$$\begin{aligned}
 & \frac{1}{4(2n-1)} \{ A_{bgh}^{dg} \delta_c^a + A_{cgh}^{ag} \delta_b^d + A_{cgh}^{dg} \delta_b^a + \\
 & + A_{bgh}^{ag} \delta_c^d - A_{bgc}^{dg} \delta_h^a - A_{hgc}^{ag} \delta_b^d - A_{hgc}^{dg} \delta_b^a - A_{bgc}^{ag} \delta_h^d \} = \\
 & = \frac{1}{2} (\delta_b^a \delta_c^d c_h - \delta_b^a \delta_h^d c_c + \delta_b^d \delta_c^a c_h - \delta_b^d \delta_h^a c_c). \quad \text{Это ра-} \\
 & \text{венство свернем сначала по индексам } a \text{ и } b, \text{ а затем} \\
 & \text{по индексам } c \text{ и } d. \text{ Тогда } \frac{n+1}{2(2n-1)} (A_{cgh}^{cg} - A_{hgc}^{cg}) = \\
 & = \frac{1}{2} (n^2 - 1) c_h, \text{ т.е. } c_h (n^2 - 1) = 0. \text{ Отсюда либо} \\
 & n = 1, \text{ либо } c_h = 0. \text{ Аналогично из (8:2) получаем,} \\
 & \text{что либо } n = 1, \text{ либо } c^h = 0. \text{ То есть } dc = c_a \omega^a + \\
 & + c^a \omega_a + c_0 \omega = 0, \text{ а значит, } c = \text{const.}
 \end{aligned}$$

Таким образом, доказана

Теорема 3. Точечное постоянство голоморфной конгармонической кривизны связного C_{10} -многообразия размерности выше трех равносильно глобальному постоянству его голоморфной конгармонической кривизны.

Пусть $M^{2n+1} - C_{10}$ -многообразие точно постоянной голоморфной конгармонической кривизны, т.е. является C_{10} -пространственной конгармонической формой. Из (5)

$$A_{bc}^{ad} = \frac{c}{2} \tilde{\delta}_{bc}^{ad} - \frac{1}{2(2n-1)} \{ (A_b^d - F_b^d) \delta_c^a + (A_c^a - F_c^a) \delta_b^d + (A_c^d - F_c^d) \delta_b^a + (A_b^a - F_b^a) \delta_c^d \}. \quad (9)$$

Рассмотрим первое фундаментальное тождество $(A_{b[c}^{ah} - F_{b[c}^{ah} F_{h|d]} = 0$. С учетом второго фундаментального тождества его можно записать в виде

$$A_{bc}^{ah} F_{hd} - A_{bd}^{ah} F_{hc} = -F_b^a F_{cd}. \quad (10)$$

Свернем это равенство по индексам a и b . Тогда

$$A_c^h F_{hd} - A_d^h F_{hc} = -F_h^h F_{cd} = -(\sum_{ab} |F^{ab}|^2) F_{cd}.$$

Свернем равенство (10) по индексам a и c . Тогда $A_b^h F_{hd} - A_{bd}^{ah} F_{ha} = -F_b^h F_{hd}$. Так как $A_{bd}^{ah} F_{ha} = 0$, то в полученном равенстве, переобозначив b на c , получим

$$A_c^h F_{hd} = -F_c^h F_{hd}. \quad (11)$$

Назовем (11) третьим фундаментальным тождеством.

Первое фундаментальное тождество с учетом (9) и второго фундаментального тождества можно записать в виде

$$\begin{aligned}
 & \frac{c}{2} \tilde{\delta}_{bc}^{ah} F_{hd} - \frac{1}{2(2n-1)} \{ (A_b^h - F_b^h) \delta_c^a + (A_c^a - F_c^a) \delta_b^h + \\
 & + (A_c^h - F_c^h) \delta_b^a + (A_b^a - F_b^a) \delta_c^h \} F_{hd} - \frac{c}{2} \tilde{\delta}_{bd}^{ah} F_{hc} + \\
 & + \frac{1}{2(2n-1)} \{ (A_b^h - F_b^h) \delta_c^a + (A_c^a - F_c^a) \delta_b^h + (A_c^h - \\
 & - F_c^h) \delta_b^a + (A_b^a - F_b^a) \delta_c^h \} F_{hc} + F^{ah} F_{hb} F_{cd} = 0, \\
 & \text{т.е. с учетом (11) } \frac{c}{2} (2\delta_b^a F_{cd} + \delta_c^a F_{bd} - \delta_d^a F_{bc}) = \\
 & = \frac{1}{2(2n-1)} \{ A_c^a F_{bd} + A_b^a F_{cd} - A_d^a F_{bc} - A_b^a F_{dc} - \\
 & - 2\delta_c^a F_b^h F_{hd} - F_c^a F_{bd} - 2\delta_b^a F_c^h F_{hd} - F_b^a F_{cd} + \\
 & + 2\delta_d^a F_b^h F_{hc} + F_d^a F_{bc} + 2\delta_b^a F_d^h F_{hc} + F_b^a F_{dc} \} - F_b^a F_{cd}.
 \end{aligned}$$

Полученное равенство свернем по индексам a и b . Тогда получим

$$c(n+1)F_{cd} = \frac{1}{2(2n-1)} \{ A_c^h F_{hd} - A_d^h F_{hc} + 2A_h^h F_{cd} - 2F_h^h F_{cd} - (2n+3)F_c^h F_{hd} + (2n+3)F_d^h F_{hc} \} - F_h^h F_{cd}. \quad (12)$$

С учетом третьего фундаментального тождества равенство (12) можно записать в форме

$$c(n+1)F_{cd} = \frac{1}{2(2n-1)} \{ 2(n+2)(-F_c^h F_{hd} + F_d^h F_{hc}) + 2(A_h^h - F_h^h)F_{cd} \} - F_h^h F_{cd}. \quad (13)$$

Из (9)

$$A_b^a = \frac{c}{2} (n+1) \delta_b^a - \frac{1}{2(2n-1)} \{ (n+2)(A_b^a - F_b^a) + (A_h^h - F_h^h) \delta_b^a \}. \quad (14)$$

Свернем равенство (14) по индексам a и b . Получим

$$A_h^h = \frac{c}{6} (n+1)(2n-1) + \frac{n+1}{3n} F_h^h. \quad (15)$$

Подставив (15) в (13), получим равенство

$$\frac{5}{6} c(n+1)F_{cd} = \frac{n+2}{2n-1} (-F_c^h F_{hd} + F_d^h F_{hc}) - \frac{3n+1}{3n} F_h^h F_{cd},$$

которое в силу второго фундаментального тождества можно записать в виде

$$\frac{5}{6} c(n+1)F_{cd} = -\frac{9n^2+5n-1}{3n(2n-1)} F_h^h F_{cd}, \text{ т.е.}$$

$$\left\{ \frac{5}{6} c(n+1) + \frac{9n^2+5n-1}{3n(2n-1)} F_h^h \right\} F_{cd} = 0. \quad \text{Тогда либо}$$

$F_{cd} = 0$, т.е. многообразие является косимплектическим, либо $c = -\frac{6}{5} \cdot \frac{9n^2+5n-1}{3n(2n-1)(n+1)} F_h^h \geq 0$. Если $c = 0$,

то $F_h^h = 0$, т.е. многообразие является косимплектическим.

Таким образом, доказана

Теорема 4. Пусть M – C_{10} -многообразие то-
ечно постоянной голоморфной конгармониче-
ской кривизны c . Тогда либо M является косим-
плектическим многообразием, либо

$$c = -\frac{6}{5} \cdot \frac{9n^2 + 5n - 1}{3n(2n-1)(n+1)} F_h^h > 0.$$

Литература

1. Chinea D., Gonzalez C. Classification of almost contact metric structures // *Annali di Matematica pura ed applicata* (IV). 1990. Vol. V, CLVI. P. 15–36.
2. Рустанов А.Р. Тождества кривизны почти контактных метрических многообразий класса C_{10} // Преподаватель XXI век. 2010. № 4. С. 199–207.
3. Рустанов А.Р. Свойства изотропности тензора кривизны почти контактных метрических многообразий класса C_{10} // Преподаватель XXI век. 2014. № 2. С. 207–213.
4. Мелехина Т.Л., Рустанов А.Р. Конгармонические аналоги тождеств Грея для почти контактных метрических многообразий класса C_{10} // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2017. № 4-1. С. 31–36.
5. Рустанов А.Р., Рустанов З.А. C_{10} -многообразия класса R_4 // *Slovak International Scientific J.* 2017. № 6 (6). P. 79–82.
6. Рустанов А.Р., Рустанов З.А. Контактные аналоги тождеств Грея для почти контактных метрических многообразий класса C_{10} // *Инновационная наука.* 2017. № 5. С. 11–13.
7. Рустанов А.Р. Свойства изотропности C_{10} -многообразий // *Инновационная наука.* 2017. № 5. С. 13–17.
8. Кириченко В.Ф. Дифференциально-геометрические структуры на многообразиях. Изд. 2-е, доп. Одесса: Печатный дом, 2013. 458 с.
9. Кириченко В.Ф., Рустанов А.Р. Дифференциальная геометрия квазисасакиевых многообразий // *Мат. сб.* 2002. Т. 193, № 8. С. 71–100.
10. Ishii Y. On conharmonic transformations // *Tensor.* 1957. Vol. 7 (2). P. 73–80.

References

1. Chinea D., Gonzalez C. Classification of almost contact metric structures. *Annali di Matematica pura ed applicata* (IV). 1990, vol. V, CLVI, pp. 15-36.
2. Rustanov A.R. Tozhdestva krivizny pochti kontaktnykh metricheskikh mnogoobrazii klassa C_{10} [Curvature identities of almost contact metric varieties of class C_{10}]. *Prepodavatel' XXI vek.* 2010, No. 4, pp. 199-207.
3. Rustanov A.R. Svoistva izotropnosti tenzora krivizny pochti kontaktnykh metricheskikh mnogoobrazii klassa C_{10} [Properties of isotropy of curvature tensor of almost contact metric varieties of class C_{10}]. *Prepodavatel' XXI vek.* 2014, No. 2, pp. 207-213.
4. Melekhina T.L., Rustanov A.R. Kongarmonicheskie analogi tozhdestv Greya dlya pochti kontaktnykh metricheskikh mnogoobrazii klassa C_{10} [Congarmonic analogues of Gray identities for almost contact metric varieties of class C_{10}]. *Izv. vuzov. Sev.-Kavk. region. Estestv. nauki.* 2017, No. 4-1, pp. 31-36.
5. Rustanov A.R., Rustanov Z.A. C_{10} -mnogoobraziiya klassa [C_{10} -varieties of the international scientific class]. *Slovak International Scientific J.* 2017, No. 6 (6), pp. 79-82.
6. Rustanov A.R., Rustanov Z.A. Kontaktnye analogi tozhdestv Greya dlya pochti kontaktnykh metricheskikh mnogoobrazii klassa C_{10} [Contact analogues of Gray's identities for almost contact metric manifolds of class C_{10}]. *Innovatsionnaya nauka.* 2017, No. 5, pp. 11-13.
7. Rustanov A.R. Svoistva izotropnosti C_{10} -mnogoobrazii [Isotropy properties of C_{10} -manifolds]. *Innovatsionnaya nauka.* 2017, No. 5, pp. 13-17.
8. Kirichenko V.F. *Differentsial'no-geometricheskie struktury na mnogoobraziyakh* [Differential-geometric structures on manifolds]. Ed. 2nd, add. Odessa: Pechatnyi dom, 2013, 458 p.
9. Kirichenko V.F., Rustanov A.R. Differentsial'naya geometriya kvazisasakievnykh mnogoobrazii [Quasibanach differential geometry of manifolds]. *Mat. sb.* 2002, vol. 193, No. 8, pp. 71-100.
10. Ishii Y. On conharmonic transformations. *Tensor.* 1957, vol. 7 (2), pp. 73-80.

УДК 539.5

DOI 10.23683/0321-3005-2018-4-40-48

МОДЕЛИРОВАНИЕ СЕГНЕТОЭЛАСТИКОВ В ДВУМЕРНОМ СЛУЧАЕ*

© 2018 г. А.С. Скалиух¹, Т.Е. Герасименко¹

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

MODELING OF FERROELASTICS IN THE TWO-DIMENSIONAL CASE

A.S. Skaliukh¹, T.E. Gerasimenko¹

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

Скалиух Александр Сергеевич – кандидат физико-математических наук, доцент, кафедра математического моделирования, Институт математики, механики и компьютерных наук им. И.И. Воровича, Южный федеральный университет, ул. Мильчакова, 8а, г. Ростов-на-Дону, 344090, Россия, e-mail: a.s.skaliukh@gmail.com

Alexander S. Skaliukh - Candidate of Physics and Mathematics, Associate Professor, Department of Mathematical Modeling, Vorovich Institute of Mathematics, Mechanics and Computer Science, Southern Federal University, Milchakova St., 8a, Rostov-on-Don, 344090, Russia, e-mail: a.s.skaliukh@gmail.com

Герасименко Татьяна Евгеньевна – ассистент, кафедра математического моделирования, Институт математики, механики и компьютерных наук им. И.И. Воровича, Южный федеральный университет, ул. Мильчакова, 8а, г. Ростов-на-Дону, 344090, Россия, e-mail: tanyapol@inbox.ru

Tatiana E. Gerasimenko - Assistant, Department of Mathematical Modeling, Vorovich Institute of Mathematics, Mechanics and Computer Science, Southern Federal University, Milchakova St., 8a, Rostov-on-Don, 344090, Russia, e-mail: tanyapol@inbox.ru

Предложена математическая модель, описывающая сегнетоэластический отклик материала на воздействие механических напряжений в двумерном случае. В основе моделирования лежит понятие «сегнетоэластический элемент», подобно тому как в теории пластичности вводится элемент сухого трения Сен-Венана. Такой элемент описывает поведение сегнетоэластического домена и под действием сжимающих напряжений может переключиться из одного состояния в другое. Многочисленные переключения всех элементов порождают пластические деформации. Для описания необратимых процессов деформирования приводятся энергетические оценки, связанные с работой механических напряжений и энергией механизмов закрепления доменов. Устанавливается энергетический баланс при переключениях доменов. Выводятся уравнения в дифференциалах, связывающие приращения остаточных деформаций и механических напряжений, которые представляют собой определяющие соотношения. Для выбора параметров модели сравниваются результаты численных экспериментов с опубликованными в литературе данными. С этой целью вводятся упругие составляющие деформаций и описывается метод численного решения полученных уравнений. Проведены численные эксперименты. Показано, что при определенном выборе параметров модели можно добиться не только качественного, но и количественного совпадения с экспериментальными данными и данными других моделей. Отмечено принципиальное отличие данной модели от моделей теории пластичности. Результаты работы могут быть использованы при конечно-элементном моделировании необратимых процессов в поликристаллических сегнетоэластиках.

Ключевые слова: сегнетоэластик, домен, переключение домена, моделирование, необратимый процесс, определяющие соотношения, пластичность, поликристаллический материал, гистерезис.

A mathematical model describing the response of a ferroelastic material to the effect of mechanical stresses in the two-dimensional case is proposed. In the basis of modeling is laid the concept of a "ferroelastic element", just as in the theory of plasticity the element of dry friction of Saint-Venant is introduced. Such an element describes the behavior of the ferroelastic domain, and under the action of compressive stresses it can switch from one state to another. Numerous switching of all elements generates plastic deformations. To describe irreversible deformation processes, energy estimates are given, related to the work of mechanical stresses and the energy of the mechanisms of domain fixing. The energy balance is established at domain switching, and equations in differentials connecting increments of residual deformations and mechanical stresses are derived. The constructed differential operator of hysteresis type is the constitutive relations. To determine the parameters of the model, the results of numerical experiments are compared with published data. To this end, elastic components of deformations are introduced, and a method for the numerical solution of the equations is described. Numerical experiments have been carried out, and it is shown that for a certain choice of model parameters, it is possible to achieve not only qualitative, but also quantitative coincidence with experimental data and data from other models. The principal difference between this model and the models of plasticity theory is noted. The results of the work can be used for finite-element modeling of irreversible processes in polycrystalline ferroelastics.

* Работа выполнена при поддержке фонда РФФИ (грант № 17-08-00860-а).

Keywords: ferroelastic, domain, domain switching, modeling, irreversible process, constitutive relationships, plasticity, polycrystalline material, hysteresis.

Основные обозначения и операции тензорной алгебры: векторы основного базиса $\{\mathbf{e}_m\}_{m=1}^3$ в декартовой системе координат $\{\mathbf{i}_m\}_{m=1}^3$; тензорное произведение: $\mathbf{a} \otimes \mathbf{b} \equiv \mathbf{ab} = a^m b^n \mathbf{e}_m \mathbf{e}_n$; полное умножение тензоров 2-го ранга: $\boldsymbol{\varepsilon} : \boldsymbol{\sigma} = \varepsilon_{mn} \sigma^{mn}$; простое умножение тензора на вектор: $\boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{e}_k = \sigma_k^m \mathbf{e}_m$.

Введение

Предметом исследования являются полные сегнетоэлектрики – сегнетоэластики типа перовскита, из которых изготовлены поликристаллические сегнетоэластичные материалы или керамики. По своей природе такие материалы содержат огромное количество кристаллитов, в которых также имеется большое количество доменов, положение которых в начальном состоянии произвольно. При неизменной температуре в материале возможна смена ориентации доменов, образующихся в низкосимметричной фазе при наложении внешнего механического напряжения определенной величины и пространственного положения, что приводит к изменению структуры материала и фазовым превращениям представительного объема типа твердое тело – твердое тело. Другими словами, механическими напряжениями можно переключать ориентационные состояния кристалла или управлять положением доменных границ. Это свойство для прозрачных керамик используется в оптике [1, 2]. При жестком воздействии на сегнетоэластичный образец, например, твердым телом, моделирование осуществляется решением интегральных уравнений [3], при мягком воздействии напряжения могут считаться известными. Именно этот случай будет рассмотрен в дальнейшем.

Моделирование необратимых процессов осуществляется на основе простых одноосных экспериментов. Так были построены одномерные и пространственные математические модели с использованием различных вспомогательных гипотез и предположений подобно теории пластичности [4–6]. В [7] описана одномерная модель для поликристаллического сегнетоэластика на основе метода Джилса – Атертона. В настоящей работе предложено развитие двумерной модели сегнетоэластика путем учета внутренней структуры материала. Установлено [7], что необратимые процессы в таких материалах приводят к разному отклику при нагрузке и разгрузке, и в рамках квазистатического процесса моделирова-

ние можно осуществить с помощью уравнений равновесия; уравнений, связывающих деформацию и перемещения, а также определяющих соотношений напряжения – деформация. Именно определяющие соотношения и вызывают основные трудности в силу неоднозначного поведения материала и описываются нелинейными операторами. Подобные задачи возникают в теории пластичности, намагничивания, концентрации вещества и в некоторых других явлениях.

Целью настоящего исследования является построение определяющих соотношений для сегнетоэластических сред с привлечением физических основ перестройки внутренней структуры в двумерном случае (2D). Очевидно, что перестройка структуры неизменно связана с трехмерной размерностью, но специальные условия на тензор напряжений, о чем будет далее подробно сказано, позволяют рассматривать задачу в двумерном случае.

Постановка задачи

Прежде всего, опишем вкратце структуру материала, элементы которой изображены на рис. 1. С точки зрения двухуровневой среды под частицей уровня U_1 будем понимать малый по сравнению с реальным образцом объем, содержащий в себе огромное количество кристаллитов.

Каждый кристаллит содержит большое количество доменов, которые, в свою очередь, состоят из элементарных ячеек. При структурном переходе каждая ячейка из кубической (более симметричной) переходит в тетрагональную (менее симметричную) фазу, как это показано на рис. 2.

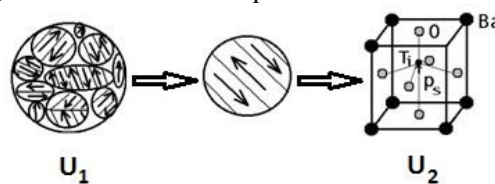


Рис. 1. Частицы первого и второго уровней / Fig. 1. Particles of the first and second levels

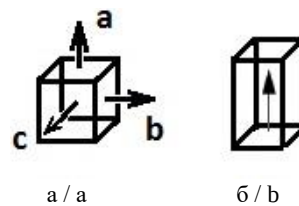


Рис. 2. Высокотемпературная и низкотемпературная фазы: а – кубическая; б – тетрагональная / Fig. 2. High-temperature and low-temperature phases: a - cubic; b - tetragonal

Совокупность ячеек с одинаковыми главными осями образуют домены. Элементарную ячейку, равно как и отдельный домен, можно рассматривать как частицу уровня U_2 .

В низкосимметричной фазе элементарная ячейка приобретает спонтанную деформацию, которая удовлетворяет условию несжимаемости материала и может быть представлена в виде

$$\epsilon_s = \frac{\epsilon_s}{2} (2\mathbf{a} \otimes \mathbf{a} - \mathbf{b} \otimes \mathbf{b} - \mathbf{c} \otimes \mathbf{c}), \quad (1)$$

где $\mathbf{a}, \mathbf{b}, \mathbf{c}$ – ортогональные гралям орты локальной системы координат. В данном исследовании рассматриваемый материал – полный сегнетоэлектрик – сегнетоэластик, поэтому наравне со спонтанной деформацией присутствует спонтанная поляризация, вектор которой изображен на рис. 2б. При приложении механических напряжений можно изменить деформацию ячейки, но не произвольно, а только в строгом соответствии с кристаллографическими осями. Фактически при этом оси ячейки меняются местами, но никаких поворотов ячейки быть не может, причем класс симметрии остается неизменным, что можно видеть на рис. 3. Поэтому часто говорят о переключении ячейки или домена.

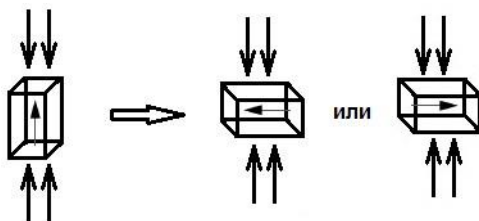


Рис. 3. Изменение деформации напряжениями
/ Fig. 3. Change of strain by stresses

Пластической деформацией частицы уровня U_1 считается усредненное значение всех спонтанных деформаций входящих в нее ячеек. При хаотическом расположении доменов такая деформация равна нулю. Это состояние принимается за начальное. Механические напряжения, меняя спонтанные деформации элементарных ячеек, изменяют пластическую деформацию частицы уровня U_1 . Очевидно, что с ростом напряжений пластические деформации не могут расти до бесконечности. Они будут стремиться к некоторому предельному состоянию (состоянию насыщения). В этом заключается принципиальное отличие сегнетоэластиков от пластических материалов.

Основной частью моделирования сегнетоэластиков является математическое моделирование отклика напряжения – деформация, т.е. построение определяющих соотношений. С этой целью можно воспользоваться реологическими элементами, как

это делается в теории пластичности. Вспомним, что реологическим элементом пластичности является элемент сухого трения Сен-Венана, который в трехмерном случае обобщается до поверхности нагружения. Дополнительно вводится ассоциированный закон, позволяющий находить приращения пластических деформаций. При моделировании сегнетоэластиков вводится по аналогии сегнетоэластичный элемент и формулируются условия его переключения. Затем проводится операция усреднения. Строятся уравнения в виде дифференциалов, о чем подробно будет описано в следующем разделе. Так как рассмотрена задача в двумерной постановке, то необходимо описать упрощения, принятые в данном исследовании.

Рассмотрим образец из поликристаллического сегнетоэластичного материала, который выполнен в виде прямого параллелепипеда и отнесен к системе осей $Oxyz$, как показано на рис. 4а. Пусть две противоположные торцевые грани зажаты гладкими жесткими плитами напряжением σ_0 так, что $\sigma_0 \cdot \mathbf{i}_k = 0$, $k = 1, 2$. К остальным граням приложены векторы напряжения $\mathbf{p}$, вызывающие добавочные напряжения σ_* . Тогда $\sigma_* \cdot \mathbf{i}_3 = 0$. Сжатие образца плитами большим напряжением σ_0 приводит к тому, что спонтанная деформация всех ячеек может переключаться только в плоскости плит. Не нарушая общности, можно принять направление по нормали к плитам, совпадающим с осью c . Рассматривается необратимый процесс деформирования при постоянных напряжениях σ_0 . В образце возникают как упругие, так и пластические деформации, но жесткие плиты при достаточно больших напряжениях σ_0 не позволяют образцу деформироваться пластически в направлении оси Oz . Кроме того, считается, что граничные условия неизменны вдоль направления Oz . Все это позволяет проводить исследования в рамках модели плоской деформации (2D). Двумерная область с одним из способов нагружения показана на рис. 4б.

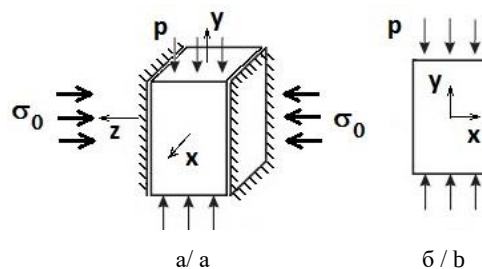


Рис. 4. Граничные условия и двумерное приближение:
а – 3D-геометрия; б – 2D-приближение / Fig. 4. Boundary conditions and two-dimensional approximation:
a - 3D geometry; b - 2D approximation

Основной задачей является моделирование упругого отклика в частице континуума уровня U_1 для напряжений любой интенсивности, при этом будем считать, что механические напряжения для всех частиц континуума уровня U_2 будут одинаковыми.

Основы моделирования

Энергетический критерий переключения доменов. Для построения оператора нелинейного отклика необратимых процессов деформирования предлагаются следующие элементы реологии. Вводится энергетический критерий переключения доменов под действием заданного напряжения. Пренебрегая взаимным влиянием соседних доменов на процесс переключения, найдем результирующую деформацию частицы уровня U_1 путем простого усреднения деформаций частиц уровня U_2 . Далее модель дополняется условиями влияния соседних доменов на процесс переключения. С этой целью рассматриваются энергетические соотношения, включающие в себя энергию, необходимую для слома механизмов закрепления доменных стенок; работу механических напряжений в идеальном случае и в реальном процессе деформирования. Все это позволяет вывести балансное энергетическое соотношение. Из него выводятся уравнения в дифференциалах, которые являются искомыми.

Спонтанная деформация (1) частицы уровня U_2 может изменяться при приложении напряжения σ_* путем поворота осей $\mathbf{a}, \mathbf{b}, \mathbf{c}$. Вместо внешних напряжений будем рассматривать эффективное поле на уровне элементарной ячейки, которое вводится по аналогии с полем Вейсса, принятым в моделировании полярных диэлектриков [8]:

$$\sigma^{ef} = \sigma_* + \alpha \varepsilon_0, \quad (2)$$

где $\sigma_* = \sigma + \sigma_0$ – напряжение в частице уровня U_2 ; ε_0 – необратимая деформация в частице уровня U_1 (представительного объема); α – некоторая константа, подлежащая в дальнейшем определению.

Геометрически удобно вместо параллелепипеда сегнетоэластичного элемента изобразить вектор $\mathbf{a}$, направление которого совпадает с главной осью спонтанной деформации растяжения (при этом возможны два диаметрально противоположных направления оси при одной и той же спонтанной деформации). Для оценки деформации частицы уровня U_1 надо установить расположение главных осей спонтанной деформации всех частиц уровня U_2 при заданных напряже-

ниях и провести операцию усреднения. Воспользуемся приемом, предложенным в [8], согласно которому выбирается точка приведения и все векторы $\mathbf{a}$ сводятся в эту точку (рис. 5).

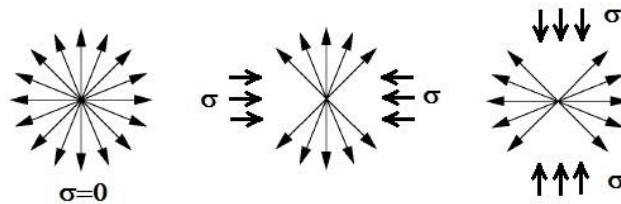


Рис. 5. Возможные направления одной из главных осей спонтанных деформаций ячеек / Fig. 5. Possible directions of one of the main axes of spontaneous strains of cells

Если переключаются домены, то начинается необратимый процесс деформирования. Переключение каждого домена происходит таким образом, что в новом положении его энергия в поле механических напряжений будет минимальна. Сформулируем критерий переключения элементарной ячейки с энергетической точки зрения. Пусть напряжения в текущем состоянии принимают некоторое значение σ^{ef} и ячейка имеет спонтанную деформацию ε_s . Энергия ячейки в текущем поле напряжений определяется как $U_{сгк} = -\varepsilon_s : \sigma^{ef} V$, где V – ее объем, который при переключениях не изменяется. Но спонтанная деформация может принимать и другие значения для данной ячейки. Всего имеем 6 возможных направлений вектора $\mathbf{a}$ (соответственно, 3 возможных значения тензора спонтанной деформации $(\varepsilon_s)_k$), для которых вычислим возможные значения энергии ячейки для этого же поля напряжений: $U_k = -(\varepsilon_s)_k : \sigma^{ef} V$. Выбрав из этих значений минимальное $U_{\min}$, определим направление осей ячейки. При этом возможны ситуации, в которых минимальную энергию ячейка может иметь для нескольких направлений главных осей. Оценим разность между текущим и минимальным значениями энергии. Если эта разность больше порогового (коэрцитивного) значения U_c , то происходит переключение, причем в такое положение, где энергия ячейки минимальна. Другими словами, если $U_{cur} - U_{\min} > U_c$, то происходит переключение и спонтанная деформация меняет оси. В случае, когда по минимальному значению оси определяются неоднозначно, они выбираются датчиком случайных чисел. При каждом изменении текущего значения напряжения этот критерий применяется снова.

Итак, пусть вначале приложено напряжение большой интенсивности σ_0 , не изменяющееся в

дальнейшем, такое, что все возможные переключения ячеек произошли. Не внося больших погрешностей, можем считать, что оси **a** всех ячеек расположились в плоскости, параллельной сжимающим плитам, причем $\mathbf{c} = \mathbf{i}_3$. Это состояние считаем начальным. Прикладывая дополнительные напряжения $\boldsymbol{\sigma}$ такие, что $\boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{i}_3 = 0$, имеем переключения только в плоскости Oxy , и пластические деформации удовлетворяют условию $\boldsymbol{\varepsilon}_0 \cdot \mathbf{i}_3 = 0$. Тогда $\boldsymbol{\varepsilon}_0 : \boldsymbol{\sigma}_0 = 0$ и в энергетический критерий будут входить лишь $\boldsymbol{\sigma}$ и $\boldsymbol{\varepsilon}_0$. Именно эти напряжения будут заданными, а деформации – искомыми.

Предельная деформация. Определим предельную деформацию в частице уровня U_1 следующим образом. Пусть в частице N элементарных ячеек (не нарушая общности, вместо ячеек можно рассматривать домены). И пусть $\boldsymbol{\sigma}$ – тензор напряжения текущего состояния. Определим остаточную деформацию при переходе из начального в текущее состояние путем усреднения, которое проведем после применения энергетического критерия переключений:

$$\boldsymbol{\varepsilon}_\infty = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (\boldsymbol{\varepsilon}_s)_k. \quad (3)$$

Построенная по этому правилу функция максимально возможной деформации называется предельной, а так как она строится путем сравнения начального и текущего состояний и начальное состояние остается неизменным, то является однозначной функцией текущего напряжения, несмотря на то что в критерий переключений входит тензор пластической деформации $\boldsymbol{\varepsilon}_0$.

Энергетическая оценка механизмов записывания доменных стенок. Пластические деформации появляются за счет переключения доменов, когда движутся доменные стенки. Однако существуют механизмы, закрепляющие их и препятствующие их движению. Чтобы сломать эти механизмы, механические напряжения должны достичь пороговых значений (аналог явления сухого трения). Приведем простейшие оценки для подсчета энергии, необходимой для слома механизмов закрепления доменных стенок. Пусть напряжения текущего состояния $\boldsymbol{\sigma}^{ef}$ получают приращение $d\boldsymbol{\sigma}^{ef}$. Если ячейка переключилась, то ее спонтанная деформация $\boldsymbol{\varepsilon}_s^{old}$ стала $\boldsymbol{\varepsilon}_s^{new}$, изменившись за счет добавочной энергии, плотность которой можно представить в виде $\Delta U = (\boldsymbol{\varepsilon}_s^{old} - \boldsymbol{\varepsilon}_s^{new}) : d\boldsymbol{\sigma}^{ef}$.

Естественно принять, что часть энергии пошла на слом механизмов закрепления стенок домена, т.е. ее можно выразить в виде

$$\Delta U_{pin} = C_* (\boldsymbol{\varepsilon}_s^{old} - \boldsymbol{\varepsilon}_s^{new}) : d\boldsymbol{\sigma}^{ef}, \quad (4)$$

где C_* – коэффициент пропорциональности, который может зависеть от интенсивности напряжений. Дабы не усложнять задачу, можно воспользоваться наиболее простым случаем, когда сжимающие напряжения и поворачивают домен на 90° . В таком случае оси ячейки **a, b** меняются местами, и в то же время они являются главными осями тензора напряжений.

$$\begin{aligned} \Delta U_{\pi/2} &= \\ &= C_* \varepsilon_s \left[\left(\mathbf{aa} - \frac{1}{2} \mathbf{bb} \right) - \left(\mathbf{bb} - \frac{1}{2} \mathbf{aa} \right) \right] : (d\sigma_I^{ef} \mathbf{aa} + d\sigma_{II}^{ef} \mathbf{bb}) = \\ &= \frac{3}{2} C_* \varepsilon_s (d\sigma_I^{ef} - d\sigma_{II}^{ef}). \end{aligned}$$

Полагая, что подобные соотношения справедливы для любой ячейки, определяем

$$C_* = \frac{2U_{\pi/2}}{3\varepsilon_s (d\sigma_I^{ef} - d\sigma_{II}^{ef})}. \quad (5)$$

Заметим, что здесь учтено правило для главных значений: $d\sigma_I^{ef} \geq d\sigma_{II}^{ef}$, т.е. $d\sigma_I^{ef} - d\sigma_{II}^{ef} \geq 0$. В противном случае необходимо взять $|d\sigma_I^{ef} - d\sigma_{II}^{ef}|$. В дальнейшем будем оперировать усредненными значениями по объему ω частицы уровня U_1 . Заметим, что напряжение $\boldsymbol{\sigma}$ постоянно в объеме частицы уровня U_1 . Остаточная деформация $\boldsymbol{\varepsilon}_0$, согласно (3), есть интегральная характеристика и не зависит от координат объема частицы. Поэтому $\langle \boldsymbol{\sigma}^{ef} \rangle = \boldsymbol{\sigma}^{ef}$, т.е. эффективные напряжения (2) совпадают с усредненными. Обозначим приращение спонтанной деформации $\boldsymbol{\varepsilon}_s^{old} - \boldsymbol{\varepsilon}_s^{new} = d\boldsymbol{\varepsilon}_s$. Тогда, учитывая (5) и операцию усреднения, получим

$$\langle \Delta U_{mes} \rangle = \frac{1}{mes(\omega)} \int_{\omega} \Delta U_{pin} d\omega = \frac{2U_{\pi/2} d\boldsymbol{\varepsilon}_0 : d\boldsymbol{\sigma}^{ef}}{3\varepsilon_s (d\sigma_I^{ef} - d\sigma_{II}^{ef})}.$$

Поликристаллическая среда – это гомогенная система. Поэтому для произвольного объема Ω можно принять, что полученная энергетическая оценка будет справедлива в любой точке этой области с некоторой плотностью распределения n . Энергию, необходимую для слома механизмов закрепления доменов в области Ω , можно представить в виде

$$\begin{aligned} \Delta U &= \int_{\Omega} \langle \Delta U_{pin} \rangle d\Omega = \int_{\Omega} \frac{k d\boldsymbol{\varepsilon}_0 : d\boldsymbol{\sigma}^{ef}}{d\sigma_I^{ef} - d\sigma_{II}^{ef}} d\Omega, \\ k &= n \frac{2U_{\pi/2}}{3\varepsilon_s}. \end{aligned} \quad (6)$$

Оценка работы механических напряжений. Механические напряжения в необратимом процессе поляризации совершают работу, в результате которой появляются упругие и пластические деформации $\boldsymbol{\varepsilon} = \boldsymbol{\varepsilon}_e + \boldsymbol{\varepsilon}_0$. Оценим эту работу для необратимого деформационного процесса

$$\Delta A = \int_{\Omega} \boldsymbol{\sigma} : d\boldsymbol{\varepsilon} d\Omega. \quad (7)$$

Приращение тензора напряжений можно выразить через приращения упругих деформаций с помощью закона Гука, в котором тензор упругих модулей в общем случае зависит от текущего значения пластических деформаций: $d\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{C}(\boldsymbol{\varepsilon}_0) : d\boldsymbol{\varepsilon}_e$.

Проведя несложные преобразования, подробно описанные в [6], для подынтегральной функции получим соотношения

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\sigma} : d\boldsymbol{\varepsilon} &= d(\boldsymbol{\sigma} : \boldsymbol{\varepsilon}) - \frac{1}{2} d(\boldsymbol{\varepsilon}_e : \mathbf{C}(\boldsymbol{\varepsilon}_0) : \boldsymbol{\varepsilon}_e) + \\ &+ \frac{1}{2} (\boldsymbol{\varepsilon}_e : d\mathbf{C}(\boldsymbol{\varepsilon}_0) : \boldsymbol{\varepsilon}_e) + \alpha d\boldsymbol{\varepsilon}_0 : \boldsymbol{\varepsilon}_0 - d\boldsymbol{\sigma}^{ef} : \boldsymbol{\varepsilon}_0. \end{aligned}$$

Тогда (7) представляется в виде суммы из пяти слагаемых:

$$\begin{aligned} \Delta A &= d \int_{\Omega} \boldsymbol{\sigma} : \boldsymbol{\varepsilon} d\Omega - \frac{1}{2} d \int_{\Omega} \boldsymbol{\varepsilon}_e : \mathbf{C}(\boldsymbol{\varepsilon}_0) : \boldsymbol{\varepsilon}_e d\Omega + \\ &+ \frac{1}{2} \int_{\Omega} (\boldsymbol{\varepsilon}_e : d\mathbf{C}(\boldsymbol{\varepsilon}_0) : \boldsymbol{\varepsilon}_e) d\Omega + \frac{\alpha}{2} d \int_{\Omega} \boldsymbol{\varepsilon}_0 : \boldsymbol{\varepsilon}_0 d\Omega - \\ &- \int_{\Omega} \boldsymbol{\varepsilon}_0 : d\boldsymbol{\sigma}^{ef} d\Omega. \end{aligned}$$

Пусть рассматривается циклический процесс, когда полные и пластические деформации циклически повторяются:

$$A = \oint \Delta A = \oint \Delta A_1 + \oint \Delta A_2 + \oint \Delta A_3 + \oint \Delta A_4 + \oint \Delta A_5.$$

Легко видеть, что первый, второй и четвертый интегралы обратятся в нуль. Третий интеграл отличен от нуля только для разномодульных материалов. Для рассматриваемых керамик упругие модули при сжатии и при растяжении равны, следовательно, и этот интеграл равен нулю. В результате остается отличным от нуля только пятый интеграл. Именно он и отвечает за энергетические потери в циклическом процессе:

$$\Delta A_5 = - \int_{\Omega} \boldsymbol{\varepsilon}_0 : \boldsymbol{\sigma}^{ef} d\Omega. \quad (8)$$

Вывод энергетического соотношения. Если бы не приходилось затрачивать работу на преодоление механизмов запирающих доменов, то энергетические потери в системе были бы значительно меньше и определялись бы идеальным (или предельным) случаем, в котором поворот механическим напряжением отдельного домена не зависит от влияния и

расположения остальных доменов. Для подсчета потерь ΔA_{∞} в этой ситуации достаточно в предыдущем выражении сделать замену тензора остаточной деформации на деформацию предельного случая. Тогда

$$\Delta A_{\infty} = - \int_{\Omega} \boldsymbol{\varepsilon}_{\infty} : d\boldsymbol{\sigma}^{ef} d\Omega. \quad (9)$$

Проведенный анализ позволяет вывести формулу энергетического баланса, в которой учитываются все энергетические потери (6), (8), (9) – реальные энергетические потери в процессе деформации складываются из потерь идеального случая плюс энергетические затраты на слом механизмов запирающих стенок доменов: $\Delta A_5 = \Delta A_{\infty} + \Delta U$.

Учитывая произвольность объема Ω и приращение тензора напряжения $d\boldsymbol{\sigma}^{ef}$, получаем уравнение в дифференциалах относительно остаточной деформации: $\boldsymbol{\varepsilon}_0 = \boldsymbol{\varepsilon}_{\infty} - k \frac{d\boldsymbol{\varepsilon}_0}{d\boldsymbol{\sigma}_I^{ef} - d\boldsymbol{\sigma}_{II}^{ef}}$, которое для численного решения удобно переписать в виде

$$d\boldsymbol{\varepsilon}_0 = \frac{1}{k} (\boldsymbol{\varepsilon}_{\infty} - \boldsymbol{\varepsilon}_0) (d\boldsymbol{\sigma}_I^{ef} - d\boldsymbol{\sigma}_{II}^{ef}). \quad (10)$$

Это уравнение является искомым. Оно позволяет определить приращения остаточных деформаций по приращению механических напряжений. Интересно отметить аналогию между моделями сегнетоэластиков и пластичности: и здесь, и там необратимые (пластические) деформации определяются в приращениях, но здесь уравнение получено из энергетического баланса потерь, а там – на основе ассоциированного закона.

Численное решение полученного уравнения

Пусть квазистатический процесс деформирования проходит в течение времени $t \in [0, T]$. Представим его в виде последовательности $N+1$ равновесных состояний C_i , $i = 0, \dots, N$, каждое из которых наступает в момент времени t_i : $t_0 = 0, \dots, t_N = T$. В начальном состоянии все функции известны. Задача заключается в определении приращения искомой функции при переходе от состояния C_i к C_{i+1} . В частности, для определения приращения остаточной деформации воспользуемся уравнением (10). Сложность этой операции заключается в том, что оно содержит параметры $U_c, \varepsilon_s, \alpha, k$, которые необходимо определить из условия совпадения численных решений с результатами экспериментов. Экспериментальные данные, как правило, приводятся в виде деформационных петель гистерезиса для отдельных компонент тензорных величин в виде зависимости

полные деформации – механические напряжения. В связи с этим нам необходимо доопределить модель функциональными соотношениями, связывающими упругие составляющие деформации ϵ_e с механическими напряжениями σ . Оставляя в стороне сложную задачу определения этого закона для общего случая, воспользуемся простым линейным законом:

$$\epsilon_e = \beta \sigma. \quad (11)$$

Имеем пять скалярных параметров: $U_c, \epsilon_s, \alpha, k, \beta$, которые находятся из условия совпадения гистерезисных кривых, полученных в экспериментах, и кривых, вычисленных с помощью описанной модели.

Определим квазистатический процесс и укажем численный метод решения уравнения (10) для построения деформационной петли гистерезиса. С этой целью задаем три функции: $\sigma_{11} = \varphi_1(t)$, $\sigma_{22} = \varphi_2(t)$, $\sigma_{12} = \varphi_3(t)$, по которым определяем приращения каждой из компонент тензора напряжения при переходе от состояния C_i к C_{i+1} . Сложность численного решения (10) заключается в том, что остаточная деформация ϵ_0 входит неявным образом в слагаемые правой части (ϵ_∞ и σ^{ef}). Поэтому предлагается использовать итерационный процесс

$$\Delta \epsilon_{0(m)}^{(i)} = \frac{1}{k} \left(\epsilon_\infty(\epsilon_{0(m)}^{(i)}) - \epsilon_{0(m)}^{(i)} \right) \left(d\sigma_I^{ef}(\epsilon_{0(m)}^{(i)}) - d\sigma_{II}^{ef}(\epsilon_{0(m)}^{(i)}) \right),$$

$$\epsilon_{0(m+1)}^{(i)} = \epsilon_0^{(i)} + \Delta \epsilon_{0(m)}^{(i)}, \quad (12)$$

в котором, как видно из второй формулы, для определения остаточной деформации m -го приближения используется неизменное значение $\epsilon_0^{(i)}$ предыдущего состояния. Эта ситуация важна, так как гистерезисные кривые в одной и той же точке имеют два разных приращения для возрастающих и убывающих значений напряжения. Предложенный подход исключает перескоки с одной ветви на другую и хорошо описывает монотонные части ветвей. После итерационного цикла находятся остаточные части деформации $\epsilon_{0(m+1)}^{(i)}$: по (11) – упругие части, определяется полная деформация $\epsilon^{(i)} = \epsilon_e^{(i)} + \epsilon_0^{(i)}$. Графическое изображение петель осуществляется по найденным приращениям с помощью любого графического пакета.

Еще одной особенностью задачи является выбор параметров $U_c, \epsilon_s, \alpha, k, \beta$ задачи. Как показали численные эксперименты, каждый из перечисленных параметров определенным образом влияет на форму и наклон петли. Оказалось, что их можно подобрать методом проб и ошибок путем сравнения с результатами работ других авторов.

Обсуждение полученных результатов

Основной, но и наиболее простой случай – это оценка зависимости между растягивающим (сжимающими) напряжениями и продольными деформациями. Оценим влияние параметров модели на вид и наклон гистерезисной кривой. Параметр U_c , входящий в предельную зависимость, фактически определяет начало необратимого процесса деформирования. Поэтому с его ростом увеличиваются линейная часть и площадь петли по оси напряжений. А так как этот параметр часто выбирается из условия $U_c = 2\sigma_c \epsilon_s$, то он связан с коэргитивным значением напряжения, аналогом которого в теории пластичности выступает напряжение текучести. Поэтому для твердых керамик эти значения значительно больше, чем для мягких. Параметр ϵ_s входит в коэффициент пропорциональности k , поэтому оказывает влияние на растяжение петли по оси напряжений. Следующий параметр α входит в определение напряжений Вейсса $\sigma^{ef} = \sigma_* + \alpha \epsilon_0$, которые, по нашему предположению, учитывают влияние соседних доменов на процесс их переключения. Предполагалось, что, переключаясь, домены начинают деформироваться и стеснять друг друга, что должно приводить к добавочным напряжениям $\alpha \epsilon_0$. Однако основное напряженное состояние в чистоте создают напряжения σ_* , поэтому добавочные напряжения составляют лишь часть основных и тем более не могут их превышать. Это же показали и численные эксперименты: параметр α очень слабо влияет на общую кривую, приводя к малозаметным сдвигам по оси деформаций. Его можно обнулить, не внося больших погрешностей. Следующий параметр k пропорционально связан с энергией поворота домена на прямой угол и обратно пропорционален разности главных значений приращения тензора напряжений. Если приращения тензора напряжений образуют шаровой тензор, то никаких переключений не будет (обнулится энергия поворота), и остается только упругая деформация. Как следствие, увеличение коэффициента k приводит к уменьшению площади петли. Кроме того, так как этот коэффициент входит в уравнение (10) обратно пропорционально приращениям остаточной деформации, то он также оказывает существенное влияние и на наклон петли. Оставшийся коэффициент β , который входит в линейную зависимость для упругих деформаций, оказывает влияние на наклон кривой на начальной стадии, когда переключения еще не начались, и на конечном этапе, когда достигнуто состояние насыщения.

При подборе параметров мы руководствовались результатами работ [9, 10] и сравнивали наши результаты с результатами этих работ. В частности, при $\varepsilon_s=0,002$, $\alpha=3,6 \cdot 10^6 \text{ Н/м}^2$, $k=3,9 \cdot 10^6 \text{ Н/м}^2$, $\beta=1,6 \cdot 10^9 \text{ Н/м}^2$ на рис. 6 слева показаны рассчитанные нами гистерезисные петли продольной деформации в зависимости от продольных напряжений растяжения-сжатия при

различных значениях коэрцитивного напряжения σ_c . Для сравнения справа показаны результаты работы [9] при тех же значениях коэрцитивного напряжения для керамики PLZT. Максимальные напряжения для каждого из случаев указаны на рис. 6, из которого видно, что наблюдается хорошее не только качественное, но и количественное совпадение.

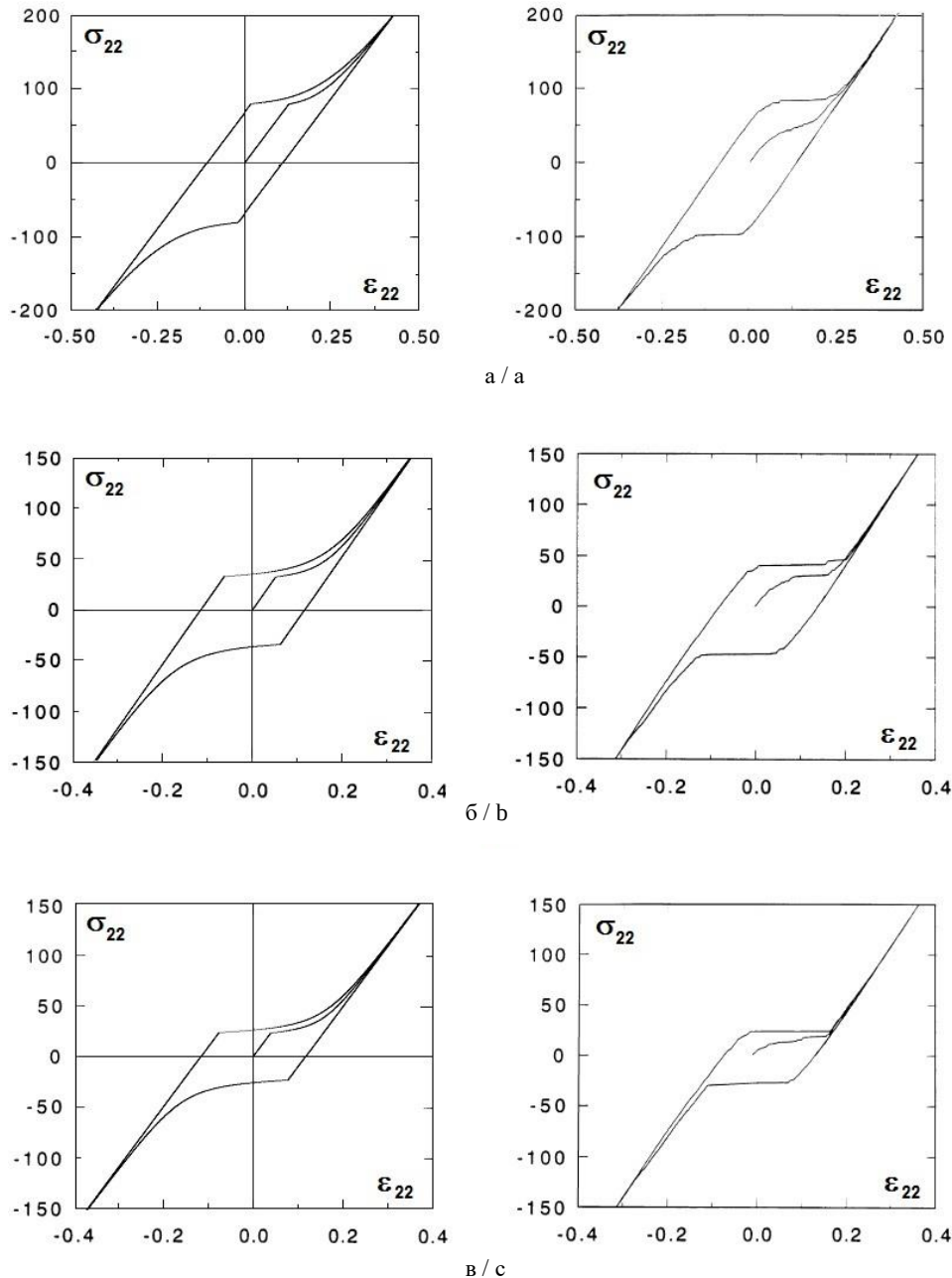


Рис. 6. Большие петли деформационного гистерезиса при различных коэрцитивных напряжениях: а – $\sigma_c = 120 \text{ МПа}$,

$\sigma_{\max} = 200 \cdot 10^6 \text{ Н/м}^2$; б – $\sigma_c = 50 \text{ МПа}$, $\sigma_{\max} = 150 \cdot 10^6 \text{ Н/м}^2$; в – $\sigma_c = 35 \text{ МПа}$, $\sigma_{\max} = 150 \cdot 10^6 \text{ Н/м}^2$

/ Fig. 6. Large loops of strain hysteresis at different coercive stresses: а - $\sigma_c = 120 \text{ МПа}$, $\sigma_{\max} = 200 \cdot 10^6 \text{ Н/м}^2$;

б - $\sigma_c = 50 \text{ МПа}$, $\sigma_{\max} = 150 \cdot 10^6 \text{ Н/м}^2$; в - $\sigma_c = 35 \text{ МПа}$, $\sigma_{\max} = 150 \cdot 10^6 \text{ Н/м}^2$

Заключение

В настоящей работе предложена двумерная модель для необратимого процесса деформирования поликристаллических сегнетоэластиков. Построены определяющие соотношения в виде уравнений в дифференциалах. Предложена схема их решения, основанная на методе последовательных приближений. Описано влияние параметров модели на вид и поведение гистерезисных кривых. Отмечено, что параметры легко подбираются, если есть возможность сравнивать результаты численного эксперимента с известными результатами. Предложенная модель существенно отличается от известных моделей теории пластичности. В отличие от постулирования условий сухого трения и ассоциированного закона здесь рассмотрены энергетические подходы при оценке разрушения механизмов закрепления доменов. Упругие деформации связаны с напряжениями линейными соотношениями, а необратимые (пластические) – в виде приращений. Результаты работы данной модели могут быть имплементированы в конечно-элементную программу, которая позволит проводить конечно-элементное моделирование необратимых процессов в сегнетоэластиках различной формы.

Литература

1. Алексеев А.Н., Злоказов М.В., Осипов И.В. Применение сегнетоэластиков // Изв. АН СССР. Сер. физ. 1983. Т. 47, № 3. С. 465–475.
2. Гриднев С.А. Сегнетоэластические кристаллы: основные свойства, влияние дефектов // Природа. 2002. № 6. С. 22–29.
3. Скалиух А.С. О приближенном решении некоторых интегральных уравнений 1-го рода, возникающих в динамических смешанных задачах теории упругости // Изв. СКНЦ ВШ. Естеств. науки. 1983. № 4. С. 17–21.
4. Salten M., Schnaider G.A., Knoblauch V., McMeeking R.M. On the evolution of the linear materials properties of PZT during loading history – an experimental study // Int. J. of Solids and Structures. 2005. № 42. P. 3953–3966.
5. Zhou D., Kamlah M. Dielectric and piezoelectric performance of soft PZT piezoceramics under simultaneous alternating electromechanical loading // J. of the European Ceramic Society. 2005. Vol. 25. P. 2415–2420.
6. Zhou D.Y., Kamlah M., Munz D. Uniaxial compressive stress dependence on the high-field dielectric and piezoelectric performance of soft PZT piezoceramics // J. Mater. Res. 2004. № 19 (3). P. 834–842.

7. Белоконов А.В., Скалиух А.С. Математическое моделирование необратимых процессов поляризации. М.: Физматлит, 2010. 328 с.

8. Тамм И.Е. Основы теории электричества. М.: Наука, 1966. 624 с.

9. Hwang S.C., McMeeking R.M. A finite element model of ferroelastic polycrystals // Int. J. of Solid and Structures. 1999. Vol. 36. P. 1541–1556.

10. Landis C.M. On the fracture toughness of ferroelastic materials // J. of the Mechanics and Physics of Solids. 2003. Vol. 51. P. 1347–1369.

References

1. Alekseev A.N., Zlokazov M.V., Osipov I.V. Prime-nenie segnetoelastikov [Application of ferroelastics]. Izv. AN SSSR. Ser. fiz. 1983, vol. 47, No. 3, pp. 465–475.
2. Gridnev S.A. Segnetoelasticheskie kristally: osnovnye svoystva, vliyanie defektov [Ferroelastic crystals: basic properties, influence of defects]. Priroda. 2002, No. 6, pp. 22–29.
3. Skaliukh A.S. O priblizhennom reshenii nekotorykh integral'nykh uravnenii 1-go roda, voznikayushchikh v dinamicheskikh smeshannykh zadachakh teorii uprugosti [On approximate solution of some integral equations of the 1st kind arising in dynamic mixed problems of elasticity theory]. Izv. SKNTs VSh. Estestv. nauki. 1983, No. 4, pp. 17–21.
4. Salten M., Schnaider G.A., Knoblauch V., McMeeking R.M. On the evolution of the linear materials properties of PZT during loading history - an experimental study. Int. J. of Solids and Structures. 2005, No. 42, pp. 3953–3966.
5. Zhou D., Kamlah M. Dielectric and piezoelectric performance of soft PZT piezoceramics under simultaneous alternating electromechanical loading. J. of the European Ceramic Society. 2005, vol. 25, pp. 2415–2420.
6. Zhou D.Y., Kamlah M., Munz D. Uniaxial compressive stress dependence on the high-field dielectric and piezoelectric performance of soft PZT piezoceramics. J. Mater. Res. 2004, No. 19 (3), pp. 834–842.
7. Belokon' A.V., Skaliukh A.S. Matematicheskoe modelirovanie neobratimyykh protsessov polyarizatsii [Mathematical modeling of irreversible polarization processes]. Moscow: Fizmatlit, 2010, 328 p.
8. Tamm I.E. Osnovy teorii elektrichestva [Fundamentals of the theory of electricity]. Moscow: Nauka, 1966, 624 p.
9. Hwang S.C., McMeeking R.M. A finite element model of ferroelastic polycrystals. Int. J. of Solid and Structures. 1999, vol. 36, pp. 1541–1556.
10. Landis C.M. On the fracture toughness of ferroelastic materials. J. of the Mechanics and Physics of Solids. 2003, vol. 51, pp. 1347–1369.

УДК 539.3

DOI 10.23683/0321-3005-2018-4-49-53

МОДЕЛИРОВАНИЕ КОНТАКТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО КОЛЕСА И ТОРМОЗНОЙ КОЛОДКИ С УЧЕТОМ ИЗНОСА, ТЕПЛОТЫДЕЛЕНИЯ ОТ ТРЕНИЯ И ЗАВИСИМОСТИ МЕХАНИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ*

© 2018 г. М.И. Чебаков¹, С.А. Данильченко¹, А.А. Ляпин¹

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

MODELING OF THE CONTACT INTERACTION OF THE RAILWAY WHEEL AND BRAKE PAD TAKING INTO ACCOUNT WEAR, HEAT SEPARATION FROM FRICTION AND DEPENDENCE OF MECHANICAL PARAMETERS ON THE TEMPERATURE

M.I. Chebakov¹, S.A. Danilchenko¹, A.A. Lyapin¹

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

Чебаков Михаил Иванович – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий лабораторией 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: chebakov@math.sfedu.ru

Mikhail I. Chebakov - Doctor of Sciences in Physics and Mathematics, Professor, Head of Laboratory for 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: chebakov@math.sfedu.ru

Данильченко Сергей Александрович – инженер-проектировщик, 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: sergey.a.danilchenko@gmail.com

Sergey A. Danilchenko - Design Engineer, Laboratory for 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: sergey.a.danilchenko@gmail.com

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@sfedu.ru

Alexander A. Lyapin - Candidate of Science in Physics and Mathematics, Senior Researcher, Laboratory for 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@sfedu.ru

В железнодорожном транспорте проблема изнашивания деталей трибосопряжения особенно в тяжело нагруженных узлах является одной из основных. Существуют различные факторы, которые влияют на интенсивность изнашивания. К основным из них относятся температурные поля, возникающие в области контакта. Изменение температуры в процессе фрикционного взаимодействия приводит к изменению физико-механических и теплофизических характеристик материалов и коэффициента трения между взаимодействующими поверхностями. Поэтому при моделировании процесса изнашивания важно учитывать такие зависимости.

Рассмотрено контактное взаимодействие тормозной колодки и колеса вагона с учетом трения, теплотыделения от трения и износа контактирующих поверхностей. В качестве модели, описывающей процесс изнашивания, использовалась модель Аркарда. Представлены результаты расчетов контактного давления и температурных полей с учетом зависимости физико-механических и теплофизических характеристик материалов, а также коэффициента трения от температуры. С учетом полученных данных произведено вычисление величины износа подошвы тормозной колодки.

* Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 16-08-00852а).

Ключевые слова: контактное взаимодействие, трение, износ, тепловыделение от трения, железнодорожное колесо, тормозная колодка.

In railway transport, the problem of wear of tribocontact parts, especially in heavily loaded nodes, is one of the main ones. There are various factors that influence the wear rate. One of the main is the temperature fields arising in the contact area. The temperature change in the process of frictional interaction leads to a change in the physical, mechanical and thermal characteristics of the materials and the coefficient of friction between the interacting surfaces. Therefore, when modeling the process of wear, it is important to consider such dependencies.

The contact interaction of the brake pad and the railway wheel is considered taking into account friction, heat release from friction and wear of the contacting surfaces. Archard model was used as a model describing the wear process. The results of calculations of contact pressure and temperature fields taking into account the dependence of physical, mechanical and thermal characteristics of materials, as well as the coefficient of friction on temperature are presented. Taking into account the data obtained, the calculation of the wear value of the brake pad base is made.

Keywords: contact interaction, friction, wear, frictions heating, railway wheel, brake pad.

Постановка задачи

Для тормозных систем железнодорожного транспорта изнашивание деталей трибосопряжения является одной из наиболее актуальных проблем. На интенсивность износа влияет множество факторов (трение в области контакта, температура, контактное давление и др.), которые тесно связаны между собой [1, 2]. Известно, что с увеличением температуры изменяются физико-механические и теплофизические характеристики материалов, а также коэффициент трения между взаимодействующими

поверхностями [3–5]. Это приводит к тому, что износ деталей происходит неравномерно и варьируется в зависимости от температурных условий.

Рассматривается задача контактного взаимодействия железнодорожного колеса и тормозной колодки. Геометрия колеса построена согласно схеме (рис. А.1, приложение А к ГОСТу 10791-2011). Геометрия колодки построена в соответствии с чертежом тормозной колодки 720.31.44.157.1. Твердотельные модели деталей трибосопряжения колесо – колодка приведены на рис. 1.

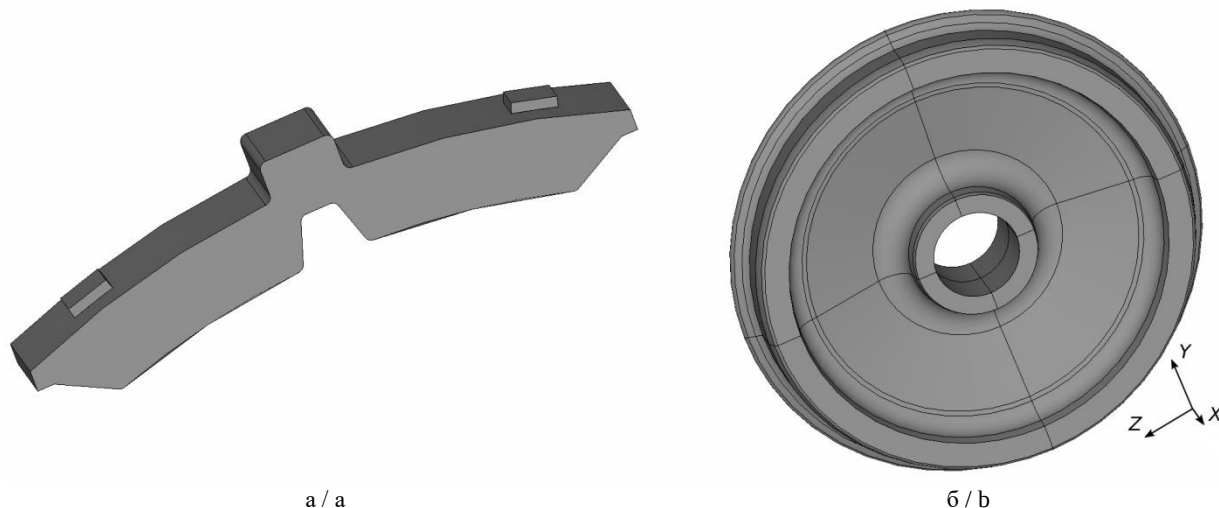


Рис. 1. Твердотельные модели тормозной колодки (а) и колеса (б) / Fig. 1. Solid models of brake pad (a) and wheel (b)

На рис. 2 представлена конечно-элементная модель сопряжения колеса – колодка.

Колесо вращается вокруг оси Ox с постоянной угловой скоростью ω ; его перемещения относительно остальных осей запрещены. Тормозная колодка прижимается к поверхности катания колеса

силой F и может перемещаться только вдоль направления приложенной силы. Между поверхностью катания колеса и подошвой колодки задано кулоновское трение с коэффициентом k .

Для представленного трибосопряжения рассмотрены две задачи: нестационарная термоупру-

гая контактная задача о фрикционном взаимодействии вращающегося колеса и тормозной колодки с учетом зависимости физико-механических характеристик и коэффициента трения от температуры (задача 1) и нестационарная упругая контактная задача об изнашивании тормозной колодки при фрикционном взаимодействии с вращающимся колесом с учетом зависимости коэффициента трения от времени (задача 2). Процесс износа описывается на основе модели Аркарда [6].

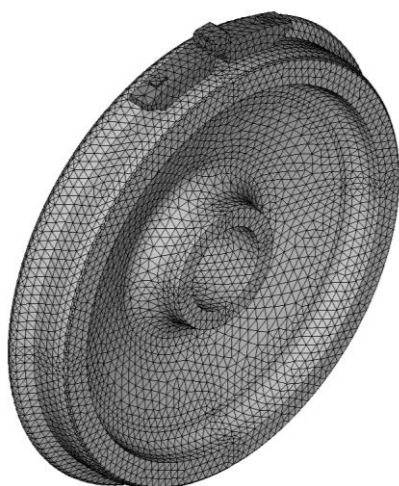


Рис. 2. Конечно-элементная модель сопряжения колесо – колодка / Fig. 2. Finite element model of wheel - brake pad mating

Решение поставленных задач осуществлялось с применением метода конечных элементов и программного комплекса ANSYS. В задаче 1 конечно-элементная сетка строилась с использованием 20-узловых упругих элементов SOLID226, для которых была установлена опция термоупругого анализа. В задаче 2 использовались 20-узловые упругие элементы SOLID186.

Для определения первоначального контакта и лучшей сходимости расчетов решение обеих задач состояло из двух этапов по аналогии с [7]. В задаче 2 для вычисления величины износа применялась модель Аркарда. Поскольку интенсивность изнашивания тормозной колодки значительно выше, чем у колеса, при расчетах износ колеса не учитывался.

Результаты расчетов

В задаче 1 для тормозной колодки и колеса зависимости от температуры физико-механических и теплофизических характеристик материалов, а также коэффициента трения задаются таблично (таблица).

Угловая скорость вращения колеса $\omega=5,85 \text{ с}^{-1}$, приложенная нагрузка $F=9 \text{ кН}$. Между поверхностью катания колеса и подошвой тормозной колодки задается коэффициент распределения теплового потока $f=0,6$ (60 % генерируемого тепла переходит в колодку). На свободных от взаимодействия поверхностях колеса задан конвективный теплообмен с коэффициентом теплоотдачи $\alpha_1=50 \text{ Вт/м}^2\text{К}$, на боковых и торцевых поверхностях колодки коэффициент теплоотдачи $\alpha_2=30 \text{ Вт/м}^2\text{К}$.

Свойства материалов тормозной колодки (1) и колеса (2) в зависимости от температуры / Material properties of brake pad (1) and wheel (2) depending on temperature

Параметр	Материал	Температура T , °C		
		20	100	200
Плотность ρ , кг/м ³	1	2100	2000	1950
	2	7826	7799	7769
Модуль упругости E , ГПа	1	5,00	4,80	4,65
	2	200	201	193
Коэффициент Пуассона ν	1	0,36	0,38	0,39
	2	0,30	0,31	0,33
Теплопроводность λ , Вт/(м·К)	1	1,40	1,25	1,10
	2	48	48	47
Коэффициент теплового расширения $\alpha \cdot 10^{-5}$, К ⁻¹	1	3,90	4,50	5,00
	2	1,19	1,27	1,34
Теплоемкость C , Дж/(кг·К)	1	1480	1520	1640
	2	473	473	494
Коэффициент трения k		0,45	0,38	0,32

На рис. 3 представлены графики зависимости температуры и контактного давления на подошве колодки от времени. Приведены результаты расчетов задачи 1 для двух случаев: физико-механические и теплофизические характеристики материалов, а также коэффициент трения постоянны и не зависят от температуры (выбраны значения из таблицы при $T=20 \text{ °C}$) – кривая 1; физико-механические и теплофизические характеристики материалов, а также коэффициент трения изменяются в зависимости от температуры – кривая 2.

Из графиков (рис. 3) следует, что для случая, когда физико-механические и теплофизические характеристик материалов и коэффициент трения задавались постоянными, значения температуры и контактного давления на подошве колодки оказывались выше, чем для случая, когда все характеристики зависели от температуры. В первую очередь это обусловлено снижением коэффициента трения с ростом температуры. Кроме того, при достижении высоких температур материалы становятся менее упругими, что также оказывает влияние на контактное давление.

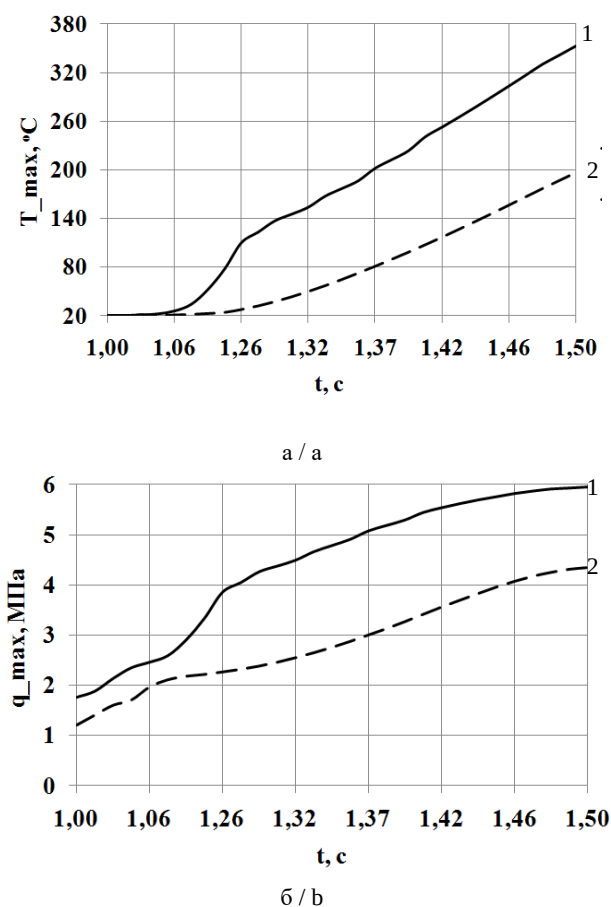


Рис. 3. Графики зависимости температуры (а) и контактного давления (б) на подошве колодки от времени / Fig. 3. Graphs of temperature (a) and contact pressure (b) at bottom of brake pad in time

Аналогичным образом было произведено сравнение величин износа и контактных давлений в задаче 2. Исходя из результатов, полученных при решении термоупругой задачи (задача 1), и данных из таблицы, была установлена зависимость коэффициента трения от времени вращения. Эта зависимость использовалась для задания коэффициента износа в модели Аркарда. На рис. 4 приведены полученные в ходе расчетов задачи 2 зависимости величины износа и контактного давления на подошве колодки от времени вращения.

Из графиков видно, что величина износа оказалась значительно выше в случае, когда коэффициент износа задавался постоянным. Контактное давление для случая, когда коэффициент износа рассчитывался с учетом зависимости коэффициента трения от времени, возрастало более резко. При этом в обоих случаях максимальное значение контактного давления в конечный момент времени оказалось практически одинаковым.

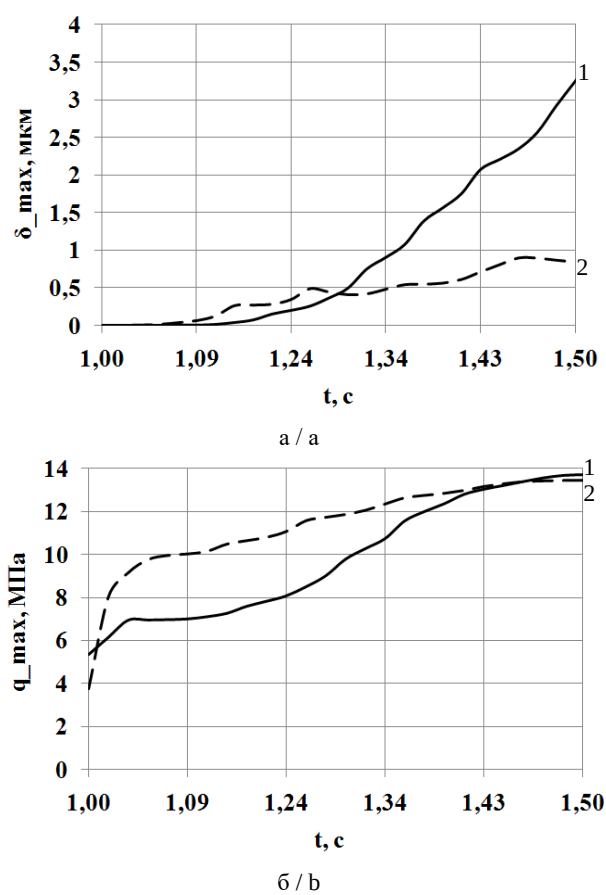


Рис. 4. Графики зависимости величины износа (а) и контактного давления (б) на подошве колодки от времени для двух случаев: кривая 1 – коэффициент износа постоянный; кривая 2 – коэффициент износа рассчитан с учетом зависимости коэффициента трения от времени / Fig. 4. Graphs of wear amount (a) and contact pressure (b) at bottom of brake pad in time for two cases: 1 - wear coefficient is constant; 2 - wear coefficient is calculated taking into account dependence of friction coefficient on time

Выводы

Проведенные расчеты показали, что при вычислении величины износа необходимо учитывать зависимости физико-механических и теплофизических характеристик материалов, а также коэффициента трения в области контакта от температуры.

Литература

1. Евтушенко А.А., Паук В.И. Взаимодействие фрикционного разогрева и износа на нестационарном контакте скольжения // Трение и износ. 1994. Т. 15, № 2. С. 186–195.
2. Александров В.М., Губарева Е.А. Задача о взаимодействии тел с покрытиями при износе, тепловыде-

лении и учете зависимости коэффициента трения от температуры // Экол. вестн. науч. центров Черноморского эконом. сотрудничества. 2006. № 2. С. 10–16.

3. Колесников В.И. Теплофизические процессы в металлополимерных трибосистемах. М.: Наука, 2003. 280 с.

4. Колесников В.И., Чебаков М.И., Колесников И.В., Ляпин А.А. Теплофизические процессы в тяжело нагруженных узлах трения подвижного состава // Транспорт: наука, техника, управление. 2015. № 1. С. 6–12.

5. Yevtushenko A.A., Kuciej M., Yevtushenko O. Modelling of the frictional heating in brake system with thermal resistance on a contact surface and convective cooling on a free surface of a pad // Intern. J. of Heat and Mass Transfer. 2015. Vol. 81. P. 915–923.

6. Archard J.F. Contact and rubbing of flat surfaces // J. of Applied Physics. 1953. Vol. 24.1. P. 18–28.

7. Чебаков М.И., Данильченко С.А., Ляпин А.А. Моделирование износа на контакте двух упругих тел с учетом тепловыделения от трения // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2017. № 4. С. 51–57.

References

1. Evtushenko A.A., Pauk V.I. Vzaimodeistvie friktsionnogo razogreva i iznosa na nestatsionarnom kontakte skol'zheniya [The interaction of the friction heating and wear on the non-stationary contact of the slip]. *Trenie i iznos*. 1994, vol. 15, No. 2, pp. 186–195.

2. Aleksandrov V.M., Gubareva E.A. Zadacha o vzaimodeistvii tel s pokrytiyami pri iznose, teplovydelenii i uchete zavisimosti koeffitsienta treniya ot tempkratury [The problem of interaction of bodies with coatings in case of wear, heat release and the dependence of the friction coefficient on the temperature]. *Ekol. vestn. nauch. tsentrov Chernomorskogo ekonom. sotrudnichestva*. 2006, No. 2, pp. 10–16.

3. Kolesnikov V.I. *Teplofizicheskie protsessy v metallopolimernykh tribosistemakh* [Thermophysical processes in metal-polymer tribosystems]. Moscow: Nauka, 2003, 280 p.

4. Kolesnikov V.I., Chebakov M.I., Kolesnikov I.V., Lyapin A.A. Thermophysical processes in heavily loaded rolling stock friction units. *Transport. Science. Engineering. Management*. 2015, No. 1, p. 6–12.

5. Yevtushenko A.A., Kuciej M., Yevtushenko O. Modelling of the frictional heating in brake system with thermal resistance on a contact surface and convective cooling on a free surface of a pad. *Intern. J. of Heat and Mass Transfer*. 2015, vol. 81, pp. 915–923.

6. Archard J.F. Contact and rubbing of flat surfaces. *J. of Applied Physics*. 1953, vol. 24.1, pp. 18–28.

7. Chebakov M.I., Danil'chenko S.A., Lyapin A.A. Modelirovanie iznosa na kontakte dvukh uprugikh tel s uchetom teplovydeleniya ot treniya [Simulation of wear on the contact of two elastic bodies with account of heat generated from friction]. *Izv. vuzov. Sev.-Kavk. region. Estestv. nauki*. 2017, No. 4, pp. 51–57.

НАУКИ О ЗЕМЛЕ SCIENCE OF EARTH

УДК 551.461.28

DOI 10.23683/0321-3005-2018-4-54-63

ОПАСНЫЕ ПОГОДНЫЕ ЯВЛЕНИЯ НА ПОБЕРЕЖЬЕ АЗОВСКОГО И ЧЕРНОГО МОРЕЙ*

© 2018 г. А.Г. Авакова¹, Л.А. Беспалова¹, А.Р. Иошпа¹, А.Е. Цыганкова¹

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

HAZARDOUS WEATHER PHENOMENA ON THE AZOV AND BLACK SEA COASTS

A.G. Avakova¹, L.A. Bepalova¹, A.R. Ioshpa¹, A.E. Tsygankova¹

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

Авакова Анжелика Георгиевна – младший научный сотрудник, кафедра океанологии, Институт наук о Земле, Южный федеральный университет, ул. Зорге, 40, г. Ростов-на-Дону, 344090, Россия, e-mail: aavakova@sfedu.ru

Anzhelika G. Avakova - Junior Researcher, Department of Oceanology, Institute for Earth Science, Southern Federal University, Zorge St., 40, Rostov-on-Don, 344090, Russia, e-mail: aavakova@sfedu.ru

Беспалова Людмила Александровна – доктор географических наук, доцент, профессор, кафедра океанологии, Институт наук о Земле, Южный федеральный университет, ул. Зорге, 40, г. Ростов-на-Дону, 344090, Россия, e-mail: lbepalova@sfedu.ru

Lyudmila A. Bepalova - Doctor of Geography, Associate Professor, Professor, Department of Oceanology, Institute of Earth Sciences, Southern Federal University, Zorge St., 40, Rostov-on-Don, 344090, Russia, e-mail: lbepalova@sfedu.ru

Иошпа Александр Рувимович – кандидат географических наук, доцент, кафедра океанологии, Институт наук о Земле, Южный федеральный университет, ул. Зорге, 40, г. Ростов-на-Дону, 344090, Россия, e-mail: aioshpa@sfedu.ru

Alexander R. Ioshpa - Candidate of Geography, Associate Professor, Department of Oceanology, Institute of Earth Sciences, Southern Federal University, Zorge St., 40, Rostov-on-Don, 344090, Russia, e-mail: aioshpa@sfedu.ru

Цыганкова Алла Евгеньевна – кандидат географических наук, доцент, кафедра океанологии, Институт наук о Земле, Южный федеральный университет, ул. Зорге, 40, г. Ростов-на-Дону, 344090, Россия, e-mail: aecygankova@sfedu.ru

Alla E. Tsygankova - Candidate of Geography, Associate Professor, Department of Oceanology, Institute of Earth Sciences, Southern Federal University, Zorge St., 40, Rostov-on-Don, 344090, Russia, e-mail: aecygankova@sfedu.ru

В последние годы экономическое и стратегическое значение Азово-Черноморского побережья существенно возросло. Расширение портов, развитие городов-курортов и инфраструктуры побережья требуют качественного гидрометеорологического обеспечения. Особенную актуальность это приобретает ввиду того, что для данной территории характерен целый комплекс опасных погодных явлений (ОПЯ), имеющих серьезные экологические последствия. В этой связи целью работы являлось исследование ОПЯ и районирование Азово-Черноморского побережья России по частоте их проявления.

В основу исследования положены данные Северо-Кавказского управления по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды за период 2005–2017 гг., а также материалы научно-прикладного справочника «Климат России» за период с 1977 по 2005 г. Для оценки частоты проявления ОПЯ Азово-Черноморского побережья Ростовской области и Краснодарского края был использован метод балльных оценок и классификаций.

*Работа выполнена в рамках проекта РФФИ № 18-05-80082 «Опасные явления» по теме «Закономерности формирования опасных береговых процессов в Азовском море и социально-экономические последствия их проявлений».

На основе проведенных исследований создана база данных в виде электронных таблиц и ГИС-карт показателей ОПЯ. Особое внимание уделялось наиболее значимым по воздействию на жизнедеятельность людей: туманам, грозам и ливневым осадкам, граду, метели, изморози, гололедным явлениям, сильному ветру. Выполнен анализ их пространственного распределения, выявлены современные тенденции развития, проведено районирование Азово-Черноморского побережья по степени проявления ОПЯ для улучшения развития прогнозирования, предупреждения и предотвращения чрезвычайных ситуаций. Выделено пять геоэкологических зон: 1) Северо-Таганрогская зона с очень сильной степенью проявления ОПЯ характерна для северного побережья Таганрогского залива; 2) Щербиновская зона с сильной степенью проявления ОПЯ зафиксирована на южном побережье Таганрогского залива; 3) Восточно-Приазовская зона со средней степенью проявления ОПЯ; 4) Азово-Темрюкско-Геленджикская зона со слабой степенью проявления ОПЯ; 5) Восточно-Причерноморская зона с очень слабой степенью проявления ОПЯ.

Ключевые слова: опасные погодные явления, ливни, грозы, туман, гололед, град, сильный ветер, побережье Азовского и Черного морей, геоэкологическая оценка.

For the last few years, the economic and strategic importance of the Azov-Black Sea coast has significantly increased. Development of ports and resort towns as well as coastal infrastructure requires hydrometeorological facilities of high quality. This is especially urgent, because a whole complex of hazardous weather phenomena (HWP) with serious ecological consequences is typical for this area. In this regard, the work was aimed at studying the HWP and their zoning of the Azov-Black Sea coast of Russia according to the frequency they occur.

The research is based on the data obtained by the North Caucasus Department of Hydrometeorology and Environmental Monitoring for the period 2005-2017, as well as the materials of the scientific and applied reference book "Climate of Russia" for the period 1977-2005. To assess the frequency of HWP on the Azov-Black Sea coast in Rostov and Krasnodar Regions, the method of credit point assessments and classifications has been used.

Based on the research, a database of spreadsheets and GIS maps of indicators of hazardous weather events has been created. Special attention was paid to the HWP which had a great impact on human life: fogs, thunderstorms and rainfalls, hail, snowstorm, frost, glacial phenomena, and strong wind. The analysis of their spatial distribution has been carried out, current trends in development have been revealed, and the zoning of the Azov-Black Sea coast has been made according to the degree of HWP to improve forecasting, prevention and avoiding hazardous events. Five geoecological zones have been recognized: 1) North-Taganrog zone with a very strong degree of HWP that is typical for the North Taganrog Gulf; 2) Scherbinovskaya zone with a strong degree of HWP that have been recorded on the South coast of the Taganrog Gulf; 3) East-Azov zone, the average degree of HWP; 4) Azov-Temryuk-Gelendzhik zone with a weak degree of HWP; 5) East-Black Sea Region with a very weak degree of HWP.

Keywords: hazardous weather phenomena, showers, thunderstorms, fog, glaze, hail, strong wind, coast of the Azov and Black seas, geoecological assessment.

Актуальность исследования. Климат побережья Азовского и Черного морей России изменяется от умеренно-континентального на побережье Азовского моря до субтропического в районе городского округа Сочи. Анализ климатообразующих факторов на побережье Ростовской области и Краснодарского края показал, что за последние десятилетия отмечаются тенденции в изменении климатических показателей: рост средней температуры воздуха составил от 1 до 2,5 °С, увеличение испаряемости, изменение годовых сумм осадков в сторону их увеличения, ослабление западно-восточного переноса воздушных масс и учащение так называемых блокирующих ситуаций в атмосфере, что определяет увеличение частоты фронтальных погод и опасных погодных явлений (ОПЯ) [1, 2].

Цель работы – исследовать ОПЯ и провести районирование Азово-Черноморского побережья России по частоте их проявления.

Материалы и методы

В основу исследования положены данные Северо-Кавказского управления по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды за период 2005–

2017 гг. по метеостанциям: Таганрог, Донская (Азов), Тимашевск, Славянск-на-Кубани, Ейск, Должанская, Приморско-Ахтарск, Тамань, Анапа, Новороссийск, Геленджик, Туапсе, Сочи, а также материалы научно-прикладного справочника «Климат России» за период с 1977 по 2005 г. [3].

Для оценки частоты проявления ОПЯ Азово-Черноморского побережья Ростовской области и Краснодарского края был использован метод балльных оценок и классификаций. Исследуемые объекты сравниваются между собой по сумме баллов всех показателей влияющих факторов.

Для ранжирования был использован метод линейной интерполяции: $r = (A_{\max} - A_{\min})/n$, $R_1 = A_{\min} + r$, $R_{2...n} = R_{1...n} + r$, где r – интервал; $A_{\max}$ – максимальное значение показателя; $A_{\min}$ – минимальное значение показателя; n – количество рангов; R – ранг.

По итогу оценки каждого фактора были построены электронные карты с использованием ГИС «Панорама» (версия 8.02#7). На основе электронных картографических материалов ВТУ ГШ: карты масштаба 1:500000 номенклатур K371, K372, L371, L372, L373, L374 (2003–2004 гг.) были созданы карты масштаба 1:2 000 000 (итоговая карта) и 1:5 000 000 (карта каждого показателя) в проекции Красовского 1942 г.

Результаты

Из ОПЯ, отмеченных на данной территории, наиболее значимыми по воздействию на жизнедеятельность людей являются туманы, грозы и ливневые осадки, град, метель, изморозь, гололед, сильный ветер. Для характеристики пространственного распределения ОПЯ в прибрежной части Азовского и Черного морей России был использован такой показатель, как среднее многолетнее число дней с ОПЯ за период 1977–2017 гг., составлена карта, отражающая частоту их проявления с использованием методики балльных оценок и классификаций [4].

Туманы. Сильные туманы на Азово-Черноморском побережье – довольно частое явление. Анализ их пространственного распределения показывает, что наибольшее количество возникает на побережье Азовского моря в пределах Неклиновского, Азовского, Щербиновского и Славянского районов. За год наблюдается от 4 (Туапсинский район) до 40 (Таганрог) дней с туманом при среднем значении 23 (рис. 1).

К зоне с очень сильной степенью проявления данного явления (34–44 дня) относятся северное и

южное побережья Таганрогского залива (Неклиновский, Щербиновский и Ейский районы). Для восточного побережья Азовского моря (Азовский, Каневской и Славянский районы) характерна сильная степень проявления туманов (28–33 дня). Средняя степень проявления туманов характерна для восточного побережья и Таманского полуострова (Приморско-Ахтарский и Темрюкский районы). На Черном море с туманами менее 22 дней в году (слабая степень проявления) [5].

Гроза и ливневые осадки – это одно из наиболее часто повторяющихся ОПЯ в приморских регионах. Анализ распределения гроз и ливневых осадков на побережье Азовского и Черного морей России показывает, что их число изменяется в широких пределах – от 18 до 36 дней в году. Зона с сильной и очень сильной степенью проявления этого ОПЯ (более 28 дней в году) находится на северном побережье Таганрогского залива (Неклиновский район) и на Черноморском побережье от Туапсе до городского округа (г/о) Сочи (рис. 2). Районами со средней степенью проявления гроз и ливневых осадков (28–25 дней) являются прибрежные зоны Приморско-Ахтарского, Славянского районов и г/о Геленджик.

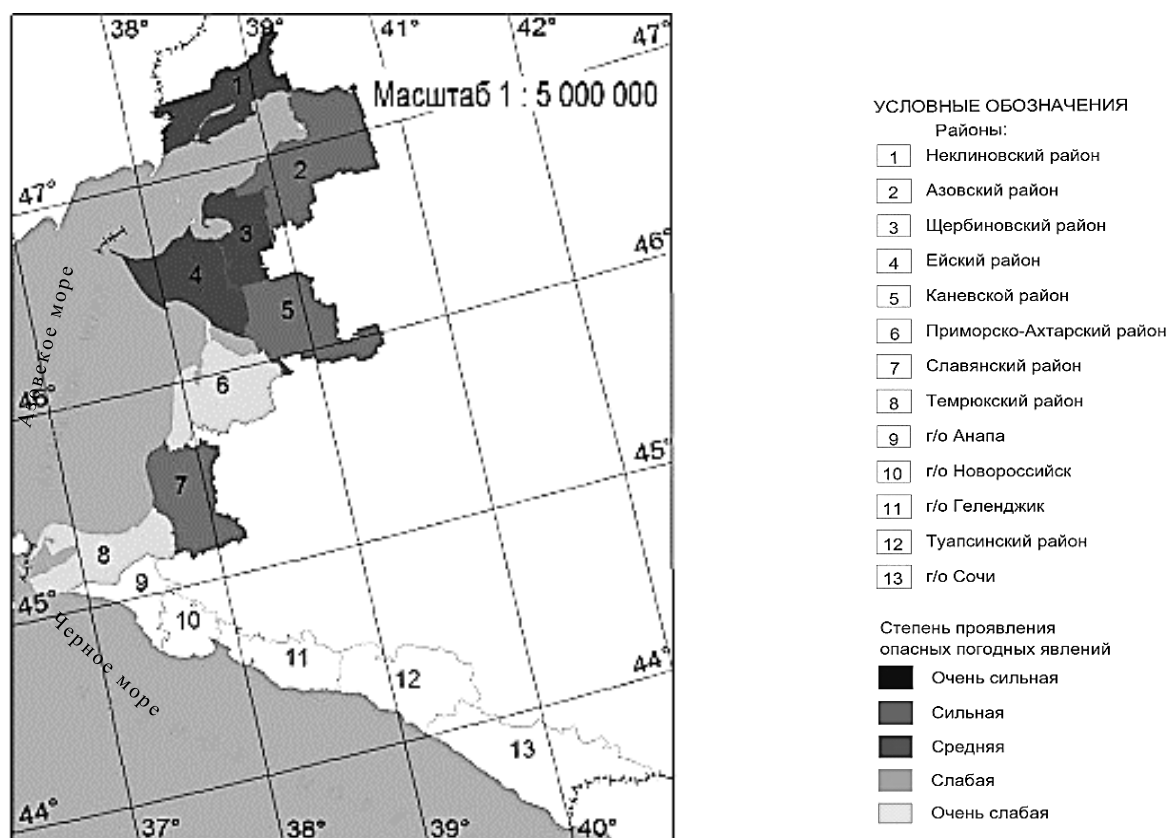


Рис. 1. Районирование побережья по степени проявления туманов / Fig. 1. Coastal zoning by the degree of fogs

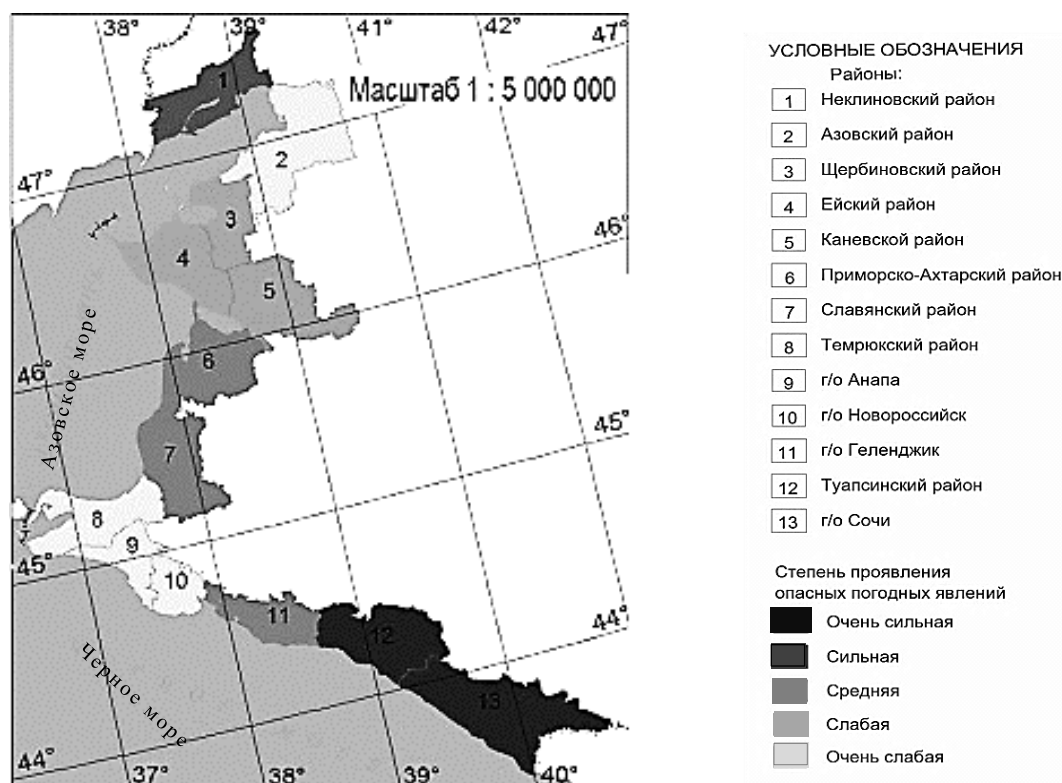


Рис. 2. Районирование побережья по степени проявления гроз и ливневых осадков
/ Fig. 2. Coastal zoning regarding the degree of thunderstorms and rainfall

Слабой и очень слабой степенью проявления гроз и ливней отличается побережье от Азовского района до г/о Новороссийск, в среднем не более 20 дней в году (рис. 2).

Град образуется при интенсивном развитии кучево-дождевой облачности. В связи с тем, что град – явление локальное, существующая сеть метеорологических станций и постов фиксирует не все случаи его выпадения. За период 1977–2017 гг. в среднем по побережью зафиксировано около одного случая в год с этим явлением (рис. 3).

Метели наиболее характерны для побережья Неклиновского, Азовского и Щербиновского районов. Количество дней с метелью за рассматриваемый период здесь изменялось от 1 до 27 в году. В пределах северного берега Таганрогского залива повторяемость метелей за последние десять лет уменьшилась, на южном практически не изменилась. Тем не менее эти районы относятся к зонам с сильной и очень сильной степенью проявления метелей. Напротив, на Черноморском побережье (Анапа, Новороссийск) тренд положительный, но эти регионы характеризуются слабой степенью проявления данного ОПЯ (рис. 4, 5). В Туапсинском районе, г/о Геленджик и Сочи метели в период с 2005 по 2014 г. вообще не наблюдались.

Анализ пространственного распределения *гололедных явлений* показал, что в среднем за год на побережье Азовского и Черного морей наблюдается от 1 (г/о Сочи) до 10 дней (Неклиновский район) с гололедом при среднем по побережью 7 дней (рис. 6).

Районами побережья с наибольшим количеством дней с гололедом являются Неклиновский и Щербиновский, что связано с частым выпадением дождей на холодную подстилающую поверхность (рис. 7).

Побережье таких районов, как Славянский, Ейский, Приморско-Ахтарский и Темрюкский, характеризуются средней степенью проявления гололедных явлений. В Азовском районе, а также на всем Черноморском побережье гололедные явления крайне редки, не более 3 дней в году.

Изморозь. На Азово-Черноморском побережье Ростовской области и Краснодарского края наблюдаются в среднем 3–4 дня в год с изморозью (рис. 8). Максимум приходится на Щербиновский район – 9 дней (в 3 раза больше среднего), который входит в зону с очень сильной степенью проявления. Образование изморози связано с выпадением туманов в холодное время года (рис. 9).

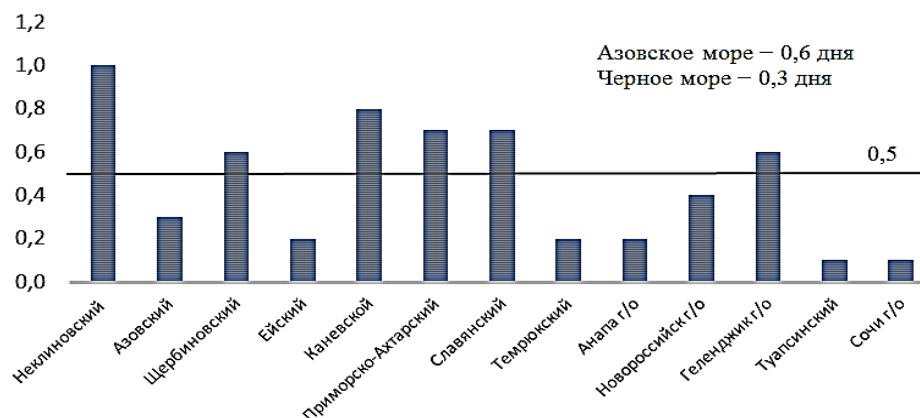


Рис. 3. Среднее количество дней с градом / Fig. 3. Average number of days with hail

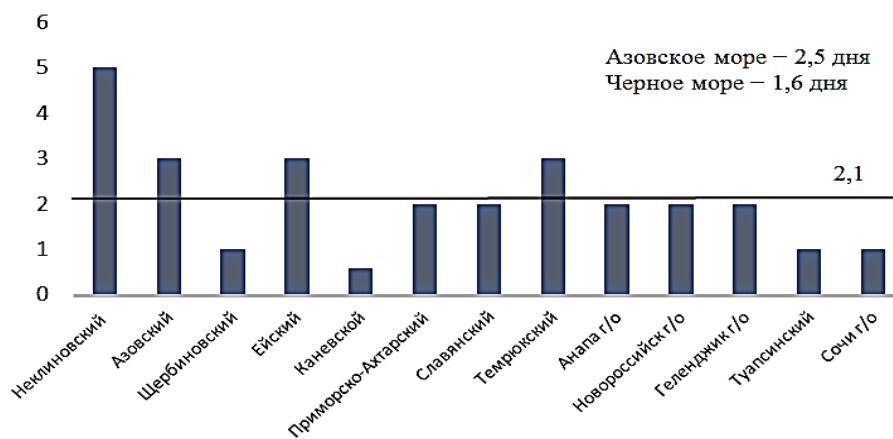


Рис. 4. Среднее количество дней с метелями / Fig. 4. Average number of days with snowstorms

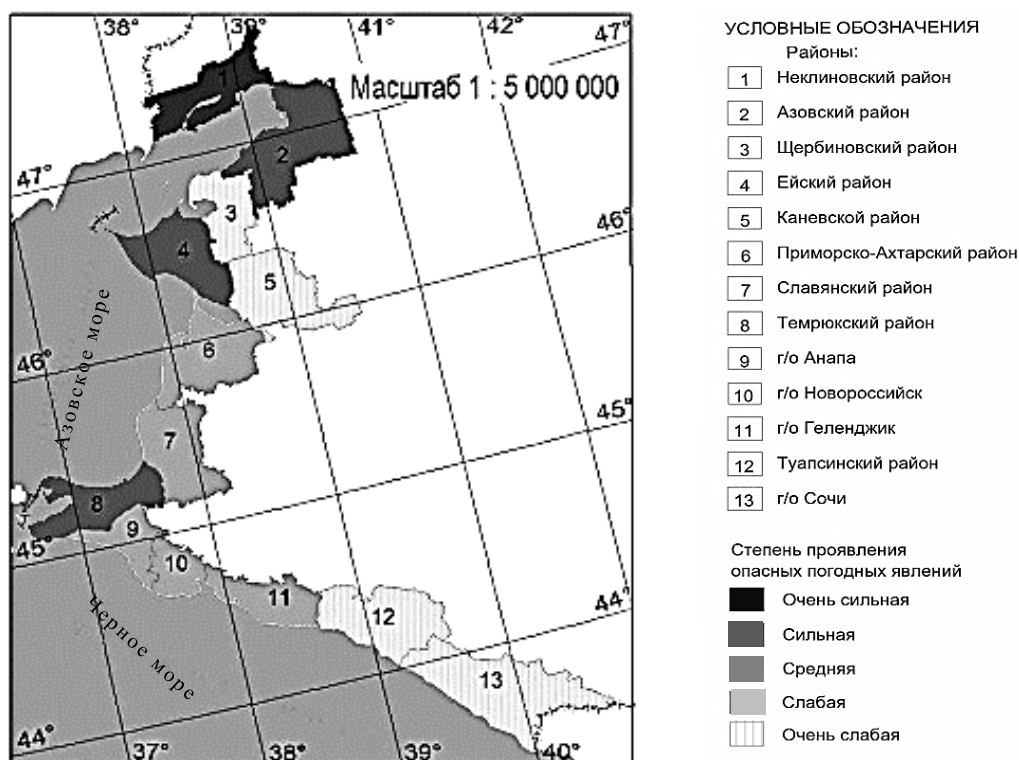


Рис. 5. Районирование побережья по степени проявления метелей / Fig. 5. Coastal zoning by the degree of blizzards

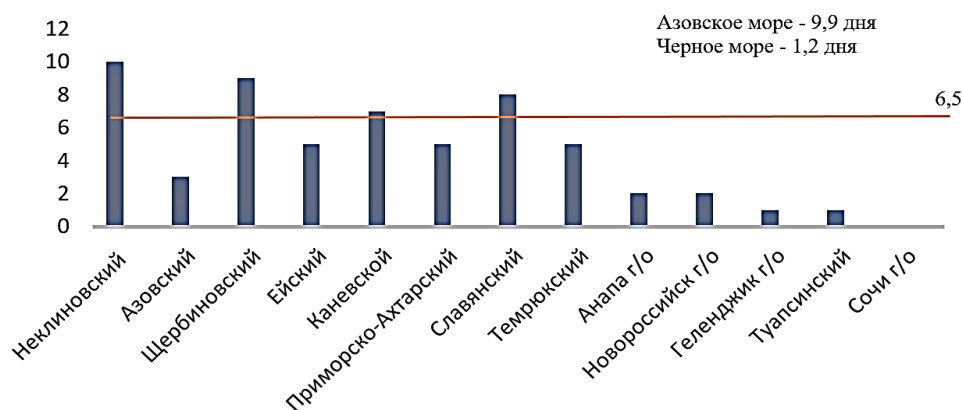


Рис. 6. Среднее количество дней с гололедом / Fig. 6. Average number of days with glaze

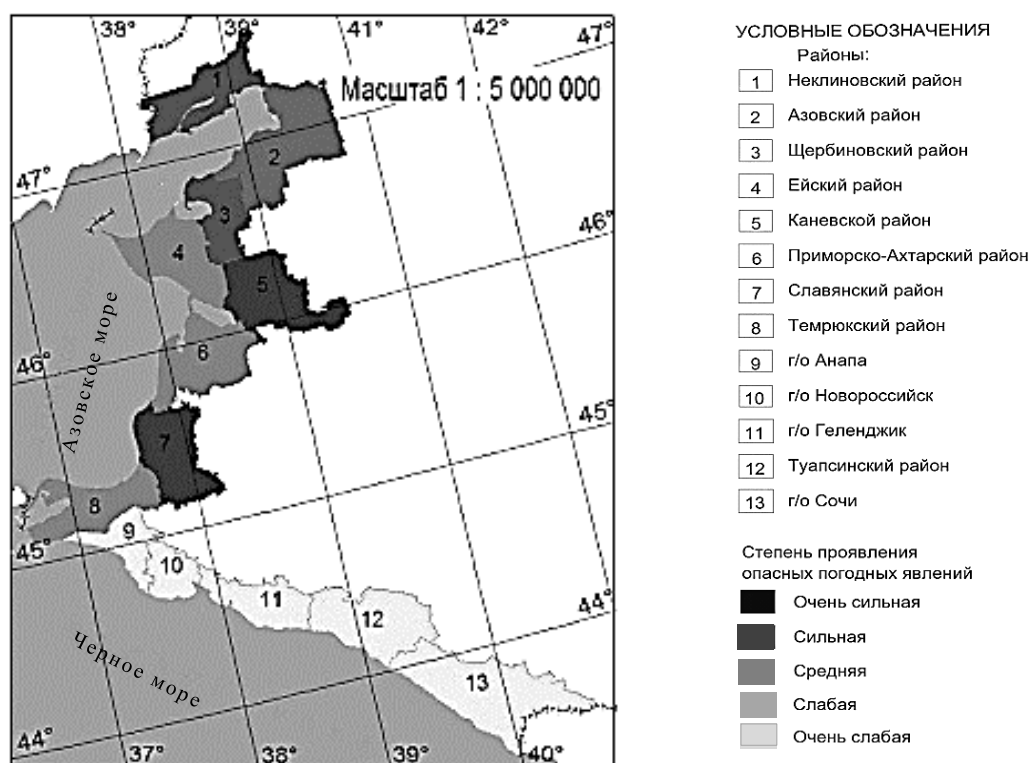


Рис. 7. Районирование побережья по степени проявления гололедных явлений / Fig. 7. Coastal zoning by the degree of glacial phenomena

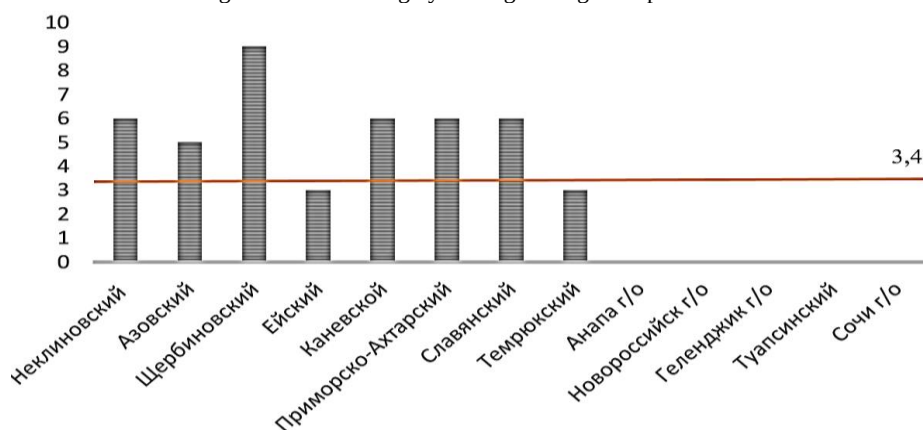


Рис. 8. Среднее количество дней с изморозью / Fig. 8. Average number of days with frost

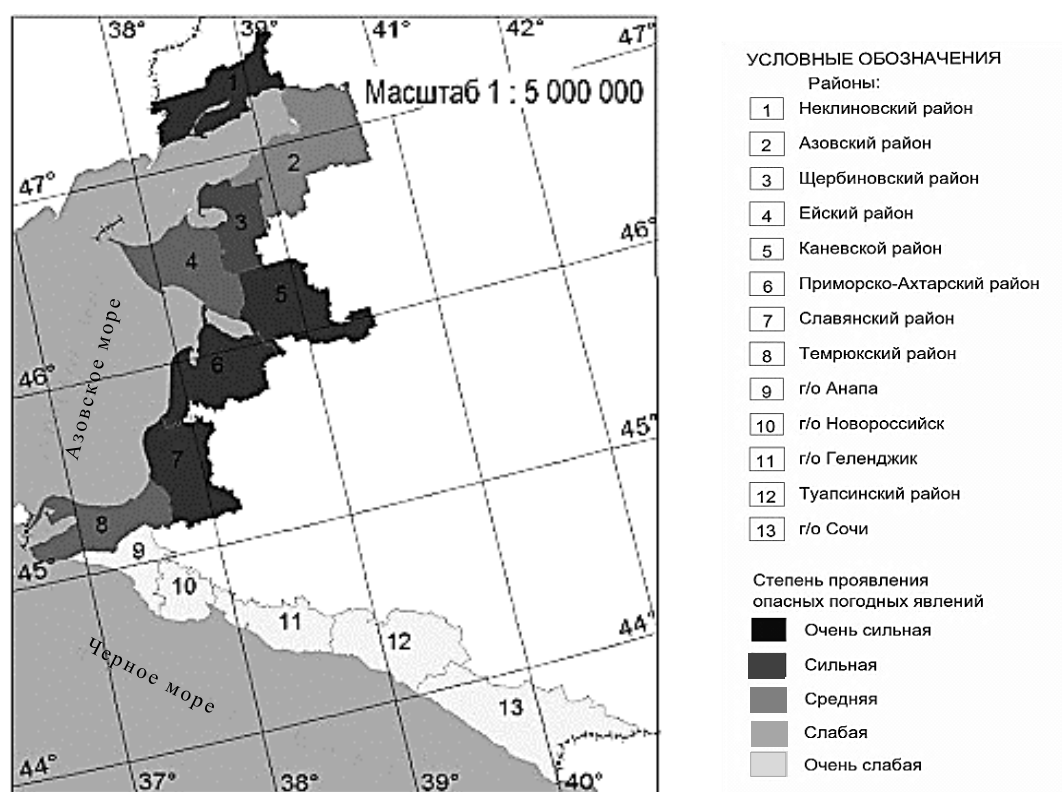


Рис. 9. Районирование побережья по степени проявления изморозных явлений
/ Fig. 9. Coastal zoning by the degree of frosty phenomena

В зону с сильной степенью проявления изморози входят Неклиновский, Каневской, Славянский, Приморско-Ахтарский, средней – Азовский район, слабой – Ейский и Темрюкский районы. Побережье Черного моря характеризуется очень редким (менее 1 дня) проявлением ОПЯ из-за мягкого субтропического климата.

Ветер. На побережье одно из основных и наиболее часто возникающих ОПЯ. Для анализа использован показатель – число дней с сильным ветром (более 15 м/с) за период 2005–2017 гг. Повторяемость сильных ветров изменялась от 7 до 106 дней в году, отмечался положительный тренд. Самым ветреным районом является г/о Новороссийск. В период с 2005 по 2017 г. наблюдалось в среднем 25 дней в году с сильным ветром, максимум – 50 дней. В среднем за год на побережье Азовского и Черного морей наблюдается от 106 (г/о Новороссийск) до 7 (г/о Сочи) дней с сильным ветром при среднем по побережью 50 дней (рис. 10).

С помощью метода интерполяции был ранжирован показатель среднего многолетнего числа дней с ветром. Городские округа Новороссийск и

Анапа относятся к зоне с очень сильной степенью проявления этого ОПЯ. Здесь в два раза чаще за год возникает сильный ветер, чем на остальном побережье. Это связано с орографическими особенностями территории, в частности с образованием знаменитой боры.

В зону с сильной степенью проявления ветра входят г/о Геленджик и Туапсинский район. Побережье Азовского моря характеризуется средней степенью проявления сильного ветра (Ейский и Темрюкский районы), слабой (Неклиновский, Азовский, Щербиновский, Приморско-Ахтарский районы) и очень слабой степенью (г/о Сочи, Каневской и Славянский районы).

Для оценки комфортности климатических условий выполнено геоэкологическое зонирование побережья Азовского и Черного морей России по степени проявления ОПЯ. Данный показатель является важным средообразующим фактором, формирующим эколого-климатический и природно-ресурсный потенциал территории, обеспечивающий жизнедеятельность населения, подлежащий обязательному учету [2].

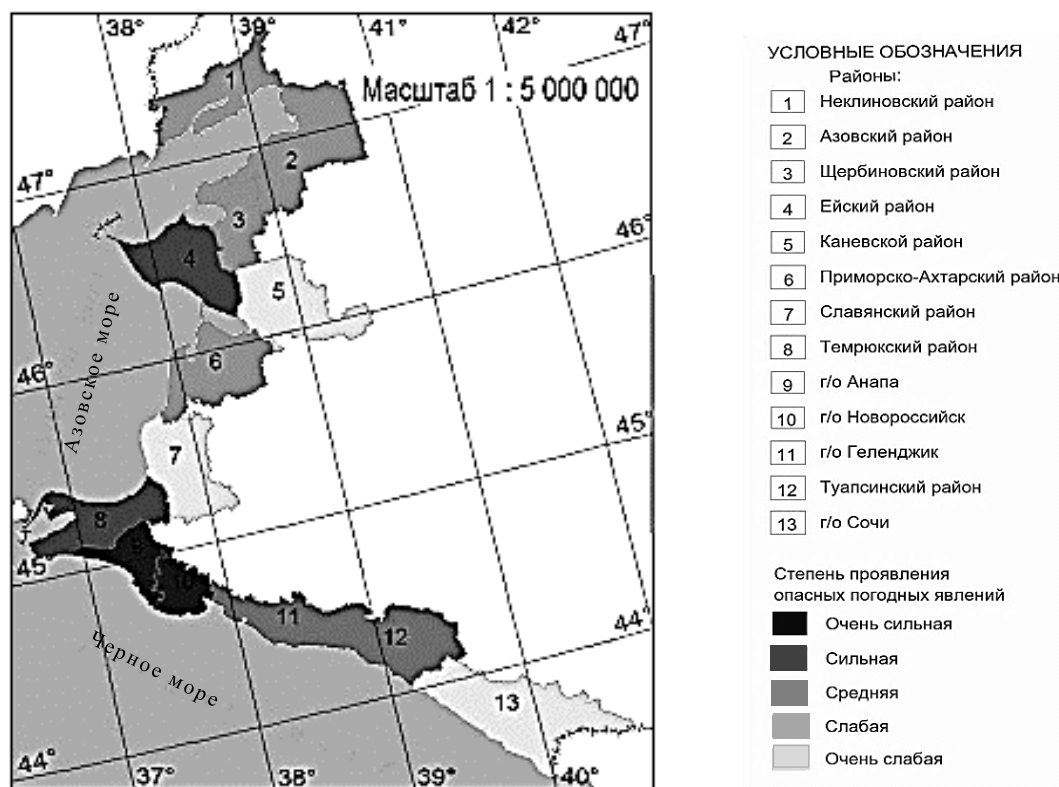


Рис. 10. Районирование побережья по среднему числу дней с сильным ветром
/ Fig. 10. Zoning by the average number of days with strong wind

Зонирование побережья Азовского и Черного морей России по степени проявления ОПЯ выполнено на основе интегральной оценки. Проанализировано 8 показателей, в результате суммирования которых был выведен общий ранг ОПЯ (таблица):

$$I = \sum R = R_T + R_{ГЛ} + R_{Г} + R_M + R_{ГЛ} + R_{и} + R_{в},$$

где I – интегральная оценка; $\sum R$ – сумма рангов; R_T – ранг возникновения туманов; $R_{ГЛ}$ – ранг возникновения грозы и ливневых осадков; $R_{Г}$ – ранг возникновения града; R_M – ранг возникновения метели; $R_{ГЛ}$ – ранг возникновения гололеда; $R_{и}$ – ранг возникновения изморози; $R_{в}$ – ранг возникновения ветра.

Ранжирование проявления ОПЯ / Ranking of HWP occurrence

Общий показатель ОПЯ	Ранг	Степень проявления ОПЯ
26–30	5	Очень сильная
22–26	4	Сильная
19–23	3	Средняя
15–19	2	Слабая
11–15	1	Очень слабая

Общий показатель ОПЯ ранжирован методом линейной интерполяции по принципу: чем больше значение, тем выше ранг. Выделено 5 кластеров с различной степенью проявления ОПЯ, которые соответствуют 5 территориальным зонам: Северо-

Таганрогская, Щербиновская, Восточно-Приазовская, Азово-Темрюкско-Геленджикская, Восточно-Причерноморская (рис. 11).

В результате зонирования установлено, что Северо-Таганрогская зона характеризуется очень сильной степенью проявления ОПЯ, все опасные метеорологические явления имеют высокую повторяемость, особенно те, которые возникают в зимний период времени [6].

Щербиновская зона с сильной степенью проявления ОПЯ занимает 5 % от общей территории. Наблюдается максимальное количество дней с туманом и изморозью – 44 и 9 дней соответственно при среднем по побережью 23 и 4 дня.

Ейский, Каневской, Приморско-Ахтарский и Славянский районы входят в Восточно-Приазовскую зону со средней степенью проявления ОПЯ. Она занимает наибольшую площадь исследуемого побережья – 35 %. Все показатели ОПЯ находятся на среднем уровне повторяемости, за исключением довольно частых метелей.

Азово-Темрюкско-Геленджикская зона со слабой степенью проявления ОПЯ, включающая в себя Азовский, Темрюкский районы и г/о Геленджик, составляет 23 % от общей площади. Здесь все показатели ОПЯ находятся ниже среднего уровня.

Городские округа Анапа, Новороссийск, Сочи и Туапсинский район входят в Восточно-Причерноморскую зону (29 % территории), которая характеризуется очень слабой степенью проявления ОПЯ. Однако здесь наблюдается максимальное количество дней с ветром, в среднем – 71 день (Новороссийск), что в два раза больше, чем по всему побережью, также здесь наибольшее количество дней с грозами и ливневыми осадками – 33 дня (Сочи) при среднем по побережью 27 дней. Остальные ОПЯ крайне редки.

Результаты проведенных исследований могут быть использованы при разработке рекомендаций по минимизации последствий проявления опасных природно-климатических явлений. Для снижения социально-экологического ущерба и рисков от ОПЯ необходимо:

– прогнозирование погодных процессов с учетом региональных особенностей проявления ОПЯ, что даст возможность повысить эффективность предупреждений о неблагоприятных метеорологических явлениях;

– создание компьютеризированной базы данных метеорологических явлений, которые привели к значительному ущербу и человеческим жертвам;

– повышение информированности общественности с помощью расширения сферы деятельности СМИ по усилению оперативной информации для населения региона;

– организация для населения всех возрастных категорий систематической подготовки по проблеме поведения при ОПЯ;

– создание региональной системы мониторинга за ОПЯ для увеличения точности прогноза снижения экономических потерь.

Полученные результаты геоэкологического районирования Азово-Черноморского побережья могут быть использованы при улучшении качества современных прогнозов ОПЯ для повышения эффективности экономического развития прибрежной инфраструктуры, для уменьшения возможного материального ущерба и человеческих потерь.

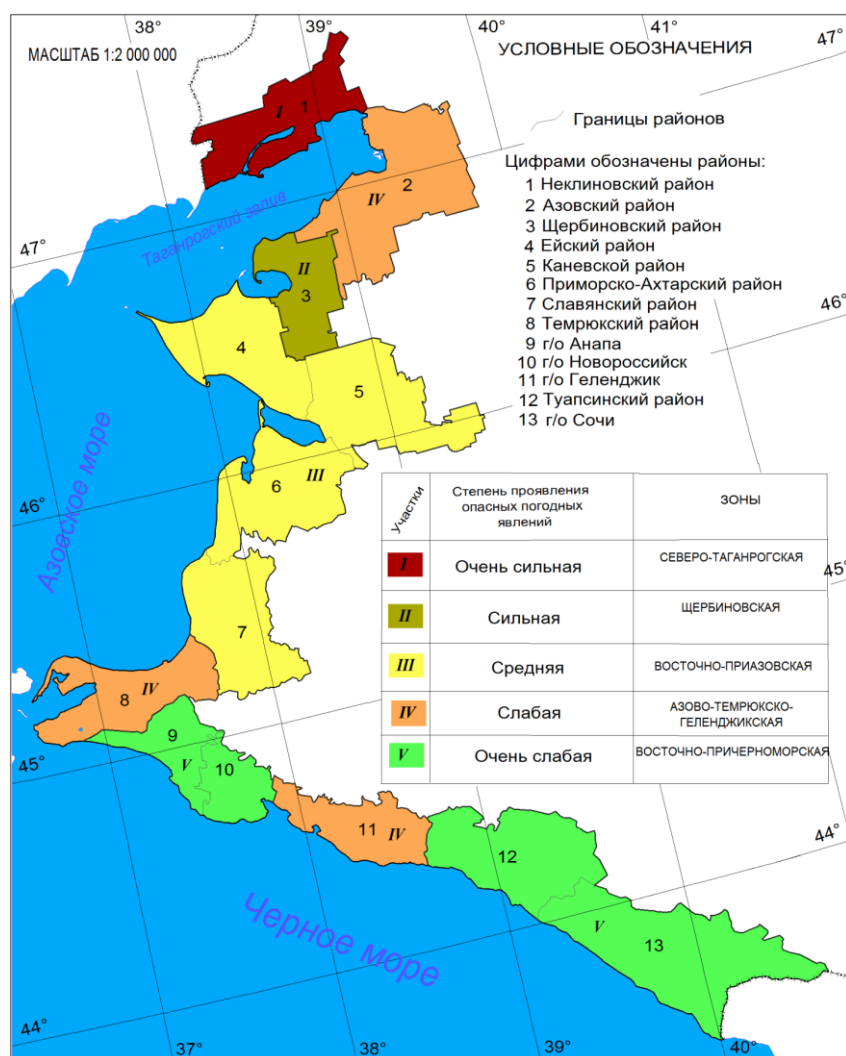


Рис. 11. Геоэкологическое районирование побережья по степени проявления ОПЯ
/ Fig. 11. Geoeological zoning of the coast by the degree of NWP

Литература

1. Панов В.Д., Лурье П.М., Ларионов Ю.А. Климат Ростовской области. Ростов н/Д.: Донской изд. дом, 2006. 487 с.
2. Андреева Е.С. К вопросу о применении вероятностно-географического метода прогнозирования рисков возникновения опасных явлений погоды равнин юга России // Естеств. и техн. науки. 2008. № 2. С. 261–262.
3. Климат России : электр. науч.-прикл. справочник. Обнинск: ВНИИГМИ-МЦД, 2007.
4. Коробов В.Б. Экспертные методы в географии и геоэкологии. Архангельск: Поморский ун-т, 2008. 236 с.
5. Авакова А.Г., Кропянко Л.В., Беспалова Л.А. Районирование Азово-Черноморского побережья Ростовской области и Краснодарского края по степени прояв-

ления опасных погодных явлений // Научные перспективы XXI века. Достижения и перспективы нового столетия : сб. материалов IX Междунар. науч.-практ. конф. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2015. С. 63–66.

6. Беспалова Л.А., Иошпа А.Р., Кропянко Л.В., Авакова А.Г. Опасные погодные явления Азово-Черноморского побережья Ростовской области и Краснодарского края // Естеств. и техн. науки. 2015. № 11. С. 272–276.

References

1. Panov V.D., Lur'e P.M., Larionov Yu.A. *Klimat Rostovskoi oblasti* [Climate of the Rostov region]. Rostov-on-Don: Donskoi izd. dom, 2006, 487 p.

2. Andreeva E.S. К вопросу о применении вероятностно-географического метода прогнозирования рисков возникновения опасных явлений погоды равнин юга России [The question of the application of probabilistic-geographical method of predicting the risk of occurrence of severe weather, the plains of the South of Russia]. *Estestv. i tekhn. nauki*. 2008, No. 2, pp. 261-262.

3. *Klimat Rossii* [Climate of Russia]. Electronic scientific and applied reference book. Obninsk: VNIIGMI-MTsD, 2007.

4. Korobov V.B. *Ekspertnye metody v geografii i geoekologii* [Expert methods in geography and geoecology]. Arkhangelsk: Pomorskii un-t, 2008, 236 p.

5. Avakova A.G., Kropyanko L.V., Bepalova L.A. [Zoning of the Azov-black sea coast of the Rostov region and Krasnodar region in the degree of manifestation of dangerous weather phenomena]. *Nauchnye perspektivy XXI veka. Dostizheniya i perspektivy novogo stoletiya* [Scientific prospects of the 21th century. Achievements and prospects for the new century]. Proceedings of the IX International Scientific-Practical Conference. Novosibirsk: Izd-vo NGTU, 2015, pp. 63-66.

6. Bepalova L.A., Ioshpa A.R., Kropyanko L.V., Avakova A.G. Опасные погодные явления Азово-Черноморского побережья Ростовской области и Краснодарского края [Dangerous weather phenomena in the Azov-black sea coast in Rostov region and the Krasnodar territory]. *Estestv. i tekhn. nauki*. 2015, No. 11, pp. 272-276.

УДК 914/919

DOI 10.23683/0321-3005-2018-4-64-71

ОСОБЕННОСТИ РАЗВИТИЯ ВНУТРЕННЕГО ВОДНОГО ТРАНСПОРТА РОССИИ НА СОВРЕМЕННОМ ЭТАПЕ

© 2018 г. О.Е. Васильева¹, А.А. Дмитриева¹, И.В. Макеев¹

¹Российский государственный педагогический университет им. А.И. Герцена, Санкт-Петербург, Россия

FEATURES OF DEVELOPMENT OF INLAND WATER TRANSPORT IN RUSSIA AT THE PRESENT STAGE

O.E. Vasilyeva¹, A.A. Dmitrieva¹, I.V. Makeev¹

¹Herzen State Pedagogical University of Russia, Saint Petersburg, Russia

Васильева Ольга Евгеньевна – кандидат географических наук, доцент, кафедра экономической географии, Российский государственный педагогический университет им. А.И. Герцена, наб. реки Мойки, 48, г. Санкт-Петербург, 191186, Россия, e-mail: vasilyeva.o.e@gmail.com

Olga E. Vasilyeva - Candidate of Geography, Associate Professor, Department of Economic Geography, Herzen State Pedagogical University of Russia, Naberezhnaya r. Moyki, 48, Saint Petersburg, 191186, Russia, e-mail: vasilyeva.o.e@gmail.com

Дмитриева Анастасия Анатольевна – кандидат географических наук, доцент, кафедра экономической географии, Российский государственный педагогический университет им. А.И. Герцена, наб. реки Мойки, 48, г. Санкт-Петербург, 191186, Россия, e-mail: a111000@mail.ru

Anastasiya A. Dmitrieva - Candidate of Geography, Associate Professor, Department of Economic Geography, Herzen State Pedagogical University of Russia, Naberezhnaya r. Moyki, 48, Saint Petersburg, 191186, Russia, e-mail: a111000@mail.ru

Макеев Иван Владимирович – аспирант, кафедра экономической географии, Российский государственный педагогический университет им. А.И. Герцена, наб. реки Мойки, 48, г. Санкт-Петербург, 191186, Россия, e-mail: Guide007@mail.ru

Ivan V. Makeev - Postgraduate, Department of Economic Geography, Herzen State Pedagogical University of Russia, Naberezhnaya r. Moyki, 48, Saint Petersburg, 191186, Russia, e-mail: Guide007@mail.ru

В современном мире транспорт играет одну из значимых ролей в формировании экономики любой страны, определяет темпы и основные направления развития всех сфер народного хозяйства. В России состояние транспортной-логистической системы, в особенности внутреннего водного транспорта, имеет низкие показатели по многим параметрам. В то же время экономические потребности нашей страны показывают важность этой отрасли. Цель статьи – анализ состояния внутреннего водного транспорта России на современном этапе, выявление основных проблем и направлений его развития. В данной статье проанализированы основные статистические показатели, характеризующие состояние внутреннего водного транспорта России с начала 2000-х гг., такие как инвестиции в основной капитал по основным видам транспорта, количество пассажирских перевозок внутренним водным транспортом, наличие речных и озерных судов, а также возрастная структура этих судов. По результатам анализа были построены диаграммы и графики, наглядно отражающие основные тенденции, происходящие в отрасли. Также нами были определены актуальные проблемы внутреннего водного транспорта России, предложены варианты возможных направлений его развития с учетом возможностей и современных показателей.

Ключевые слова: транспорт, водный транспорт, внутренние водные пути, порты, пассажирские перевозки.

In the modern world, transport plays one of the important roles in shaping the economy of any country, determines the pace and the main directions of development of all spheres of the national economy. In Russia, the state of the transport-logistics system, especially inland waterway transport, has low indicators in many parameters. At the same time, the economic needs of our country show the importance of this industry. The purpose of the article is to analyze the state of inland water transport in Russia at the present stage, to identify the main problems and directions of its development. This article analyzes the main statistical indicators characterizing the state of inland water transport in Russia since the beginning of the 2000s, such as investments in fixed assets by main types of transport, the number of passenger transportations by inland waterway transport, the presence of river and lake vessels, and the age structure of these ships. Based on the results of the analysis, diagrams and graphs were constructed, clearly reflecting the main trends taking place in the industry. Also, we identified the current problems of inland water transport in Russia, proposed options for possible directions for its development, taking into account the capabilities and current indicators.

Keywords: *transport, water transport, inland waterways, ports, passenger transportation.*

Исторически так сложилось, что внутренний водный транспорт играет значимую роль в функционировании отечественной экономики, так как наша страна обладает большим разнообразием рек и озер и при этом имеет достаточно большую площадь территории, практически непригодную для прокладывания искусственных транспортных путей.

Российский речной транспорт имеет многовековую историю. Первые поселения древних славян располагались вдоль береговой линии рек и озер, которые использовались в качестве путей сообщения. В IX в. Киевская Русь наладила торговые отношения с Византией, Средней Азией и Ближним Востоком благодаря Волховско-Днепровскому пути (Варяжскому пути, или Восточному пути), который связывал Балтийское море с Чёрным. С момента объединения русских княжеств в Московское централизованное государство, особенно в период царствования Петра I, речное судоходство использовалось преимущественно для военных походов. На протяжении долгого периода истории велось активное освоение новых земель. Во всех речных бассейнах Российской империи начинают возникать центры судостроения, где велась постройка судов для различных государственных нужд. Значительные успехи достигнуты в XVIII – XIX вв., когда на месте волоков (участков суши между озерами и притоками крупных рек, через которые тащили ладьи и челны) были сооружены искусственные водные системы. Первыми такими системами были Вышневолоцкая (1708), связавшая Новгородский и Нижний волоки; Тихвинская (1811), соединившая водоразделы рек от западного берега Ладожского озера до верховьев Волги, Мариинская (1810), протянувшаяся от Рыбинска до Петербурга. Вышневолоцкая система имела много порогов и пропускала суда лишь со стороны Волги на Балтику. Тихвинская система была самой короткой и позволяла осуществлять навигацию в обоих направлениях. Малые размеры отдельных участков Мариинской системы и большое количество шлюзов (28), прохождение трассы по малолюдным местам (невозможность найти людей и лошадей для осуществления тяги) серьезно отражались на грузообороте.

Развитие паромостроения достигло высочайшего уровня к 1913 г. Российская империя являлась лидером как по количеству производимых паромов, так и по качественным характеристикам судов. Протяженность судоходных путей по рекам, озерам и каналам на тот период времени составляла 64,6 тыс. км [1].

Следует отметить, что в дореволюционной России наиболее загруженными были реки европейской части страны при использовании как пассажирских судов, так и грузовых. Речные бассейны Сибири и Дальнего Востока практически не задействовались для судоходства. В структуре грузооборота преобладали зерно, лес, нефть, сыпучие грузы.

Одним из важнейших исторических этапов развития речного транспорта нашей страны был период 30–50-х гг. XX в. Речной флот СССР был национализирован, план ГОЭЛРО предусматривал создание системы речной транспортной сети, организацию движения, строительство портов и водных каналов. За этот период времени были построены Беломоро-Балтийский и Волго-Донской каналы, создана единая глубоководная сеть в европейской части СССР, сооружены каскады гидроузлов и водохранилищ на реках Волга и Кама и пр. Такие темпы строительства привели к увеличению в эти годы единиц самоходного речного флота в 2,2 раза, несамоходного – в 2,7, что, безусловно, отразилось и на объёме речных перевозок (увеличились более чем в 3 раза), интенсивном строительстве по береговой линии портов, механизации около половины всех погрузочно-разгрузочных работ [2].

Даже тяжелейшие годы Великой Отечественной войны, которые нанесли огромный ущерб речному транспорту, не снизили значение внутреннего водного транспорта в развитии страны. Строительство Волго-Балтийского водного пути, соединение морей европейской части СССР через каналы и глубоководные речные магистрали на долгие годы обеспечили надёжную транспортную связь между экономическими районами центральной и северо-западной частей страны.

С конца 50-х – середины 70-х гг. начинается гидротехническое развитие рек Сибири, которые за очень небольшой промежуток времени из путей местного значения превратились в важнейшие транзитные магистрали, связавшие европейскую и азиатскую части страны через Северный морской путь. Благодаря развитию речного транспорта Сибирского региона началось быстрое и эффективное освоение нефтегазоносных и рудных районов. К 1973 г. удельный вес грузоперевозок по рекам Сибири в общем объёме грузоперевозок речного транспорта составил в СССР 24,5 %, а протяженность всех речных магистралей страны, использовавшихся в судоходстве, возросла до 146,1 тыс. км [1]. Это был период количественного и качественного изменения состава речного флота нашей страны.

Рекордные объемы грузовых перевозок по внутренним водным путям были достигнуты в 1989 г. – более 580 млн т. Однако в 1990-е гг. после распада Советского Союза, разрыва производственных связей между экономическими районами, потери рынков сбыта промышленной и сельскохозяйственной продукции, все большего проявления конкуренции со стороны автотранспорта и серьезного износа речного флота грузовые перевозки сократились к 2000 г. в пять раз – до 110–120 млн т. [1].

Почти в 10 раз сократились пассажирские перевозки. В РСФСР в 1980-е гг. речным транспортом

ежегодно пользовались около 100 млн чел., а в 2000 и 2015 гг. по внутренним водным путям были перевезены 28 и 14 млн чел. соответственно [3].

Протяженность внутренних водных путей в России, по данным Росморречфлота, в течение последних 15 лет не менялась. По данным на 2015 г., она составляет 101 662 км. Следует отметить, что в настоящее время более половины путей не соответствуют требованиям стандартных судовых габаритов.

В табл. 1 представлены основные речные бассейны нашей страны.

Таблица 1

Общая характеристика речных бассейнов России* / General characteristics of the Russian river basins

Название бассейна	Основные города-порты	Структура грузоперевозок
Волго-Камский	Ярославль, Нижний Новгород, Казань, Тольятти, Самара, Саратов, Волгоград, Астрахань, Тверь, Ярославль – на Волге, Пермь, Березники, Набережные Челны – на Каме	Стройматериалы (доля в объеме перевозок не менее 60 %, основной производитель – цементные заводы г. Вольска, Саратовская область), лесоматериалы, нефтепродукты, уголь и зерно. Лесоматериалы и калийные соли из Березников идут в Санкт-Петербург и на Северный Кавказ по Волго-Балтийскому водному пути. С юга на север везут баскунчакскую соль, бахчевые и рыбу из Прикаспия. Уголь из Кузнецкого бассейна (Кемеровская область) направляется через пункты перевалки по железной дороге в Пермь, Саратов, Самару. Нефтепродукты и зерно перемещаются в обоих направлениях
Западно-Сибирский	Новосибирск, Томск, Барнаул, Сургут, Салехард, Уренгой, Лабетанги – на Оби; Омск, Тобольск, Тюмень, Ханты-Мансийск – на Иртыше	Строительные грузы (детали домов, цемент, ЖБИ, щебень, песок) стали преобладающими с началом промышленного освоения. Также с юга на север перевозят трубы, буровое оборудование, уголь. С севера на юг в структуре грузоперевозок преобладают лес и топливные грузы. По Северному морскому пути в труднодоступные районы Сибири поступают в основном стройматериалы, нефтепродукты, соль, продовольственные и промышленные товары
Речные системы Северного и Северо-Западного районов (Северная Двина с притоками Выгедга и Сухона, Мезень, Печора, Свирь, Нева, Беломоро-Балтийский канал)	Архангельск и Котлас – на Северной Двине, Печора и Нарьян-Мар – на Печоре, Санкт-Петербург – на Неве, Мезень – на р. Мезень	Лесоматериалы, железорудный и апатитовый концентраты везут с Кольского полуострова, Карелии, Архангельской области и Республики Коми в южном направлении. В обратном направлении – промышленные товары, соль, зерно, нефтепродукты
Речные системы Восточной Сибири и Дальнего Востока	Красноярск, Енисейск, Игарка, Дудинка – на Енисее; Иркутск, Братск, Усть-Илимск, Ангарск – на Ангаре; Якутск, Витим, Киренск, Качуг, Жиганск, Осетрово – на Лене; Благовещенск, Хабаровск и Комсомольск-на-Амуре – на Амуре	За пределы региона вывозится сырье, в том числе в страны Юго-Восточной Азии, – уголь, глинозем, апатитовый концентрат, фосфорные удобрения, лес, редкие металлы. В регион транспортируются промышленные и продовольственные товары, необходимые для развития производства и жизнедеятельности, в том числе более 50 % ввозимых грузов – это строительные материалы
Азово-Донской бассейн	Ростов-на-Дону, Калач-на-Дону, Волгодонск, Усть-Донецк	35,5 % – перевозка мазута, 14,6 % – серы, транспортировка из Ростова металлолома в Турцию, зерна в Грецию. Вывоз в северном направлении зерновых и масличных культур и продуктов их переработки. Основные грузы по Кубани – стройматериалы

* Составлена авторами по [4, 5].

Среди всех перевозок внутри страны, как грузовых, так и пассажирских, более половины приходится на Волго-Камский бассейн. При этом учитываются связи канала им. Москвы и Волго-Донского канал с Дном, а также через Волго-Балтийский путь с Балтийским морем. Волго-Камский бассейн является также самым загруженным транзитными, местными пригородными и внутригородскими линиями перевозки пассажиров среди всех речных бассейнов страны [4].

Западно-Сибирский бассейн занимает второе место после Волго-Камского по объему выполняемой работы на речном транспорте страны. Его отличительными особенностями являются существенная удаленность от морских и океанических путей с круглогодичной навигацией, а также высокая зависимость от погодных условий не только в зимний период, но и в летний (аномальная жара привела в 2018 г. к падению уровня воды до критического, большая часть судов не могла осуществлять навигацию).

Обь и Иртыш как важнейшие речные магистрали связывают южные и центральные районы Западной Сибири с районами Крайнего Севера. Направление и характер перевозок грузов в основном связаны с лесными ресурсами, представленными в регионе, а также освоением нефтяных и газовых месторождений. Речные пути являются важнейшим фактором, улучшающим транспортно-географическое положение региона и уровень взаимодействия с системой международных транспортных коридоров через Северный морской путь.

Реки Европейского Севера (Северная Двина с притоками Вычегда и Сухона, Мезень, Печора, Свирь, Нева, Беломоро-Балтийский канал) находятся на третьем месте по объему перевозок страны. Из пассажирских перевозок здесь можно выделить направления из Санкт-Петербурга в Москву, в Карелию (Валаам, Кижы), Архангельскую область (Соловецкие острова) и на Верхнюю Волгу.

Речные системы Восточной Сибири и Дальнего Востока с крупнейшими артериями, такими как реки Енисей, Ангара, Лена, а также оз. Байкал, играют важную роль в жизнеобеспечении региона, несмотря на ограниченный период навигации. В этом регионе практически отсутствует возможность использовать другие виды транспорта для перевозки грузов и людей между отдаленными районами. Енисей связывает южные районы Восточной Сибири с Заполярьем и Северным морским путем. Лена – самая крупная судоходная река России. Она протекает по Иркутской области и Якутии. На Дальнем Востоке водную транспортную систему образуют Амур и его притоки Зея и Бурея. Стратегическое развитие Восточно-Сибир-

ского бассейна – это обеспечение внешнеэкономических связей с Азиатско-Тихоокеанским регионом и интеграция существующих путей в международные транспортные коридоры [6].

Азово-Донецкий речной бассейн связывает крупные промышленные центры короткими и экономически выгодными транспортными маршрутами, обеспечивает внешнеэкономическое сотрудничество со странами Черноморского, Прикаспийского и Средиземноморского бассейнов.

Среди субъектов Федерации по протяженности внутренних водных путей лидируют Республика Саха (Якутия) – 16 522 км, Тюменская область – 11 834 км и Иркутская область – 8 069 км [7]. Также наибольшее стратегическое значение имеют Волго-Балтийский водный путь, Волго-Донской и Беломорско-Балтийский каналы и др.

С открытием и внедрением новых технологий и новых видов транспортных средств постепенно снизилось активное использование внутреннего водного транспорта. Авиаационный и трубопроводный транспорт во многом заменил речной для транспортировки грузов и пассажиров в труднодоступные регионы России. Экономический кризис 1990-х гг. способствовал сокращению перевозки грузов речным транспортом более чем в пять раз. Только начиная с 2000-х гг. объем добычи полезных ископаемых в отдаленных экономических районах РФ начал увеличиваться, что вернуло позиции речному транспорту. Сегодня перед дальнейшим функционированием отечественного внутреннего транспорта стоит много задач, которые должны изменить негативные тенденции в данном виде транспорта. Ввиду этого представляется важным и актуальным исследование внутреннего транспорта, раскрытие причин его отставания и неконкурентоспособности на современном этапе.

Для развития любой отрасли экономики необходимы инвестиции. Если проанализировать динамику инвестиций по видам транспорта в России за период с 2005 по 2015 г., можно сразу отметить значительный их рост в 2010 г. и особенно в 2011-м (табл. 2). После кризисных 2008–2009 гг. с 2010 г. наблюдалась положительная динамика. Это связано с принятыми мерами правительства по улучшению ситуации в экономике страны, в том числе и с реализацией проектов в транспортной сфере. Одним из таких проектов был газопровод «Северный поток». В 2011 г. «Газпром» совместно со своими иностранными партнерами ввел в эксплуатацию первую нитку газопровода.

Также большие капиталовложения поступали на развитие железнодорожного транспорта. В этот период и по водному внутреннему транс-

порту наблюдался резкий подъем. В 2011 г. осуществилась реконструкция некоторых участков Енисейского бассейна, на Волго-Донском судоходном канале и канале Москвы. К 2015 г. показатели значительно сокращаются по сравнению с 2011 г. Основной причиной этого является кризис 2014 г., который отразился на состоянии практически всех отраслей экономики нашей страны. Резко уменьшилось количество иностранных инвестиций, что привело к сокращению бюджета и государственных инвестиций. При этом стоит отметить значительное отставание по количеству инвестиций в развитие внутреннего водного транспорта России за весь рассматриваемый период от других видов транспорта, где заметными лидерами являются железнодорожный и трубопроводный транспорт.

Таблица 2

Инвестиции в основной капитал по основным видам деятельности транспорта (в фактически действующих ценах), млрд р.* / Investments in fixed assets by main types of transport activities (in actual prices), milliard rubles

Направление инвестиций	2005	2010	2011	2015
Железнодорожный транспорт	141,4	364,6	393,0	339,3
Автомобильный пассажирский транспорт, подчиняющийся расписанию (автобусный)	5,7	12,3	18,9	11,5
Городской электрический	27,2	56,4	80,5	82,1
Автомобильный грузовой транспорт	3,9	10,5	19,3	20,6
Транспортирование по трубопроводам	220,4	624,5	951,3	715,4
Морской транспорт	9,8	4,6	13,3	3,3
Внутренний водный транспорт	2,6	2,7	12,3	2,7
Воздушный и космический транспорт	9,4	18,9	17,8	57,6
Всего по всем видам транспорта	596,1	1471,0	2038,9	1862,5

* Составлена авторами по [8].

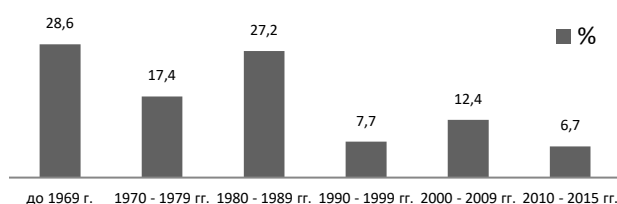
Такие низкие показатели объясняются непривлекательностью и неконкурентоспособностью речного вида транспорта относительно других. Несмотря на его определенные преимущества (наличие естественных путей, не требующих существенных капиталовложений по эксплуатации, низкая себестоимость перевозимых грузов даже в отдаленные населенные и промышленные пункты и др.), их оказалось недостаточно для обеспечения объема грузооборота. Основным конкурентом внутреннего водного транспорта с точки зрения выполнения тех же функций (доставка массовых грузов на дальние и средние расстояния) является железнодорожный. Этому способствовало несколько причин.

В судоходстве до конца 1990-х гг. преобладали в основном крупные парохозяйства. Активные процессы приватизации во второй половине 90-х гг. затронули и системы речного транспорта. Стремительными темпами единые крупные парохозяйства страны были разделены на множество судоходных компаний. Результатом стало не только неравномерное (как по количеству, так и по эксплуатационным характеристикам) распределение судов между компаниями, но и размывание ответственности, отсутствие интереса к развитию системы флота и значительное недофинансирование внутреннего водного транспорта. В этот же период происходит значительный скачок в развитии частных авиационных компаний и железнодорожного транспорта за счет реорганизации его структуры. В итоге за 20 лет проводимых реформ в транспортной отрасли общий объем речных грузоперевозок только в Западной Сибири снизился в 7–10 раз, а в некоторых районах почти прекратились поставки отдельных категорий грузов [9].

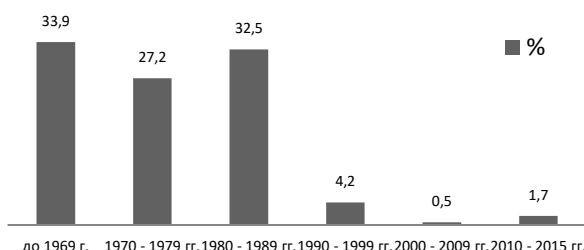
Одним из отрицательных показателей является старение эксплуатируемого флота. Независимо от региона страны, все судоходные компании констатируют, что речные суда выработали свой ресурс, а новых судов в России сейчас практически не строят. Средний возраст речных и озерных судов в нашей стране составляет приблизительно 30 лет, что превышает на 5–10 лет рекомендуемый срок безопасной эксплуатации (рис. 1).

Все это говорит о том, что Россия стремительно теряет свой речной флот. С 2000 по 2015 г. количество речных и озерных судов сократилось примерно в 2 раза (рис. 2). Результатом этого служит уменьшение грузовых и пассажирских перевозок внутренним водным транспортом (рис. 3).

Пассажирские и грузопассажирские



Сухогрузные грузовые суда



Наливные грузовые суда

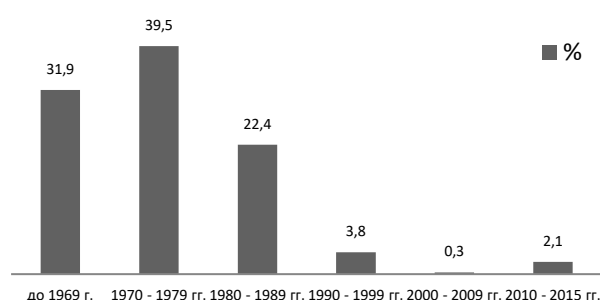


Рис. 1. Возрастная структура речных и озерных судов, % к итогу 2015 г. (составлен авторами по [8])
/ Fig. 1. Age structure of river and lake vessels, % of the end 2015



Рис. 2. Наличие речных и озерных судов на конец года (составлен авторами по [8]) / Fig. 2. Presence of river and lake vessels at the end of the year

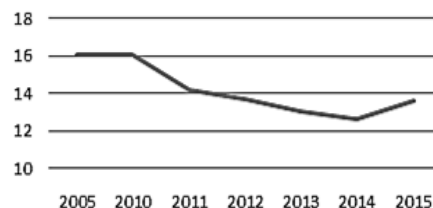


Рис. 3. Перевозки пассажиров, млн чел. (составлен авторами по [8]) / Fig. 3. Transportation of passengers, mln people

В настоящее время остро стоит вопрос о необходимости принятия оперативных мер для стимулирования перевозок по рекам. Самостоятельно вопрос покупки новых единиц флота без поддержки на государственном уровне судоходные компании решить не могут. Износ транспортных средств приводит к возникновению ряда экономических, экологических и социальных проблем. Сокращение персонала, халатное отношение к работе, несвоевременные и некачественные проверки эксплуатационных характеристик судов могут являться причинами крупных катастроф, самыми значительными из которых стали затонувший на Волге речной теплоход «Булгария» (2011 г.), «Сергей Абрамов» (2011 г.) и гибель детей на Сямозере (2016 г.) [10].

Проблемами отечественного внутреннего водного транспорта также являются недофинансирование отрасли; дефицит квалифицированных специалистов разного уровня; неразвитая или устаревшая портовая инфраструктура пассажирских перевозок; несоответствие качества и стоимости предоставляемых услуг, в том числе недостаточное количество единиц комфортабельного круизного флота [11]. При этом стоит отметить, что недостаточное обновление флота сдерживается высокой себестоимостью производства; длительным сроком окупаемости проекта по строительству пассажирского судна; ограниченным периодом использования круизных судов (навигация длится до пяти месяцев в центральных бассейнах); ограниченными возможностями в формировании новых направлений водного туризма в России [8].

Несмотря на все вышеперечисленное, внутренний водный транспорт будет использоваться в нашей стране, так как есть ряд сфер, где он является незаменимым. К примеру, водный транспорт остается актуальным для использования его в труднодоступных регионах нашей страны (некоторых районах Сибири и Дальнего Востока). Железнодорожное полотно проложить возможно далеко не везде, а авиаперевозки финансово очень материально затратны для массовой транспортировки грузов (полезных ископаемых и пр.) [12].

Для изменения и улучшения ситуации в секторе отечественного внутреннего водного транспорта, на наш взгляд, можно и необходимо предпринять следующие меры:

- введение доступных тарифов на пассажироперевозки;
- модернизация портовой инфраструктуры внутренних водных путей;
- расширение спектра предоставляемых услуг и усиление контроля их качества;
- обновление флота благодаря не только модернизации судов, но и вводу в эксплуатацию новых, приобретенных за счет субсидирования отрасли;
- повышение безопасности транспортных услуг [13].

Несмотря на обозначенные проблемы, безусловным остается факт необходимости инновационного развития отрасли, включая техническое переоснащение и внедрение современных систем управления и контроля, а также проведение инженерно-гидрологических работ по улучшению речной навигации. Формирование российской государственности по берегам великих рек, строительство речных систем и портов, как в период Российской империи и в период СССР, постепенное преодоление кризиса экономики в целом и, значит, формирование запроса на перевозку грузов, перегруженность автомобильных магистралей, безальтернативность транспорта для ряда регионов подчеркивают значимость развития отрасли на государственном уровне.

Литература

1. Лебедев А.В. История транспорта России в XIX – начале XX века. Ярославль: ЯрГУ, 2011. 84 с.
2. Астахова А. Сели на мель // Совершенно секретно. 2016. № 5/382.
3. Социально-экономические аспекты организации высокоэффективной системы пассажирских перевозок на внутреннем водном транспорте // Онлайн-библиотека. URL: biblio.fond.ru/view.aspx?id=667354 (дата обращения: 13.02.2018).
4. Морские вести России. Речной флот. URL: http://www.morvesti.ru/-SECTION_ID=1682 (дата обращения: 20.02.2018).
5. Отправление грузов водным транспортом. URL: http://www.gks.ru/bgd/regl/b13_01/IssWWW.exe/Stg/d12/2-1-7.htm (дата обращения: 30.01.2018).
6. Варакса А.М. Комплексный подход к изучению национальной экономики // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. 2015. № 1. С. 6–9.

7. Рынок водных перевозок // RosInvest. Com. URL: rosinvest.com/acolumn/blog/gruzoperevozki/262.html (дата обращения: 13.02.2018).

8. Транспорт и связь в России, 2016. URL: http://www.gks.ru/free_doc/doc_2016/transp-sv16.pdf (дата обращения: 10.02.2018).

9. Кречетова К.А. Транспортная система Западной Сибири в условиях перехода к рынку // Сиб. науч. вестн. 2012. № 16. С. 403–407.

10. О Стратегии развития внутреннего водного транспорта Российской Федерации на период до 2030 года: Распоряжение Правительства РФ от 29.02.2016 г. № 327-р. URL: <https://rosinvest.com/acolumn/blog/gruzoperevozki/262.html> (дата обращения: 20.02.2018).

11. Селиванова М. Речной флот России тонет. URL: <https://ria.ru/analytics/20110712/400689448.html> (дата обращения: 10.02.2018).

12. Григорьев Е.А., Варакса А.М. Учет внутрирейтинговой оценки при выборе оптимального типа состава // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. 2015. № 4. С. 58–60.

13. О федеральной целевой программе «Развитие транспортной системы России (2010–2020 годы)»: Постановление Правительства РФ от 5 декабря 2001 г. № 848. URL: http://www.gks.ru/free_doc/doc_2016/transp-sv16.pdf (дата обращения: 10.02.2018).

References

1. Lebedev A.V. *Istoriya transporta Rossii v XIX – nachale XX veka* [The history of transport in Russia in the 19th - early 20th century]. Yaroslavl: YarGU, 2011, 84 p.
2. Astakhova A. Seli na mel' [We ran aground]. *Sovershenno sekretno*. 2016, No. 5/382.
3. Sotsial'no-ekonomicheskie aspekty organizatsii vysokoeffektivnoi sistemy passazhirskikh perevozok na vnutrennem vodnom transporte [Socio-economic aspects of the organization of a highly efficient system of passenger transport in inland water transport]. *Onlain-biblioteka*. Available at: biblio.fond.ru/view.aspx?id=667354 (accessed 13.02.2018).
4. *Morskie vesti Rossii. Rechnoi flot* [Sea news of Russia. River fleet]. Available at: http://www.morvesti.ru/-SECTION_ID=1682 (accessed 20.02.2018).
5. *Otpравlenie gruzov vodnym transportom* [The shipment of the cargoes by water transport]. Available at: http://www.gks.ru/bgd/regl/b13_01/IssWWW.exe/Stg/d12/2-1-7.htm (accessed 30.01.2018).
6. Varaksa A.M. Kompleksnyi podkhod k izucheniyu natsional'noi ekonomiki [An integrated approach to the study of the national economy]. *Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka*. 2015, No. 1, pp. 6–9.
7. Rynok vodnykh perevozok [Water transportation market]. *RosInvest.com*. Available at: rosinvest.com/acolumn/blog/gruzoperevozki/262.html (дата обращения: 13.02.2018).

vest.com/acolumn/blog/gruzoperevozki/262.html (accessed 13.02.2018).

8. *Transport i svyaz' v Rossii, 2016* [Transport and communications in Russia, 2016]. Available at: http://www.gks.ru/free_doc/doc_2016/transp-sv16.pdf (accessed 10.02.2018).

9. Krechetova K.A. Transportnaya sistema Zapadnoi Sibiri v usloviyakh perekhoda k rynku [The transport system of Western Siberia in the conditions of transition to the market]. *Sib. nauch. vestn.* 2012, No. 16, pp. 403-407.

10. *O Strategii razvitiya vnutrennego vodnogo transporta Rossiiskoi Federatsii na period do 2030 goda* [About Strategy of development of inland water transport of the Russian Federation for the period till 2030]. Order of the Government of the Russian Federation of 29.02.2016 No. 327-p. Available at:

<https://rosinvest.com/acolumn/blog/gruzoperevozki/262.html> (accessed 20.02.2018).

11. Selivanova M. *Rechnoi flot Rossii tonet* [Russian River fleet sinks]. Available at: <https://ria.ru/analitics/20110712/400689448.html> (accessed 10.02.2018).

12. Grigor'ev E.A., Varaksa A.M. Uchet vnutrinit-ingovoi otsenki pri vybore optimal'nogo tipa sostava [Accounting intra-rating assessment when selecting the appropriate type of structure]. *Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka.* 2015, No. 4, pp. 58-60.

13. *O federal'noi tselevoi programme «Razvitie transportnoi sistemy Rossii (2010–2020 gody)»* [About the Federal target program “Development of transport system of Russia (2010–2020)”]. Order of the Government of the Russian Federation of December 5, 2001 No. 848. Available at: [//www.gks.ru/free_doc/doc_2016/transp-sv16.pdf](http://www.gks.ru/free_doc/doc_2016/transp-sv16.pdf) (accessed 10.02.2018).

УДК 504.054

DOI 10.23683/0321-3005-2018-4-72-76

ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ КАБАРДИНО-БАЛКАРСКОЙ РЕСПУБЛИКИ

© 2018 г. О.О. Дахова¹, Б.М. Хучунаев², З.А. Мустафаева¹, Г.В. Куповых³, И.С. Даов²

¹Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова, Нальчик, Россия,

²Высокогорный геофизический институт, Нальчик, Россия,

³Южный федеральный университет, Таганрог, Россия

ECOLOGICAL PROBLEMS OF KABARDINO-BALKAR REPUBLIC

O.O. Dakhova¹, B.M. Khuchunaev², Z.A. Mustafaeva¹, G.V. Kupovykh³, I.S. Daov²

¹Berberov Kabardino-Balkarian State University, Nalchik, Russia,

²High-Mountain Geophysical Institute, Nalchik, Russia,

³Southern Federal University, Taganrog, Russia

Дахова Оксана Олеговна – кандидат географических наук, доцент, кафедра общей биологии, биоразнообразия и геоэкологии, Институт химии и биологии, Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова, ул. Чернышевского, 173, г. Нальчик, КБР, 360004, Россия, e-mail: dakhva@rambler.ru

Oksana O. Dakhova - Candidate of Geography, Associate Professor, Department of Biology, Biodiversity and Geoecology, Institute of Chemistry and Biology, Berbekov Kabardino-Balkarian State University, Chernyshevskogo St., 173, Nalchik, KBR, 360004, Russia, e-mail: dakhva@rambler.ru

Хучунаев Бузигит Муссаевич – доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник, заведующий лабораторией микрофизики облаков, Высокогорный геофизический институт, пр. Ленина, 2, г. Нальчик, КБР, Россия, 360030, e-mail: buzigit@mail.ru

Buzigit M. Khuchunaev - Doctor of Physics and Mathematics, Senior Researcher, Head of Laboratory of Physics of Clouds, High-Mountain Geophysical Institute, Lenina Ave, 2, Nalchik, KBR, 360030, Russia, e-mail: buzigit@mail.ru

Мустафаева Земфира Аммаевна – доктор экономических наук, профессор, кафедра менеджмента, Институт права, экономики и финансов, Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова, ул. Чернышевского, 173, г. Нальчик, КБР, Россия, 360004, e-mail: 18zema03@mail.ru

Zemfira A. Mustafaeva - Doctor of Economics, Professor, Department of Management, Institute of the Right, Economics and Finance, Berbekov Kabardino-Balkarian State University, Chernyshevskogo St., 173, Nalchik, KBR, 360004, Russia, e-mail: 18zema03@mail.ru

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, 347928, Россия, e-mail: kupovykh@sfnu.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, 347928, Russia, e-mail: kupovykh@sfnu.ru

Даов Инал Султанович – инженер, лаборатория микрофизики облаков, Высокогорный геофизический институт, пр. Ленина, 2, г. Нальчик, КБР, 360030, Россия, e-mail: inzhener_07@inbox.ru

Inal S. Daov - Engineer, Laboratory of Physics of Clouds, High-Mountain Geophysical Institute, Lenina Ave, 2, Nalchik, KBR, 360030, Russia, e-mail: inzhener_07@inbox.ru

Исследовано комплексное экологическое состояние окружающей среды на территории Кабардино-Балкарской Республики. Рассчитан суммарный выброс загрязняющих веществ в атмосферу за год от стационарных источников загрязнения и от автомобильного транспорта, последний из них носит преобладающий характер. Приведены данные о динамике изменения сброса загрязненных сточных вод в поверхностные водные объекты на территории республики за 5 лет. Наиболее высокое загрязнение имеет река Баксан. Методом проб выявлены распределения тяжелых металлов в почвенном покрове различных районов на территории КБР. Установлено, что основными загрязнителями почвенного покрова являются кислорастворимые металлы, такие как свинец, цинк, кадмий и др. Максимальный уровень загрязнений обнаружен в черте города Нальчика и на близлежащих территориях, а также вдоль феде-

ральной трассы 29 от сельского поселения Залукокоаже до сельского поселения Урух. По данным социально-гигиенического мониторинга, с учетом загрязнения воздушного бассейна, почвенного покрова, а также содержания химических элементов в питьевой воде определен комплексный показатель антропогенной нагрузки территории, проведено анкетирование жителей республики на предмет основных экологических проблем.

Ключевые слова: антропогенная нагрузка, водные объекты, загрязняющие вещества, комплексный показатель, промышленные выбросы, устойчивое развитие.

The complex ecological state of the environment in the territory of Kabardino-Balkar Republic is investigated. The total emission of pollutants into the atmosphere for the year from stationary sources of pollution and from road transport is calculated, the latter being the predominant. Data on the dynamics of changes in the discharge of contaminated wastewater into surface water bodies on the territory of the Republic for 5 years. The greatest pollution is the Baksan river. The distribution of heavy metals in the soil cover of different areas on the territory of the Republic is determined. The main pollutants of the soil cover are non-ferrous metals, such as lead, zinc, cadmium, etc. Maximum level of contaminants detected in the city of Nalchik and the surrounding areas, and also along Federal route 29 from the rural settlement of Zalukokoazhe to the rural settlement of Urukh. According to the data of social and hygienic monitoring, taking into account the pollution of the air basin, soil cover, as well as the content of chemical elements in drinking water, a comprehensive indicator of the anthropogenic load of the territory was determined, a survey of the inhabitants of the Republic on the main environmental problems was conducted.

Keywords: anthropogenic load, water objects, pollutants, complex indicator, industrial emissions, sustainable development.

Введение

В отдельных районах Земли конфликт между человеком и природой настолько обострился, что достиг уровня экологического кризиса. При высоких объемах промышленного и сельского производства увеличивается угроза загрязнения окружающей природной среды. Под влиянием антропогенного воздействия на природную среду образуются локальные очаги сильного загрязнения атмосферного воздуха, водных объектов, почвенного покрова, а также растительности. Масштабы загрязнений зависят не только от объемов выброса, но и от их физических и химических свойств, режимов выбросов, а также климатических, геохимических и гидрологических условий.

Сегодня существует угроза нарушения экологического равновесия. С каждым годом увеличиваются материальные потребности человечества, но природная среда не успевает восполнять потери.

Мы можем считать, что регион находится в состоянии устойчивого развития, только в том случае, когда элементы социально-экономического, природного, политического, производственного характера находятся в тесной взаимосвязи. Регион также можно считать конкурентоспособным, если он длительное время сохраняет присущие черты и развивается [1, 2].

Обеспечение благоприятных условий для жизни населения можно считать результатом устойчивого развития. Для достижения этого необходимо максимально уменьшить вредные выбросы в окружа-

ющую среду путем рационального использования природных ресурсов [3].

Кабардино-Балкарская Республика (КБР) богата красивыми природными ландшафтами, а также удивительной флорой и фауной.

Воздушный бассейн является жизненно важным компонентом окружающей природной среды, процесс дыхания присущ всем живым организмам.

В атмосферу выбрасываются загрязняющие вещества от стационарных и передвижных источников. Передвижные источники в КБР вносят до 98 % от всей массы выбросов (разных источников) вредных веществ в окружающую среду [4–8].

В Кабардино-Балкарии зарегистрировано больше 250 тыс. единиц автомобильного транспорта, из них грузовой автотранспорт и автобусы составляют 20 %, легковой автомобильный транспорт – 80.

На территории КБР суммарный выброс загрязняющих веществ составляет около 80,0 тыс. т в год:

- от стационарных источников загрязнения – 3,949 тыс. т;

- от автомобильного транспорта – 76,051 тыс. т.

По результатам лабораторного мониторинга атмосферного воздуха в зоне влияния ОАО «Гидрометаллург», в 2016 г. отмечается снижение проб, превышающих ПДК по сероводороду, хлористому водороду, аммиаку.

Внутренние воды республики являются наиболее уязвимым компонентом природной среды. Склады хранения ядохимикатов и удобрений, мусорные свалки, сточные воды промышленных предприятий являются основными источниками загрязнения вод.

Загрязняющие (вредные) вещества при попадании в природные водоемы приводят к качественным изменениям воды. Это может вызвать изменение цвета воды, появление запаха и плавающих веществ на поверхности воды, а также осадка на дне водоема [9–11].

Наиболее высокое загрязнение имеет река Баксан, где для определения качества воды установлены 12 створов наблюдения. Органолептические показатели воды и физические свойства являются удовлетворительными. В зависимости от времени года и погодных условий они меняются незначительно.

Динамика изменения сброса загрязненных сточных вод в поверхностные водные объекты на территории КБР за 5 лет приведена на рис. 1.

В ходе анализа состояния окружающей природной среды, сельскохозяйственного производства оценка изменения качественных показателей угодий показывает, что основные тенденции уменьшения плодородия почвенного покрова и изменения (ухудшения) общей экологической ситуации в агропромышленном комплексе являются актуальными.

Для определения распределения тяжелых металлов в почвенном покрове были отобраны пробы в следующих направлениях городов: Терек, Майский, Прохладный, Чегем, Баксан, а также сельских населенных пунктов: Залукокоаже, Аргудан, Урух, Ново-Ивановка, Куба-Таба.

Было определено, что основными загрязняющими веществами являются свинец, цинк, кадмий, медь. Наибольшее количество свинца, цинка и кадмия обнаружено в черте города Нальчика (в радиусе 7 км). Область распространения загрязнения почвенного покрова данными металлами вытянута вдоль федеральной трассы 29 от сельского поселения Залукокоаже до сельского поселения Урух.

При распределении территории КБР, по данным социально-гигиенического мониторинга, с учетом загрязнения воздушного бассейна, почвенного покрова, а также содержания химических элементов в питьевой воде получили следующий показатель антропогенной нагрузки (таблица).

Наиболее высокой антропогенная нагрузка остается в г. Нальчике. Основными загрязнителями выступают ОАО «Гидрометаллург» и автотранспорт. Второе ранговое место Зольского района обусловлено нитратным загрязнением питьевой воды централизованного водоснабжения, концентрация содержания колеблется от 17,5 до 54,75 мг/л. На

Объем сточных вод, млн. м³

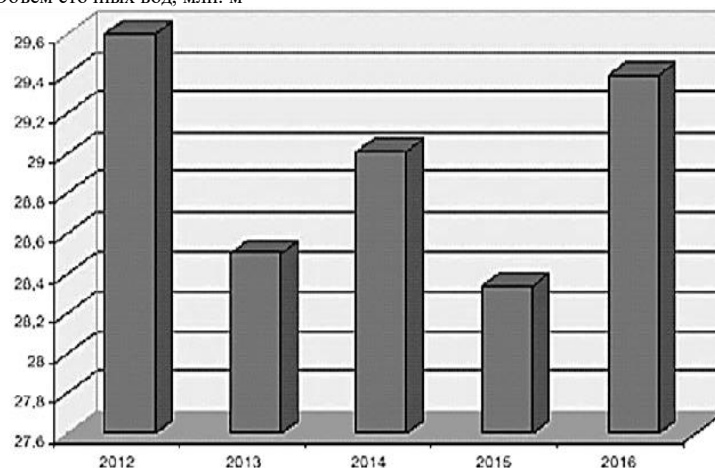


Рис. 1. Динамика сброса загрязненных сточных вод в поверхностные водные объекты на территории республики за 5 лет / Fig. 1. Dynamics of discharge of contaminated sewage into surface water bodies on the territory of the Republic for 5 years

третьем месте находится г. Прохладный, завод по производству медной катанки, который является источником загрязнения воздушного бассейна оксидами меди, серы и свинца [12–16].

Таким образом, высокое использование природных ресурсов приводит к необходимости изменения природоохранной деятельности – к более рациональному использованию природных богатств.

Показатель комплексной антропогенной нагрузки, 2016 / Indicator of complex anthropogenic load, 2016

Территория	Показатель комплексной антропогенной нагрузки	Ранговое место
Баксан	0,57	7
Прохладный	0,70	3
Нальчик	1,12	1
Баксанский район	0,62	6
Зольский район	0,97	2
Лескенский район	0,51	12
Майский район	0,56	9
Прохладненский район	0,66	4
Терский район	0,55	10
Урванский район	0,61	8
Чегемский район	0,63	5
Черекский район	0,18	13
Эльбрусский район	0,52	11

Для определения потребительских предпочтений жителей региона в решении экологических проблем был применен метод анкетирования.

В анкетировании участвовали жители КБР со следующими социально-демографическими характеристиками:

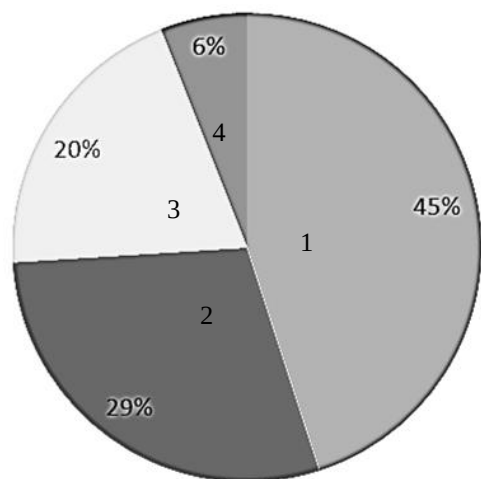
1) 52 % респондентов (жителей) составили мужчины и 48 % – женщины;

2) 61 % опрошенных респондентов составили жители в возрасте от 18 до 23 лет, 24 % респондентов – 24–35 лет, 12 % – от 36 до 45 лет и 3 % – старше 45 лет;

3) жители с незаконченным высшим образованием, участвовавшие в анкетировании, составили 63 %, с высшим образованием – 37.

Опрос показал, что 92 % опрошенных респондентов считают, что в КБР присутствуют проблемы экологического характера, 8 % опрошенных жителей считают, что их нет.

Отметим также, что 45 % опрошенных респондентов считают, что доминирующей проблемой экологического характера является загрязнение воздушного бассейна, 29 % – что это загрязнение водных объектов (питьевой, в реке), 20 % респондентов называют в качестве преобладающей проблемы твердые бытовые отходы. 6 % жителей выбрали графу «другое» (рис. 2).



1 – загрязнение атмосферы; 2 – загрязнение воды;
3 – бытовые отходы; 4 – другое

Рис. 2. Основные экологические проблемы КБР
/ Fig. 2. Main environmental problems of the KBR

Таким образом, в ходе анкетирования было выявлено, что значительная часть жителей КБР владеют информацией о наличии проблем экологического характера, но считают, что предопределять их должны местные органы власти или существующие природоохранные организации, что свидетельствует о низкой экологической культуре.

Литература

1. Махотлова М.Ш., Мирзоева Н.М., Накова Л.В. Мониторинг земель и землеустройство – мероприятия

по изучению состояния земель // Моск. экон. журн. 2016. Вып. 2. С. 15–21.

2. Коробко В.И. Экологический менеджмент. М.: Юнити-Дана, 2012. 303 с.

3. Дергунова М.И., Говорова М.С., Мельникова А.В., Мельникова В.Л. «Зеленый» маркетинг и его особенности // Актуальные вопросы экономики и управления : материалы III Междунар. науч. конф. М.: Буки-Веди, 2015. С. 72–74.

4. Дахова О.О. Некоторые результаты исследования загрязнения г. Нальчика автотранспортом // Экология человека: концепция факторов риска, экологической безопасности и управления рисками : сб. ст. V науч.-практ. конф. Пенза: РИО ПГСХА, 2008. С. 39–42.

5. Дахова О.О. Загрязнение воздушного бассейна курортных городов Юга России (на примере г. Нальчика) // Курортно-рекреационный комплекс в системе регионального развития: инновационные подходы. 2011. № 1. С. 115–119.

6. Дахова О.О. Оценка состояния городских антропогенных ландшафтов // Изв. КБНЦ РАН. 2012. № 6-1 (50). С. 77–81.

7. Дахова О.О., Малкарова Р.Р., Татаренко Н.В. Качество воды в водозаборе «Головной» г. Нальчика // Изв. КБНЦ РАН. 2017. № 1 (75). С. 59–64.

8. Дахова О.О., Хучунаев Б.М., Куповых Г.В. Применение расчетного мониторинга атмосферного воздуха городских экосистем // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2016. № 3. С. 76–79.

9. Дахова О.О., Хучунаев Б.М., Куповых Г.В. Химическое и физическое загрязнение городских экосистем автотранспортом // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2016. № 4. С. 67–72.

10. Дахова О.О., Сабанова Р.К., Хагажеева З.Н. Экологические нагрузки на рекреационные комплексы города-курорта Нальчик // Успехи современной науки. 2017. № 4, т. 9. С. 255–260.

11. Дахова О.О. Мониторинг атмосферного воздуха городской среды // Безопасность природопользования в условиях устойчивого развития : материалы Междунар. науч.-практ. конф. Иркутск: ИГУ, 2017. С. 94–101.

12. Лукина А.В. Теоретические аспекты экологического маркетинга // Вестн. Воронежского гос. аграр. ун-та. 2014. № 3 (42). С. 238–241.

13. Ядов В.А. Социологическое исследование – методология, программа, методы. М.: Самарский ун-т., 2009. 388 с.

14. Резник Г.А., Малышев А.А. Механизмы экономической мотивации предприятий в условиях устойчивости эколого-экономической системы // Вестн. ПГТУ. 2012. № 2. С. 63–68.

15. Малышев А.А. Востребованность в экопродукции населением Пензенской области // Современные научные исследования и инновации. 2015. № 4, ч. 3. URL: <http://web.snauka.ru/issues/2015/04/52202> (дата обращения: 11.01.2018).

16. Мальшев А.А., Зубрилина Е.А. Разработка рекомендаций по развитию эколого-социального маркетинга на примере Пензенской области // Маркетинг в России и за рубежом. 2013. № 2. С. 87–96.

References

1. Makhotlova M.Sh., Mirzoeva N.M., Nakova L.V. Monitoring zemel' i zemleustroistvo – meropriyatiya po izucheniyu sostoyaniya zemel' [Monitoring of lands and land development – training on land]. *Mosk. ekon. zhurn.* 2016, Iss. 2, pp. 15-21.

2. Korobko V.I. *Ekologicheskii menedzhment* [Environmental management]. Moscow: Yuniti-Dana, 2012, 303 p.

3. Dergunova M.I., Govorova M.S., Mel'nikova A.V., Mel'nikova V.L. [“Green” marketing and its features]. *Aktual'nye voprosy ekonomiki i upravleniya* [Topical issues of economics and management]. Proceedings of the III International Scientific Conference. Moscow: Buki-Vedi, 2015, pp. 72-74.

4. Dakhova O.O. [Some results of the pollution study of the city of Nalchik road]. *Ekologiya cheloveka: kontseptsiya faktorov riska, ekologicheskoi bezopasnosti i upravleniya riskami* [Human ecology: the concept of risk factors, environmental safety and risk management]. Compilation of articles V Scientific-Practical Conference. Penza: RIO PGSKhA, 2008, pp. 39-42.

5. Dakhova O.O. Zagryaznenie vozdušnogo basseina kurortnykh gorodov Yuga Rossii (na primere g. Nal'chika) [Air pollution of the resort cities of the South of Russia (on the example of Nalchik)]. *Kurortno-rekreatsionnyi kompleks v sisteme regional'nogo razvitiya: innovatsionnye podkhody.* 2011, No. 1, pp. 115-119.

6. Dakhova O.O. Otsenka sostoyaniya gorodskikh antropogennykh landshaftov [Assessment of urban anthropogenic landscapes]. *Izv. KBNTs RAN.* 2012, No. 6 (50), pp. 77-81.

7. Dakhova O.O., Malkarova R.R., Tatarenko N.V. Kachestvo vody v vodozabore «Golovnoi» g. Nal'chika [The quality of water in water intake “Head” of the city of Nalchik]. *Izv. KBNTs RAN.* 2017, No. 1 (75), pp. 59-64.

8. Dakhova O.O., Khuchunaev B.M., Kupovykh G.V. Primenenie raschetnogo monitoringa atmosfernogo vozdukha gorodskikh ekosistem [Application of the esti-

mated ambient air monitoring of urban ecosystems]. *Izv. vuzov. Sev.-Kavk. region. Estestv. nauki.* 2016, No. 3, pp. 76-79.

9. Dakhova O.O., Khuchunaev B.M., Kupovykh G.V. Khimicheskoe i fizicheskoe zagryaznenie gorodskikh ekosistem avtotransportom [Chemical and physical pollution of urban ecosystems transport]. *Izv. vuzov. Sev.-Kavk. region. Estestv. nauki.* 2016, No. 4, pp. 67-72.

10. Dakhova O.O., Sabanova R.K., Khagazheeva Z.N. Ekologicheskie nagruzki na rekreatsionnye komplekсы goroda-kurorta Nal'chik [Environmental load on the recreational facilities of the resort city of Nalchik]. *Uspekhi sovremennoi nauki.* 2017, No. 4, vol. 9, pp. 255-260.

11. Dakhova O.O. [Monitoring of atmospheric air of city environment]. *Bezopasnost' prirodoopol'zovaniya v usloviyakh ustoichivogo razvitiya* [Safety management in the context of sustainable development]. Materials of International Scientific-Practical Conference. Irkutsk: IGU, 2017, pp. 94-101.

12. Lukina A.V. Teoreticheskie aspekty ekologicheskogo marketinga [Theoretical aspects of environmental marketing]. *Vestn. Voronezhskogo gos. agrar. un-ta.* 2014, No. 3 (42), pp. 238-241.

13. Yadov V.A. *Sotsiologicheskoe issledovanie – metodologiya, programma, metody* [Sociological research - methodology, program, methods]. Samara: Samarskii un-t, 2009, 388 p.

14. Reznik G.A., Malyshev A.A. Mekhanizmy ekonomicheskoi motivatsii predpriyatii v usloviyakh ustoichivosti ekologo-ekonomicheskoi sistemy [Mechanisms of economic motivation of enterprises in the conditions of sustainability of the ecological and economic system]. *Vestn. PGTU.* 2012, No. 2, pp. 63-68.

15. Malyshev A.A. Vostrebovannost' v ekoproduktsii naseleniem Penzenskoi oblasti [The demand for health by the population of the Penza region]. *Sovremennye nauchnye issledovaniya i innovatsii.* 2015, No. 4, ch. 3. Available at: <http://web.snauka.ru/issues/2015/04/52202> (accessed 11.01.2018).

16. Malyshev A.A., Zubrilina E.A. Razrabotka rekomendatsii po razvitiyu ekologo-sotsial'nogo marketinga na primere Penzenskoi oblasti [Development of recommendations for the development of the environmental-social marketing by the example of Penza region]. *Marketing v Rossii i za rubezhom.* 2013, No. 2, pp. 87-96.

УДК 550.461

DOI 10.23683/0321-3005-2018-4-77-85

ПОТОКИ ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ В СОСТАВЕ ОСАЖДАЮЩЕГОСЯ ВЗВЕШЕННОГО ВЕЩЕСТВА НА ШЕЛЬФЕ ЧЁРНОГО МОРЯ (ПО ДАННЫМ СЕДИМЕНТАЦИОННЫХ ЛОВУШЕК)

© 2018 г. В.И. Денисов¹, В.В. Латун¹

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

FLOWS OF CHEMICAL ELEMENTS IN SUSPENDED MATTER FLUXES IN THE SHALLOW AREA OF THE BLACK SEA SHELF (ACCORDING TO THE SEDIMENT TRAPS DATA)

V.I. Denisov¹, V.V. Latun¹

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

Денисов Валерий Иванович – кандидат географических наук, доцент, кафедра физической географии, экологии и охраны природы, Институт наук о Земле, Южный федеральный университет, ул. Зорге, 40, г. Ростов-на-Дону, 344090, Россия, e-mail: denisovgeo@yandex.ru

Valeriy I. Denisov - Candidate of Geography, Associate Professor, Department of Physical Geography, Ecology and Environment Protection, Institute of Earth Sciences, Southern Federal University, Zorge St., 40, Rostov-on-Don, 344090, Russia, e-mail: denisovgeo@yandex.ru

Латун Владимир Владимирович – кандидат географических наук, доцент, заведующий кафедрой социально-экономической географии и природопользования, Институт наук о Земле, Южный федеральный университет, ул. Зорге, 40, г. Ростов-на-Дону, 344090, Россия, e-mail: vlatun@yandex.ru

Vladimir V. Latun - Candidate of Geography, Associate Professor, Head of the Department of Socio-Economic Geography and Environment Protection, Institute of Earth Sciences, Southern Federal University, Zorge St., 40, Rostov-on-Don, 344090, Russia, e-mail: vlatun@yandex.ru

На основе собственных данных, полученных в период 1984–2010 гг., приводятся сведения о количественных параметрах осаждающейся взвеси от устьевых участков рек до глубины 50 м на российском участке восточного шельфа Черного моря от Керченского пролива до устья Мзымты. Кроме этого, включены данные по шельфу бывшего СССР от устья Дуная до устья Ингури. Во взвешенном веществе количественными методами определены концентрации 6 химических элементов (Cr, Mn, Fe, Cu, Zn и Pb) и рассчитаны потоки этих элементов в составе осаждающегося взвешенного материала. Все натурные данные получены методом седиментационных ловушек.

Абсолютные величины потоков в области шельфа в зависимости от глубины моря, сезона и гидрометеорологических причин изменяются в очень широком диапазоне – от 0,09 мг/м²/сут до более 4500 г/м²/сут. Концентрации химических элементов, как и их потоки, в составе осаждающегося вещества также имеют широкий диапазон величин. Так, содержание железа во взвеси колеблется от 0,13 до 13,1 мг/г, а потоки этого химического элемента составляют в среднем 51 мг/см²/сут. Содержание остальных 5 микроэлементов на 3 порядка ниже и составляет десятки мкг/г, а потоки – единицы – десятки мкг/см²/сут.

Ключевые слова: взвешенное вещество, поток вещества, поток химических элементов, седиментационная ловушка.

The article presents the quantitative data of suspended matter fluxes (collected from 1984 to 2010) from river mouth areas to 50-meter depth parts in the Russian sector of the eastern Black Sea shelf from the Strait of Kerch to the mouth of the Mzymta River. Besides, the paper includes the data gathered in the former Soviet Union's sector of the eastern Black Sea shelf from the mouth of Danube to the mouth of the Ingury River. The concentration of six chemical elements (Cr, Mn, Fe, Cu, Zn и Pb) was identified in suspended matter using the quantitative methods. Further, the flows of these chemical elements in suspended matter flux were calculated. All field data were collected using sediment traps during marine expeditions.

Absolute values of fluxes on the shelf vary dramatically from 0.09 mg/m²/d to over 4500 mg/m²/d depending on the depth of the sea, the season and hydrometeorological conditions. The concentration of chemical elements as well as their flows in suspended matter fluxes have a wide range of values. Thus, concentration of Fe in suspended matter fluctuates from 0.13 to 13.1 mg/g, whereas flows of this chemical element on average are 51 mg/cm²/d. Concentration of other microelements is by 2-3 time lower and equal dozens of µg/g, whereas flows equal units and dozens of mg/cm²/d.

Keywords: *suspended matter, suspended matter flux, flow of chemical elements, sediment trap.*

Взвешенное вещество шельфовой части моря является смесью терригенного материала береговой зоны, речного стока, атмосферной пыли, а также хемотропного и биогенного субстрата, которое возникает из растворов, поступающих на мелководье. В целом ряде публикаций выполнены исследования взвесей в Черном море, их образования, количественного распределения [1–3], вещественного и химического состава [4–6], форм миграции тяжелых металлов [7, 8]. Исследован количественный и качественный состав осаждающегося материала методом седиментационных ловушек (СЛ) [8–12].

Постановка задачи

Для исследования фундаментальных свойств вещества в море, решения некоторых задач численного моделирования, например описания геохимических циклов макро- и микроэлементов, возникает необходимость в изучении количественных потоков химических элементов в составе осаждающейся взвеси, а также потоков растворенных химических элементов в воде. В данный момент времени представляется возможным на примере взвесей шельфа Чёрного моря рассчитать характеристики потоков ряда химических элементов, осаждающихся на дно моря. Данную задачу можно решить, одновременно имея сведения о количественных характеристиках потоков вещества и элементном составе взвеси.

Целью статьи является определение потоков химических элементов в составе осаждающейся взвеси в области мелководного участка причерноморского шельфа.

Материалы и методы исследований

Сбор вертикально оседающего вещества осуществлялся с помощью СЛ цилиндрической формы с отношением высоты к диаметру, равным 3 [13, 14], изготовленных из поливинилхлоридных труб диаметром 100 мм и высотой 300 мм. Пластмассовые трубы скреплялись в трехгранные упаковки с использованием антикоррозионных и химически нейтральных материалов: высоколегированной нержавеющей стали, титана и его сплавов, фторопласта, силикона и плексигласа. Внешний вид конструкции представлен и многократно описан в ряде публикаций [4, 10].

Подготовка оборудования производилась в соответствии с принятыми в Институте океанологии РАН (ИО РАН) правилами. Она включала в себя тщательное отмывание их раствором детергента с

последующим многократным вымыванием дистиллированной водой и промывкой 70%-м раствором этанола. В качестве консерванта применялся 5%-й раствор формалина в 100%-м растворе NaCl (марки ОСЧ). Время экспозиции СЛ составляло от 10 ч до 20 сут, иногда до 3 мес. Предварительная обработка проб осуществлялась в судовой или береговой лаборатории непосредственно после отбора воды и взвеси. Осадочное вещество из ловушек выделялось общепринятым методом прямой вакуумной мембранной ультрафильтрации с использованием ядерных фильтров производства Объединенного института ядерных исследований в г. Дубне (ОИЯИ) с диаметром пор 0,45 мкм. Полученная взвесь высушивалась до постоянного веса, взвешивалась, после этого рассчитывалась интенсивность вертикального потока – $г/м^2/сут$ [4, 10]. После получения количественных данных о содержании химических элементов в пробах взвеси (аналитические физико-химические работы) производился расчет потоков каждого химического элемента в осаждающейся взвеси. В статье приведены выборочные сведения на основе данных рентгенофлюоресцентного анализа.

«Поток осадочного материала», или «поток вещества», – термин свободного пользования, показывающий количество осадочного материала в целом или его частей (отдельные элементы, остатки организмов, фракции гранулометрического состава, минералы и др.), проходящих через единицу поверхности на определенной глубине океана. Чаще всего потоки измеряют в миллиграммах (граммах) на квадратные метры в сутки, а для фораминиферных остатков организмов (фораминиферы, радиолярии, пеллеты и др.) – в штуках на квадратные метры в сутки.

Под потоком вещества (ПВ) мы понимаем перемещение массы седиментационного материала на единицу площади дна (через единицу площади вертикального разреза) в единицу времени. Процесс транспортировки вещества в море можно условно подразделить на два основных вида:

1. Вертикальный ПВ – $[г/м^2/сут]$ (1), или $[мг/м^2/сут]$, или $[мг/см^2/сут]$ (3), или $[мкг/см^2/сут]$ (4), происходящий под результирующим влиянием силы тяжести на единицу площади дна.

2. Горизонтальный ПВ – $[г/м^2/сут]$, или $[мг/м^2/сут]$, или $[мг/см^2/сут]$, или $[мкг/см^2/сут]$, происходящий под результирующим влиянием несущей силы потока воды через единицу площади сечения, расположенного перпендикулярно горизонтальной поверхности уровня воды. Суммарный расход взвеси через сечение шельфа оценивается в $т/сут$ [1, 3].

Данный тип ПВ имеет место при любых скоростях горизонтальных течений. Он является основным в реках, устьевых зонах река – море, в проливах, при приливо-отливных явлениях, в струях морских течений, во вдольбереговых потоках и т.д.

Поток химических элементов в составе осаждающейся взвеси рассчитывался по формуле (4).

Использование СЛ позволяет непосредственно измерить массу поступающего на дно осадочного материала. В литературе существуют оценки количества оседающего вещества, проведенные с использованием биологических (по продукции детрита), химических методов (по концентрации органического вещества), а также методом абсолютных масс [15].

Прямые измерения ПВ с помощью автоматических больших СЛ в течение трехлетнего турецко-американского эксперимента проведены в южной части Черного моря для глубин 250 и 1200 м на траверзе устья реки Сакарья в 1982–1984 гг. Изменчивость общего вертикального ПВ находилась в пределах 2–500 мг/м²/сут в зависимости от сезона года и горизонта ловушек [9].

На восточном шельфе от Анапы до устья р. Псоу сотрудниками Южного отделения (ЮО) ИО РАН на малых глубинах от 8 до 40 м получены результаты прямых ловушечных измерений в различные сезоны 1989–1992 гг. По их данным, диапазон колебаний потоков взвесей находится в пределах 0,02–345,62 мг/см²/сут [8].

Сотрудники ИО и ЮО ИО РАН провели работы по изучению потоков осаждающейся взвеси в сентябре–октябре 1999 г. с помощью пяти СЛ, которые экспонировались на трех станциях в районе Бетта – Архипо-Осиповка в диапазоне глубин 50–1680 м. Станции располагались на шельфе, подводном склоне и подножье подводного склона. Суммарные потоки осадочного материала, по данным авторов, находятся в диапазоне 1,23–24,94 мг/м²/сут [11].

По нашим данным, изменчивость потоков в области черноморского шельфа в зависимости от глубины моря, сезона и гидрометеорологических причин находится в пределах от 0,09 до 450 мг/м²/сут [4, 10, 12].

Как правило, мы использовали вариант одиночных СЛ, устанавливаемых в придонном слое воды на расстоянии 0,5–1,0 м от дна, однако проводились и установки вертикальных серий СЛ в районах Тендровской косы в северо-западной части моря, в Керченском предпроливье, в Южной Озереевке, на мысе Утриш, в районе Широкой Балки (Новороссийск). В обоих вариантах применялись растяжная система буюв (кухтылей) и груза, которые надежно удерживают СЛ на заданном горизонте в вертикаль-

ном положении, а на поверхности моря ловушечная станция маркируется сигнальным буюм [4, 12].

Расчет основных характеристик потоков взвеси, скоростей осадконакопления, абсолютных масс потока осадочного материала производился по следующим формулам:

$$V = M/S/T \quad [\text{г/м}^2/\text{сут}], \quad (1)$$

$$V' = V \times 365,25 \quad [\text{г/м}^2/\text{год}],$$

$$I = V'/\rho/1000 \quad [\text{мм/год}], \quad (2)$$

$$I' = I \times 1000 \quad [\text{мм/1000 лет}],$$

$$A = V'/10 \quad [\text{г/см}^2/1000 \text{ лет}],$$

$$V'' = V/10 \quad [\text{мг/см}^2/\text{сут}], \quad (3)$$

$$\Psi = V \times C/10000 \quad [\text{мкг(С)/см}^2/\text{сут}], \quad (4)$$

где V – поток осаждающегося материала (вертикальный ПВ), г/м²/сут; V' – поток осаждающегося материала (вертикальный ПВ) за год, г/м²/год; M – масса осевшей в ловушке взвеси, г; T – время экспонирования СЛ, сут и доли суток; S – площадь рабочей поверхности СЛ, м²; I – скорость осадконакопления, мм/год; I' – скорость осадконакопления, мм/1000 лет; ρ – плотность осадка, 1,87 г/см³ (средняя измеренная плотность ловушечной взвеси (200 измерений) в сухом весе); 365,25 – средняя продолжительность года (с учетом високосного года); 1000 – коэффициент; A – абсолютная масса потока осадочного материала, г/см²/1000 лет; V'' – ПВ в размерности, мг/см²/сут; Ψ – поток химического элемента в составе осаждающегося материала, мкг(С)/см²/сут; C – концентрация химического элемента во взвеси, мкг/г (сухого веса) [10].

Результаты

Максимальное поступление осаждающегося материала на шельфе связано с двумя глобальными поясами лавинной седиментации в этой части моря: 1 – граница река – море; 2 – у основания континентального склона.

Исследуемая зона шельфа Черного моря вместе с устьевыми участками рек составляет первый пояс лавинной седиментации. Устьевые участки рек как геохимически активные барьерные зоны достаточно подробно исследованы.

Основная часть (до 90 %) твердого стока рек, абразивного материала клифов и бенчей, практически весь ракушечный материал осаждаются и переотлагаются в пределах первого пояса лавинной седиментации для широкого шельфа [1–3]. В ряде работ А.П. Лисицын убедительно показал, что в устьевых областях рек и у основания континентального склона осаждается огромное количество материала с исключительно высокими скоростями. Это доказывается методами изучения взвеси, скоростей осадконакопления, абсолютных масс и мощностей отложе-

ний. По его мнению, в пелагиаль океана поступает не более 8 % речного материала [15].

Исследования показывают, что барьер река – море или река – лиман – море является главным природным фильтром как для взвешенного, так и для многих форм растворенного вещества. Наши данные также подтверждают эти выводы и позволяют альтернативным методом СЛ количественно оценить степень оседания материала на дно по мере продвижения от мелководья (устьев рек) до глубины 50 м.

СЛ устанавливались для сбора не только фоновых, естественных ПВ, но и, например, потоков биогенного материала в районах свайных конструкций причалов (Лазаревское) прямо под пирсом, бетонные сваи которого полностью обросли мидиями. В данном месте можно считать, что ПВ, поступающий на дно, состоит из биоотложений (фекалии и псевдофекалии мидий) + фоновая взвесь [4, 12]. В районах размещения опытных мидийных плантаций (мыс Утриш) на протяжении различных сезонов в течение года производились работы по наблюдению за количеством и химическим составом биоотложений мидий, которые собирались в СЛ, расположенных в углах квадратной мидийной плантации на трех и двух горизонтах [4]. Методом СЛ была решена задача разнота взвеси и её размывания в толще воды при сбросе материала донных осадков при очистке портов и подходов каналов. Зона дампинга находилась в Керченском предпроливье. Впоследствии метод СЛ применялся в Таганрогском заливе Азовского моря при мониторинге разнота пятен взвеси в период работы земснарядов при дноуглублении судоходных каналов.

Работы с СЛ были начаты в 1984 г. в границах бывшего СССР, поэтому в базе данных есть сведения о ПВ в устье реки Дунай и собственно в реке, в устьевой зоне реки Днестр, в Днепре, Днепровско-Бугском лимане, в реке Южный Буг, в зоне Тендровской косы, в некоторых точках Крымского шельфа и в шельфовой области Республики Абхазии до устья р. Ингури. Количественные характеристики потоков определялись по данным более 200 СЛ. Элементный состав взвесей был изучен по данным около 70 СЛ. Потоки химических элементов в составе взвесей рассчитывались по данным 63 СЛ. В статье приводятся выборочные сведения по данным 40 ловушек.

В табл. 1 приведены выборочные данные о величинах потоков осаждающегося материала, полученные с помощью СЛ в море. Сведения о концентрациях шести химических элементов во взвеси и их

потоки представлены в табл. 2. В табл. 3 приводятся статистические сведения о концентрациях химических элементов и их потоках в составе взвеси.

Величина потоков осаждающейся взвеси имеет абсолютные значения от 1,6 до более 4500 г/м²/сут при среднем значении 92,3 г/м²/сут. Наибольшие значения потоков наблюдаются в устьях крупных рек, в первую очередь в Дунае, Днепре, Днестре, Южном Буге, в лиманах севе-западной части моря, в устьях рек Кавказского участка шельфа, таких как Ингури, Мзымта, Аше, Шахе, Псеуапсе и др. Наименьшие значения потоков взвеси отмечаются в зонах скальных участков побережья и максимальных глубин, где минимально взмучивание донных отложений и отсутствует влияние речного твердого стока. Содержание железа в осаждающейся взвеси изменяется в диапазоне от 0,13 до 13,1 мг/г при среднем значении 3,6. Поток железа в составе взвеси колеблется от 0,432 до 1635 мг/см²/сут при среднем значении 51 мг/см²/сут.

Содержание марганца в составе взвеси изменяется также в широком диапазоне от 35 до 16500 мкг/г при среднем значении 1650 мкг/г. Максимальные значения марганца и потоков этого элемента отмечаются во взвеси рек Днепр, Дунай и Южный Буг. Это связано, по-видимому, с размывом рудных тел в зонах дренажа речных потоков. Минимальные концентрации марганца в составе взвеси отмечены в Керченском проливе, на участке шельфа Утриша, в ряде прикавказских рек: Шапсухо, Вулан, Пшада и др.

Концентрация хрома во взвеси изменяется от 48 до 1200 мкг/г, потоки элемента – от 0,024 до 56 мкг/см²/сут. Максимальные значения потоков хрома отмечаются во взвеси Дуная и Днепра.

Содержание меди во взвешенном веществе изменяется от 1 до 300 мкг/г, потоки этого элемента – от 0,001 до 3,9 мкг/см²/сут. Максимальные концентрации отмечаются в веществе Днепровско-Бугского лимана, Южного Буга.

Концентрации цинка во взвешенном веществе исследуемой части шельфа изменяется от 20 до 2600 мкг/г при средней величине 270 мкг/г. Потоки элемента – от 0,02 до 83 мкг/см²/сут при среднем значении 2,5. Максимум содержания отмечается во взвеси Тендровской косы и Днепровско-Бугского лимана.

Концентрация свинца в осаждающейся взвеси колеблется от 15 до 250 мкг/г. Потоки этого микроэлемента изменяются от 0,008 до 25,1. Максимумы концентраций отмечаются во взвеси Керченского пролива, Днепровско-Бугского лимана и Тендровской косы.

Таблица 1

**Общие сведения о потоках вещества на шельфе Чёрного моря по данным СЛ (собственные данные)
 / General data about the flows of suspended matter flux on the Black Sea shelf based
 on the original sediment traps data**

№ СЛ	Долгота, в.д.	Широта, с.ш.	Глубина, м	Горизонт установки, м	Т, экспо- зиция, сут	V, верти- кальный ПВ, г/м ² /сут	I, интенсив- ность поступления осадочного материала, мм/год	Район установки СЛ, дата
1	37,34	44,81	32	29	45	2,473	0,4831	мыс Утриш, 28.06 – 12.08.1986
2	37,38	44,75	34	32	44	5,096	0,9953	мыс Утриш, 28.06 – 12.08.1986
7	37,36	44,76	50	49	44	4,040	0,7892	мыс Утриш, 28.06 – 12.08.1986
11	37,38	44,75	32	30	44	15,657	3,0581	мыс Утриш, 28.06 – 12.08.1986
22	37,66	44,66	20	7	89	14,140	2,7619	Южная Озереевка, 26.07 – 22.10.1987
25	37,66	44,66	20	19	52	1,630	0,3185	Южная Озереевка, 01.09 – 22.10.1987
26	41,52	42,47	11	10	0,67	38,102	7,4421	мыс Анаклиа (устье р. Ингури), 31.07 – 01.08.1987
27	35,02	44,79	47	46	80	2,210	0,4317	Крым, Новый Свет, 26.05–14.08.1987
28	31,69	46,03	20	10	0,21	6,667	1,3023	Тендровская коса, 17.08.1987
31	31,93	46,59	6	5	0,33	34,247	6,6891	Днепровско-Бугский лиман, 17 – 18.08.1987
32	30,74	45,79	30	29	0,38	10,528	2,0563	траверз Днестровского лимана, 20 – 21.08.1987
33	39,98	43,39	20	19	10,02	33,925	6,6263	Адлер, 23.06 – 02.07.1988
34	36,67	45,1	15	14	6,98	66,293	12,9485	Тамань, 16.06 – 21.06.1988
35	37,72	44,65	15	14	12,68	1,724	0,3368	мыс Колдун, 22.06 – 05.07.1988
36	37,72	44,64	30	28	12,69	2,386	0,4661	мыс Колдун, 22.06 – 05.07.1988
37	39,42	43,78	37	35	11	2,038	0,3981	Якорная Щель, Головинка, 23.06 – 04.07.1988
38	41,5	42,47	14	13	0,42	6,466	1,2630	мыс Анаклиа (устье реки Ингури), 30.06.1988
39	29,58	45,41	4	3	1,32	4504,357	879,7949	р. Дунай, г. Вилково, 07 – 08.08.1987
40	31,97	47,0	8	7	1	189,153	36,9454	р. Ю. Буг, г. Николаев, 12 – 13.08.1987
41	32,6	46,61	8	7	0,68	41,542	8,1140	р. Днепр, г. Херсон, 10–11.08.1987
42	36,595	45,205	7	6	96,1	77,572	15,1515	Керченский пролив, 09.09 – 14.12.1987

Окончание табл. 1

№ СЛ	Долгота, в.д.	Широта, с.ш.	Глубина, м	Горизонт установки, м	Т, экспозиция, сут	V, вертикальный ПВ, г/м ² /сут	I, интенсивность поступления осадочного материала, мм/год	Район установки СЛ, дата
43	36,598	45,21	6	5	96,1	111,703	21,8179	Керченский пролив, 09.09 – 14.12.1987
45	31,43	46,65	5	4	0,68	75,156	14,6795	Березанский лиман, взморье, 14 – 15.08.1988
46	31,97	47,0	10	9	1,04	29,806	5,8217	р. Ю. Буг, г. Николаев, 05 – 06.08.1988
47	32,58	46,61	10	9	1,02	159,315	31,1175	р. Днепр, г. Херсон, 04 – 05.08.1988
48	29,58	45,41	4	3	0,92	1452,289	283,6622	р. Дунай, г. Вилково, 02 – 03.08.1988
54	37,39	44,753	25	24	75	107,426	20,9826	мыс Утриш, 19.07 – 03.10.1988, мид. плантация
72	39,16	44,03	5	4,5	0,524	224,836	43,9152	устье р. Шепси, 03 – 04.08.1989
73	39,95	43,39	15	14,5	3,04	35,165	6,8684	бухта Имеретинская, 05 – 08.08.1989, мид. плантация
75	39,963	43,395	15	14,5	2,96	32,024	6,2550	бухта Имеретинская, 05 – 08.08.1989, мид. плантация
76	39,93	43,42	1	0,6	0,97	760,392	148,5205	устье реки Мзымта, 09 – 10.08.1989
80	39,26	43,96	2	1,5	0,472	310,825	60,7107	устье реки Аше, 12 – 13.08.1989
81	39,08	44,087	2,5	2	1,128	335,898	65,6080	устье реки Туапсе, 13 – 14.08.1989
82	39,03	44,13	1	0,5	0,368	22,731	4,4398	устье реки Агой, пос. Агой, 13 – 14.08.1989
83	38,75	44,3	2	1,5	0,441	348,042	67,9798	устье реки Шапсухо, пос. Лермонтово, 14 – 15.08.1989
84	38,53	44,362	1,5	1	0,517	94,882	18,5324	устье реки Вулан, пос. Архипо-Осиповка, 15–16.08.1989
86	38,325	44,388	3	2,5	0,413	148,202	28,9469	устье реки Пшада, 17 – 18.08.1989
87	37,384	44,765	10	9,5	1,938	4,155	0,8116	мыс Утриш, море, траверз озера Змеинового, 19 – 21.08.1989
90	36,603	45,16	9	8	10	4,194	0,8192	Керченский пролив, 18 – 28.04.1990
97	36,423	45,188	9	8	10	51,374	10,0344	Керченский пролив, 18 – 28.04.1990

Таблица 2

Содержание химических элементов в осаждающейся взвеси (мкг/г, Fe – мг/г) сухого веса и потоки химических элементов в составе взвеси по данным СЛ (собственные данные), мкг(С)/см²/сут, (Fe – мг/см²/сут) сухого веса, С – химический элемент / Concentration of chemical elements in suspended matter (µg/g, Fe - mg/g) dry weight and flows of chemical elements in suspended matter composition based on the original sediment traps data, µg(C)/ cm²/d, (Fe - mg/cm²/d) dry weight, C - chemical element

№ СЛ	Cr		Mn		Fe		Cu		Zn		Pb	
	Содер- жание	Поток	Содер- жание	Поток	Содер- жание	Поток	Содер- жание	Поток	Содер- жание	Поток	Содер- жание	Поток
1	113	0,0279	721	0,1783	3,38	0,8359			140	0,0346	48	0,0119
2	163	0,0831	417	0,2125	1,65	0,8408	101	0,0515	129	0,0657	46	0,0234
7	130	0,0525	1272	0,5139	3,98	1,6081			223	0,0901	55	0,0222
11	101	0,1581	188	0,2943	1,89	2,9591	68	0,1065	78	0,1221	28	0,0438
22	284	0,4016	486	0,6872	3,83	5,4158	42	0,0594	158	0,2234	80	0,1131
25	301	0,0491	1969	0,3210	5,2	0,8478	68	0,0111	328	0,0535	87	0,0142
26	194	0,7392	1054	4,0160	5,23	19,9274	16	0,0610	218	0,8306	62	0,2362
27	176	0,0389	695	0,1536	4,04	0,8929			129	0,0285	70	0,0155
28	1161	0,7741	3683	2,4556	13,1	8,7344	214	0,1427	2630	1,7535	251	0,1674
31	335	1,1473	9656	33,0685	8,35	28,5959	110	0,3767	935	3,2021	134	0,4589
32	469	0,4937	1822	1,9181	4,62	4,8637	311	0,3274	711	0,7485	112	0,1179
33	105	0,3562	650	2,2052	5,91	20,0499			159	0,5394	48	0,1628
34	342	2,2672	1026	6,8017	4,87	32,2849			119	0,7889	59	0,3911
35	300	0,0517	1363	0,2350	5,48	0,9449	73	0,0126	417	0,0719	82	0,0141
36	628	0,1499	1712	0,4086	7,38	1,7612	122	0,0291	515	0,1229	107	0,0255
37	390	0,0795	1832	0,3734	7,07	1,4409	88	0,0179	507	0,1033	103	0,0210
38	306	0,1979	3040	1,9657	8,29	5,3604	96	0,0621	775	0,5011	130	0,0841
39	124	55,8540	917	413,0495	3,63	1635,0816	6	2,7026	184	82,8802	56	25,2244
40	160	3,0264	6485	122,6654	2,74	51,8278			128	2,4212	40	0,7566
41	339	1,4083	14000	58,1589	7,04	29,2456	14	0,0582	257	1,0676	72	0,2991
42	255	1,9781	897	6,9582	4,14	32,1149	5	0,0388	90	0,6982	57	0,4422
43	150	1,6755	947	10,5782	3,83	42,7821	6	0,0670	81	0,9048	56	0,6255
45	309	2,3223	6294	47,3032	4,97	37,3526	70	0,5261	595	4,4718	71	0,5336
46	234	0,6975	2709	8,0744	4,41	13,1444	134	0,3994	267	0,7958	69	0,2057
47	285	4,5405	16500	262,8692	6,91	110,0864			150	2,3897	60	0,9559
48	145	21,0582	843	122,4279	3,67	532,9899	27	3,9212	186	27,0126	53	7,6971
54	176	1,8907	180	1,9337	2,24	24,0635	1	0,0107	71	0,7627	40	0,4297
72			40	0,8993	0,19	4,2719	45	1,0118	45	1,0118		
73			240	0,8440	1,87	6,5758	30	0,1055	60	0,2110	55	0,1934
75			215	0,6885	1,46	4,6755	30	0,0961	110	0,3523	40	0,1281
76			300	22,8118	3,15	239,5236	15	1,1406	90	6,8435	50	3,8020
80			145	4,5070	0,75	23,3119	10	0,3108	50	1,5541	35	1,0879
81			360	12,0923	2,5	83,9746	50	1,6795	135	4,5346	45	1,5115
82			340	0,7729	2,27	5,1599	45	0,1023	135	0,3069	50	0,1137
83			85	2,9584	0,72	25,0590	10	0,3480	20	0,6961	15	0,5221
84			125	1,1860	0,78	7,4008	30	0,2846	40	0,3795	40	0,3795
86			35	0,5187	0,13	1,9266	20	0,2964	20	0,2964		
87			285	0,1184	2,4	0,9973	10	0,0042	140	0,0582	80	0,0332
90			80	0,0336	2,24	0,9395	50	0,0210	1845	0,7738	210	0,0881
97			180	0,9247	4,96	25,4814	10	0,0514	180	0,9247	100	0,5137

Таблица 3

**Основные статистические данные ловушечной взвеси (концентрация и потоки химических элементов)
/ Main statistics data of suspended matter from sediment traps (concentration and flows of chemical elements)**

	Единица измерения	Химический элемент	Объем выборки	Среднее арифметическое	Медиана	Минимальное	Максимальное	Дисперсия
Концентрация	мг/г	Fe	63	3,6	3,2	0,130	13,1	5
Поток	мг/см ² /сут			50,9	5,3	0,432	1635,1	46556
Концентрация	мкг/г	Cr	43	247,0	194,0	48,000	1161,0	33337
Поток	мкг/см ² /сут			2,5	0,4	0,024	55,9	80
Концентрация	мкг/г	Mn	63	1656,2	695,0	35,000	16500,0	9363470
Поток	мкг/см ² /сут			18,7	0,8	0,034	413,0	4120
Концентрация	мкг/г	Cu	55	50,7	30,0	1,000	311,0	3133
Поток	мкг/см ² /сут			0,3	0,1	0,001	3,9	0,46
Концентрация	мкг/г	Zn	63	269,3	135,0	20,000	2630,0	169403
Поток	мкг/см ² /сут			2,5	0,3	0,021	82,9	118
Концентрация	мкг/г	Pb	61	65,7	55,0	15,000	251,0	1844
Поток	мкг/см ² /сут			0,8	0,1	0,007	25,2	11

Выводы

1. Экстремальные концентрации и потоки химических элементов во взвешенном веществе могут являться надежными индикаторами дренируемых реками рудных тел.

2. Для всех участков шельфа Чёрного моря прослеживаются нелинейные распределения потоков осаждающегося вещества и скоростей осадконакопления по глубине шельфа.

3. Величины потоков химических элементов определяются абсолютной величиной потоков осаднения и концентрацией этих химических элементов во взвеси.

4. Районы с максимальными значениями потоков химических элементов пространственно тяготеют к устьевым участкам рек, мелководью, районам с высокой биопродуктивностью, к зонам сброса бытовых и промышленных отходов. В нашем случае наибольшие величины потоков практически всех 6 химических элементов отмечаются во взвеси рек Дунай, Днепр, Южный Буг, Мзымта, Аше, Туапсе и др.

5. Минимальные значения как потоков вещества, так и концентраций химических элементов и их потоков характерны в зонах шельфа, где отсутствует или минимален речной сток, а также на максимальных исследованных глубинах шельфа.

6. Наблюдения за потоками взвесей и их химическими характеристиками проводились в различных погодных условиях летом, весной и осенью. Режимы течений, твердого и жидкого стока рек, ветрового волнения и иных факторов, скорее всего, явились причинами, вызывающими существенные различия в условиях осадконакопления, а также потоках химических элементов.

Литература

1. Айбулатов Н.А. Динамика твердого вещества в шельфовой зоне. Л.: Гидрометеиздат, 1990. 271 с.
2. Айбулатов Н.А., Щербаков Ф.А. Лавинная седиментация в Черном море // Изв. АН СССР. Сер. геол. 1989. № 12. С. 30–45.
3. Айбулатов Н.А., Новикова З.Т. Количественное распределение взвеси в шельфовых водах Черного моря // Океанология. 1984. Т. 24, вып. 6. С. 960–968.
4. Денисов В.И. Закономерности образования взвешенного материала на шельфе Черного моря: дис. ... канд. геогр. наук. Ростов н/Д., 1998. 256 с.
5. Хрусталева Ю.П., Черноусов С.Я., Денисов В.И. Некоторые особенности и закономерности седиментогенеза в северо-западной части Черного моря (вещественный состав и распределение взвеси) // Океанология. 1990. Т. 30, вып. 2. С. 288–294.
6. Хрусталева Ю.П., Денисов В.И. Вещественный состав взвеси шельфа Черного моря (от дельты Дуная до устья Ингури) // Океанология. 1999. Т. 39, № 6. С. 912–919.
7. Демина Л.Л. Формы миграции тяжелых металлов в океане (на ранних стадиях океанского осадкообразования). М.: Наука, 1982. 120 с.
8. Шимкус К.М., Комаров А.В. Современное осадконакопление // Техногенное загрязнение и процессы естественного самоочищения Прикавказской зоны Черного моря. М.: Недра, 1996. С. 57–100.
9. Honjo S., Hay B.J., Manganini S.J., Asper V.L., Degens E.T., Kempe S., Ittekkot V., Izdar E., Konuk Y.T., Benli H.A. Seasonal cyclicity of lithogenic particle fluxes at a southern Black Sea sediment trap station // Mitt. Geol. Paleontol. Inst. Univ. Hamburg: SCO-PE/UNEP Sonderband Heft 62, 1987. P. 19–39.

10. Денисов В.И. Количественные характеристики потоков взвешенных веществ в мелководной области шельфа Черного моря (по данным седиментационных ловушек) // Вопросы промысловой океанологии. 2011. Вып. 8, № 2. С. 194–209.

11. Русаков В.Ю., Зернова В.В., Исаева А.Б., Серова В.В., Анохина Л.Л. Исследования потоков осадочного вещества в районе Кавказского побережья с помощью седиментационных ловушек // Комплексные исследования северо-восточной части Черного моря. М.: Наука, 2002. С. 317–327.

12. Хрусталеv Ю.П., Денисов В.И. Интенсивность седиментации на шельфе Черного моря (по данным седиментационных ловушек) // Общая и региональная геология, геология морей и океанов, геологическое картирование: обзорная информация. М.: Геоинформмарк, 2002. Вып. 4. 48 с.

13. Bloesch J., Burns N.M. A critical review of sedimentation trap technique // Swiss. J. of Hydrology. 1980. Vol. 42, № 1. P. 15–55.

14. Gardner W.D. Field assesment of sediment traps // J. Mar. Res. 1980. Vol. 38, № 1. P. 41–52.

15. Лисицын А.П. Процессы океанской седиментации. М.: Наука, 1978. 392 с.

References

1. Aibulatov N.A. *Dinamika tverdogo veshchestva v shel'fovoi zone* [Dynamics of solid substance in a shelf zone]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1990, 271 p.

2. Aibulatov N.A., Shcherbakov F.A. Lavinnaya sedimentatsiya v Chernom more [Avalanche sedimentation in the Black Sea]. *Izv. AN SSSR. Ser. geol.* 1989, No. 12, pp. 30–45.

3. Aibulatov N.A., Novikova Z.T. Kolichestvennoe raspredelenie vzvesi v shel'fovykh vodakh Chernogo morya [Quantitative distribution of a suspension in shelf waters of the Black Sea]. *Okeanologiya*, 1984, vol. 24, Iss. 6, pp. 960–968.

4. Denisov V.I. *Zakonomernosti obrazovaniya vzveshennogo materiala na shel'fe Chernogo morya* : dis. ... kand. geogr. nauk [Regularities of formation of the suspended matter on the shelf of the Black Sea]. Rostov-on-Don: RSU, 1998, 256 p.

5. Khrustalev Yu.P., Chernousov S.Ya., Denisov V.I. Nekotorye osobennosti i zakonomernosti sedimentogeneza v severo-zapadnoi chasti Chernogo morya (veshchestvennyi sostav i raspredelenie vzvesi) [Some features and regularities of a sedimentogenesis in a northwest part of the Black Sea (material structure and distribution of a suspension)]. *Okeanologiya*, 1990, vol. 30, Iss. 2, pp. 288–294.

6. Khrustalev Yu.P., Denisov V.I. Veshchestvennyi sostav vzvesi shel'fa Chernogo morya (ot del'ty Dunaya do ust'ya Inguri) [Material structure of a suspension of the shelf of the Black Sea (from the Danube Delta to the mouth of the Inguri)]. *Okeanologiya*, 1999, vol. 39, Iss. 6, pp. 912–919.

7. Demina L.L. *Formy migratsii tyazhelykh metallov v okeane (na rannikh stadiyakh okeanskogo osadkoobrazovaniya)* [Forms of migration of heavy metals in the ocean (on earlirs stages of ocean sedimentation)]. Moscow: Nauka, 1982, 120 p.

8. Shimkus K.M., Komarov A.V. [Modern sedimentation]. *Tekhnogennoe zagryaznenie i protsessy estestvennogo samoochishcheniya Prikavkazskoi zony Chernogo morya* [Technogenic pollution and processes of natural self-cleaning of the Caucasian zone of the Black Sea]. Moscow: Nedra, 1996, pp. 57–100.

9. Honjo S., Hay B.J., Manganini S.J., Asper V.L., Degens E.T., Kempe S., Ittekkot V., Izdar E., Konuk Y.T., Benli H.A. Seasonal cyclicity of lithogenic particle fluxes at a southern Black Sea sediment trap station. *Mitt. Geol. Paleontol. Inst. Univ. Hamburg: SCO-PE/UNEP Sonderband Heft 62*, 1987, pp. 19–39.

10. Denisov V.I. Kolichestvennye kharakteristiki potokov vzveshennykh veshchestv v melkovodnoi oblasti shel'fa Chernogo morya (po dannym sedimentatsionnykh lovushek) [Quantitative characteristics of suspended matter fluxes in shallow area of the Black Sea shelf (according to sedimentation traps)]. *Voprosy promyslovoi okeanologii*. 2011, Iss. 8, No. 2, pp. 194–209.

11. Rusakov V.Yu., Zernova V.V., Isaeva A.B., Serova V.V., Anokhina L.L. [Researches of sedimentary substance fluxes near the Caucasian coast by means of sedimentation traps]. *Kompleksnye issledovaniya severo-vostochnoi chasti Chernogo morya* [Complex researches of a northeast part of the Black Sea]. Moscow: Nauka, 2002, pp. 317–327.

12. Khrustalev Yu.P., Denisov V.I. [Intensity of sedimentation on the shelf of the Black Sea (according to sedimentation traps)]. *Obshchaya i regional'naya geologiya, geologiya morei i okeanov, geologicheskoe kartirovanie: obzornaya informatsiya* [General and regional geology, geology of the seas and oceans, geological mapping. Survey information]. Moscow: Geoinformmark, 2002, Iss. 4, 48 p.

13. Bloesch J., Burns N.M. A critical review of sedimentation trap technique. *Swiss. J. of Hydrology*. 1980, vol. 42, No. 1, pp. 15–55.

14. Gardner W.D. Field assesment of sediment traps. *J. Mar. Res.* 1980, vol. 38, No. 1, pp. 41–52.

15. Lisitsyn A.P. *Protsessy okeanskoi sedimentatsii* [Processes of ocean sedimentation]. Moscow: Nauka, 1978, 392 p.

УДК 639.222.2

DOI 10.23683/0321-3005-2018-4-86-91

ВЛИЯНИЕ СОЛЕНОСТИ И ВОДНОГО СТОКА НА РАСПРОСТРАНЕННОСТЬ ЧЕРНОМОРСКО-АЗОВСКОЙ ПРОХОДНОЙ СЕЛЬДИ В АЗОВСКОМ МОРЕ*

© 2018 г. И.Д. Кузнецова^{1,2}, Ю.А. Федоров¹

¹Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, Россия,
Азовский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства, Ростов-на-Дону, Россия

INFLUENCE OF SALT AND WATER STOCK ON THE DISTRIBUTION OF THE BLACK SEA-AZOV PASSING HERRING IN THE AZOV SEA

I.D. Kuznecova^{1,2}, Yu.A. Fedorov¹

¹Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia,
Azov Scientific-Research Institute of Fisheries, Rostov-on-Don, Russia

Кузнецова Инна Дмитриевна – аспирант, кафедра физической географии, экологии и охраны природы, Институт наук о Земле, Южный федеральный университет, ул. Зорге, 40, г. Ростов-на-Дону, 344090, Россия; младший научный сотрудник, лаборатория проходных и полупроходных рыб, Азовский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства, ул. Береговая, 21в, г. Ростов-на-Дону, 344002, Россия, e-mail: kuznecovainna1811@yandex.ru

Inna D. Kuznecova – Postgraduate, Department of Physical Geography, Ecology and Environment Protection, Institute of Earth Sciences, Southern Federal University, Zorge St., 40, Rostov-on-Don, 344090, Russia; Junior Researcher, Laboratory of Pass-Through and Semi-Pass Fish, Azov Scientific Research Institute of Fisheries, Beregovaya St., 21v, Rostov-on-Don, 344002, Russia, E-mail: kuznecovainna1811@yandex.ru

Федоров Юрий Александрович – доктор географических наук, профессор, главный научный сотрудник, заведующий кафедрой физической географии, экологии и охраны природы, Институт наук о Земле, Южный федеральный университет, ул. Зорге, 40, г. Ростов-на-Дону, 344090, Россия, e-mail: fedorov@sfedu.ru

Yuriy A. Fedorov - Doctor of Geography, Professor, Main Researcher, Head of the Department of Physical Geography, Ecology and Environment Protection, Institute of Earth Sciences, Southern Federal University, Zorge St., 40, Rostov-on-Don, 344090, Russia, e-mail: fedorov@sfedu.ru

Черноморско-азовская проходная сельдь *Alosa immaculate* (Bennett, 1836) является одним из древних представителей ихтиофауны Азовского моря и до настоящего времени играет важную роль в отечественном промысле. Численность сельди и ее уловы на протяжении всего развития промысла претерпевают ярко выраженные годовые и многолетние колебания под воздействием природных и антропогенных факторов, в частности осолонения Азовского моря и Таганрогского залива. Основным фактором, определяющим формирование режима солености Азовского моря, является материковый сток (его объем и внутригодовое распределение). Соленость Таганрогского залива и юго-восточных прибрежных районов находится под существенным влиянием стока рек Дон и Кубань, а южный предпроливный район испытывает значительное воздействие черноморских вод. Повышение годовых объемов материкового стока способствовало снижению солености Азовского моря или стабилизации ее значений, а в условиях снижения материкового стока отмечался рост солености. Это обстоятельство подтверждается и выраженной асинхронностью колебаний среднегодовых значений солености и стока. В данной статье авторами рассмотрено изменение распределения черноморско-азовской проходной сельди под воздействием осолонения Азовского моря.

Ключевые слова: черноморско-азовская проходная сельдь, среда обитания, период миграции, осолонение, динамика численности, район нагула, плотность распределения, эффективность размножения.

The Black Sea-Azov passage herring is one of the most ancient representatives of the ichthyofauna of the Azov Sea and up to the present time plays an important role in the domestic industry. The number of herrings and their catches throughout the development of the fishery undergo pronounced annual and perennial fluctuations under the influence of natural and anthropogenic factors in particular, the salinization of the Azov Sea and the Taganrog Gulf. The main factor determining the formation of the salinity regime of the Azov Sea is the continental runoff (its volume and intra-annual distribution). The salinity of the Taganrog Gulf and the southeastern coastal regions is under the significant influence of the runoff of the Don and Kuban rivers, and the southern before the strait area experiences a significant impact of the Black Sea waters. An increase in the annual volume of continental runoff contributed to a decrease in the salinity of the Sea of Azov or the stabilization of its values, and in the condi-

* Работа выполнена при поддержке гранта № ВнГр – 5.5795.2017/8.9.

tions of a decrease in the continental runoff salinity growth was noted. This circumstance is also confirmed by the pronounced asynchrony of fluctuations in the mean annual values of salinity and runoff. In this article the author considers the change in the distribution of the Black Sea-Azov passage herring under the influence of salting of the Azov Sea.

Keywords: Black Sea-Azov passing herring, habitat, migration period, salinity, population dynamics, feeding area, distribution density, reproduction efficiency.

Введение

Показателем условий обитания в море проходных форм рыб, темпа их роста и созревания является такой интегральный показатель среды, как соленость воды Азовского моря и Таганрогского залива.

Для сельди существуют допустимые значения солености, благоприятные для обитания. При варьировании этих показателей, соответственно, изменяется и ареал популяции [1].

Географическое положение и относительно небольшие размеры Азовского моря обуславливают высокую изменчивость солености моря [2–4]. Поскольку устойчивость к солености черноморско-азовской сельди выше, чем у большинства других проходных и полупроходных видов (для производителей лимитирующей является соленость более 35 ‰, т.е. на уровне средних показателей вод Мирового океана), осолонение вод Азовского моря не ведет к сокращению нагульного ареала *взрослых* особей данного вида. Это подтверждается результатами учетных траловых съемок, показывающих, что районом нагула сельди является практически вся акватория Азовского моря и Таганрогского залива. Несмотря на эвригалинность сельди, изменение солености оказывает существенное влияние на *молодь* (сеголетков) данного вида, обитающую в районах моря с соленостью, не превышающей 9–10 ‰. При увеличении солености до 12 ‰ плотность распределения сеголетков сельди снижается в 7 раз, при солености выше 12 ‰ они встречаются в уловах трала крайне редко.

Актуальность работы. Азовское море до недавнего времени являлось самым продуктивным в мире рыбопромысловым водоемом, что главным образом определялось благоприятными физико-географическими и гидрометеорологическими условиями, но в настоящее время оно теряет свои лидерские позиции из-за увеличения антропогенного пресса. Для регулирования промысловой нагрузки и сохранения промыслового запаса черноморско-азовской проходной сельди необходимо ежегодно получать материалы, характеризующие состояние водных биологических ресурсов. Изучением состояния рыбных ресурсов и гидрологии Азовского моря в России занимается ФГБНУ «АзНИИРХ». С 2014 г. автор принимает участие в исследованиях, проводимых АзНИИРХ.

Цель исследования – проанализировать влияние солености и водного стока на распределение черноморско-азовской проходной сельди в Азовском море.

Задачи исследования:

- проанализировать изменения распространения сельди в Азовском море и Таганрогском заливе;
- выявить влияние антропогенного изменения стока р. Дон бассейна Азовского моря на динамику солености;
- проследить за изменением солености водоема за последние годы;
- сопоставить данные о распространении сельди с изменением солености и проследить связь.

Материалы и методы исследований

Оценка численности и запаса сельди выполнены на основании данных, полученных сотрудниками АзНИИРХ в летний и осенний периоды 2006–2017 гг. в Азовском море и Таганрогском заливе по стандартной сетке станций методом прямого учета, применяемым в Азовском море с 1953 г.

Численность популяции (N) рассчитана по формуле $N = xF/fg$, где x – средний улов на станцию; F – площадь моря (района); f – площадь облова орудием лова; g – коэффициент уловистости орудия лова.

Материал по качественным характеристикам популяции сельди Азовского моря собран в марте – декабре 2006–2017 гг. в рыбопромысловых бригадах на р. Дон (тоня «Оседельная», р-н Аксайского моста), в г. Керчи (Керченский пролив) и ст. Тамани, а также в летних и осенних учетных траловых съемках. Биологический анализ, промеры и статистический анализ выполнены по традиционным для отечественной науки методам.

Зоны с благоприятной соленостью рассчитывались по следующему принципу: результаты съемок наносились на карту, выделялись зоны вод одинаковой солености (изогалыны проводились через 1 ‰). Для каждой из выделенных по солености зон составлялись вариационные ряды по данным отловов рыб, т.е. характеризовалась плотность популяции. Эти зоны, на которые приходилась наибольшая численность (в сумме не менее 60 ‰), рассматривались как оптимальные. За верхнюю границу для пресноводных видов рыб и за нижнюю границу благоприятной солености морских видов принима-

лась такая, за пределами которой отмечалось не более 5–10 % всей популяции данного вида. Сильно осолоненные для проходных и солоноводных видов рыб, а для морских – опресненные участки моря к ареалу не относились. Соленость, при которой учитывалось менее 1 % популяции, рассматривалась как летальная для данного вида в случае его длительного пребывания в этих условиях [5].

В работе использованы литературные данные, архивные и фондовые материалы АзНИИРХ, а также сведения, полученные при непосредственном участии авторов в полевых работах и судовых рейсах 2014–2017 гг.

Результаты и обсуждение

Анализ многолетних данных по динамике численности сельди, а также условий размножений этих рыб позволил выявить четкую корреляцию между величиной урожайности сельди, водного стока и солености [6]. После строительства Цимлянского гидроузла в 1952 г. был зарегулирован сток р. Дон, что привело к резкому сокращению весеннего половодья, снижению величины пресного стока, уменьшению скорости течения в реке почти в 4 раза (до 0,5–0,7 м/с против 2,0–2,5 м/с до зарегулирования), увеличению солености (с 9,05 до 14,2 ‰) и, следовательно, к сужению ареала распространения *молоди* сельди в Азовском море и Таганрогском заливе. Затем сооружение низконапорных гидроузлов – Николаевского, Константиновского, Кочетовского – повлекло за собой сокращение нерестового ареала сельди, низкую эффективность ее размножения и, как следствие, уменьшение величины запаса и промысловых уловов сельди [7].

После строительства Цимлянской плотины стал возможен лишь пассивный скат икры и личинок в Таганрогский залив, заканчивающийся в июле. Повышенный весенний сброс воды, наблюдающийся в Дону в многоводные годы, и обусловленное этим увеличение скорости потока улучшают условия выживания икры и личинок в русле (икра и личинки не опускаются в придонную часть потока). Значительное распреснение Таганрогского залива, отмечающееся в годы с высоким весенним паводком, увеличивает нагульные площади молоди сельди, откармливающейся в этом районе в течение лета [8].

В маловодные годы, наоборот, гибель икры возрастает. В силу малых расходов воды в Дону она опускается в придонный слой речного потока. Количество мертвой икры в этом горизонте в несколько раз больше, чем в вышележащих, и возрастает по мере падения скорости течения [8].

Анализ изменения солености Азовского моря позволил выделить несколько периодов с разнонаправленными тенденциями процессов осолонения, опреснения или стабилизации [4]. С 2006 г. в Азовском море наблюдается период осолонения, который продолжается и по текущий год (рис. 1). Наибольшими темпами повышения солености (0,405 ‰ в год, или 0,04 ‰ в месяц) характеризуется современный период [9].

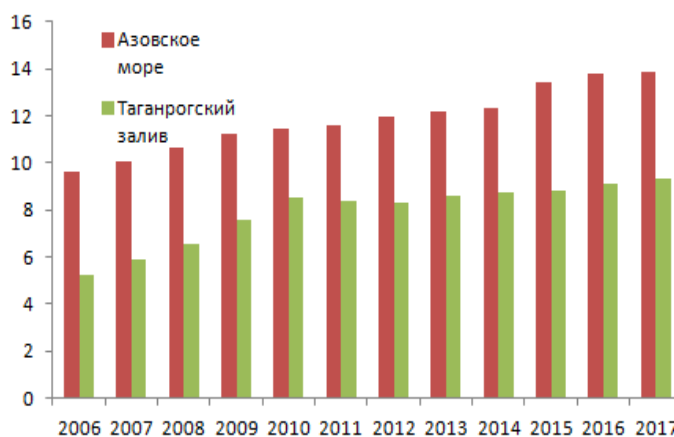


Рис. 1. Изменение солености Азовского моря и Таганрогского залива, 2006–2017 гг., ‰ (исследования проводились по стандартной сетке станций, для построения графика взяты данные среднего значения) / Fig. 1. Change in salinity of the Sea of Azov and the Taganrog Gulf, 2006–2017, ‰

В августе 2016 г. максимума солености Азовское море достигло в районе косы Арабатская стрелка – 14,06 ‰, Таганрогский залив в районе Долгих о-вов – 13,17. Средняя соленость по Азовскому морю составила 13,8 ‰, по Таганрогскому заливу – 9,08. Из-за повышения солености в Азовском море и Таганрогском заливе значительно сократился ареал личинок сельди, ограниченный изогалиной 3 ‰, и сеголетков, обитающих в районах моря с соленостью, не превышающей 9–10 ‰. В ходе летней учетной траловой съемки на акватории моря они не были выявлены. Предположительно, молодь черноморско-азовской сельди находилась в распресненной прибрежной части Таганрогского залива и устье р. Дон, которые в результате траловой съемки не были учтены. Основное скопление промысловой сельди наблюдалось в южной части Азовского моря и северо-западной части Таганрогского залива. Максимум скоплений непромысловой сельди наблюдался в районе Очаковской косы, а также на юге и юго-востоке Азовского моря (рис. 2).

В августе 2017 г. максимума солености Азовское море достигло в районе Утлюкского лимана – 14,2 ‰, Таганрогский залив в районе Долгих

о-вов – 13,3. Средняя соленость по Азовскому морю составила 13,9 ‰, по Таганрогскому заливу – 9,3. Распределение черноморско-азовской проходной сельди на акватории Азовского моря и Таганрогского залива было неравномерно. Наблюдения за распределением взрослой сельди показали, что особи промысловых размеров нагуливались в западной и северо-восточной частях Азовского моря и северо-восточной части Таганрогского залива. Максимум скоплений непромысловых особей наблюдался в районе Очаковской косы, а также на юге и юго-востоке Азовского моря (рис. 3).

Исключительно важными факторами, определяющими условия среды обитания сельди Азов-

ского моря, являются размеры и положение зон с различной соленостью [3].

Площадь зоны с наиболее благоприятной для молоди рыб соленостью менее 7 ‰ в среднем за последние 50 лет составила 2,8 тыс. км². Минимальное значение этого ареала, составившего всего 0,7 тыс. км², отмечено в 1975 г., а наибольшей площади эта зона достигала в 2007 г. (4,65 тыс. км²). Средняя величина зоны с соленостью менее 9 ‰ составляет 4,33 тыс. км². Наибольшим колебаниям подвержены размеры зоны с соленостью до 11 ‰: от 2,7 (1975) до 37,8 тыс. км² (2007). Изменения площадей зон с соленостью более 12 ‰ обычно находятся в противофазе с размерами зон более низкой солености [10].

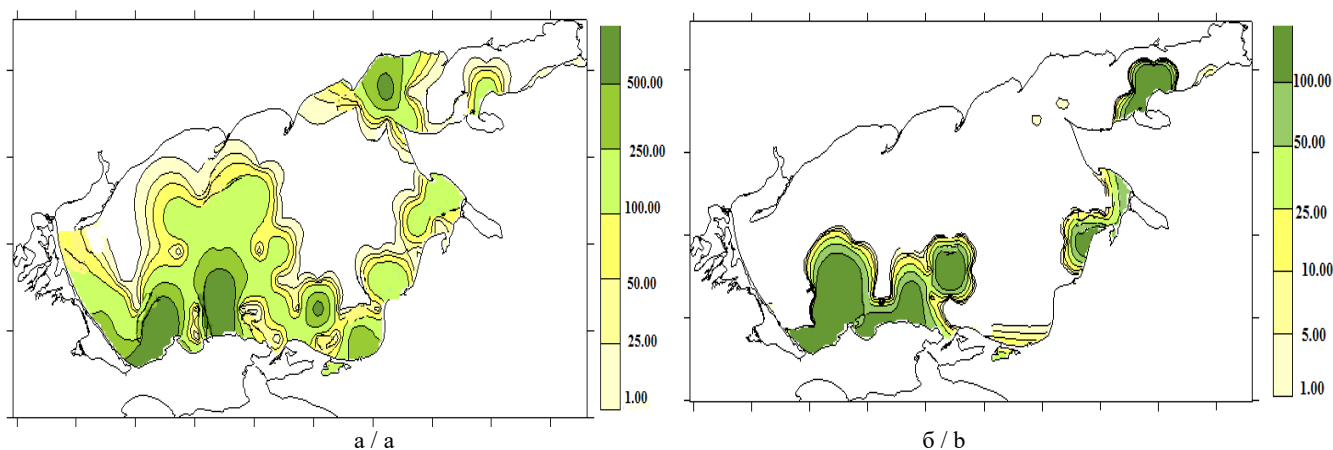


Рис. 2. Распределение черноморско-азовской проходной сельди летом 2016 г., экз./км²: а – промысловой; б – непромысловой (промысловыми считаются особи, достигшие длины 15 см, меньше 15 см – непромысловыми)
/ Fig. 2. Distribution of Black Sea-Azov pass-through herrings in the summer of 2016, specimen / km²:
a - commercial; b - non-commercial

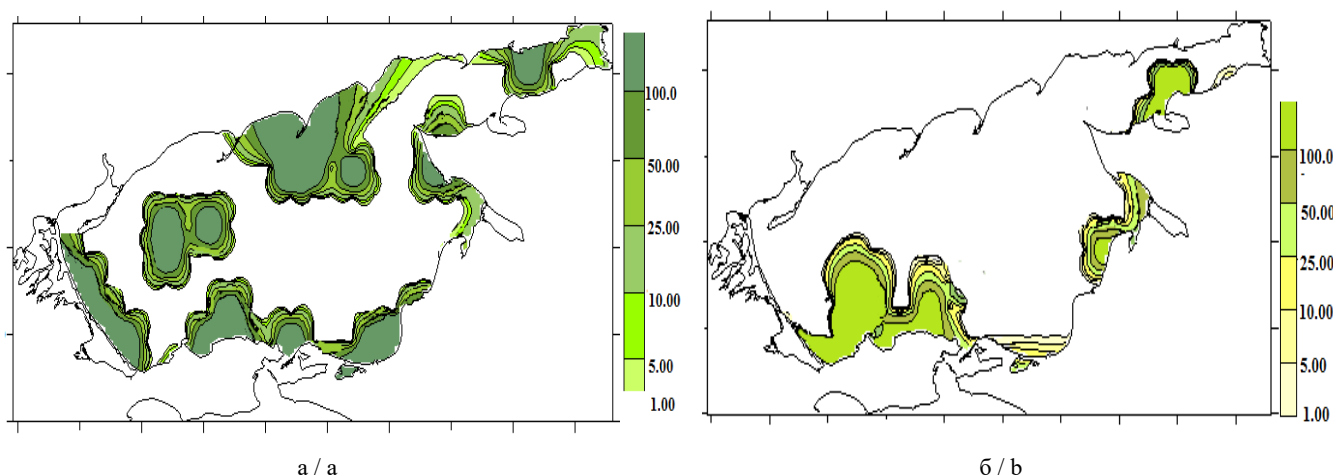


Рис. 3. Распределение черноморско-азовской проходной сельди летом 2017 г., экз./км²: а – промысловой; б – непромысловой / Fig. 3. Distribution of Black Sea-Azov pass-through herrings in the summer of 2017, specimen / km²:
a - commercial; b - non-commercial

Наблюдающееся после относительно благополучного периода сокращение запаса сельди мы связываем со снижением объема стока р. Дон и уменьшением скорости водного потока в нем, что является критичным фактором для инкубации икры данного вида и приводит к увеличению смертности икры и личинок (рис. 4).

По сравнению с 90-ми гг. численность популяции сельди значительно выросла, но с 2015 г. темпы роста начали снижаться.

На рис. 4 показана асинхронность колебаний среднегодовых значений солёности со стоком и промысловым запасом.

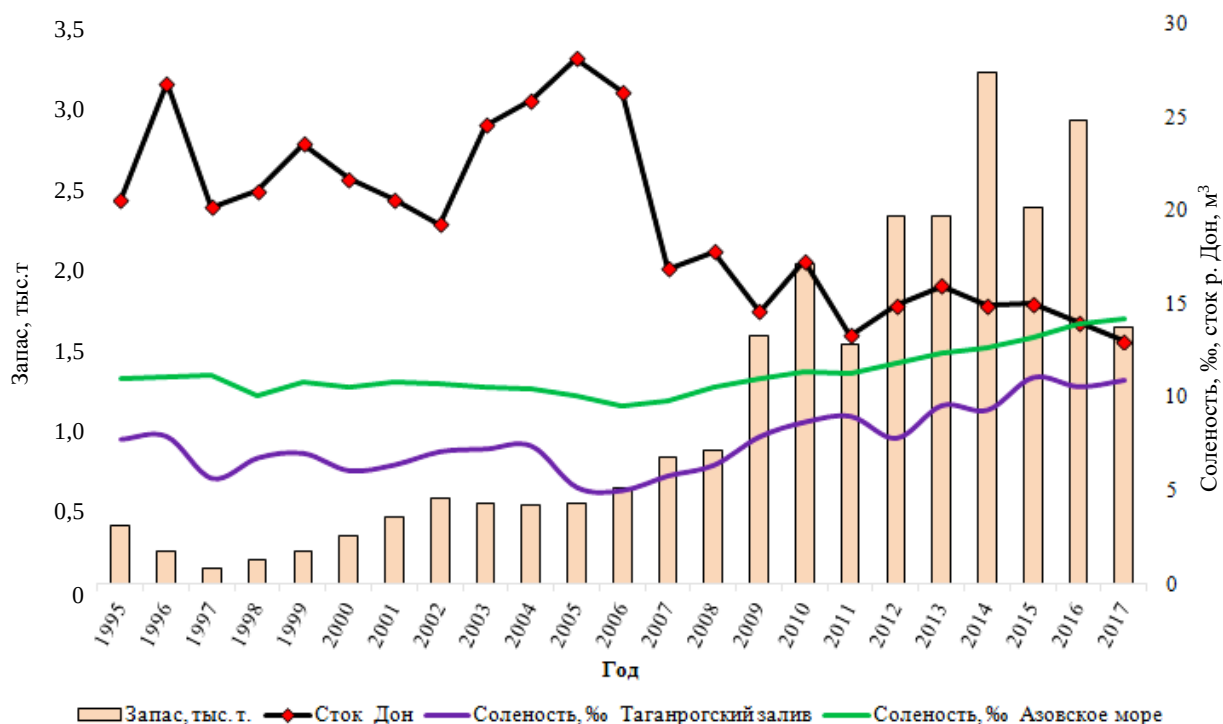


Рис. 4. Вариации запасов проходной сельди и гидрологических условий, Азовское море и Таганрогский залив, 1995–2017 гг.
/ Fig. 4. Variation of stocks of herrings and hydrological conditions, the Sea of Azov and the Taganrog Gulf, 1995-2017

Основные выводы

1. В результате увеличения солёности на акватории Азовского моря произошло смещение ареала молоди черноморско-азовской проходной сельди в более распресненные районы (северо-восток Азовского моря и Таганрогский залив), а площади нагула проходных и полупроходных рыб сократились почти в 2 раза.

2. Наиболее благоприятными для роста и развития черноморско-азовской проходной сельди в Азовском море являются периоды стабильного гидрологического режима. В этих условиях частично сохраняются опресненные зоны вдоль северо-западного и восточного побережья.

3. Низкая весенняя водность р. Дон, характерная для последних нескольких лет, неблагоприятно отразилась на условиях естественного размножения сельди, выживании ее икры и личинок, нагула молоди. Промысловый запас сельди за последние 10 лет в среднем составил 1,9 тыс. т, т.е.

значительно ниже показателей запаса до зарегулирования стока р. Дон.

4. Современные особенности формирования режима солёности Азовского моря, происходящие на фоне процессов потепления воздуха и снижения объемов материкового стока, выражаются в повышении вариабельности пространственно-временной структуры солёности.

5. При сохранении отмечаемой в последние годы тенденции климатообусловленного и антропогенного снижения водности р. Дон и активизации водообмена с Черным морем можно ожидать усиления процессов осолонения моря и расширения зоны с солёностью выше 12 ‰, которые приведут к ухудшению гидроэкологического режима Азовского моря в целом.

6. Наряду с этим крайне негативным фактором, лимитирующим не только формирование благоприятного режима солёности, но и возможность естественного воспроизводства, является отсутствие на Дону с 1994 г. весенних попусков, соответствующих требованиям рыбного хозяйства.

Литература

1. Куропаткин А.П. Ретроспективные изменения и прогноз пространственной структуры поля солёности Азовского моря // Среда, биота и моделирование экологических процессов в Азовском море. Апатиты: Мурманский морской биол. ин-т КНЦ РАН, 2001. С. 72–77.
2. Гаргона Ю.М. Крупномасштабные изменения гидрометеорологических условий формирования биопродуктивности Азовского моря : автореф. дис. ... д-ра геогр. наук. Мурманск, 2003. 34 с.
3. Федоров Ю.А. Стабильные изотопы и эволюция гидросферы. М.: Истина, 1999. 370 с.
4. Федоров Ю.А., Беляев А.Г. Биогенные вещества в зоне смешения река Дон – Азовское море. Ростов н/Д.: ИнфоСервис, 2004. 108 с.
5. Аведикова Т.М., Баландина Л.Г., Воловик С.П., Иванченко И.Н., Корнеев А.А., Кукарина Л.В., Луц Г.И., Рогов С.Ф. Влияние океанографических факторов на воспроизводство и распределение проходных и полупроходных видов рыб Азовского моря // Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Л.: Гидрометеоздат, 1991. Т. 5. С. 209–215.
6. Кузнецова И.Д. Влияние изменения солёности на распространение проходных, полупроходных и морских видов рыб в Азовском море // Географы в годы войны и мира : сб. тр. М.: Перо, 2015. С. 648–652.
7. Кузнецова И.Д., Чепурная Т.А. Географические закономерности распределения и динамика промыслового запаса черноморско-азовской проходной сельди // Актуальные проблемы наук о Земле : сб. тр. II науч. конф. Ростов н/Д.: Изд-во ЮФУ, 2016. С. 174–177.
8. Могильченко В.И. Состояние запасов азово-донских сельдей и возможные их изменения при некоторых водохозяйственных мероприятиях // Тр. АЗНИИРХ. 1972. Вып. 10. 190 с.
9. Куропаткин А.П., Жукова С.В., Шишкин В.М., Бурлачко Д.С., Карманов В.Г., Лутынская Л.А., Фоменко И.Ф., Подмарева Т.И. Изменение солёности Азовского моря // Вопросы рыболовства. 2013. Т. 14, № 4 (56). С. 666–673.
10. Куропаткин А.П. Особенности гидрологического режима и рыбопродуктивность Азовского моря // Проблемы современной гидрометеорологии и геоэкологии. Ростов н/Д.: РГГМУ, 2007. С. 89–92.

References

1. Kuropatkin A.P. [Retrospective changes, and forecast the spatial structure of the salinity field of the Azov

sea]. *Sreda, biota i modelirovanie ekologicheskikh protsessov v Azovskom more* [Environment, biota and modelling of ecological processes in the sea of Azov]. Apatity: Murmanskii morskoi biol. in-t KNTs RAN, 2001, pp. 72–77.

2. Gargopa Yu.M. *Krupnomasshtabnye izmeneniya gidrometeorologicheskikh uslovii formirovaniya bioproduktivnosti Azovskogo morya* : avtoref. dis. ... d-ra geogr. nauk [Large-scale changes in hydrometeorological conditions of formation of biological productivity of the Azov sea]. Murmansk, 2003, 34 p.

3. Fedorov Yu.A. *Stabil'nye izotopy i evolyutsiya gidrosfery* [Stable isotopes and evolution of the hydrosphere]. Moscow: Istina, 1999, 370 p.

4. Fedorov Yu.A., Belyaev A.G. *Biogennye veshchestva v zone smesheniya reka Don – Azovskoe more* [Nutrients in the zone of mixing the river Don - Azov sea]. Rostov-on-Don: InfoServis, 2004, 108 p.

5. Avedikova T.M., Balandina L.G., Volovik S.P., Ivanchenko I.N., Korneev A.A., Kukarina L.V., Luts G.I., Rogov S.F. *rya* [Influence of oceanographic factors on the reproduction and distribution of anadromous and semi-anadromous fish species of the Azov sea]. *Gidrometeorologiya i gidrokhimiya morei SSSR* [Hydrometeorology and hydrochemistry of the USSR seas]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1991, vol. 5, pp. 209–215.

6. Kuznetsova I.D. [The influence of changes in salinity on the distribution of migratory, semi-migratory and marine fish species in the sea of Azov]. *Geografy v gody voiny i mira* [Geographers during the war and peace]. Proceedings. Moscow: Pero, 2015, pp. 648–652.

7. Kuznetsova I.D., Chepurnaya T.A. [Geographical regularities of distribution and dynamics of commercial stock of the Black sea - Azov herring]. *Aktual'nye problemy nauk o Zemle* [Actual problems of Earth sciences]. Proceedings of the II Scientific Conference. Rostov-on-Don: Izd-vo YuFU, 2016, pp. 174–177.

8. Mogil'chenko V.I. *Sostoyanie zapasov azovodonskikh sel'dei i vozmozhnye ikh izmeneniya pri nekotorykh vodokhozyaistvennykh meropriyatiyakh* [State of reserves of Azov - Don herring and their possible changes in some water management activities]. *Tr. AzNIIRKh*. Rostov-on-Don, 1972, Iss. 10, 190 p.

9. Kuropatkin A.P., Zhukova S.V., Shishkin V.M., Burlachko D.S., Karmanov V.G., Lutynskaya L.A., Fomenko I.F., Podmareva T.I. *Izmenenie solenosti Azovskogo morya* [Change of salinity of Azov sea]. *Voprosy rybolovstva*. 2013, vol. 14, No. 4 (56), pp. 666–673.

10. Kuropatkin A.P. [Features of the hydrological regime and fish production of the Azov sea]. *Problemy sovremennoi gidrometeorologii i geoekologii* [Problems of modern hydrometeorology and geoecology]. Rostov-on-Don: RGGMU, 2007, pp. 89–92.

УДК 631.41

DOI 10.23683/0321-3005-2018-4-92-99

МИНЕРАЛОГИЧЕСКИЙ СОСТАВ СЕРОЗЕМНЫХ ПОЧВ НАХИЧЕВАНСКОЙ АВТОНОМНОЙ РЕСПУБЛИКИ

© 2018 г. Г.Д. Мехтиев¹

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

MINERALOGICAL STRUCTURES OF SEROZEM SOILS IN NAKHCHIVAN AUTONOMIC REPUBLIC

H.D. Mehtiyev¹

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

Мехтиев Гусейн Джалал-оглы – кандидат сельскохозяйственных наук, руководитель лаборатории минералогии и химии почв, Институт почвоведения и агрохимии, Национальная академия наук Азербайджана, ул. М. Рагима, 5, г. Баку, 1073, Азербайджан, e-mail: huseyn.mehdiyev.59@mail.ru

Huseyn D. Mehtiyev - Candidate of Agricultural Sciences, Head of the Laboratory of Soils Mineralogy and Chemistry, Institute of Soil Science and Agrochemistry, National Academy of Sciences of Azerbaijan, M. Rahima St., 5, Baku, 1073, Azerbaijan, e-mail: huseyn.mehdiyev.59@mail.ru

Минералогический состав илстой фракции и качественная характеристика минералов светлых, темных, примитивных, а также малогумусовых слабоглееватых, мало- и среднесуглинистых сероземных почв центральной, восточной частей Шарурской и примитивно сероземных почв Беюк-Дюзской равнины представлены сложными неупорядоченными, смешанослойными образованиями с сегрегацией пакетов слюдистого и смектитового типов, иллитами (гидрослюдами) при слабом содержании каолинита и хлорита. Илстая фракция указанных слоистых минералов существенно изменяется в пределах профиля, характеризуя уменьшение содержания смектитовой фазы и увеличение содержания хлорита в верхнем и среднем горизонтах. В примитивных сероземных почвах Беюк-Дюзской равнины количественное содержание смектита значительное и распределяется между верхним и нижним горизонтами.

В верхнем и среднем горизонтах содержание иллита (гидрослюды) увеличивается в слабоглееватых, мало- и среднесуглинистых и примитивных сероземных почвах. В илстом материале встречаются также примеси тонкодисперсного кварца, калиевых, полевых шпатов. Аналогичная ассоциация отмечается также при качественном определении минералов.

Полученные результаты качественного состава минералов предоставляют нам возможность характеризовать генезис почв и их классификацию.

Ключевые слова: сероземы, глинистые отложения, смешанослойные минералы, иллит (гидрослюда), каолинит, хлорит, гумус.

Mineralogical composition of silty fraction, qualitative definition of minerals in the bright, dark and primitive serozem soils from the less humic weak gleyey, less and medium loamy soils in the Central, Eastern part of Sharur and primitive serozem soils in the Boyukduz plain are presented by complex unregulated, mixed-layer formation with segregation packets of the slude and smektite types of illite (hidroslude) under diatocedric types with weak caolinite, chlorite. The silty fraction of the noted linear silicate essentially is changed in limits of profile, fixed by the decrease of smektite phase content in the central part of the Sharur plain and increase of chlorite content on the upper and middle horizon. But the smektite content is high and is distributed on the upper and low horizons in the eastern primitive serozem soils of the Boyuk-Duz plain.

The illite (hidroslude) content gets increased on the upper and middle horizons in the central, Eastern primitive serozem soils of the Boyuk-Duz plain. A mixture of thin disperse kvartz, potassium, field shpats in the silty material is noted.

The obtained results of the qualitative definition gives a whole characteristics about soil genesis and their classification.

Keywords: serozem, clayey residue, mixed-layer minerals, illite (hidroslude), caolinite, chlorite, humus.

Введение

Сероземные почвы в Азербайджане рассматривались как зональные почвы Кура-Араксинской, Прикаспийской низменности и Нахичеванской равнины [1]. Широкое распространение сероземных почв в указанных равнинах связано с близостью их минералогического состава, а также влиянием аридных экологических факторов на их формирование. Вероятно, как следствие такого ограниченного подхода, отсутствие более детальных полевых диагностических характеристик для типа сероземных почв создало сложность в систематике и классификации этих почв.

Теоретический анализ результатов исследований, посвященных изучению генезиса сероземных почв, а также климатические условия развития почв в сухостепной зоне Азербайджана требуют более детальной разработки систематики и номенклатуры этих почв.

Актуальными являются и более точное картирование ареалов распространения сероземных почв, и создание почвенных карт полупустынных зон [2–4].

Сероземы выделяются в Муганской, Ширванской, Карабахской и Мильской степях на территориях с количеством осадков меньше 300 мм в год [1].

В настоящее время данные почвы Азербайджана изучены многими авторами (М.П. Бабаев, М.Е. Салаев, В.Р. Волобуев, Г.Ш. Мамедов, Р.Г. Мамедов, И.Ш. Искендеров и др.), которые предлагают новые классификации и систематики [1, 5–8].

Была составлена классификация типа сероземных почв Азербайджана, в том числе Нахичеванской АР, где различают следующие подтипы: сероземы светлые, сероземы обыкновенные, сероземы давно орошаемые, сероземы примитивные [9].

Изучение минералогического состава глинистых почв и их тонкодисперсных фракций проводится геологами и почвоведом для решения вопросов генезиса этих почв, которые не нашли достаточно научного освещения в Азербайджане.

По полученным обобщенным данным минералогического состава было выявлено, что в исследуемых почвах содержатся глинистые минералы, включающие диоктоэдрический иллит (гидрослюда), с признаками сложной неупорядоченной структуры, с большими блоками пакетов смектитового и слюдистого типов смешанослойных образований, триоктаэдрических хлорита, каолинита, кварца и полевого шпата. Глинистый материал в сероземных почвах имеет отличительные черты, которые преимущественно касаются количествен-

ных соотношений минеральных фаз, соотношения числа пакетов в смешанослойных слюда-смектитовых (хлоритовых) образованиях, а также структурного состояния минералов.

Цель работы – определение минералогического состава илистой фракции сероземных почв центральной и восточной частей Шарурской и Беюк-Дюзской равнины Республики Азербайджан.

Объекты и методы исследования

Исследование минералогического состава проводилось на сероземах светлых и темных Шарурской равнины, а также на примитивных сероземных почвах Беюк-Дюзской равнины.

Изучение физико-химических свойств почв включало следующие виды анализов. Исследование гранулометрического состава почвы проводили методом пипетки с обработкой пирофосфатом натрия, органического углерода – по Н.В. Тюрину, объемной массы – по методу Н.А. Качинского, естественной влажности – методом высушивания почв в термостате, гигроскопической влаги – термическим методом, поглощенного кальция и магния – по методу Д.Н. Иванова для карбонатных почв (путем вытеснения хлоритом натрия), pH водной суспензии – потенциометрическим методом [2].

Для анализа минералогического состава илистой фракции и качественного определения минералов выбраны почвенные объекты, сформировавшиеся на разных почвообразующих породах.

Сероземы светлые (разрез 3) расположены в центральной части Шарурской равнины, сероземы темные (разрез 4) – в восточной части Шарурской равнины, сероземы примитивные (разрез 5) заложены в северо-восточной части Беюк-Дюзской равнины Нахичеванской АР.

Минералогические исследования выполнены по методике Н.И. Горбунова [10], которая была разработана в Институте почвоведения и агрохимии Национальной АН Азербайджана.

Ориентированные препараты получили путем седиментации фракции на покровные стекла. Рентгеновская съемка выполнена с использованием дифрактометра MOM-1500 (Венгрия).

Использовано CuK_α -излучение. Анализ выполнен в области углов 2° – 52° со скоростью $0,02^\circ$ в 1 с. Режим съемки: напряжение – 40 кВ, сила тока – 30 мА. Ориентированные препараты снимали в воздушно-сухом состоянии Na-форма после насыщения парами этиленгликоля.

Результаты и обсуждение

Физико-химическое исследование светло-, темно- и примитивно-сероземных почв в Шарурской и Беюк-Дюзской равнинах. Фундаментальное решение вопросов систематического положения сероземов является предметом специального научного изучения и обсуждения. Понятие «сероземные почвы» широко используется в крупномасштабных почвенных исследованиях, они отображены на карте на больших площадях орошаемой зоны Кура-Араксинской низменности и Нахичеванской АР.

Используя материалы новейших исследований крупномасштабных почвенных съемок, серии географических карт по типам климата и агроклиматическим ландшафтам Азербайджана, были внесены существенные коррективы для выделения ареалов сероземных почв. Ареалы ограничены их пределами в аридной части сухостепной полупустынной зоны Апшерона и Юго-Восточной Ширвани, где имеются условия для развития сероземных почв в строго автоморфных условиях при непромывном водном режиме [1].

Для сероземов Азербайджана, в том числе Нахичеванской АР, характерно наличие признаков литогенности, что непосредственно связано с относительной молодостью развития этих почв. На легких породах (суглиносупеси, известковые песчаники и др.) развиваются обычно незасоленные, сравнительно блеклые и легкие почвы, тогда как на соленосных тяжелоглинистых породах формируются солончаковые и солонцеватые виды сероземных почв.

В центральной части Шарурской равнины естественная влажность изменяется в пределах 3,27–12,33 %. В темно-сероземных почвах восточного склона Шарурской равнины – 5,50–25,89 %. Примитивно-сероземные почвы в Беюк-Дюзской равнине – 5,18–9,42 %.

Естественная полевая влажность сероземных темных почв восточного склона Шарурской равнины высокая, она тесно связана с влажностью генетических горизонтов. Самая низкая естественная влажность отмечается в примитивно-сероземных почвах Беюк-Дюзской равнины и зависит от сильного сезонного иссушения почв данного региона (таблица).

Основные физико-химические показатели сероземных почв центральной и восточной частей Шарурской и Беюк-Дюзской равнин Нахичеванской АР / Main physical and chemical indicators of the gray soils of the Central and Eastern parts of the Sharur and Beyuk-Dyuz plains of the Nakhchivan Autonomous Republic

№ разреза	Глубина, см	Естественная влажность, %	Гумус, %	pH	Объемная масса, г/см ³	Гигроскопическая влага, %	CO ₂ , %	CaCO ₃ по CO ₂ , %	Сумма обменных оснований, мм/100 г почв	Обменные катионы, мм/100 г почв			Содержание частиц	
										Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	N ⁺	Ил (<0,001) %	Физ. глина (<0,01), %
3. Светло-сероземные почвы Шарурской равнины Нахичеванской АР	A 0–5	3,27	0,94	7,4	Не опр.	2,39	10,64	24,62	23,55	20,6	2,4	0,55	5,60	25,76
	A/B 5–26	5,39	0,64	7,6	1,28	3,18	10,57	24,62	28,31	23,9	3,3	1,11	6,20	41,12
	B ₁ 26–47	7,38	0,64	7,8	1,38	3,71	10,28	23,36	24,03	21,1	1,9	1,03	16,52	45,64
	B ₂ 47–74	8,95	0,47	7,4	1,40	3,75	10,55	23,98	17,87	13,7	3,7	0,47	16,40	50,20
	B/C 74–110	12,33	0,34	7,4	Не опр.	3,27	10,80	24,08	19,08	16,2	1,3	1,58	10,84	39,00
	C 110–130	6,27	0,30	7,3	Не опр.	2,86	10,90	24,95	19,85	11,9	6,7	1,65	9,36	33,06
4. Темно-сероземные почвы Шарурской равнины Нахичеванской АР	A 0–22	5,50	1,26	7,7	Не опр.	3,10	10,42	23,89	20,85	10,2	9,7	0,95	15,48	42,68
	A/B 22–41	10,65	1,20	7,9	1,02	3,69	9,70	22,05	16,88	8,2	8,2	0,48	11,60	32,46
	B ₁ 41–70	14,06	1,00	8,5	1,19	3,80	10,71	24,35	16,80	12,4	5,0	0,80	15,72	49,00
	B/C 70–97	17,42	0,80	8,8	Не опр.	4,09	10,80	24,57	14,01	9,8	5,6	0,61	21,68	54,96
	C 97–130	25,89	0,54	8,9	Не опр.	4,24	11,24	25,59	18,68	16,0	1,8	1,08	18,00	55,80
5. Примитивно-сероземные почвы Беюк-Дюзской равнины Нахичеванской АР	A 0–10	5,18	0,37	7,7	1,4	3,19	12,33	28,01	25,08	21,2	2,5	1,38	15,92	40,40
	A/B 10–24	5,33	0,28	7,8	1,36	3,89	12,09	27,46	25,02	20,0	2,0	1,02	20,32	43,44
	B ₁ 24–51	7,03	0,25	7,6	1,31	4,23	13,00	29,55	24,21	21,2	2,0	1,01	23,60	49,40
	B/C 81–87	8,40	0,19	7,6	Не опр.	4,40	11,70	26,59	25,45	21,0	3,0	1,43	18,56	43,16
	C 87–120	9,42	0,11	7,8	Не опр.	5,53	10,55	25,98	28,63	19,0	7,8	1,83	24,28	50,48

Содержание гумуса в светлых сероземных почвах центральной части Шарурской равнины низкое и изменяется в пределах 0,30–0,94 %, а в темно-сероземных почвах в восточной части Шарурской равнины – в пределах 0,54–1,26 %. Прimitивные сероземные почвы Беюк-Дюзской равнины по показателям гумуса отличаются низкими величинами и изменяются в пределах 0,11–0,37 %.

Реакция среды светло-сероземных почв центральной части Шарурской равнины слабощелочная и изменяется в пределах 7,3–7,8, в темно-сероземных почвах восточного склона Шарурской равнины составляет 7,7–8,9, а в примитивных сероземных почвах Беюк-Дюзской равнины реакция среды слабощелочная и изменяется в пределах 7,6–7,8.

Плотность светло-сероземных почв в центральной части Шарурской равнины изменяется в пределах 1,28–1,40 г/см³, а в темно-сероземных почвах восточного склона Шарурской равнины её значение уменьшается до 1,02–1,29 г/см³. Прimitивные сероземные почвы Беюк-Дюзской равнины по содержанию дисперсных частиц варьируют в пределах 1,31–1,40 г/см³, т.е. идентичны почвам центральной части Шарурской равнины, что, вероятно, связано с гранулометрическим составом этих почв и схожим содержанием органического вещества.

Содержание карбонатов кальция в примитивно-сероземных почвах Беюк-Дюзской равнины очень низкое и изменяется в пределах 10,55–13,00 %, а в светло- и темно-сероземных почвах центральной и восточной частей Шарурской равнины показатели средние и варьируют в пределах 23,36–24,95 и 22,05–25,59 %.

Сумма поглощенных оснований в светлых и примитивных сероземах изменяется в диапазоне 19,08–28,31 мг/экв. на 100 г, т.е. эти почвы характеризуются как среднеобеспеченные.

По количеству физической глины примитивные сероземные почвы Беюк-Дюзской равнины отличаются высоким содержанием, значения изменяются в пределах 15,92–24,28 %. Светло-сероземные почвы центральной части Шарурской равнины и темно-сероземные почвы в восточной части Шарурской равнины отличаются динамической вариацией и изменяются в пределах от 5,60–16,5 до 11,60–21,68 %.

Гранулометрический состав в примитивно-сероземных почвах Беюк-Дюзской равнины характеризуется слабосупесчаным составом и изменяется в пределах 40,40–50,48 %, а в светло- и темно-

сероземных почвах центральной и восточной частей Шарурской равнины он отличается слабо- и среднесупесчаным составом и варьирует в пределах 25,76–50,20 и 32,48–55,89 %.

Минералогический состав илстой фракции и качественное определение минералов светло-, темно- и примитивно-сероземных почв Шарурской и Беюк-Дюзской равнин. Был изучен минералогический состав почв илстой фракции и проведено качественное определение минералов почв сухих субтропических степей Нахичеванской АР.

Минералогический состав илстой фракции в светло-сероземных почвах в центральной части Шарурской равнины характеризуется содержанием неупорядоченных, смешанослойных образований магнезиального хлорита и изменяется в рентгенодифрактограммах рефлексами с пиками 1,400; 0,710; 0,474 и 0,354 нм.

При сольватации с глицерином минерал магнезиального хлорита увеличивает свой показатель до 1,500 нм, а при прокаливании до $t=550^{\circ}\text{C}$ его содержание сильно уменьшается и составляет 1,00 нм. Смешанослойные минералы типа смектита в материнской породе резко увеличиваются и образуют смешанослойные пакеты типа смектит-хлорита.

При сольватации с глицерином содержание магнезиального хлорита часто увеличивается, что, видимо, связано с наличием сопутствующих минералов типа хлорита-монтмориллонита. При температуре ниже 550°C он переходит в минерал иллита (гидрослюды).

Содержание минералов высокодисперсных фракций иллита (гидрослюды) в светло-сероземных почвах центральной части Шарурской равнины высокое. Они встречаются по всему почвенному профилю. На рентгенодифрактограммах эти минералы диагностируются по рефлексам 1,00, 0,500 и 0,334 нм. При насыщении с глицерином и этиленгликолем, а также при прокаливании до температуры $t=550^{\circ}\text{C}$ содержание минералов иллита (гидрослюды) не изменяется и соответствует первому порядку минералов иллита (гидрослюды).

Каолинит в светло-сероземных почвах илстой фракции диагностируется на рентгенодифрактограммах по соответствующим 0,710 и 0,358 нм.

При сольватации с глицерином и прокаливании минералов при $t=550^{\circ}\text{C}$ его содержание резко изменяется (рис. 1–3).

Из первичных минералов в светло-сероземных почвах содержатся кварц и полевой шпат.

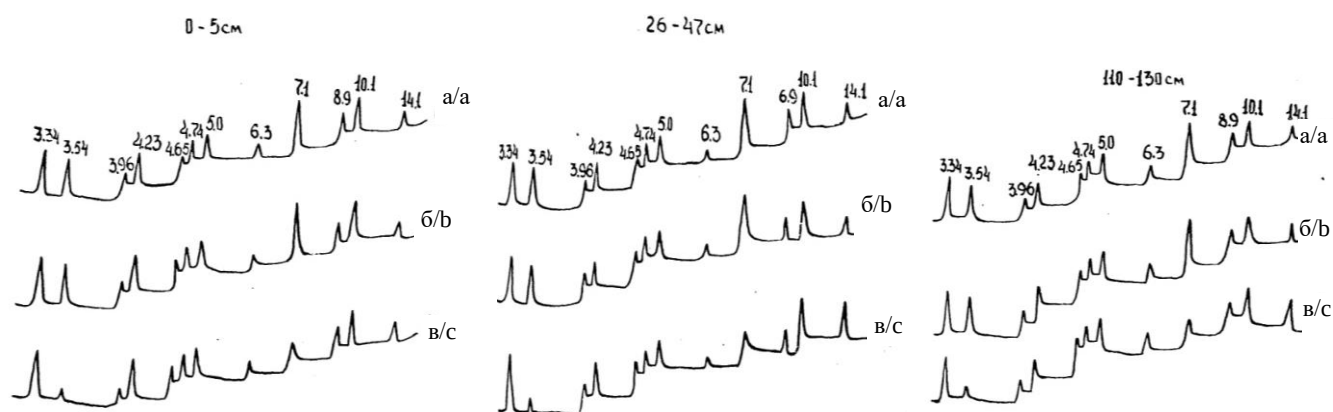


Рис. 1. Рентгенодифрактограмма илистой фракции <0,001 мм светло-сероземных почв, разрез 3: а – воздушно-сухая почва; б – после насыщения этиленгликолем; в – после прокаливании при $t=550\text{ }^{\circ}\text{C}$ / Fig. 1. X-ray diffraction pattern of the clay fraction <0.001 mm of light-gray soil, section 3: a - air-dry soil; b - after saturation with ethylene glycol; c - after calcination at $t=550\text{ }^{\circ}\text{C}$

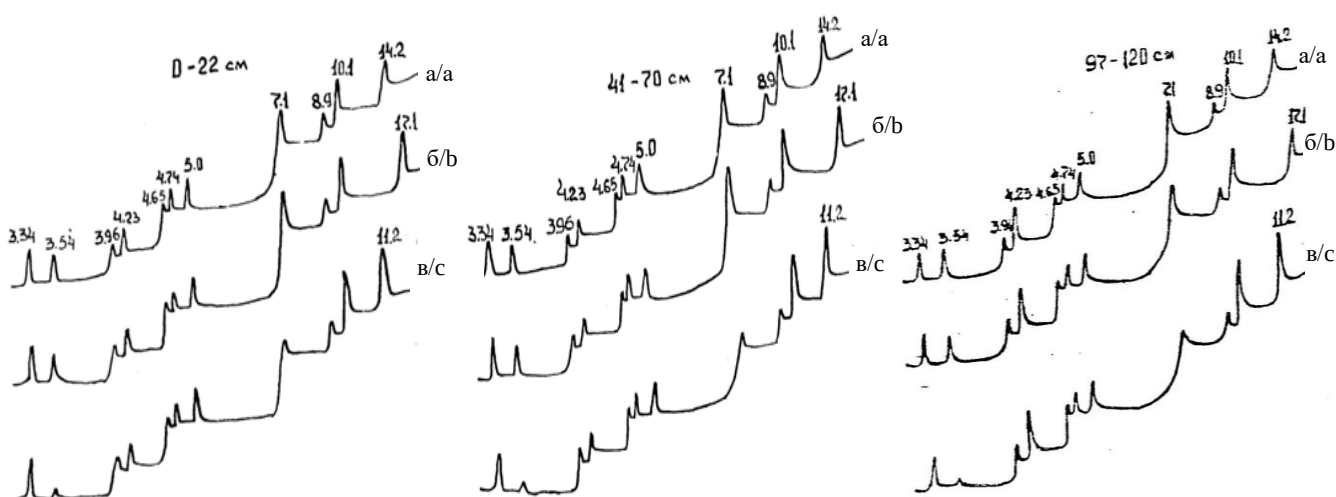


Рис. 2. Рентгенодифрактограмма илистой фракции <0,001 мм темно-сероземных почв, разрез 4: а – воздушно-сухая почва; б – после насыщения этиленгликолем; в – после прокаливании при $t=550\text{ }^{\circ}\text{C}$ / Fig. 2. X-ray diffractogram of the clay fraction <0.001 mm dark gray soil, section 4: a - air-dry soil; b - after saturation with ethylene glycol; c - after calcination at $t=550\text{ }^{\circ}\text{C}$

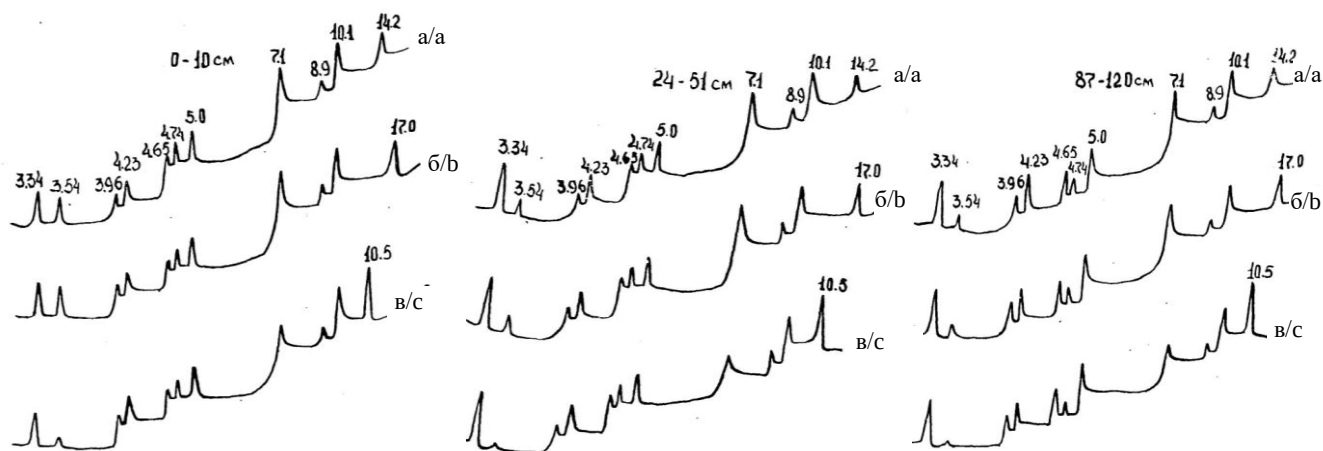


Рис. 3. Рентгенодифрактограмма илистой фракции <0,001 мм примитивно-сероземных почв, разрез 5: а – воздушно-сухая почва; б – после насыщения этиленгликолем; в – после прокаливании при $t=550\text{ }^{\circ}\text{C}$ / Fig. 2. X-ray diffractogram of the clay fraction <0.001 mm primitively gray soil, section 5: a - air-dry soil; b - after saturation with ethylene glycol; c - after calcination at $t=550\text{ }^{\circ}\text{C}$

Сравнение светло-сероземных почв в центральной части Шарурской равнины с темно-сероземными почвами показало, что состав минералов илистой фракции восточной части Шарурской равнины представлен минералами монтмориллонитовой группы. В рентгенодифрактограммах отмечаются по следующим пикам: 1,400; 0,700; 0,474 и 0,358 нм.

При сольватации с глицерином его пик часто увеличивается и составляет 1,750 нм, а при прокаливании его пик уменьшается [10–14].

Формирование типичных сероземных почв восточной части Шарурской равнины унаследовано от суглинков. Состав минералов и их профильное распределение существенно меняются по генетическим горизонтам (41–70 см). В первых отмечается относительное накопление хлорита, иллита (гидрослюд) и слабое – каолинита. В тонкодисперсную часть попадают кварц, калиевые, полевые шпаты, плагиоклазы, роговая обманка. Таким образом, распределение по профилю сложных смешанослойных образований со смектитовым пакетом носит элювиальный характер.

Содержание смешанослойных образований типа иллита (гидрослюд) в темно-сероземных почвах восточной части Шарурской равнины высокое и обнаруживается практически во всех горизонтах этих почв. В рентгенодифрактограммах его значения изменяются в рефлексах 1,01; 0,500 и 0,334 нм. При насыщении этиленгликолем и прокаливании при 550 °С их содержание не изменяется. Они остаются в составе минералов первого порядка.

Минералы группы каолинита проявляются на рентгенодифрактограммах по отмеченным пикам 0,710 и 0,358 нм. При насыщении глицерином и прокаливании до 550 °С их содержание резко уменьшается. Первичные минералы в этих почвах состоят из минералов кварца и калиево-полевых шпатов.

Минералогический состав илистой фракции в примитивно-сероземных почвах Беюк-Дюзской равнины состоит из минерала монтмориллонита. На рентгенодифрактограммах он обнаруживается по рефлексам 1,400; 0,700; 0,474 и 0,358 нм.

При насыщении глицерином его пик увеличивается до 1,700 нм. А при прокаливании до 550 °С рефлекс пиков сильно уменьшается до предела 1,00 нм. При увеличении пика монтмориллонита образуются смешанослойные образования типа монтмориллонитовой группы, а при сокращении его пик составляет 1,00 нм и превращается в минерал со смешанослойными образованиями типа иллита (гидрослюд) – монтмориллонита.

Высокодисперсные и слоистые минералы илистой фракции в рентгенодифрактограммах проявляются по рефлексам 1,00; 0,500 и 0,335 нм, при насыщении глицерином и прокаливании до 550 °С градусов пик иллита (гидрослюд) не изменяется, и остаются в первом порядке минералов иллита (гидрослюд).

Каолинит в илистой фракции в примитивно-сероземных почвах Беюк-Дюзской равнины в рентгенодифрактограммах изменяется по рефлексам между 0,700 и 0,554 нм. При насыщении с этиленгликолем и глицерином пики рефлексов каолинита резко уменьшаются до 0,354 нм.

Изучено также качественное определение минералов в исследуемых почвах для полного обоснования количественного содержания минералов [15–20].

Хлорит при качественном определении присутствует в светло-сероземных почвах во всех горизонтах: А 0–5, В₁ 26–47 и С 110–130 см, d_{001} – 1,62, d_{002} – 2,97, d_{003} – 1,62 %. Содержание иллита (гидрослюд) составляет d_{001} – 3,6, d_{002} – 2,8, d_{003} – 4,4 %.

Содержание минералов группы каолинита по горизонтам изменяется в пределах d_{001} – 1,65 %, d_{002} – 1,35, а содержание минералов монтмориллонита в нижних горизонтах С 110–130 см изменяется, составляет 0,9 %.

При качественном определении минералов в темно-сероземных почвах восточной части Шарурской равнины обнаруживаются минералы монтмориллонита d_{001} – 0,6 %, d_{002} – 2,00, d_{003} – 0,6. Иллита (гидрослюд) представлен по всем горизонтам: А 0–22, В 41–70 и С 97–130 см, d_{001} – 4,00 %, d_{002} – 2,80, d_{003} – 2,40, каолинита d_{001} – 3,00 %, d_{002} – 0,90.

При изучении качественного состава минералов в примитивно-сероземных почвах Беюк-Дюзской равнины выявлены смешанослойные минералы монтмориллонитовой группы, которые изменяются в пиках А 0–10; В₁ 24–51; С 87–120 см, d_{001} – 0,8, d_{002} – 1,4, d_{003} – 0,6 %, иллита (гидрослюд) – d_{001} – 4,8, d_{002} – 2,8, d_{003} – 3,6 %, каолинита – d_{001} – 2,1 %, d_{002} – 0,75.

Выводы

1. Установлено, что светло-сероземные почвы характеризуются относительной молодостью почвообразовательного процесса. Они развиваются в условиях непромывного водного режима под полынно-эфемерной растительностью. Профиль крайне монотонный, иллювиально-карбонатный горизонт выделяется очень слабо, карбонатные выделения мало заметны, вскипает с глубины

С 110–130 см 24,95 %, распределение карбонатов равномерное, содержание гумуса низкое, равное 0,30–0,94 %, емкость поглощения очень низкая – 11,9–23,9 мМ/ 100 г почв.

В восточной части Шарурской равнины темные сероземы по сравнению со светлыми отличаются более выраженным профилем, особенно по окрашенности гумусового горизонта. Характерны высокая биологическая обработанность и четко выраженная микроструктурность, распределение карбонатов неравномерно, увеличивается в нижних горизонтах.

Примитивно-сероземные почвы в восточной части Беюк-Дюзской равнины широко представлены на слабобрасчлененных поверхностях, формирующихся под солянково-эфемерной растительностью в условиях непромывного режима. Распределение карбонатов равномерное, содержание гумуса минимальное 0,11–0,37 %.

2. Минералогический состав светло-сероземных почв в центральной части Шарурской равнины представлен минералами иллита (гидрослюды) – смешанослойные образования типа слюда-сметит. Также фиксируется примесь неупорядоченного железистого хлорита, тонкодисперсного кварца, калиевых, полевых шпатов, плагиоклазов. В восточной части Шарурской равнины отмечается накопление минералов монтмориллонита, иллита (гидрослюды) и каолинита.

Илистая фракция примитивно-сероземных почв в Беюк-Дюзской равнине в профиле <1 мкм состоит из монтмориллонита, иллита (гидрослюды) и сложных неупорядоченных смешанослойных пакетов с преобладанием последних.

3. Выявлено, что минералы хлорита в светло-сероземных почвах в центральной части Шарурской равнины представлены в следующих интервалах: d_{001} – 1,62 %, d_{002} – 2,97, d_{003} – 1,62 %; иллит (гидрослюда) – d_{001} – 3,6 %, d_{002} – 2,8, d_{003} – 4,4 %; каолинит – d_{001} – 1,65 %, d_{002} – 1,35. Темно-сероземные почвы восточного склона Шарурской равнины по содержанию монтмориллонита проявляются в пиках d_{001} – 0,6 %, d_{002} – 2,00, d_{003} – 0,6 %; иллит (гидрослюда) d_{001} – 4,00 %, d_{002} – 2,80, d_{003} – 2,40 %; каолинит d_{001} – 2,0, d_{002} – 0,90 %. В примитивно-сероземных почвах Беюк-Дюзской равнины содержание монтмориллонита проявляется рефлексом d_{001} – 0,8 %, d_{002} – 1,4, d_{003} – 0,6 %; иллит (гидрослюда) d_{001} – 4,8 %, d_{002} – 2,8, d_{003} – 3,6 %; каолинит d_{001} – 2,1 %, d_{002} – 0,75.

Значительная часть сероземных почв используется в орошаемом земледелии и является одним из основных земельных фондов для выращивания зерновых и других сельскохозяйственных культур.

Литература

1. Салаев М.Э. Диагностика и классификация почв Азербайджана. Баку: Элм, 1991. 237 с.
2. Аринушкина Е.А. Руководство по химическому анализу почв. М.: Изд-во МГУ, 1961. С. 490.
3. Алиев Г.А., Зейналов А.К. Почвы Нахичеванской АССР. Баку: АзерНИИР, 1988. С. 237.
4. Розанов А.Н. Сероземы Средней Азии. М.: Изд-во АН СССР, 1951. 459 с.
5. Бабаев М.П., Гасанов В.Г., Джафарова Ч.М., Гусейнова С.М. Морфологическая диагностика, номенклатура и систематика почв Азербайджана. Баку: Элм, 2011. 448 с.
6. Волобуев В.Р. Система почв мира. Баку: Элм, 1973. 306 с.
7. Мамедов Г.Ш. Земельная реформа в Азербайджане: правовые и научно-экономические вопросы. Баку: Элм, 2000. 371 с.
8. Мамедов Р.Г. Агрофизическая характеристика почв Приараксинской полосы. Баку: Элм, 1970. 320 с.
9. Arbestain M.C., Mourenza C., Alvarez E., Macias F. Influence of parent material and soil type on the root chemistry of forest species grown on acid soils // Forest Ecology and Management. 2004. Vol. 193. P. 307–320.
10. Горбунов Н.И. Высокодисперсные минералы и методы их изучения. М.: Изд-во АН СССР, 1963. 301 с.
11. April R., Keller D. Mineralogy of the rhizosphere in forest soils of the eastern United states // Biogeochemistry. 1990. Vol. 9. P. 1–18.
12. Arocena J.M., Glowa K.R., Massicotte H.B, Lavkulich L. Chemical and mineral composition of ectomycorrhizosphere soils of subalpine fir (*Abies lasiocarpa* (Hook Nutt) in the E horizon of a Luvisol // Canadian J. Soil Science. 1999. Vol. 79. P. 25–35.
13. Соколова Т.А., Толмешта И.И., Русакова Е.С., Максимова Ю.Г., Мокроусова П.А., Блинецов К.Ю. Химические свойства гумусовых горизонтов подзолистых и аллювиальных дерново-глеевых почв в ризосфере в годы с разными погодными условиями // Многолетние процессы в природных комплексах заповедников России. Великие Луки, 2012. С. 68–73.
14. Courchesne F., Gobran G.R. Mineralogical Variations of Bulk and Rhizosphere Soils from a North Spruce // Soil Science Society Am. J. 1997. Vol. 61. P. 1245–1249.
15. Мехмиев Г.Д. Процентное содержание минералогического состава лугово-степных почв южной части Приараксинской полосы Нахичеванской Автономной Республики // Вестн. Волгоградского гос. ун-та. Естеств. науки. 2016. № 4 (18). С. 48–58.
16. Мехмиев Г.Д. Минералогический и микроморфологический состав илистой фракции темно-сероземных почв центральной части Нахичеванской Автономной Республики // Вестн. Белорусской гос. сельскохозяйственной академии. 2016. № 4. С. 61–64.
17. Аранбаев М.П., Малаев И.Р., Ниязова М.М. Минералогический состав сероземов и коричневых

почв южной части Туранской фации. Ашхабад: Ылым, 1972. 281 с.

18. Гулиев А.Г. Экомелиоративная оценка орошаемых почв Нахичеванской Автономной Республики. Нахичевань, 2014. 167 с.

19. Искендеров И.Ш. Влияние термических процессов, происходящих в почве, на ее физико-химические свойства. Баку: Элм, 1972. 66 с.

20. Шакури Б.К., Марданлы А.Р. Природные ресурсы Нахичеванской Автономной Республики и их охрана. Баку, 2005. 343 с.

Reference

1. Salaev M.E. *Diagnostika i klassifikatsiya pochv Azerbaidzhana* [Diagnosis and classification of soils of Azerbaijan]. Baku: Elm, 1991, 237 p.

2. Arinushkina E.A. *Rukovodstvo po khimicheskomu analizu pochv* [Guide to chemical analysis of soils]. Moscow: Izd-vo MGU, 1961, p. 490.

3. Aliev G.A., Zeinalov A.K. *Pochvy Nakhichevanskoi ASSR* [Soils of the Nakhichevan ASSR]. Baku: AzerNIIR, 1988, p. 237.

4. Rozanov A.N. *Serozemny Srednei Azii* [Serozems of Central Asia]. Moscow: Izd-vo AN SSR, 1951, 459 p.

5. Babaev M.P., Gasanov V.G., Dzhaferova Ch.M., Guseinova S.M. *Morfologicheskaya diagnostika, nomenklatura i sistematika pochv Azerbaidzhana* [Morphological diagnostics, nomenclature and systematics of soils of Azerbaijan]. Baku: Elm, 2011, 448 p.

6. Volobuev V.R. *Sistema pochv mira* [System of soils of the world]. Baku: Elm, 1973, 306 p.

7. Mamedov G.Sh. *Zemel'naya reforma v Azerbaidzhane: pravovye i nauchno-ekonomicheskie voprosy* [Land reform in Azerbaijan: legal and scientific-economic issues]. Baku: Elm, 2000, 371 p.

8. Mamedov R.G. *Agrofizicheskaya kharakteristika pochv Priaraksinskoi polosy* [Agrophysical characteristics of soils of Arax strip]. Baku: Elm, 1970, 320 p.

9. Arbestain M.C., Mourenza C., Alvarez E., Macias F. Influence of parent material and soil type on the root chemistry of forest species grown on acid soils. *Forest Ecology and Management*. 2004, vol. 193, pp. 307-320.

10. Gorbunov N.I. *Vysokodispersnye mineraly i metody ikh izucheniya* [Highly dispersed minerals and methods of their study]. Moscow: Izd-vo AN SSSR, 1963, 301 p.

11. April R., Keller D. Mineralogy of the rhizosphere in forest soils of the eastern United states. *Biogeochemistry*. 1990, vol. 9, pp. 1-18.

12. Arocena J.M., Glowa K.R., Massicotte H.B., Lavkulich L. Chemical and mineral composition of ectomycorrhizosphere soils of subalpine fir (*Abies lasiocarpa* (Hook Nutt) in the E horizon of a Luvisol. *Canadian J. Soil Science*. 1999, vol. 79, pp. 25-35.

13. Sokolova T.A., Tolpeshta I.I., Rusakova E.S., Maksimova Yu.G., Mokrousova P.A., Bliznetsov K.Yu. [Chemical properties of humus horizons of podzolic and alluvial sod-gley soils in the rhizosphere in years with different weather conditions]. *Mnogoletnie protsessy v prirodnikh kompleksakh zapovednikov Rossii* [Long-term processes in natural complexes of nature reserves of Russia]. Velikie Luki, 2012, pp. 68-73.

14. Courchesne F., Gobran G.R. Mineralogical Variations of Bulk and Rhizosphere Soils from a North Spruce. *Soil Science Society Am. J.* 1997, vol. 61, pp. 1245-1249.

15. Mekhtiev G.D. Protsentnoe sodержanie mineralogicheskogo sostava lugovo-stepnykh pochv yuzhnoi chasti Priaraksinskoi polosy Nakhichevanskoi Avtonomnoi Respubliki [Percentage of mineralogical composition of meadow-steppe soils of the southern part of the Arax strip of the Nakhichevan Autonomous Republic]. *Vestn. Volgogradskogo gos. un-ta. Estestv. nauki*. 2016, No. 4 (18), pp. 48-58.

16. Mekhtiev G.D. Mineralogicheskii i mikromorfologicheskii sostav ilistoi fraktsii temno serozemnykh pochv tsentral'noi chasti Nakhichevanskoi Avtonomnoi Respubliki [Mineralogical and micromorphological composition of silt fraction of dark gray soils of the Central part of Nakhichevan Autonomous Republic]. *Vestn. Belorusskoi gos. sel'skokhoz. akademii*. 2016, No. 4, pp. 61-64.

17. Aranbaev M.P., Malaev I.R., Niyazova M.M. *Mineralogicheskii sostav serozemov i korichnevyykh pochv yuzhnoi chasti Turanskoi fatsii* [Mineralogical composition of the serozems and brown soils of the southern part of the Turan facies]. Ashkhabad: Ylym, 1972, 281 p.

18. Guliev A.G. *Ekomeliorativnaya otsenka oroshayemykh pochv Nakhichevanskoi Avtonomnoi Respubliki* [Ammeliorate assessment of the irrigated soils of the Nakhichevan Autonomous Republic]. Nakhichevan, 2014, 167 p.

19. Iskenderov I.Sh. *Vliyanie termicheskikh protsessov, proiskhodyashchikh v pochve, na ee fiziko-khimicheskie svoistva* [Influence of thermal processes occurring in the soil on its physical and chemical properties]. Baku: Elm, 1972, 66 p.

20. Shakuri B.K., Mardanly A.R. *Prirodnye resursy Nakhichevanskoi Avtonomnoi Respubliki i ikh okhrana* [Natural resources of Nakhchevan Autonomous Republic and their protection]. Baku, 2005, 343 p.

УДК 550.461; 556.314

DOI 10.23683/0321-3005-2018-4-100-106

ГИДРОХИМИЯ ГРУППЫ СОЛЕНЫХ ОЗЕР СТАВРОПОЛЬСКОГО КРАЯ*

© 2018 г. Ю.А. Федоров¹, Д.Н. Гарькуша¹, Р.Г. Трубник¹, Б.В. Талпа¹

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

THE HYDROCHEMISTRY A FEW SALT LAKES OF THE STAVROPOL REGION

Yu.A. Fedorov¹, D.N. Gar'kusha¹, R.G. Trubnik¹, B.V. Talpa¹

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

Федоров Юрий Александрович – доктор географических наук, профессор, главный научный сотрудник, заведующий кафедрой физической географии, экологии и охраны природы, Институт наук о Земле, Южный федеральный университет, ул. Зорге, 40, г. Ростов-на-Дону, 344090, Россия, e-mail: fedorov@sfedu.ru

Yury A. Fedorov - Doctor of Geography, Professor, Main Researcher, Head of the Department of Physical Geography, Ecology and Environment Protection, Institute of Earth Sciences, Southern Federal University, Zorge St., 40, Rostov-on-Don, 344090, Russia, e-mail: fedorov@sfedu.ru

Гарькуша Дмитрий Николаевич – кандидат географических наук, доцент, ведущий научный сотрудник, Институт наук о Земле, Южный федеральный университет, ул. Зорге, 40, г. Ростов-на-Дону, 344090, Россия, e-mail: gardim1@yandex.ru

Dmitry N. Gar'kusha - Candidate of Geography, Associate Professor, Leading Researcher, Institute of Earth Sciences, Southern Federal University, Zorge St., 40, Rostov-on-Don, 344090, Russia, e-mail: gardim1@yandex.ru

Трубник Роман Геннадьевич – младший научный сотрудник, Институт наук о Земле, Южный федеральный университет, ул. Зорге, 40, г. Ростов-на-Дону, 344090, Россия, e-mail: truroman@sfedu.ru

Roman G. Trubnik - Junior Researcher, Institute of Earth Sciences, Southern Federal University, Zorge St., 40, Rostov-on-Don, 344090, Russia, e-mail: truroman@sfedu.ru

Талпа Борис Васильевич – ведущий специалист, Институт наук о Земле, Южный федеральный университет, ул. Зорге, 40, г. Ростов-на-Дону, 344090, Россия, e-mail: talpabv@gmail.com

Boris V. Talpa - Leading Specialist, Institute of Earth Sciences, Southern Federal University, Zorge St., 40, Rostov-on-Don, 344090, Russia, e-mail: talpabv@gmail.com

Проведены гидрохимические исследования рапы группы сульфидных соленых озер Ставропольского края. Определены такие показатели, как температура, жесткость, минерализация, отношение сульфатов и хлоридов к минерализации, а также ионный состав рапы. Анализ полученных данных показал, что хлоридный класс природных вод преобладает в четырех исследованных озерах: Соленом (Медвеженское), Соленом (Ниженепетровское), Соленом (Лушниковское) и восточной части озера Птичьего. Для подпруженной западной части озера Птичьего и озера Соленого (Александровский район) характерен сульфатный класс природных вод. Рапа Соленых озер (Медвеженское и Александровское) относится к группе магния и натрия, а остальных – к группе натрия. Рапа озера Соленого (Медвеженское) принадлежит к очень крепким рассолам. По мере увеличения солености рапы озера можно расположить в следующем порядке: восточная часть Птичьего – западная часть Птичьего – Соленое (Лушниковское) – Соленое (Ниженепетровское) – Соленое (Александровский район) – Соленое (Медвеженское). Рассмотрены факторы, оказывающие влияние на гидрохимические характеристики рапы и озер в целом.

Ключевые слова: сульфидные соленые озера, рапа, лечебные грязи, ионный состав вод, Ставропольский край.

Hydrochemical studies of a group of sulfide salt lakes of the Stavropol Region were carried out. Indicators such as temperature, ionic composition, total dissolved solids (TDS), hardness of the brine, and the relation of sulphates and chlorides to total dissolved solids were determined. Data analysis showed that the chloride class of natural waters prevails in four of the studied water objects: Salt Lake (Medvezhenskoe), Salt Lake (Nizhnepetrovskoe), Salt Lake (Lushnikovskoe) and the eastern part of Lake Ptichie. The sulphate class of natural waters prevails in the western part of the Lake Ptichie and the Salt Lake (Aleksandrovsky District). The brine of the Salt Lakes (Medvezhenskoe and Aleksandrovskoe) belongs to the group of magnesium and sodium, and the other lakes - to the group of sodium. As the salinity of the brine increases, the lakes can be ar-

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №17-17-01229).

ranged in the following order: the eastern part of Lake Ptichie - the western part of Lake Ptichie - Salt Lake (Lushnikovskoe) - Salt Lake (Nizhnepetrovskoe) - Salt Lake (Aleksandrovsky District) - Salt Lake (Medvezhenskoe). The factors impact the hydrochemical characteristics of brine and lakes are considered.

Keywords: sulfide salt lakes, brine, therapeutic mud, ionic water composition, Stavropol Region.

Введение

Бальнеологические курорты Ставропольского края занимают одно из ведущих мест в рекреационной сети на Юге России. Регион славится не только уникальными по химическому составу минеральными источниками, но и грязевыми солеными озерами, изобилующими рапой и иловыми сульфидными грязями [1, 2]. Эти природные субстанции не одну сотню лет используют при лечении широкого спектра заболеваний [1, 3, 4]. На сегодняшний день достаточно детально с точки зрения геоморфологии, гидролого-гидрохимических и экологических характеристик изучено только озеро Большой Тамбукан, где ведется добыча лечебной грязи и рапы [5–9]. В научной литературе также имеются сведения о величине минерализации грязевого раствора, физико-химических и бактериальных показателях грязей озера Соленого Лушниковского месторождения (Петровский район) и экологических особенностях некоторых соленых ставропольских озер [1, 10]. Как итог, подавляющее большинство ставропольских соленых озер, грязи которых потенциально могут рассматриваться в качестве лечебных, фактически не изучено. Отметим, что информация о гидрохимии рапы соленых озер интересна в связи с её возможным использованием в бальнеологических целях, а также с позиции влияния рапы на состав и качество грязевого раствора и собственно грязей. Для ставропольских озер весьма характерны изменения химического состава рапы: ее минерализация при увлажнении территории значительно снижается вследствие разбавления, а с увеличением доли испарения в расходных статьях водного баланса озер возрастает иногда до нескольких сотен граммов на литр [8].

Изучение химического состава рапы сульфидных со-

леных озер соответствует стратегическим целям развития водных ресурсов Ставропольского края, так как создает основу для разработки методов рационального использования бальнеоклиматических ресурсов озер, что особенно важно в связи с развитием рекреационных территорий по использованию лечебных грязей на территории административных районов, к которым приурочены экосистемы соленых озер.

Исходя из изложенного выше, изучение химического состава рапы группы ставропольских озер представляется важной научной и практической задачей нашего исследования.

Объекты исследования, материалы и методы

В августе 2018 г. состоялись экспедиционные исследования группы сульфидных соленых озер Ставропольского края: озеро Соленое (Медвеженское), Соленое (Александровский район), Соленое (Нижнепетровское), Соленое (Лушниковское), озеро Птичье (рис. 1).

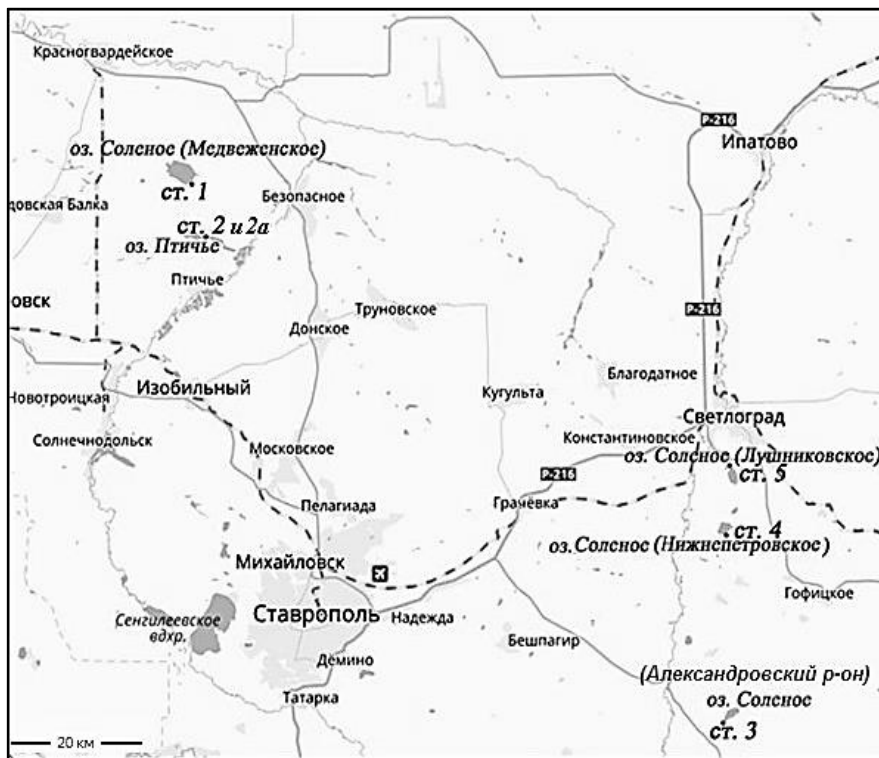


Рис. 1. Карта-схема станций отбора проб рапы соленых сульфидных озер Ставропольского края / Fig. 1. Map-scheme of stations for sampling brine of salt sulfide lakes of the Stavropol Region

Озеро Соленое (Медвеженское) расположено на юге Красногвардейского района, на границе с Изобильненским районом, в 7 км к юго-востоку от пос. Медвеженского. Площадь озера – 12,0 км². Длина береговой линии – около 15 км. В озеро с запада и востока впадают 2–3 небольших ручья с пересыхающими руслами. В летний период (3 месяца) озеро пересыхает. Ранее в питании озера некоторую роль играло орошение, в настоящее время орошение на водосборе озера сведено к минимуму. Озеро имеет изометричную форму и находится в котловине. Береговая зона сложена в основном задернованными глинистыми отложениями. Вблизи границы озера наблюдаются пелоиды черного цвета, маслянистые с запахом H₂S, перекрытые тонкой коркой галита мощностью от 0,2 до 0,5 см. На озере отмечены неорганизованные бальнеологические купальни, в которых в местах углубления наблюдается горько-соленая мутная рапа.

Озеро Птичье расположено в 5 км от одноименного поселка в Ставропольском крае в ложе балки Птичьей. Площадь озера – 2 км², длина береговой линии – 8,5 км. На станции отбора проб озеро разделено дамбой на 2 части – западную и восточную (собственно оз. Птичье). Пробы воды отобраны в обеих частях озера. Западная часть озера представляет собой подпруженную озерную часть, мелководную, заросшую обильно травяной растительностью по всей площади и зарослями тростника по периметру. В летний период озеро выпарено, в результате освобождено 5–6 м прибрежной территории, которая сложена илистыми осадками. Восточная часть (собственно оз. Птичье) представляет собой полноводный водоем с параллельными берегами видимой длиной более 1 км, шириной – до 400 м. Находится ниже уровня западной части на 1,5–2,0 м. Озеро зарыблено, лов рыбы запрещен.

Еще одно озеро Соленое расположено в Александровском районе Ставропольского края в 5 км к востоку от трассы Ставрополь – Александровское – Минеральные Воды, в 4 км к северо-западу от села Северного, в межгорной котловине. Водная поверхность озера протягивается с юго-запада на северо-восток на расстояние примерно 3 км при ширине с северо-запада на юго-восток около 1,2 км. Площадь озера – 3,6 км². Длина береговой линии – 7 км. Озеро находится в углублении сарматских глин древнего моря. Превышение гор относительно озера – около 150–200 м. Рельеф котловины обуславливает постоянно дующий ветер различной скорости, который ускоряет испарение воды в озере. Этот рельеф также позволяет концентрировать солнечную энергию на поверхности озера, что также усиливает испарение. Озеро заполнено рапой высокой концентрации розово-красного оттенка с

обилием остатков растительности. Наблюдается оригинальная агатовидная структура поверхностной пленки и прибрежных отложений (рис. 2). В озере обитает жаброногий рачок *Artemia salina* (рис. 3). Пищей ему служат в основном жгутиковая водоросль дуналиелла соленоводная (*Dunaliella salina*) и диатомии. Отмирая, органические остатки растительного и животного происхождения дают огромное количество органического материала, который аккумулируется в осадках и принимает участие в формировании лечебных грязей.



Рис. 2. Агатовидная структура прибрежной зоны озера Соленого (Александровский район) / Fig. 2. Type of agate structure of the coastal zone of the Salt Lake (Alexandrovsky district)

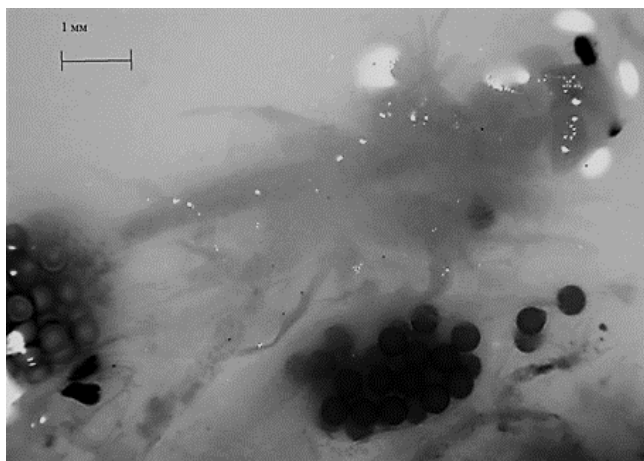


Рис. 3. Жаброногий рачок *Artemia salina* с отложенными яйцами под микроскопом / Fig. 3. *Artemia salina* under the microscope

Озеро Соленое (Нижнепетровское) имеет изометричную форму, расположено в широкой котловине, окружено горами, на 150–250 м возвышающимися над поверхностью озера. Площадь озера – 3 км², длина береговой линии – 8,8 км. В озеро с

востока и юга впадает до 6 ручьев с периодически пересыхающими руслами. Берега пологие. Растительность на берегу размещается зонально: от кромки воды в озере до 10–20 м произрастают галофиты рыже-бурого цвета, далее травянистая растительность, представленная разнотравьем (с преобладанием лебеды), бобовыми (верблюжья колючка) и злаками. Почвы, окружающие озеро, каменисто-песчаные, сложенные обломками белых, светло-серых тонкоплитчатых известняков неогенового возраста. Грязевые отложения начинаются от кромки расположения макрофитов к центру озера. В летние месяцы ширина обезвоженных пелоидов составляет 25–35 м. Вода в озере прозрачная, бесцветная, солоноватая. По берегам озера корок солей не наблюдается.

Озеро Соленое (Лушниковское) расположено в Петровском районе Ставропольского края в 15 км к юго-западу от города Светлограда, в 500 м южнее хутора Солёное Озеро, в долине реки Калаус, на западном склоне Прикалаусских высот и является отделившимся от реки участком её прежнего русла. Площадь озера – 3,6 км², длина береговой линии – 7,2 км. Котловина озера окружена с севера и восто-

ка горами, превышающими поверхность озера на 150–200 м. Озеро имеет овальную форму и вытянуто в меридиональном направлении. Высота над уровнем моря не превышает 139 м. Пляжи и мелководья покрыты толстым слоем ила – черной грязью с лечебными свойствами. С западной стороны в озеро впадают три ручья с водой повышенной минерализации, русло которых заросло тростником и розогом. Также озеро питают семь стекающих со склона горы Куцай родников.

Отбор и подготовка проб рапы к анализам выполнены в соответствии с требованиями [11, 12]. По методике [13] произведен анализ проб рапы по следующим гидрохимическим показателям: pH, температура, жесткость, минерализация, главные ионы HCO_3^- , CO_3^{2-} , Cl^- , SO_4^{2-} , Ca^{2+} , Mg^{2+} , $\text{Na}^+ + \text{K}^+$. Рассчитана жесткость, а также по методике [8] отношения содержания сульфатов к минерализации и содержанию хлоридов ($\text{ESO}_4^{2-} / \text{ЭМ}$) ($\text{ESO}_4^{2-} / \text{ЭCl}^-$).

Результаты и их обсуждение

Результаты химического анализа рапы представлены в таблице.

Основные гидрохимические показатели рапы / Main Hydrochemical Indicators of brine

Показатель		Станция					
		1	2	2а	3	4	5
Температура, °С		50	33	34	33	33	29
pH		7,02	8,08	8,70	8,11	7,98	8,25
Жесткость, мг-экв/л		2320,0	42,9	432,5	1840,2	809,6	543,3
Минерализация, мг/л		350604,6	7461,2	70316,9	264544,4	230878,2	159760,2
$\text{ЭSO}_4^{2-} / \text{ЭМ}$		0,13	0,31	0,25	0,28	0,22	0,23
$\text{ЭSO}_4^{2-} / \text{ЭCl}^-$		0,36	1,84	1,00	1,28	0,77	0,89
HCO_3^-	мг/л	1453,0	236,8	127,5	1220,0	782,3	647,4
	мг-экв/л	23,820	3,822	2,090	20,000	12,825	10,613
	мг-экв/л. %	0,39	3,31	0,18	0,33	0,34	0,41
CO_3^{2-}	мг/л	–	41,4	–	960,0	–	–
	мг-экв/л	–	1,380	–	32,000	–	–
	% экв	–	1,18	–	0,52	–	–
Cl^-	мг/л	157653,0	1398,5	20421,0	85523,0	74828,0	47934,0
	мг-экв/л	4447,193	39,450	576,051	2412,496	2110,804	1352,158
	% экв	73,22	33,62	49,95	39,51	56,39	52,66
SO_4^{2-}	мг/л	76913,0	3486,7	27611,0	174805,2	77744,0	57837,0
	мг-экв/л	1602,354	72,640	575,229	3641,771	1619,667	1204,938
	% экв	26,38	61,90	49,87	59,64	43,27	46,93
Сумма анионов	мг-экв/л	6073,367	117,351	1153,370	6106,267	3743,295	2567,709
Ca^{2+}	мг/л	190,0	163,6	820,0	400,8	550,0	455,0
	мг-экв/л	9,481	8,164	40,918	20,000	27,445	22,705
	% экв	0,16	6,96	3,55	0,33	0,73	0,88
Mg^{2+}	мг/л	28078,0	422,3	4758,0	29032,0	9503,0	6325,0
	мг-экв/л	2310,947	34,757	391,605	2389,465	782,551	520,576
	% экв	38,05	29,62	33,95	39,13	20,91	20,27
$\text{Na}^+ + \text{K}^+$	мг/л	86317,6	1711,9	16579,5	85016,4	67465,9	46561,8
	мг-экв/л	3752,940	74,431	720,847	3696,802	2933,199	2024,428
	% экв	61,79	63,43	62,50	60,54	78,36	78,84
Сумма катионов	мг-экв/л	6073,367	117,351	1153,370	6106,267	3743,295	2567,709

Значения водородного показателя рапы варьируются от нейтральных до щелочных. Минимальное значение pH (7,02) отмечено в озере Соленом (Медвеженское), максимальное (8,7) – в западной части озера Птичьего. В остальных озерах преобладает слабощелочная рапа. Несмотря на то что жесткость рапы в озерах изменяется в довольно широких пределах – от 42,9 до 2320,0 мг-экв/л, все исследованные образцы рапы являются очень жесткими, что является характерной чертой соленых озер, как и их высокая минерализация, например, в рапе озера Соленого (Медвеженское) она достигает 343,2 г/л. По классификации М.С. Гуревича и Н.И. Толстихина [14], которая используется применительно к поверхностным водам, рапа озера Соленого (Медвеженское) относится к очень крепким рассолам. К крепким рассолам относится рапа Соленых озер (Александровский район, Нижнепетровское и Лушниковское). Рапа озера Птичьего, как и предполагалось, в западной и восточной его частях существенно различается по минерализации: слабоконцентрированный рассол рапы характерен для западной части, а для восточной – сильносоленоватая вода (рапа).

В работе [8] было обосновано применение гидрхимических коэффициентов $\text{ЭSO}_4^-/\text{ЭМ}$ и $\text{ЭSO}_4^-/\text{ЭСГ}$ в качестве индикаторов, которые указывают на возможную трансформацию химического состава при разбавлении или концентрировании воды и грязевого раствора в озерах. Сульфатный ион был взят в качестве ингредиента, который является неконсервативным, в связи с тем, что он подвергается сульфатной редукции. Хлоридный ион, наоборот, является консервативным элементом. Минерализация может изменяться в широких пределах, и важно знать, как будет варьироваться на этом фоне отношение $\text{ЭSO}_4^-/\text{ЭМ}$.

Анализ коэффициентов показал, что экстремально низкими отношениями $\text{ЭSO}_4^-/\text{ЭМ}$ и $\text{ЭSO}_4^-/\text{ЭСГ}$ характеризуется только рапа озера Соленого (Медвеженское). Рапа других озер характеризуется ионными отношениями $\text{ЭSO}_4^-/\text{ЭМ}$ и $\text{ЭSO}_4^-/\text{ЭСГ}$ соответственно в пределах 0,22–0,30 и 0,77–1,84. В свою очередь, эти коэффициенты были выше в воде-рапе озера Большой Тамбукан и изменялись от 0,29 до 0,35 и от 1,61 до 2,32. Оказалось, что, несмотря на катастрофическое опреснение озера Большой Тамбукан, значения коэффициентов не выходили за эти пределы, а химический тип и класс воды-рапы оставались прежними.

В соответствии с классификацией О.А. Алекина [15, 16] по типу природных вод озеро Соленое (Медвеженское), западная часть озера Птичьего, озеро Соленое (Нижнепетровское) и озеро Соленое (Лушниковское) относятся к хлоридному классу, тогда как воды восточной части озера Птичьего и

Соленого (Александровский район) – к сульфатному классу. При этом рапа Соленых озер (Медвеженское и Александровское) относится к группе магния и натрия, а остальных – к группе натрия. Тип II воды характерен для всех озер, за исключением озера Соленого (Медвеженского), где распространен тип III. Обращает на себя внимание высокое содержание иона магния. Это обусловлено тем, что осадочные отложения здесь представлены темно-серыми глинами с прослойками мергеля и известковых песчаников. На склонах балок и оврагов обнажаются среднесарматские отложения глин с многочисленными прослойками мергеля, песка и песчаника. Сравнение наших данных с результатами, полученными ранее в работе [1] для Лушниковского месторождения, показало хорошее сходство. Так, минерализация рапы, по нашим сведениям, была 159,8 г/л, а по данным Л.Б. Мальчуковского и др. грязевый раствор и рапа имели минерализацию соответственно 119,05 и 100 г/л. Класс обоих растворов был хлоридный, тип II, группа натрия.

Для озера Соленого (Медвеженское) условия формирования рапы связаны в большей степени с испарением молекул воды и катионным обменом (обычно Na^+ раствора на Ca^{2+} и Mg^{2+}), в то время как для всех остальных исследованных озер характерной чертой механизма формирования рапы является ее взаимодействие с различными осадочными породами и продуктами выветривания коренных пород. В таких условиях питание высокоминерализованными подземными водами является главным фактором, оказывающим влияние на формирование химического состава рапы соленых озер. Также ионный состав воды подвержен циклическим изменениям в зависимости от времени года: весной таяние снега и атмосферные осадки способствуют разбавлению рапы, вследствие чего минерализация значительно уменьшается, а летом выпаривание ведет к резкому возрастанию значений минерализации рапы соленых озер [11, 16].

Закключение

Проведенные исследования позволили установить, что рапа группы сульфидных соленых озер Ставропольского края относится к классу хлоридных и сульфатных вод группы натрия с преобладанием II типа, с высокой жесткостью и минерализацией. В химическом составе рапы преобладающими ионами являются Cl^- , SO_4^{2-} , Mg^{2+} и Na^+ . Полученные данные по химическому составу воды-рапы в комплексе с результатами будущих исследований физико-химического и микробиологического анализа лечебных грязей соленых озер могут послу-

жить обоснованием для проекта развития бальнеологической инфраструктуры и экологического туризма в Ставропольском крае.

Литература

1. Мальчуковский Л.Б., Старокожко Л.Е., Гайдамака И.И., Чипизубов А.И. Сравнительная характеристика иловой сульфидной грязи озёр Большой Тамбукан и Солёное Лушниковского месторождения // Курортная медицина. 2012. № 1. С. 14–21.
2. Федоров Ю.А., Гарькуша Д.Н., Доценко И.В., Афанасьев К.А. Метан и сероводород в лечебных сульфидных грязях (на примере озера Большой Тамбукан) // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2014. № 3. С. 102–109.
3. Бейнер Н.В., Чабан В.В., Бейнер П.С. Контроль экологического состояния грунтовых вод как важный элемент системы мониторинга поверхностного водоёма (на примере Сакского солёного озера) // Вода: химия и экология. 2013. № 9 (63). С. 104–110.
4. Ефименко Н.В., Меньшикова Т.Б., Васин В.А., Глухов А.Н., Урвачева Е.Е., Школьный В.Н. Лечебные грязи озера Большой Тамбукан в медицинской реабилитации социально значимых заболеваний // Курортная медицина. 2015. № 2. С. 89–94.
5. Данилов С.Р., Ляшенко С.И., Ганенков В.Д. [и др.]. Актуальные проблемы водно-солевого режима озера Большой Тамбукан // Состояние и охрана воздушного бассейна и водно-минеральных ресурсов курортно-рекреационных регионов : сб. докл. памяти академика А.М. Обухова. М.: МАКС Пресс, 2000. С. 80–81.
6. Ляшенко С.Л., Поволоцкая Н.П., Данилов С.Р. [и др.]. К вопросу о современном состоянии месторождения лечебной грязи озера Большой Тамбукан // Состояние и охрана воздушного бассейна и водно-минеральных ресурсов курортно-рекреационных регионов : сб. докл. памяти академика А.М. Обухова. М.: МАКС Пресс, 2000. С. 133–137.
7. Федоров Ю.А., Потапов Е.Г., Данилов С.Р., Салов Г.В. Особенности динамики гидрологических параметров, гидрохимических, биогеохимических показателей и компонентов рапы и сульфидной грязи оз. Большой Тамбукан // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. Юбилейный выпуск. 2002. С. 72–76.
8. Федоров Ю.А. Гидролого-гидрохимические исследования сульфидного озера Большой Тамбукан // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2013. № 2. С. 81–88.
9. Щербаков А.В. Сокровища озера Большой Тамбукан : науч.-попул. очерк. Ессентуки, 2008. 81 с.
10. Окрут С.В., Поспелова О.А., Комаров В.А. Экологическая характеристика солёных озёр Ставропольского края // Приоритетные направления развития науки

и образования / под общ. ред. Г.Ю. Гуляева. Пенза: Наука и просвещение, 2017. С. 260–267.

11. ГОСТ 31861-2012. Вода. Общие требования к отбору проб. М., 2013.
12. Р 52.24.353-2012. Отбор проб поверхностных вод суши и очищенных сточных вод. Ростов н/Д., 2012.
13. Руководство по химическому анализу поверхностных вод суши / под ред. Л.В. Боевой. Ростов н/Д.: НОК, 2009. Ч. 1. 1037 с.
14. Гуревич М.С., Толстихин Н.И. Схема химической классификации подземных вод // Изв. вузов. Геология и разведка. 1961. № 1. С. 83–93.
15. Алевин О.А. Основы гидрохимии. Л.: Гидрометеоиздат, 1970. 442 с.
16. Гончарова Т.А., Никаноров А.М., Федоров Ю.А., Тарасов М.Г., Матвеева Н.П. Справочник по гидрохимии. Л.: Гидрометеоиздат, 1989. С. 162–231.

References

1. Mal'chukovskii L.B., Starokozhko L.E., Gaidamaka I.I., Chipizubov A.I. Sravnitel'naya kharakteristika ilovoi sul'fidnoi gryazi ozer Bol'shoi Tambukan i Solenoe Lushnikovskogo mestorozhdeniya [Comparative characteristics of silt sulfide mud of the lakes of Bolshoy Tambukan and Solenoe of Lushnikov field]. *Kurortnaya meditsina*. 2012, No. 1, pp. 14–21.
2. Fedorov Yu.A., Gar'kusha D.N., Dotsenko I.V., Afanas'ev K.A. Metan i serovodorod v lechebnykh sul'fidnykh gryazyakh (na primere ozera Bol'shoi Tambukan) [Methane and hydrogen sulfide in the sulfide curative muds (on the example of the lake Bolshoy Tambukan)]. *Izv. vuzov. Sev.-Kavk. region. Estestv. nauki*. 2014, No. 3, pp. 102–109.
3. Beiner N.V., Chaban V.V., Beiner P.S. Kontrol' ekologicheskogo sostoyaniya gruntovykh vod kak vazhnyi element sistemy monitoringa poverkhnostnogo vodoema (na primere Saksogo solenogo ozera) [Control of the ecological state of groundwater as an important element of the surface water body monitoring system (on the example of Saki salt lake)]. *Voda: khimiya i ekologiya*. 2013, No. 9 (63), pp. 104–110.
4. Efimenko N.V., Men'shikova T.B., Vasin V.A., Glukhov A.N., Urvacheva E.E., Shkol'nyi V.N. Lechebnye gryazi ozera Bol'shoi Tambukan v meditsinskoi reabilitatsii sotsial'no znachimyykh zabolevaniy [Therapeutic mud of lake Bolshoy Tambukan in medical rehabilitation of socially significant diseases]. *Kurortnaya meditsina*. 2015, No. 2, pp. 89–94.
5. Danilov S.R., Lyashenko S.I., Ganenkov V.D. [i dr.]. [Actual problems of water-salt regime of lake Bolshoy Tambukan]. *Sostoyanie i okhrana vozdushnogo basseina i vodno-mineral'nykh resursov kurortno-rekreatsionnykh regionov* [Status and protection of the air basin and water-mineral resources of resort and recreation re-

gions]. Collection of reports in memory of academician M. Obukhov. Moscow: MAKS Press, 2000, pp. 80-81.

6. Lyashenko S.L., Povolotskaya N.P., Danilov S.R. [i dr.]. [To the question about the current state of deposits of therapeutic mud of the lake Bolshoy Tambukan]. *Sostoyanie i okhrana vozdushnogo basseina i vodno-mineral'nykh resursov kurortno-rekreatsionnykh regionov* [Status and protection of the air basin and water-mineral resources of resort and recreation regions]. Collection of reports in memory of academician M. Obukhov. Moscow: MAKS Press, 2000, pp. 133-137.

7. Fedorov Yu.A., Potapov E.G., Danilov S.R., Salov G.V. Osobennosti dinamiki gidrologicheskikh parametrov, gidrokhimicheskikh, biogeokhimicheskikh pokazatelei i komponentov rapy i sul'fidnoi gryazi oz. Bol'noi Tambukan [Features of dynamics of hydrological parameters, hydrochemical, biogeochemical parameters and components of brine and sulfide mud of lake Bolshoy Tambukan]. *Izv. vuzov. Sev.-Kavk. region. Estestv. nauki. Anniversary issue.* 2002, pp. 72-76.

8. Fedorov Yu.A. Gidrologo-gidrokhimicheskie issledovaniya sul'fidnogo ozera Bol'shoi Tambukan [Hydrological and hydrochemical studies of sulphide of lake Bolshoy Tambukan]. *Izv. vuzov. Sev.-Kavk. region. Estestv. nauki.* 2013, No. 2, pp. 81-88.

9. Shcherbakov A.V. *Sokrovishcha ozera Bol'shoi Tambukan* [Treasures of the lake Bolshoy Tambukan]. Popular science essay. Essentuki, 2008, 81 p.

10. Okrut S.V., Pospelova O.A., Komarov V.A. [Ecological characteristics of the salt lakes of Stavropol territory]. *Prioritetnye napravleniya razvitiya nauki i obrazovaniya* [Priority directions of development of science and education]. Ed. G.Yu. Gulyaev. Penza: Nauka i prosveshchenie, 2017, pp. 260-267.

11. GOST 31861-2012. *Voda. Obshchie trebovaniya k otboru prob* [Water. General requirements for sampling]. Moscow, 2013.

12. R 52.24.353-2012. *Otbor prob poverkhnostnykh vod sushi i ochishchennykh stochnykh vod* [Sampling of land surface water and treated wastewater]. Rostov-on-Don, 2012.

13. *Rukovodstvo po khimicheskomu analizu poverkhnostnykh vod sushi* [Guide to the chemical analysis of surface waters of the land]. Ed. L.V. Boeva. Rostov-on-Don: NOK, 2009, ch. 1, 1037 p.

14. Gurevich M.S., Tolstikhin N.I. Skhema khimicheskoi klassifikatsii podzemnykh vod [Scheme of chemical classification of groundwater]. *Izv. vuzov. Geologiya i razvedka.* 1961, No. 1, pp. 83-93.

15. Alekin O.A. *Osnovy gidrokhimii* [Basics of hydrochemistry]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1970, 442 p.

16. Goncharova T.A., Nikanorov A.M., Fedorov Yu.A., Tarasov M.G., Matveeva N.P. *Spravochnik po gidrokhimii* [Handbook on hydrochemistry]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1989, pp. 162-231.

УДК 911:574(470.64)

DOI 10.23683/0321-3005-2018-4-107-110

ВЛИЯНИЕ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ СИТУАЦИИ НА ЗДОРОВЬЕ НАСЕЛЕНИЯ (НА ПРИМЕРЕ КАБАРДИНО-БАЛКАРСКОЙ РЕСПУБЛИКИ)

© 2018 г. М.Н. Хашукоева¹

¹Кабардино-Балкарский государственный университет имени Х.М. Бербекова, Нальчик, Россия

INFLUENCE OF THE ECOLOGICAL SITUATION ON THE HEALTH OF THE POPULATION (CASE STUDY OF THE KABARDINO-BALKAR REPUBLIC)

M.N. Khashukoeva¹

¹Berbekov Kabardino-Balkarian State University, Nalchik, Russia

Хашукоева Марьям Николаевна – аспирант, кафедра биологии, биоразнообразия и геоэкологии, Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова, ул. Чернышевского, 173, г. Нальчик, КБР, 360004, Россия, e-mail: maryam808@mail.ru

Maryam N. Khashukoeva - Postgraduate, Department of Biology, Biodiversity and Geocology, Berbekov Kabardino-Balkarian State University, Chernyshevskogo St., 173, Nalchik, KBR, 360004, Russia, e-mail: maryam808@mail.ru

Рассмотрены особенности экологической ситуации в Кабардино-Балкарии и проанализировано ее влияние на здоровье населения. Основные компоненты обеспечения экологической безопасности Кабардино-Балкарской Республики базируются на направлениях деятельности, призванных сохранить и восстановить природные экосистемы, принять меры, направленные на снижение негативного воздействия на окружающую природную среду, развивать инфраструктуру для захоронения и переработки отходов производства и потребления, снизить негативное воздействие хозяйственной деятельности на окружающую среду на основе использования передовых технологий, сформировать высокую экологическую культуру населения.

Ключевые слова: экологическая ситуация, здоровье населения, экологическая культура населения.

The article describes the features of the ecological situation in Kabardino-Balkaria and analyzes its impact on public health. The author comes to the conclusion that the main components of ensuring the environmental safety of the Kabardino-Balkarian Republic are based on activities designed to preserve and restore natural ecosystems, take measures aimed at reducing the negative impact on the environment, develop infrastructure for the disposal and recycling of production and consumption wastes to reduce the negative impact of economic activity on the environment through the use of advanced technologies, allow to form high ecological culture of the population.

Keywords: ecological situation, public health, ecological culture of the population.

Введение

Экологическая ситуация, как известно, в значительной степени влияет на здоровье населения, проживающего на той или иной территории. Именно под воздействием неблагоприятных экологических факторов могут возникать определенные соматические заболевания как у детей и молодежи, так и у представителей старшего поколения. Соответственно, исследование факторов влияния экологии на здоровье нации необходимо для снижения заболеваемости населения всех возрастных групп.

Цель работы – рассмотреть особенности экологической ситуации в Кабардино-Балкарии и проанализировать ее влияние на здоровье населения.

Методы исследования. При написании статьи были использованы сравнительный, аналитический и расчетный методы.

Результаты и обсуждение. Кабардино-Балкарская Республика – территория, богатая не только памятниками культурного наследия, но и горными и равнинными ландшафтами, характеризующимися высоким уровнем привлекательности для туристов. Однако уровень качества жизни и экологическая ситуация в республике оставляют желать лучшего [1].

На основании рейтинга городов, составленного Институтом территориального планирования «Урбаника» и Союзом архитекторов России, было определено, что Кабардино-Балкарская Республика занимает только 91-е место. Разработчики рейтинга при этом учитывали экологическую ситуацию, загруженность дорог, городское благоустройство, покупательную способность населения, а также природные условия. Таким образом, экологические проблемы республики требуют оперативного решения.

Правительством республики разработана Стратегия развития Кабардино-Балкарской Республики до 2022 года, согласно которой самым перспективным направлением развития рассматриваемой территории является создание центра здоровья и эффективного природопользования. Здесь предусматривается необходимость комплексного развития региона, эффективного использования всех его конкурентных преимуществ, в результате чего Кабардино-Балкарская Республика должна превратиться в регион здоровья [2]. Соответственно, на её территории должен получить развитие экологический туризм как полноценный сектор современной экономики, а сама республика должна позиционироваться как регион, предусматривающий активный отдых, укрепление здоровья и реабилитацию. Главный фактор успешной реализации данной стратегии – это экологическая ситуация в регионе.

На основании анализа статистических данных можно заключить, что состояние окружающей среды в республике в последнее время заметно ухудшилось. В частности, в 2016 г. отмечается увеличение объема выбросов загрязнителей в атмосферу по сравнению с 2002 г. на 15 %, а качество очистки воздуха от загрязняющих веществ ухудшилось почти в два раза (табл. 1).

Таблица 1

Динамика загрязнения атмосферного воздуха и поверхностных водных объектов в Кабардино-Балкарской Республике за период 2002–2016 гг. [3]
/ Dynamics of air pollution and surface water bodies in the Kabardino-Balkarian Republic over the period 2002-2016 [3]

Показатель	Год		
	2002	2010	2016
Выбросы загрязняющих веществ в атмосферный воздух, отходящих от стационарных источников, тыс. т	2,5	3,0	2,8
Улавливание загрязняющих атмосферу веществ, отходящих от стационарных источников, тыс. т	2,1	2,0	1,1
%	89,6	66,7	50,1

Основные вещества, загрязняющие атмосферу в Кабардино-Балкарской Республике, – это пыль, окислы азота, хлор и его соединения, фенол, аммиак. Более всего атмосферный воздух загрязняется выбросами автотранспорта, которые составляют до 90 % объема всех выбросов.

Загрязнение водных ресурсов Кабардино-Балкарской Республики происходит за счет взвешенных веществ (нерастворенных в воде загрязнений, имеющих органическую и неорганическую природу), также свой вклад в загрязнение вод вносят нефтепродукты, сульфаты, хлориды, азоты аммонийных солей, нитраты и нитриты, тяжелые металлы (табл. 2).

Среди загрязняющих веществ, которые сбрасывались в воды с превышением установленных нормативов (лимитов) в 2017 г., преобладают взвешенные вещества – 89,3 %; нефтепродукты – 50; сульфаты – 21,8; азот аммонийные соли – 80,5; азот нитритов – 31,9 %.

Таблица 2

Анализ сброса загрязняющих веществ по КБР [3] / Analysis of the discharge of pollutants in the Kabardino-Balkarian Republic [3]

Загрязняющие вещества	Масса сброса всего, т		Масса сброса в пределах установленных нормативов (лимитов), т		Масса сброса, сверх установленных нормативов (лимитов), т	
	2015	2016	2015	2016	2015	2016
Взвешенные вещества, т	1895,6	1905,4	151	169	1562,4	1590,4
Нефтепродукты, т	2,6	2,7	1	1	1	1,2
Сухой остаток, т	19621,3	19768,0	14001	14026	5811,85	5841
Сульфаты, т	1089,4	1889	1711	1514	318,17	312
Хлориды, т	2133,4	2415	2148	3254	295,7	315
Азот аммонийных солей, т	317,0	323,5	78,8	69,8	268,1	256,6
Азот нитратов	82511,0	95168	82119,2	92446,1	717,5	3722,8
Азот нитритов, кг	2178	4188,4	2044,2	3025,2	516,4	1216,8
Железо, кг	3111,18	1351	1418	1105,2	1109,18	15,6

По результатам исследования собранных вод, более всего загрязненных сверх нормативов вод сбрасывается в такие реки, как Баксан, Малка, Терек. Качество воды в реках республики также неуклонно снижается под воздействием деятельности предприятий Кабардино-Балкарии, производящих спиртовые дрожжи и крахмал, а также по той причине, что очистные сооружения катастрофически изношены, а русла и поймы рек загрязнены бытовыми отходами и отходами сельскохозяйственных предприятий [4].

Негативно воздействуют на окружающую среду отходы производства и потребления, количество которых с каждым годом также растет. В структуре отходов, образуемых в Кабардино-Балкарии, более 75 % занимает пищевая промышленность, остальные 25 % приходятся на такие отрасли, как цветная металлургия, сельское хозяйство, автотранспорт, а также промышленность строительных материалов. Наиболее серьезный урон наносится просроченными ядохимикатами и удобрениями, гальваношламами, стоками автомоечных пунктов, аккумуляторами и ртутьсодержащими лампами, отходами горнорудного производства.

В республике также существует проблема с утилизацией отходов: в частности, отсутствуют полигоны для захоронения промышленных отходов. На территории Кабардино-Балкарии функционирует только один мусоросортировочный завод, который располагается в Урванском районе. Среди технологий, применяемых на заводе, – сортировка, переработка утилизируемой части твердых бытовых отходов, прессовка и захоронение на полигоне их части, которая не утилизируется, демеркуризация электроламп, содержащих пары ртути [3].

Серьезная проблема для Кабардино-Балкарии заключена также в деградации и разрушении почвы, причинами которых являются водная эрозия, засоление, заболачивание, нерациональное землепользование. Рост площадей таких земель обусловлен добычей полезных ископаемых карьерным способом. Безусловно, ухудшение экологической обстановки не может не сказываться на состоянии здоровья жителей территории.

Численность населения Кабардино-Балкарской Республики на 1 января 2018 г. составила 865,8 тыс. чел. Существенное проявление неблагополучия в демографическом развитии республики – это повышение уровня смертности населения (8,8 чел. на 1 тыс. населения) и ухудшение состояния здоровья нации [5–8].

В структуре заболеваемости взрослого населения в 2016 г. первые пять мест занимают следующие болезни:

- болезни органов дыхания – 27,6 %;
- травмы и отравления – 17,4 %;
- болезни системы кровообращения – 10,2 %;
- болезни органов пищеварения – 8,9 %;
- болезни мочеполовой системы – 7,5 %.

Среди подростков 15–17 лет наиболее распространены следующие болезни:

- болезни органов дыхания – 35,7 %;
- болезни кожи и подкожной клетчатки – 13,4 %;
- травмы и отравления – 17,6 %;
- болезни органов пищеварения – 8,2 %;
- болезни эндокринной системы – 5,1 %.

Для детского населения 0–14 лет наиболее характерны следующие заболевания:

- болезни органов дыхания – 57,1 %;
- болезни кожи и подкожной клетчатки – 11,5 %;
- травмы и отравления – 7,0 %;
- болезни органов пищеварения – 5,9 %;
- инфекционные и паразитарные болезни – 4,5 %.

Заболеваемость взрослого населения по сумме нозологических форм в 2016 г. возросла по сравнению с 2015 г. на 19,5 %. Наибольший рост отмечен в рамках следующих нозологических форм:

- болезни системы кровообращения – в 2,1 раза;
- психические расстройства – 65,7 %;
- болезни мочеполовой системы – 36,9 %;
- болезни кожи и подкожной клетчатки – 33,3 %;
- болезни нервной системы – 28 %.

Среди населения 0–14 лет по сумме нозологических форм в 2016 г. снижение заболеваемости по сравнению с 2015 г. незначительное (0,13 %). Преобладают следующие нозологические формы:

- болезни эндокринной системы – 44,8 %;
- новообразования – 26 %;
- болезни уха и сосцевидного отростка – 21 %.

Заболеваемость подростков (15–17 лет) по сумме нозологических форм увеличилась по сравнению с 2015 г. на 26,6 %. Наибольший рост отмечается по таким нозологическим формам:

- болезни нервной системы – 54,2 %;
- болезни эндокринной системы – 42,5 %;
- болезни крови и кроветворных органов – 34,2 %.

Республиканскую заболеваемость по всем возрастным категориям превышает уровень заболеваемости на следующих административных территориях: г.о. Нальчик, Урванский и Майский муниципальные районы, г. Прохладный, Черекский и Прохладненский муниципальные районы.

В росте динамики заболеваемости не последнюю роль играет экологическая обстановка. Однако органы власти принимают необходимые меры по ее стабилизации. Так, в 2016 г. Управление Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека по Кабардино-Балкарской Республике, осуществляя надзор за сани-

тарно-эпидемиологическим благополучием населения, проводило как плановые, так и внеплановые расследования. Каждое из них позволило выявить ряд нарушений, что свидетельствует о неблагоприятной экологической ситуации в регионе.

Выводы

Таким образом, можно заключить, что качество жизни в республике постоянно снижается по ряду причин, которые заключены в следующем:

- усиливается антропогенная нагрузка на природную среду;
- загрязняются атмосфера, гидросфера и литосфера;

- растут показатели заболеваемости.

Чтобы в полном объеме реализовать мероприятия, намеченные в Стратегии развития Кабардино-Балкарской Республики до 2022 г., необходимо сбалансировать высокие темпы экономического роста и природоохранные экологические ориентиры. Основные компоненты обеспечения экологической безопасности Кабардино-Балкарской Республики базируются на направлениях деятельности, призванных:

- сохранить и восстановить природные экосистемы;
- принять меры, направленные на снижение негативного воздействия на окружающую природную среду;
- развивать инфраструктуру для захоронения и переработки отходов производства и потребления;
- снизить негативное воздействие хозяйственной деятельности на окружающую среду на основе использования передовых технологий;
- сформировать высокую экологическую культуру населения [2].

Литература

1. Хараева Г.И. Экологический мониторинг. Улан-Удэ: Изд-во ВСГТУ, 2014. 77 с.
2. Стратегия развития Кабардино-Балкарской Республики до 2022 года. URL: <http://www.ivr.ru/kbr2/downloads/strategy.pdf> (дата обращения: 20.05.2018).
3. Кабардино-Балкария в цифрах. 2017: стат. сб. / Кабардино-Балкариястат. Нальчик, 2018. 340 с.
4. Сибатагуллина А.М., Мазуркин П.М. Измерение загрязненности речной воды. М.: Академия естествознания, 2015. 216 с.
5. Анаева Л.А., Жетишев Р.А., Крымукова М.А., Ауканова Б.Л. Динамика распространенности и нозологической структуры детской инвалидности в Ка-

бардино-Балкарии // Фундаментальные исследования. 2014. № 10, ч. 9. С. 1680–1684.

6. Баранов А.А., Альбицкий В.Ю. Основные тенденции здоровья детского населения России. М.: Союз педиатров России, 2011. 116 с.

7. Баранов А.А., Альбицкий В.Ю., Модестов А.А. Заболеваемость детского населения России. М.: ПедиатрЪ, 2013. 280 с.

8. Тамахина А.Я., Балаева С.И., Блиева М.В., Глунов Т.Х., Карданова Ф.Х. Региональные аспекты экологической и продовольственной безопасности (на примере Кабардино-Балкарской Республики). Нальчик: Изд-во М. и В. Котляровых, 2016. 148 с.

References

1. Kharaeva G.I. *Ekologicheskii monitoring* [Environmental monitoring]. Ulan-Ude: Izd-vo VSGTU, 2014, 77 p.
2. *Strategiya razvitiya Kabardino-Balkarskoi Respubliki do 2022 goda* [Development strategy of the Kabardino-Balkar Republic until 2022]. Available at: <http://www.ivr.ru/kbr2/downloads/strategy.pdf> (accessed 20.05.2018).
3. *Kabardino-Balkariya v tsifrakh. 2017* [Kabardino-Balkaria in numbers. 2017]. Statistical compendium / Kabardino-Balkariyastat. Nalchik, 2018, 340 p.
4. Sibagatullina A.M., Mazurkin P.M. *Izmerenie zagryaznennosti rechnoi vody* [Measurement of contamination of river water]. Moscow: Akademiya estestvoznaniya, 2015, 216 p.
5. Anaeva L.A., Zhetishev R.A., Krymukova M.A., Atskanova B.L. *Dinamika rasprostranennosti i nozo-logicheskoi struktury detskoi invalidnosti v Kabardino-Balkarii* [Dynamics of prevalence and nosological structure of childhood disability in Kabardino-Balkaria]. *Fundamental'nye issledovaniya*. 2014, No. 10, ch. 9, pp. 1680-1684.
6. Baranov A.A., Al'bitskii V.Yu. *Osnovnye tendentsii zdorov'ya detskogo naseleniya Rossii* [Main trends in the health of the children's population of Russia]. Moscow: Soyuz pediatrov Rossii, 2011, 116 p.
7. Baranov A.A., Al'bitskii V.Yu., Modestov A.A. *Zabolevaemost' detskogo naseleniya Rossii* [The incidence of children in Russia]. Moscow: Pediatr, 2013, 280 p.
8. Tamakhina A.Ya., Balaeva S.I., Blieva M.V., Tlupov T.Kh., Kardanova F.Kh. *Regional'nye aspekty ekologicheskoi i prodovol'svennoi bezopasnosti (na primere Kabardino-Balkarskoi Respubliki)* [Regional aspects of environmental and food security (on the example of Kabardino-Balkarian Republic)]. Nalchik: Izd-vo M. i V. Kotlyarovykh, 2016, 148 p.

УДК 551.576

DOI 10.23683/0321-3005-2018-4-111-115

ИССЛЕДОВАНИЕ ЛЬДООБРАЗУЮЩИХ СВОЙСТВ НАНОТРУБОК ОКСИДА ЦИНКА

© 2018 г. Б.М. Хучунаев¹, Г.В. Куповых², А.А. Ташилова¹, Н.В. Теунова¹, А.Б. Хучунаев¹, А.Х. Будаев¹

¹Высокогорный геофизический институт, Нальчик, Россия,

²Южный федеральный университет, Таганрог, Россия

STUDY OF ICE-FORMING PROPERTIES OF ZINC OXIDE NANOTUBES

B.M. Khuchunaev¹, G.V. Kupovykh², A.A. Tashilova¹, N.V. Teunova¹, A.B. Khuchunaev¹, A.Kh. Budaev¹

¹High-Mountain Geophysical Institute, Nalchik, Russia,

²Southern Federal University, Taganrog, Russia

Хучунаев Бузигит Муссаевич – доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник, заведующий лабораторией микрофизики облаков, Высокогорный геофизический институт, пр. Ленина, 2, г. Нальчик, КБР, 360030, Россия, e-mail: buzigit@mail.ru

Buzigit M. Khuchunaev - Doctor of Physics and Mathematics, Senior Researcher, Head of Laboratory of Physics of Clouds, High-Mountain Geophysical Institute, Lenina Ave, 2, Nalchik, KBR, 360030, Russia, e-mail: buzigit@mail.ru

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, 347928, Россия, e-mail: kupovykh@sfnu.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, 347928, Russia, e-mail: kupovykh@sfnu.ru

Ташилова Алла Амарбиевна – кандидат физико-математических наук, доцент, старший научный сотрудник, лаборатория микрофизики облаков, Высокогорный геофизический институт, пр. Ленина, 2, г. Нальчик, КБР, 360030, Россия, e-mail: vgikbr@yandex.ru

Alla A. Tashilova - Candidate of Physics and Mathematics, Associate Professor, Senior Researcher, Laboratory of Physics of Clouds, High-Mountain Geophysical Institute, Lenina Ave, 2, Nalchik, KBR, 360030, Russia, e-mail: vgikbr@yandex.ru

Теунова Наталия Вячеславовна – научный сотрудник, лаборатория микрофизики облаков, Высокогорный геофизический институт, пр. Ленина, 2, г. Нальчик, КБР, 360030, Россия, e-mail: vgikbr@yandex.ru

Nataliya V. Teunova - Senior Researcher, Laboratory of Physics of Clouds, High-Mountain Geophysical Institute, Lenina Ave, 2, Nalchik, KBR, 360030, Russia, e-mail: vgikbr@yandex.ru

Хучунаев Азамат Бузигитович – научный сотрудник, лаборатория микрофизики облаков, Высокогорный геофизический институт, пр. Ленина, 2, г. Нальчик, КБР, 360030, Россия, e-mail: vgikbr@yandex.ru

Azamat B. Khuchunaev - Senior Researcher, Laboratory of Physics of Clouds, High-Mountain Geophysical Institute, Lenina Ave, 2, Nalchik, KBR, 360030, Russia, e-mail: vgikbr@yandex.ru

Будаев Алим Хадисович – ведущий инженер-программист, лаборатория микрофизики облаков, Высокогорный геофизический институт, пр. Ленина, 2, г. Нальчик, КБР, 360030, Россия, e-mail: vgikbr@yandex.ru

Alim Kh. Budaev - Leading Engineer Programmer, Laboratory of Physics of Clouds, High-Mountain Geophysical Institute, Lenina Ave, 2, Nalchik, KBR, 360030, Russia, e-mail: vgikbr@yandex.ru

Для управления облачными процессами в качестве реагента предлагается использовать наночастицы оксида цинка, обладающие высокими конденсационными и кристаллизационными свойствами. В статье описаны разработанные методика и аппаратура для синтеза наночастиц оксида цинка, а также результаты исследований их льдообразующих свойств. Для изучения льдообразующих свойств нанотрубок ZnO при различных термодинамических условиях использовалась большая облачная камера, снабженная системой регулировки температуры и вентилятором для перемешивания водяного пара. В результате экспериментов установлено, что при возгонке реагента на основе нанотрубок оксида цинка непосредственно в облачной среде повышаются его льдообразующие свойства. Наибольший удельный выход льдообразующих ядер наблюдается в поддиапазоне от 0 до $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ и составляет $3 \cdot 10^{13}\text{ } \text{г}^{-1}$, а при температуре возгонки

от $-5,5$ до -10 °C удельный выход равен $1,2 \cdot 10^{11}$ г^{-1} . Синтезированный реагент на основе нанотрубок ZnO может быть рекомендован как добавка к композитным материалам на основе AgI что приведет к увеличению удельного выхода кристаллов. Кроме того, комплексные составы расширяют диапазон температур для эффективного использования по сравнению с традиционными реагентами, увеличивают число объектов активного воздействия, что в итоге повышает эффективность работ по активным воздействиям на облачные процессы.

Ключевые слова: оксид цинка, нанотрубки, удельный выход кристаллов, облачная среда, реагент, синтез нанотрубок, большая облачная камера, парогенератор, активные воздействия.

To control cloud processes, it is proposed to use zinc oxide nanoparticles with high condensation and crystallization properties as a reagent. The article describes the developed methods and equipment for the synthesis of zinc oxide nanoparticles, as well as the results of studies of their ice-forming properties. To study the ice-forming properties of ZnO nanotubes under different thermodynamic conditions, a large cloud chamber equipped with a temperature control system and a fan for mixing water vapor was used. As a result of the experiments, it was found that the sublimation of the reagent based on zinc oxide nanotubes directly in the cloud environment increases its ice-forming properties. The largest specific yield of ice-forming nuclei is observed in the sub-range from 0 °C to -2 °C and is $3 \cdot 10^{13}$ г^{-1} , and at the sublimation temperature from $-5,5$ °C to -10 °C the specific yield is $1,2 \cdot 10^{11}$ г^{-1} . The synthesized reagent based on ZnO nanotubes can be recommended as an additive to AgI-based composite materials, which will lead to an increase in the specific yield of crystals. In addition, complex compositions expand the temperature range for effective use in comparison with traditional reagents, increase the number of objects of active influence, which, as a result, increases the efficiency of work on active effects on cloud processes.

Keywords: zinc oxide, nanotubes, the specific yield of crystals, cloud, reagent, synthesis of nanotubes, large cloud chamber, steam generator, cloud seeding.

Введение

Для управления облачными процессами, включающими подавление града и запуска механизмов осадкообразования, используются реагенты, обладающие способностью к конденсации и кристаллизации воды. Однако физические механизмы образования частиц реагента до сих пор остаются не до конца исследованными. В области размеров частиц реагента 10–100 нм значимость поверхностных явлений сильно возрастает за счет усиления взаимодействия частиц. Это имеет решающее значение для фазовых переходов вещества и формирования частиц активного реагента.

Современные научные изыскания в области активных воздействий на облачные процессы характеризуются интенсивным развитием экспериментальных и теоретических исследований роста наноразмерных частиц. Их появление и развитие обуславливают образование новой фазы вещества и, как следствие, приводят к созданию наиболее перспективных реагентов для воздействия на облачные процессы. Увеличение эффективности реагентов происходит, прежде всего, за счет роста удельного выхода числа частиц с большой площадью поверхности, а также вследствие увеличения значений электрического поля на частицах реагента. Синтезирование реагента в виде нанотрубок позволяет достигнуть этих результатов [1, 2].

Основной целью работы являются представление результатов синтеза оксида цинка (ZnO) в виде нанотрубок и исследование их льдообразующих свойств.

Аппаратура и методика

В последние годы было разработано много способов синтеза наночастиц оксида цинка [3–7]. Метод термической возгонки является наиболее подходящим для использования при активных воздействиях на облачные процессы.

Авторами была проделана большая исследовательская работа по синтезу нанотрубок ZnO методом термической возгонки в лаборатории микрофизики облаков Высокогорного геофизического института (ВГИ) [2]. Для этого были разработаны методика синтеза и комплекс аппаратуры (рис. 1).

Комплекс аппаратуры состоит из двух оптических микроскопов (Motis и МБИ-15), электронного микроскопа (ЭММА-4), вакуумной установки, камеры возгонки и большой облачной камеры.

Синтез наночастиц ZnO был осуществлен следующим образом. В вакуумной установке, где между электродами устанавливалась лодочка из графита длиной 5–6 см и шириной 1 см, при подаче постоянного напряжения 9В получали дуговой разряд [1, 3]. В целях предотвращения распыления вещества, помещенного в лодочку, вакуумная установка накрывалась стеклянным колпаком, где оставался небольшой зазор для доступа кислорода в камеру. Ток, проходящий через графитовую лодочку, не превышал 100–150 А. Температура возгонки состава находилась в пределах от 1000 до 2500 °C. Процесс синтеза продолжался 3–4 мин [2]. Синтезированные таким образом нанотрубки ZnO представлены на рис. 2.



Рис. 1. Комплекс лабораторной аппаратуры, где проводился синтез нанотрубок оксида цинка: 1 – электронный микроскоп ЭММА-4; 2 – оптический микроскоп МБИ-15; 3 – вакуумная установка; 4 – большая облачная камера; 5 – оптический микроскоп Motic / Fig. 1. Complex laboratory equipment, which carried out the synthesis of nanotubes of zinc oxide: 1 - electron microscope EMMA-4; 2 - optical microscope MBI-15; 3 - vacuum; 4 - a large cloud chamber; 5 - optical microscope Motic



Рис. 2. Нанотрубки оксида цинка / Fig. 2. Nanotubes of zinc oxide

После агрегации на стеклянные подложки частицы вещества исследовались оптическим микроскопом (МБИ-15). Для исследования электронным микроскопом пробы осаждались на угольную пленку. Фотография нанотрубок ZnO приведена на рис. 3.

Для исследования льдообразующих свойств нанотрубок при различных термодинамических условиях использовалась большая облачная камера ВГИ объемом $V = 8 \text{ м}^3$ с теплоизолированными стенками, охлаждающаяся с помощью холодильных агрегатов. Специальная теплоизоляционная пленка на стенках камеры снижает температурный

градиент. Регулируемая температура в камере поддерживается в интервале от 0 до -17°C . Перемешивание воздуха в камере осуществлялось с помощью вентиляторов.

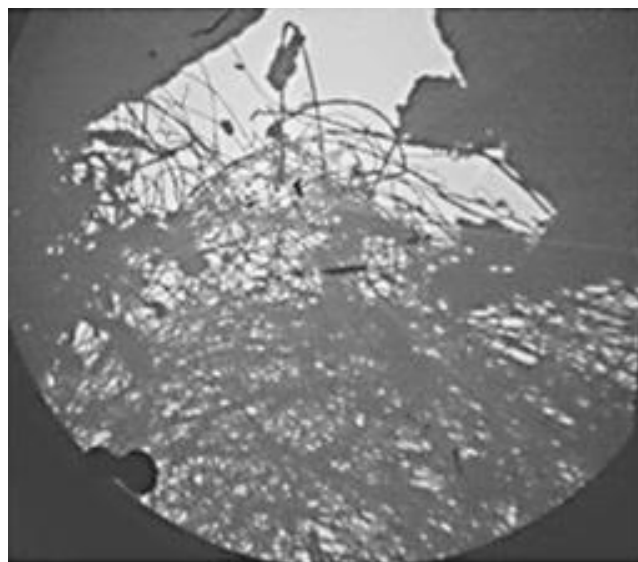


Рис. 3. Нанотрубки под электронным микроскопом / Fig. 3. The nanotubes under an electron microscope

Синтезированные нанотрубки ZnO использованные в качестве реагента, исследовались на льдообразующие свойства при различных температурах. Для определения удельного выхода кристаллов были проведены эксперименты двумя способами:

1. Возгонка реагента производилась в специальной (малой) камере и известный объем воздуха с реагентом переносился в охлажденную облачную среду (стандартный метод).

2. Возгонка реагента производилась непосредственно в охлажденной среде большой облачной камеры.

При проведении экспериментов в охлажденной среде большой облачной камеры (вторым способом) оценивались фоновые значения количества льдообразующих ядер. Было получено, что фоновое значение не превышало 2–3 кристаллов на площади $S = 4 \text{ мм}^2$ (поле зрения микроскопа).

В начале эксперимента в большую облачную камеру запускали пар и сжигали реагент. Образовавшиеся кристаллы оседали на подложки, которые извлекали из камеры и фотографировали под микроскопом Motic. Затем подсчитывалось количество кристаллов на подложке, а далее определялись количество кристаллов по всей площади камеры ($S_{\text{м.к}} = 3 \cdot 10^{12} \text{ мкм}^2$) и среднее количество кристаллов на 1 мкм^2 .

Удельный выход определялся по формуле

$$A = \frac{n_{кр}}{m_{реаг}}, \quad (1)$$

где $m_{реаг}$ – масса реагента, г; $n_{кр}$ – число кристаллов в малой камере, $м^{-3}$. Экспериментальные и расчетные данные по удельному выходу кристаллов при использовании нанотрубок ZnO приведены в таблице.

Данные по удельному выходу кристаллов
/ Data on the specific yield of crystals

n/n	Исходное вещество	Масса, г	Температура в облачной камере, °C	Удельный выход кристаллов, $г^{-1}$
1	Zn + Fe	0,4	-9,0	$1,5 \cdot 10^8$
2	Zn + Fe	0,04	-7,5	$1,4 \cdot 10^9$
3	Zn + Fe	0,04	-7,2	$5,0 \cdot 10^8$
4	Zn + Fe	0,04	-6,6	$2,2 \cdot 10^9$
5	Zn + Fe	0,04	-7,3	$6,1 \cdot 10^9$
6	Zn + Fe	0,033	-7,1	$5,2 \cdot 10^9$
7	Zn + Fe	0,033	-9,5	$5,3 \cdot 10^9$
8	Zn	0,03	-5,7	$5,9 \cdot 10^9$
9	Zn	0,03	-5,8	$2,1 \cdot 10^9$
10	Zn	0,03	-5,1	$1,4 \cdot 10^{10}$
11	Zn	0,03	-4,9	$1,75 \cdot 10^{10}$
12	Zn	0,007	-5,6	$4,19 \cdot 10^{10}$
13	Zn	0,007	-4,6	$1,6 \cdot 10^{11}$
14	Zn	0,007	-4,5	$1,7 \cdot 10^{11}$
15	Zn	0,0001	-0,2	$1,7 \cdot 10^{13}$
16	Zn	0,0001	-4,2	$1,44 \cdot 10^{12}$
17	Zn	0,0001	-4,6	$6,45 \cdot 10^{11}$
18	Zn	0,0001	-2,0	$1,8 \cdot 10^{13}$
19	Zn	0,0001	-1,6	$2,15 \cdot 10^{13}$
20	Zn	0,0001	-1,1	$1,11 \cdot 10^{13}$
21	Zn	0,0001	-3,2	$4,8 \cdot 10^{12}$
22	Zn	0,0001	-1,5	$1,88 \cdot 10^{12}$

График рассеяния имеет два линейных тренда: в «холодном» (от -10 до $-5,5$ °C) и в «теплом» (от $-5,5$ до 0 °C) диапазонах температур (рис. 4).

Уравнение линейного тренда в «холодном» диапазоне температур имеет вид

$$Y = (Y_1 t_1 + C_1) K, \quad (2)$$

где Y_1 – удельный выход кристаллов, $г^{-1}$; A_1 – угловой коэффициент, $A_1 = 23,03$ °C $^{-1} \cdot г^{-1}$; t_1 – температура в «холодном» диапазоне; C_1 – свободный член, $C_1 = 488,7$ $г^{-1}$; K – постоянный коэффициент, $K = 10^7$ $г^{-1}$.

Уравнение линейного тренда в «теплом» диапазоне температур имеет вид

$$Y = (Y_2 t_2 + C_2) K, \quad (3)$$

где $A_2 = 359919$ °C $^{-1} \cdot г^{-1}$; t_2 – температура в «теплом» диапазоне; $C_2 = 2 \cdot 10^6$ $г^{-1}$; $K = 10^7$ $г^{-1}$.

В результате экспериментальных исследований установлено, что удельный выход кристаллов увеличивается скачкообразно, на несколько порядков при переходе температуры из «холодного» диапазона (от -10 до $-5,5$ °C) в «теплый» диапазон (от $-5,5$ до 0 °C). В «теплом» диапазоне при увеличении температуры на один градус удельный выход кристаллов возрастает с нескольких десятков до нескольких сотен тысяч ($г^{-1}$), что наглядно видно на рис. 4.

Закключение

Результаты экспериментов, проведенных в лаборатории микрофизики облаков ВГИ, показали следующее:

– при возгонке реагента на основе нанотрубок оксида цинка непосредственно в облачной среде повышаются его льдообразующие свойства;

– при проведении экспериментов по возгонке реагента в температурном диапазоне от 0 до -10 °C наибольший удельный выход льдообразующих ядер ($3 \cdot 10^{13}$ $г^{-1}$) наблюдается в поддиапазоне от 0 до -2 °C;

– при температуре возгонки от 0 до -2 °C удельный выход льдообразующих ядер составил $3 \cdot 10^{13}$ $г^{-1}$, а при температуре возгонки от $-5,5$ до -10 °C удельный выход равен $1,2 \cdot 10^{11}$ $г^{-1}$.

Синтезированный реагент на основе нанотрубок ZnO может быть рекомендован как добавка к композитным материалам на основе AgI, что приведет к увеличению удельного выхода кристаллов.

Комплексные составы расширяют диапазон температур для эффективного использования по сравнению с традиционными реагентами и увеличивают число объектов активного воздействия,

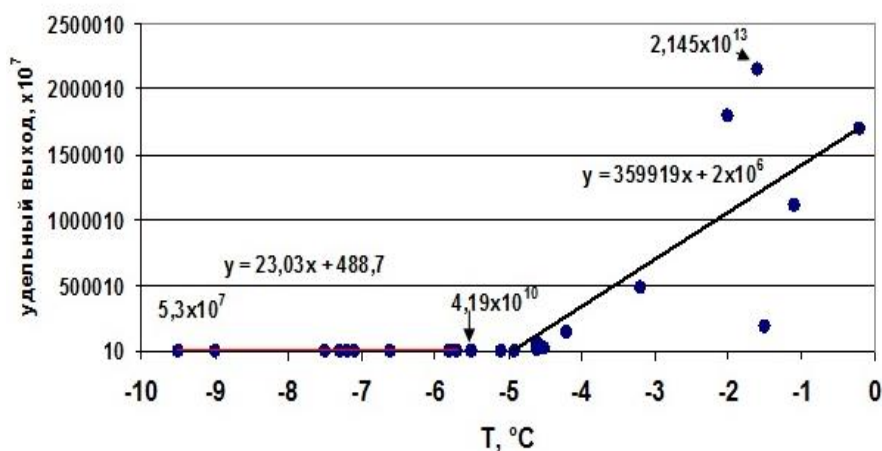


Рис. 4. График зависимости удельного выхода кристаллов от температуры T в двух диапазонах (с линейными трендами) / Fig. 4. Graph of specific yield of the crystals against temperature T in two ranges (linear trends)

повышают эффективность работ по градозащите и вызыванию осадков. Для более конкретных рекомендаций по активным воздействиям на облачные процессы требуются дополнительные исследования по определению удельного выхода комплексных составов с добавками цинка в более широком температурном диапазоне.

Литература

1. Тапасханов В.О., Хучунаев Б.М., Тлисов М.И., Хучунаев А.Б., Куповых Г.В. Предварительные результаты исследования конденсационных льдообразующих свойств нанотрубок AgI и оксида цинка // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2014. № 6. С. 40–43.
2. Развитие научно-методических основ и разработка технико-экономического обоснования работ по борьбе с засухами методами искусственного увеличения атмосферных осадков // Отчет о НИР (заключительный) по ФГБУ «ВГИ». Исследование льдообразующих и конденсационных свойств кристаллогидратов KI, нанотрубок AgI и ZnO и оценка возможности их использования для искусственного вызывания осадков, Нальчик, 2016. 60 с.
3. Haupt M., Ladenburger A., Sauer R., Thonke K. Ultraviolet-emitting ZnO nanowhiskers prepared by a vapor transport process on prestructured surfaces with self-assembled polymers // J. Appl. Phys. 2003. Vol. 93, No. 10. P. 6252–6257.
4. Heo Y.M., Varadarajan V., Kaufman M., Kim K., Norton D.P. Site-specific growth of ZnO nanorods using catalysis-driven molecular-beam epitaxy // Appl. Phys. Lett. 2002. Vol. 81, No. 16. P. 3046–3048.
5. Бураков В.С., Тарасенко Н.В., Невар Е.А., Неделько М.И. Морфология и оптические свойства наноструктур оксида цинка, синтезированных методом термического и электроразрядного распыления // ЖТФ. 2011. Вып. 2, т. 81. С. 88–97.
6. Покропивный В.В., Касумов М.М. Получение и механизм роста наноструктур из оксида цинка в дуговом разряде // Письма в ЖТФ. 2007. Вып. 1, т. 33. С. 88–94.
7. Тапасханов В.О., Хучунаев Б.М., Хучунаев А.Б., Панаэтов В.П. Предварительные результаты исследования льдообразующих свойств оксида цинка и AgI // Докл. Всерос. открытой конф. по физике облаков и активным воздействиям на гидрометеорологические процессы. Нальчик: Печатный двор, 2015. Ч. 2. С. 190–194.

References

1. Tapaskhanov V.O., Khuchunaev B.M., Tlisov M.I., Khuchunaev A.B., Kupovykh G.V. Predvaritel'nye rezul'taty issledovaniya kondensatsionnykh l'doobrazuyushchikh svoistv nanotrubok AgI i oksida tsinka [Preliminary results of a study of the condensation of ice-nucleation properties of nanotubes AgI and oxide of zinc]. *Izv. vuzov. Sev.-Kavk. region. Estestv. nauki*. 2014, No. 6, pp. 40–43.
2. [Development of scientific and methodological bases and development of feasibility study of works on drought control by methods of artificial increase of atmospheric precipitation]. *Issledovanie l'doobrazuyushchikh i kondensatsionnykh svoistv kristallogidratov KI, nanotrubok AgI i ZnO i otsenka vozmozhnosti ikh ispol'zovaniya dlya iskusstvennogo vyzyvaniya osadkov* [Study of ice-forming and condensation properties of crystallohydrates KI, AgI and ZnO nanotubes and assessment of the possibility of their use for artificial precipitation]. Research report. Nalchik, 2016, 60 p.
3. Haupt M., Ladenburger A., Sauer R., Thonke K. Ultraviolet-emitting ZnO nanowhiskers prepared by a vapor transport process on prestructured surfaces with self-assembled polymers. *J. Appl. Phys.* 2003, vol. 93, No. 10, pp. 6252–6257.
4. Heo Y.M., Varadarajan V., Kaufman M., Kim K., Norton D.P. Site-specific growth of ZnO nanorods using catalysis-driven molecular-beam epitaxy. *Appl. Phys. Lett.* 2002, vol. 81, No. 16, pp. 3046–3048.
5. Burakov V.S., Tarasenko N.V., Nevar E.A., Nedel'ko M.I. Morfologiya i opticheskie svoistva nanostруктур оксида цинка, синтезированных методом термического и электроразрядного распыления [Morphology and optical properties of zinc oxide nanostructures synthesized by thermal and electric discharge spraying]. *ZhTF*. 2011, Iss. 2, vol. 81, pp. 88–97.
6. Pokropivnyi V.V., Kasumov M.M. Poluchenie i mekhanizm rosta nanostруктур из оксида цинка в дуговом разряде [Preparation and growth mechanism of nanostructures of zinc oxide in the arc discharge]. *Pis'ma v ZhTF*. 2007, Iss. 1, vol. 33, pp. 88–94.
7. Tapaskhanov V.O., Khuchunaev B.M., Khuchunaev A.B., Panaetov V.P. [Preliminary results of a study of ice-nucleation properties of ZnO and AgI]. *Dokl. Vseros. otкрытой конф. po fizike oblakov i aktivnym vozdeistviyam na gidrometeorologicheskie protsessy* [Reports of the all-Russian open conference on the physics of clouds and active influences on hydrometeorological processes]. Nalchik: Pechatnyi dvor, 2015, ch. 2, pp. 190–194.

БИОЛОГИЧЕСКИЕ НАУКИ

BIOLOGICAL SCIENCES

УДК 576.89 (470.323)

DOI 10.23683/0321-3005-2018-4-116-123

РЕЗУЛЬТАТЫ САНИТАРНО-ГИГИЕНИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА УРОВНЯ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ГОРНЫХ ПАСТБИЩ КАБАРДИНО-БАЛКАРИИ ЯЙЦАМИ ТРЕМАТОДЫ *DICROCOELIUM LANCEATUM* (STILLES ET HASSALL, 1896)

© 2018 г. А.М. Биттиров¹, М.М. Хуламханова², Н.М. Мирзоева², Дж.А. Эльмурзаева²,
Л.В. Накова², С.М. Балаева², Л.Г. Гринева², А.А. Биттирова¹, С.А. Бегиева¹

¹Кабардино-Балкарский государственный аграрный университет им. В.М. Кокова, Нальчик, Россия,

²Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова, Нальчик, Россия

RESULTS OF SANITARY AND HYGIENIC MONITORING OF LEVEL OF POLLUTION OF MOUNTAIN PASTURES OF KABARDINO-BALKARIA EGGS TREMATODA *DICROCOELIUM LANCEATUM* (STILLES ET HASSALL, 1896)

A.M. Bittirov¹, M.M. Khulamkhanova², N.M. Mirzoeva², J.A. Elmurzaeva², L.V. Nakova²,
S.M. Balaeva², L.G. Grineva², A.A. Bittirova¹, S.A. Begieva¹

¹Kokov Kabardino-Balkarian State Agrarian University, Nalchik, Russia,

²Berbekov Kabardino-Balkarian State University, Nalchik, Russia

Биттиров Анатолий Мурашевич – доктор биологических наук, профессор, кафедра ветеринарной медицины, Кабардино-Балкарский государственный аграрный университет им. В.М. Кокова, ул. Ленина, 1в, г. Нальчик, КБР, 360030, Россия, e-mail: bam_58a@mail.ru

Anatoliy M. Bittirov - Doctor of Biological Sciences, Professor, Department of Veterinary Medicine, Kokov Kabardino-Balkarian State Agrarian University, Lenina St., 1b, Nalchik, KBR, 360030, Russia, e-mail: bam_58a@mail.ru

Хуламханова Марина Магомедовна – кандидат биологических наук, старший преподаватель, кафедра общей биологии, биоразнообразия и геоэкологии, Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова, ул. Чернышевского, 185, г. Нальчик, КБР, 360030, Россия, e-mail: xulamkhanova76@mail.ru

Marina M. Khulamkhanova - Candidate of Biological Sciences, Senior Lecturer, Department of General Biology, Biodiversity and Geocology, Berbekov Kabardino-Balkarian State University, Chernyshevskogo St., 185, Nalchik, KBR, 360030, Russia, e-mail: xulamkhanova76@mail.ru

Мирзоева Назифат Мухтаровна – кандидат биологических наук, старший преподаватель, кафедра биохимии и химической экологии, Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова, ул. Чернышевского, 185, г. Нальчик, КБР, 360030, Россия, e-mail: mnazifa@bk.ru

Nazifat M. Mirzoeva - Candidate of Biological Sciences, Senior Lecturer, Department of Biochemistry and Chemical Ecology, Berbekov Kabardino-Balkarian State University, Chernyshevskogo St., 185, Nalchik, KBR, 360030, Russia, e-mail: mnazifa@bk.ru

Эльмурзаева Джаннет Ануаровна – кандидат медицинских наук, ассистент, кафедра микробиологии, вирусологии и иммунологии, Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова, ул. Чернышевского, 185, г. Нальчик, КБР, 360030, Россия, e-mail: jan-net.elmurzaeva@yandex.ru

Janet A. Elmurzaeva - Candidate of Medicine, Assistant, Department of Microbiology, Virology and Immunology, Berbekov Kabardino-Balkarian State University, Chernyshevskogo St., 185, Nalchik, KBR, 360030, Russia, e-mail: jannet.elmurzaeva@yandex.ru

Накова Лариса Владимировна – кандидат биологических наук, ассистент, кафедра микробиологии, вирусологии и иммунологии, Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова, ул. Чернышевского, 185, г. Нальчик, КБР, 360030, Россия, e-mail: mnazifa@bk.ru

Larisa V. Nakova - Candidate of Biological Sciences, Assistant, Department of Microbiology, Virology and Immunology, Berbekov Kabardino-Balkarian State University, Chernyshevskogo St., 185, Nalchik, KBR, 360030, Russia, e-mail: mnazifa@bk.ru

Балаева Сафият Масхутовна – кандидат химических наук, доцент, кафедра биохимии и химической экологии, Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова, ул. Чернышевского, 185, г. Нальчик, КБР, 360030, Россия, e-mail: safiyat.balaeva@mail.ru

Safiyat M. Balaeva - Candidate of Chemistry, Associate Professor, Department of Biochemistry and Chemical Ecology, Berbekov Kabardino-Balkarian State University, Chernyshevskogo St., 185, Nalchik, KBR, 360030, Russia, e-mail: safiyat.balaeva@mail.ru

Гринева Лариса Георгиевна – кандидат химических наук, доцент, кафедра биохимии и химической экологии, Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова, ул. Чернышевского, 185, г. Нальчик, КБР, 360030, Россия, e-mail: Larissa-3349@yandex.ru

Larisa G. Grineva - Candidate of Chemistry, Associate Professor, Department of Biochemistry and Chemical Ecology, Berbekov Kabardino-Balkarian State University, Chernyshevskogo St., 185, Nalchik, KBR, 360030, Russia, e-mail: Larissa-3349@yandex.ru

Биттирова Асият Анатольевна – аспирант, кафедра ветеринарной медицины, Кабардино-Балкарский государственный аграрный университет им. В.М. Кокова, ул. Ленина, 1в, г. Нальчик, КБР, 360030, Россия, e-mail: baa_1993@mail.ru

Asiyat A. Bittirova - Postgraduate, Department of Veterinary Medicine, Kokov Kabardino-Balkarian State Agrarian University, Lenina St., 1b, Nalchik, KBR, 360030, Russia, e-mail: baa_1993@mail.ru

Бегиева Софият Анатольевна – аспирант, кафедра ветеринарной медицины, Кабардино-Балкарский государственный аграрный университет им. В.М. Кокова, ул. Ленина, 1в, г. Нальчик, КБР, 360030, Россия, e-mail: bsa_1991@mail.ru

Sofiyat A. Begieva - Postgraduate, Department of Veterinary Medicine, Kokov Kabardino-Balkarian State Agrarian University, Lenina St., 1b, Nalchik, KBR, 360030, Russia, e-mail: bsa_1991@mail.ru

Представлены результаты сравнительного анализа санитарно-гигиенического состояния 11 горных пастбищ Кабардино-Балкарии по уровню загрязнения яйцами трематоды *Dicrocoelium lanceatum* (Stilles et Hassall, 1896). В местах выпаса, стоянок и отдыха животных в горных урочищах Кабардино-Балкарии (Аурсентх, Хаймаша, Кинжал, Лохран, Тызыл, Джилы-Су, Шикуртым, Шелюга, Мозокей, Гатлахуко, Бгух) в 55,00–92,00 % проб почвы (в среднем 73,00 %) обнаружены яйца ланцетовидной двуустки; на 100 г пробы приходится $8,2 \pm 0,7$ – $17,4 \pm 2,2$ экз. (в среднем $12,20 \pm 1,34$). В почвах прифермских территорий и в местах водопоя животных загрязненность яйцами *Dicrocoelium lanceatum* составляет 100 % при относительно сильной степени загрязнения инвазионными элементами трематоды. На высоте 1000, 1500, 2000, 2500, 3000, 3500 м над уровнем моря перезимовывали соответственно 32,6; 29,4; 20,8; 13,2; 3,0 и 0 % яиц ланцетовидной двуустки. Почвы на высоте 3500 м над уровнем моря к весне свободны от наличия жизнеспособных яиц ланцетовидной двуустки. Санитарно-гигиеническое состояние горных пастбищных угодий Кабардино-Балкарской Республики по их загрязненности яйцами ланцетовидной двуустки оценивается как сильно загрязненное.

Ключевые слова: Кабардино-Балкарская Республика, почва, горная зона, загрязнение, яйцо, трематода, *Dicrocoelium lanceatum* (Stilles et Hassall, 1896).

Results of the comparative analysis of a sanitary and hygienic condition of 11 mountain pastures of Kabardino-Balkaria on pollution level are presented by eggs trematodes *Dicrocoelium lanceatum* (Stilles et Hassall, 1896). In places of a pasture, parking and rest of animals in mountain natural boundaries of Kabardino-Balkaria (Aursentkh, Haimasha, Dagger, Lokhran, Tysyl, Gily-Su, Shikurtym, Shelyuga, Mozokey, Gatlahuko, Bgukh), respectively, in 55.00 - 92.00 % tests of the soil (on average

73.00 %) have found eggs trematodes *Dicrocoelium lanceatum* in quantity per 100 g of test, respectively, 8.2 ± 0.7 - 17.4 ± 2.2 (on average 12.20 ± 1.34) by piece. In soils of prifermsky territories and in places of a watering place of animals the impurity eggs *Dicrocoelium lanceatum* (Stilles et Hassall, 1896) is 100 % at rather strong extent of pollution by invasive elements of a trematodes. At the heights of 1000, 1500, 2000, 2500, 3000, 3500 m above sea level 32.6; 29.4; 20.8; 13.2; 3.0 and 0 % of eggs *Dicrocoelium lanceatum* are wintered. Soils at the height of 3500 m above sea level by spring are free from existence of viable eggs of a trematoda of *D. lanceatum*. The sanitary and hygienic condition of mountain pasturable territories of Kabardino-Balkar Republic on their impurity is estimated by eggs *Dicrocoelium lanceatum* at the present period as strongly polluted.

Keywords: Kabardino-Balkar Republic, soil, mountain zone, pollution, egg, trematoda, *Dicrocoelium lanceatum* (Stilles et Hassall, 1896).

Введение

Дикроцелиоз человека и более 100 видов животных – глобальная медико-ветеринарная проблема в перечне паразитарных зоонозов в мире. Эпизоотологическая и эпидемическая ситуация по опасному зоонозу в регионах РФ за последние десятилетия имеет тенденцию к ухудшению [1–5]. По данным ветеринарных служб, за последние 20 лет уровень заболеваемости жвачных животных имагинальным дикроцелиозом вырос в 4,7 раза [6–9]. Дикроцелиозная инвазия среди животных в мире и на всей территории РФ приобрела энзоотичный характер с образованием региональных эпизоотологических и эпидемических сельских и городских очагов [10–14].

Стал очевидным высокий уровень экстенсивности дикроцелиозом разных видов домашних и диких копытных животных с охватом 40–70 % от всего имеющегося взрослого поголовья [15–19].

В густонаселенных человеком регионах Кабардино-Балкарии зараженность овец дикроцелиозом составляет 50–86 % [20, 21], взрослого поголовья крупного рогатого скота – 35–62 [22].

В России дикроцелиоз у домашних и диких животных стал природно-очаговой инвазией с многоуровневой защитой жизненных стратегий у дефинитивных и промежуточных хозяев через загрязненную яйцами трематоды *Dicrocoelium lanceatum* внешнюю среду [21–25].

По активности эпизоотического процесса дикроцелиоза во взаимосвязи с уровнем загрязнения яйцами горной экосистемы Кабардино-Балкарии научные исследования не проводились [25–27]; мало сведений по вопросам санитарно-гигиенического состояния горных объектов по загрязненности яйцами трематоды этого вида и за рубежом [28–30].

Цель статьи – проведение локальных экологических и санитарно-гигиенических исследований с оценкой состояния загрязненности горных объектов Кабардино-Балкарии яйцами *Dicrocoelium lanceatum* (Stilles et Hassall, 1896).

Материалы и методы

Работу проводили на базе лаборатории паразитологии ФГБНУ «Прикаспийский зональный научно-исследовательский ветеринарный институт» в 2014–2017 гг.

Для этого с мест выпаса, стоянок и отдыха животных в горных урочищах Аурсентх, Хаймаша, Кинжал, Лохран, Тызыл, Джилы-Су, Шикуртым, Шелюга, Мозокей, Гатлахуко, Бгух брали по 100 образцов почвы ежемесячно весной, летом и осенью на глубине 1–5 см в трех повторностях для исследования на предмет обнаружения яиц *Dicrocoelium lanceatum*.

В условиях биотопов горной зоны с учетом вертикальной поясности Кабардино-Балкарской Республики были проведены опыты по определению сроков развития яиц трематоды *Dicrocoelium lanceatum* на высоте 1000, 1500, 2000, 2500, 3000, 3500 м над уровнем моря.

Закладку опытов проводили с использованием смывых из матки свежих яиц ланцетовидной двуустки. Пробы яиц (10–15 тыс.) доставляли на опытный участок ежемесячно с марта по ноябрь. Для этого яйца помещали в стеклянные банки, которые затем ставили на биоплощадку.

Для определения жизнеспособности инвазионных элементов ежедневно брали пробы почвы с яйцами имаго ланцетовидной двуустки.

В каждом случае исследовали под микроскопом по 100 экз. яиц из проб почвы. Возможности жизнеспособности яиц трематод этого вида в зимний сезон изучали в условиях горной зоны. В пробы почвы в конце ноября вносили свежие яйца и оставляли в течение зимы до марта следующего года во внешней среде. По окончании зимнего периода образцы почвы с целью обнаружения яиц двуустки ланцетовидной исследовали методами гельминтоовоскопии [1, 7, 13, 20].

Данные подвергали статистической обработке в программе «Биометрия».

Результаты и обсуждение

Санитарно-гельминтологические овоскопические исследования образцов почвы позволили выявить неблагополучные эпизоотически и эпидемически горные территории в отношении инвазии трематоды *Dicrocoelium lanceatum* (табл. 1).

Таблица 1

Санитарно-гигиеническое состояние 100 образцов почвы горных урочищ Кабардино-Балкарии и их загрязненность яйцами *Dicrocoelium lanceatum* (Stilles et Hassall, 1896) (по данным исследования образцов почвы) / A sanitary and hygienic condition of 100 samples of the soil of mountain natural boundaries of Kabardino-Balkaria and their impurity eggs *Dicrocoelium lanceatum* (Stilles et Hassall, 1896) (according to an research of samples of the soil)

Название урочища	Количество загрязненных образцов почвы	Загрязненные образцы почвы, %	Количество яиц трематоды <i>Dicrocoelium lanceatum</i> в 100 г почвы
Аурсентх	92	92,00	17,4±2,2
Хаймаша	88	88,00	14,8±2,0
Кинжал	76	76,00	12,6±1,7
Лохран	80	80,00	13,9±1,5
Тызыл	72	72,00	11,5±1,3
Джилы-Су	84	84,00	14,2±1,9
Шикуртым	67	67,00	10,7±1,0
Шелюга	55	55,00	8,9±0,8
Мозокей	62	62,00	10,3±0,9
Гатлахуко	57	57,00	8,2±0,7
Бгух	70	70,00	11,7±1,1
В среднем	–	73,00	12,20±1,34

По результатам исследований проб почвы в местах выпаса, стоянок и отдыха животных в горных урочищах в 55,00–92,00 % проб (в среднем 73,00 %) обнаружены яйца *Dicrocoelium lanceatum* (ланцетовидной двуустки); на 100 г пробы – 8,2±0,7 – 17,4±2,2 экз. (в среднем 12,20±1,34) (табл. 1).

При изучении динамики контаминации образцов почвы яйцами трематоды данного вида в условиях горных пастбищ Аурсентх в 2014–2017 гг. установлено, что уровень загрязнения проб почвы увеличился с 83,0 до 100 % (среднее 92,00 %) при возрастании количества яиц ланцетовидной двуустки в 100 г почвы с 12,4±1,8 до 22,2±2,6 экз. (среднее 17,4±2,2) (табл. 2).

Аналогичная тенденция роста контаминации почвы с

яйцами *Dicrocoelium lanceatum* наблюдается и в горных пастбищах Хаймаша, но при не достоверно меньших значениях степени загрязнения яйцами почвы.

По данным овоскопии почвы в каждом из 11 горных урочищ Кабардино-Балкарии исследовали по 300 образцов почвы в прифермских территориях и по 150 в местах водопоя животных. Обнаружена 100%-я загрязненность яйцами ланцетовидной двуустки при относительно сильной степени загрязнения инвазионными элементами биогельминта (свыше 11 экз. яиц в 100 г образцов почвы).

Замечание. Слабая степень загрязненности – 1–5 экз. яиц в 100 г почвы; средняя – 6–10; сильная – свыше 11.

Опытным путем на биоплощадках на высоте 1000, 1500, 2000, 2500, 3000, 3500 м над уровнем моря установлена прямая зависимость перезимовывания в почвах отгонных пастбищ Кабардино-Балкарии яиц *Dicrocoelium lanceatum* от высотной поясности горных территорий. В почве 11 отгонных пастбищ Кабардино-Балкарии на высоте 1000–3500 м над уровнем моря перезимовывали соответственно 32,6; 29,4; 20,8; 13,2; 3,0 и 0 % яиц. В течение зимнего периода к весне в пробах почвы количество нежизнеспособных яиц ланцетовидной двуустки по мере увеличения высоты над уровнем моря имело тенденцию к увеличению с 67,4 до 100 % (табл. 3).

Данные табл. 3 указывают на высокий уровень контаминации почвы в местах выпаса, стоянок и отдыха животных в горных урочищах Кабардино-Балкарии яйцами ланцетовидной двуустки.

Таблица 2

Динамика контаминации образцов почвы горных пастбищ урочища Аурсентх (Хаймаша) яйцами *Dicrocoelium lanceatum* (Stilles et Hassall, 1896), 2014–2017 гг. (по данным исследования образцов почвы) / Dynamics of contamination of samples of the soil of mountain pastures of the natural boundary Aursenth (Haimasha) eggs *Dicrocoelium lanceatum* (Stilles et Hassall, 1896) 2014-2017 (according to an research of samples of the soil)

Год	Исследовано образцов почвы, экз.	Обнаружены образцы почвы с яйцами трематоды <i>Dicrocoelium lanceatum</i> , экз.	ЭИ, %	Количество яиц трематоды <i>Dicrocoelium lanceatum</i> в 100 г почвы
2014	100	83 (81)	83,0 (81,0)	12,4±1,8 (10,5±1,6)
2015	100	90 (85)	90,0 (85,0)	16,3±2,0 (13,4±1,8)
2016	100	95 (90)	95,0 (90,0)	18,7±2,4 (16,0±2,2)
2017	100	100 (96)	100 (96,0)	22,2±2,6 (19,3±2,4)
Всего	400	368 (352)	–	–
В среднем	–	–	92,00 (88,00)	17,4±2,2 (14,8±2,0)

Таблица 3

Показатели перезимовывания яиц *Dicrocoelium lanceatum* в почве на отгонных пастбищах Кабардино-Балкарии с учетом высотного пояса (по данным исследования образцов почвы) / Indicators of a overwintering of eggs *Dicrocoelium lanceatum* in the soil on distant pastures of Kabardino-Balkaria with accounting of a high-rise belt (according to an research of samples of the soil)

Высота над уровнем моря, м	Количество яиц <i>Dicrocoelium lanceatum</i> в почве осенью при закладке опыта, экз.	Количество яиц <i>Dicrocoelium lanceatum</i> в почве весной, экз.	Жизнеспособные яйца <i>Dicrocoelium lanceatum</i> в почве весной, %
1000	1000±100	938±49,2	32,6
1500	1000±100	912±42,7	29,4
2000	1000±100	884±37,4	20,8
2500	1000±100	861±29,6	13,2
3000	1000±100	847±22,9	3,0
3500	1000±100	924±19,5	–

В почве 11 отгонных пастбищ на высоте 1000, 1500, 2000, 2500, 3000, 3500 м над уровнем моря перезимовывали соответственно 32,6; 29,4; 20,8; 13,2; 3,0 и 0 % яиц *Dicrocoelium lanceatum*, что согласуется с данными [3] и др.

Заключение

В статье изучена загрязненность горных объектов Кабардино-Балкарской Республики яйцами трематоды *Dicrocoelium lanceatum* (Stilles et Hassall, 1896). В местах выпаса, стоянок и отдыха животных в 11 горных урочищах Кабардино-Балкарии в 55,00–92,00 % проб почвы обнаружены яйца двуустки. На высоте 1000, 1500, 2000, 2500, 3000, 3500 м над уровнем моря перезимовывали соответственно 32,6; 29,4; 20,8; 13,2; 3,0 и 0 % яиц гельминта. В течение зимнего периода к весне в пробах почвы количество нежизнеспособных яиц дикроцелий по мере увеличения высоты над уровнем моря имело тенденцию к увеличению с 67,4 до 100 %. Санитарно-гигиеническое состояние горных пастбищных территорий Кабардино-Балкарской Республики (Аурсентх, Хаймаша, Кинжал, Лохран, Тызыл, Джилы-Су, Шикуртым, Шелюга, Мозокей, Гатлахуко, Бгух) по их загрязненности яйцами *Dicrocoelium lanceatum* в настоящий период оценивается как сильно загрязненное.

Литература

1. Атабиева Ж.А., Бичиева М.М., Колодий И.В., Биттиров А.М., Шихалиева М.А., Сарбашева М.М., Жекамухова М.З. Прогнозирование эпизоотической и эпидемической ситуации по зоонозным инвазиям на

юге России // Ветеринарная патология. 2012. № 1 (39). С. 119–122.

2. Биттиров А.М. Эпидемиологическая ситуация по гельминтозам животных и человека в Кабардино-Балкарской Республике // Проблемы и перспективные направления прикладной биологической науки в начале XXI в. : материалы Всерос. науч.-практ. конф., 19–21 мая 2013. М., 2013. С. 82–86.

3. Василевич Ф.И., Биттиров А.М., Калабеков М.И., Кешиков Р.Х., Соттаев М.Х. Санитарное просвещение населения и пути обеспечения гигиенической безопасности в отношении зоонозных инвазий. Нальчик; М., 2010. 68 с.

4. Атабиева Ж.А., Биттирова А.А., Сарбашева М.М., Шихалиева М.А., Биттиров А.М., Жекамухова М.З., Максидова З.Ф., Биттиров А.М. Эколого-видовой состав фауны эндопаразитов и эпидемиологическая характеристика зоонозов в Кабардино-Балкарской Республике // Ведомости Белгородского гос. ун-та. Медицина и фармация. 2012. № 10 (129). С. 94–98.

5. Малышева Н.С., Романенко Н.А. Поиск новых эффективных путей охраны здоровья и профилактики паразитарных заболеваний человека // Гигиена и санитария. 2003. № 3. С. 41–45.

6. Сарбашева М.М., Биттиров А.М., Ардавова Ж.М., Арипишева Б.М. Улучшение санитарно-паразитологического состояния объектов окружающей среды в Кабардино-Балкарии // Рос. паразитол. журн. 2010. № 4. С. 119–122.

7. Шихалиева М.А., Дохов А.А., Биттиров А.М., Вологиров А.С., Чилаев С.Ш. Паразитозоозы Кабардино-Балкарской Республики // Изв. Горского гос. агроун-та. 2010. № 1 (47). С. 146–148.

8. Биттиров А.М., Сарбашева М.М., Казанчева Л.К., Канокова А.С. Санитарно-паразитологическое исследование объектов инфраструктуры населенных пунктов Кабардино-Балкарской Республики // Теория и практика борьбы с паразитарными болезнями : материалы Всерос. науч. конф. 22–23 мая 2010 г. М., 2010. С. 55–58.

9. Кабардиев С.Ш., Биттиров А.М., Карпущенко К.А. Эпизоотическая оценка гельминтов чабанских собак на отгонных пастбищах Уш-тулу, Жалпак и Сукал // Таврический науч. обозреватель. 2015. № 3 (2). С. 84.

10. Sarbasheva M.M., Bittirova A.A., Atabieva Zh.A., Bittirov A.M. Model of Sanitary-Helminthological Surveillance and Search of Means of Dezinvas of Soil and Water in the Fences of Tenairinhoza under Conditions of Kabardino-Balkaria // Hygiene and Sanitation. 2014. № 3 (93). P. 31–34.

11. Шихалиева М.А., Атабиева Ж.А., Колодий И.В., Биттиров А.М., Сарбашева М.М., Бичиева М.М., Биттиров А.М. Структура паразитоценозов равнинного пояса Северного Кавказа // Ветеринарная патология. 2012. № 2 (40). С. 109–113.

12. Акиева О.А., Биттиров А.М. Дикроцелиоз – факторная инвазия овец в регионе Северного Кавказа // Проблемы ветеринарной медицины в условиях реформирования с.-х. пр-ва Прикасп. ЗНИВИ. 2012. С. 218–221.
13. Бессонов А.С. Распространение эхинококкоза сельскохозяйственных и промысловых животных в Центральном районе РФ : материалы науч.-практ. конф. ВОГ. М.: ВИГИС, 2002. С. 3–7.
14. Акиева О.М., Биджиев А.З., Голубев А.А., Сарбашева М.М., Мантаева С.Ш., Шихалиева М.А., Биттиров А.М. Эколого-видовая и эпизоотологическая характеристика гельминтов волка в Кабардино-Балкарской Республике // Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2012. № 5 (30). С. 86–89.
15. Биттиров А.М., Кудаев А.С., Тамаев Т.И. Проблемы эпизоотологии и эпидемиологии эхинококкозов животных и человека в некоторых регионах Южного федерального округа РФ // Проблемы и перспективные направления прикладной биологической науки в начале XXI в. : материалы Всерос. науч.-практ. конф. Нальчик; М., 2003. Ч. 1. С. 34–35.
16. Биттиров А.М., Биджиев А.З., Мантаева С.Ш., Шихалиева М.А., Сарбашева М.М., Голубев А.А., Акиева О.М. Эпизоотологическая оценка гельминтов собак и диких псовых в Кабардино-Балкарии // Аграрная наука. 2012. № 9. С. 31–32.
17. Bittirov A.M., Gazaeva A.A., Begieva S.A., Bit-tirova A.A., Uyanaeva F.B. Integrated Assessment of Pollution of Objects and Infrastructure of the North Caucasian Region with Eggs *Toxokara canis* // Hygiene and Sanitation. 2018. № 4 (97). P. 301–305.
18. Сарбашева М.М., Биттирова А.А., Атабиева Ж.А., Биттиров А.М., Биттиров А.М. Оценка санитарно-гельминтологического состояния почвы и воды // Эпидемиология и инфекционные болезни. 2013. № 1. С. 46–48.
19. Сарбашева М.М., Биттиров А.М., Ардавова Ж.М., Арипишева Б.М. Улучшение санитарно-паразитологического состояния объектов окружающей среды в Кабардино-Балкарской Республике // Рос. паразитол. журн. 2010. № 4. С. 98–100.
20. Сарбашева М.М., Биттирова А.А., Атабиева Ж.А., Биттиров А.М. Количественный анализ фауны гельминтов, общих для человека и животных в Кабардино-Балкарской Республике // Успехи совр. естествознания. 2013. № 2. С. 33–35.
21. Chin T.H. The cestode soonoses of China // Sixth International Congress of Parasitology. Brisbane, Australia, August 25–29, 2016. Australian Academy of Science. Canberre, 2016. № 30. P. 323–326.
22. Сарбашева М.М., Биттирова А.А., Атабиева Ж.А., Биттиров А.М., Биттиров А.М. Краевая эпидемиология цестодозов человека в Кабардино-Балкарской Республике // Эпидемиология и инфекционные болезни. 2012. № 6. С. 35–37.
23. Шихалиева М.А., Атабиева Ж.А., Колодий И.В., Биттиров А.М., Сарбашева М.М., Бичиева М.М., Биттиров А.М. Структура паразитоценозов равнинного пояса региона Северного Кавказа // Ветеринарная патология. 2012. № 2 (40). С. 109–113.
24. Zalikhanov M.Ch., Bittirov A.M., Begieva S.A. Modern Biological Threats and World Regulations to Provide Biosafety of Animal Products // Breeding on Modern Populations of Domestic Dairy Cathedral as a Basis of Import Substitution of Animal Production. Materials of the All-Russian Scientific-Practical Conference with International Participation. Belgorod, 2018. P. 245–253.
25. Bittirov A.M. Epidemiological Situation in Helminthoses of Animals and Man in the Kabardino-Balkaria Republic // Problems and Prospective Directions of Applied Biological Science at the Beginning of the 21st Century : Proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference. May 19–21, 2013. M., 2013.
26. Vasilevich F.I., Bittirov A.M., Kalabekov M.I., Aliev Sh.K., Sarbasheva M.M. Biodiversity, Biogeography and Epidemiological Monitoring of Zoonoses of Dogs and Wild Dogs Family (Canidae) in the North Caucasus Region. Nalchik: PoligrafServis, 2010. 168 p.
27. Atabieva Zh.A., Bichieva M.M., Kolodii I.V., Bittirov A.M., Shikhalieva M.A., Sarbasheva M.M., Zhekamukhova M.Z. Forecasting of Epizootic and Epidemic Situation on Zoonotic Invasions in the South of Russia // Veterinary Pathology. 2012. № 1 (39). P. 119–122.
28. Limbery A.J. *Dicrocoelium lanceatum* (Stilles et Hassall, 1896). Wallingford, UK: CAB International, 2005. 479 p.
29. Prasad B.N., Prasad L.N. Note on the Pathology of Hydatidosis in Sheep and Goat Indian // Vet. Med. J. 2010. Vol. 44, № 2. P. 89–94.
30. Gemmell M.A., Varela-Diaz V.M. Review of Programs for the Control of *Dicrocoelium lanceatum* (Stilles et Hassall, 1896) / Pan American Zoonosis Centre, Pan American Healths Organization, Buenos Aires, 2013. № 4. P. 307–311.

References

1. Atabieva Zh.A., Bichieva M.M., Kolodii I.V., Bittirov A.M., Shikhalieva M.A., Sarbasheva M.M., Zhekamukhova M.Z. Prognozirovanie epizooticheskoi i epidemicheskoi situatsii po zoonoznym invaziyam na yuge Rossii [Forecasting of an epizootic and epidemic situation on zoonoses invasions in the South of Russia]. *Veterinarnaya patologiya*. 2012, No. 1 (39), pp. 119–122.
2. Bittirov A.M. [An epidemiological situation on helminthoses of animals and the person in Kabardino-Balkar Republic]. *Problemy i perspektivnye napravleniya prikladnoi biologicheskoi nauki v nachale XXI v.* [Problems and the perspective directions of applied biological science at the beginning of the 21st century]. Materials of the All-

Russian Scientific and Practical Conference. May 19-21, 2013. Moscow, 2013, pp. 82-86.

3. Vasilevich F.I., Bittirov A.M., Kalabekov M.I., Keshokov R.Kh., Sottaev M.Kh. *Sanitarnoe prosveshchenie naseleniya i puti obespecheniya gigienicheskoi bezopasnosti v otnoshenii zoonoznykh invazii* [Sanitary education of the population and a way of ensuring hygienic safety concerning zoonoses invasions]. Nalchik; Moscow, 2010, 68 p.

4. Atabieva Zh.A., Bittirova A.A., Sarbasheva M.M., Shikhalieva M.A., Bittirov A.M., Zhekamukhova M.Z., Maksidova Z.F., Bittirov A.M. *Ekologo-vidovoi sostav fauny endoparazitov i epidemiologicheskaya kharakteristika zoonozov v Kabardino-Balkarskoi Respublike* [Ecological and species composition of the fauna of endoparasites and epidemiological characteristics of zoonoses in the Kabardino-Balkar Republic]. *Vedomosti Belgorodskogo gos. un-ta. Meditsina i farmatsiya*. 2012, No. 10 (129), pp. 94-98.

5. Malysheva N.S., Romanenko N.A. *Poisk novykh effektivnykh putei okhrany zdorov'ya i profilaktiki parazitarnykh zabolevani cheloveka* [Search of new effective ways of health protection and prevention of parasitic diseases of the person]. *Gigiena i sanitariya*. 2003, No. 3, pp. 41-45.

6. Sarbasheva M.M., Bittirov A.M., Ardavova Zh.M., Aripshcheva B.M. *Uluchshenie sanitarno-parazitologicheskogo sostoyaniya ob"ektov okruzhayushchei sredy v Kabardino-Balkarii* [Improvement of a sanitary and parasitological condition of objects of the environment in Kabardino-Balkaria]. *Ros. parazitol. zhurn.* 2010, No. 4, pp. 119-122.

7. Shikhalieva M.A., Dokhov A.A., Bittirov A.M., Vologirov A.S., Chilaev S.Sh. *Parazitoozoozy Kabardino-Balkarskoi Respubliki* [Parazitoozoozy of Kabardino-Balkar Republic]. *Izv. Gorskogo gos. agroun-ta*. 2010, No. 1 (47), pp. 146-148.

8. Bittirov A.M., Sarbasheva M.M., Kazancheva L.K., Kanokova A.S. *Sanitarny i parazitologicheskiy issledovaniye ob"ektov osnovednykh sooruzheniy poselkov Kabardino-Balkarskoi Respubliki* [Sanitary and parasitological research of infrastructure facilities of settlements of Kabardino-Balkar Republic]. *Teoriya i praktika bor'by s parazitarnymi boleznyami* [Theory and practice of fight against parasitic diseases]. Materials of the All-Russian Scientific Conference. May 22-23, 2010. Moscow, 2010, pp. 55-58.

9. Kabardiev S.Sh., Bittirov A.M., Karpushchenko K.A. *Epizooticheskaya otsenka gel'mintov chabanskikh sobak na otgonnykh pastbishchakh Ush-tulu, Zhalpak i Sukan* [Epizootic assessment of helminthes of chabansky dogs on distant pastures Ush-Tula, Zhalpak and Sukan]. *Tavrisheskii nauch. obozrevatel'*. 2015, No. 3 (2), p. 84.

10. Sarbasheva M.M., Bittirova A.A., Atabieva Zh.A., Bittirov A.M. *Model of Sanitary-Helminthological Surveillance and Search of Means of Dezinvase of Soil and Water in the Fences of Tenairinhoza Under Conditions of Kabardino-Balkaria*. *Hygiene and Sanitation*. 2014, No. 3 (93), pp. 31-34.

11. Shikhalieva M.A., Atabieva Zh.A., Kolodii I.V., Bittirov A.M., Sarbasheva M.M., Bichieva M.M., Bittirov A.M. *Struktura parazitotsenozov ravninnogo poyasa Severnogo Kavkaza* [Structure of parasitocenosis of a flat belt of the North Caucasus]. *Veterinarnaya patologiya*. 2012, No. 2 (40), pp. 109-113.

12. Akieva O.A., Bittirov A.M. *Dicrocoeliosis - a factorial invasion of sheep in the region of the North Caucasus*. *Problemy veterinarnoi meditsiny v usloviyakh reformirovaniya s.-kh. pr-va Prikasp. ZNIVI* [Problems of veterinary medicine in the conditions of reforming agricultural production in the Caspian SNEVE]. 2012, pp. 218-221.

13. Bessonov A.S. *Rasprostraneniye ekhinokokkoza sel'skokhozyaistvennykh i promyslovnykh zhivotnykh v Tsentral'nom raione RF* [Spread of echinococcosis of farm and trade animals in the Central district of the Russian Federation]. Materials of the Scientific and Practical Conference. Moscow: VIGIS, 2002, pp. 3-7.

14. Akieva O.M., Bidzhiev A.Z., Golubev A.A., Sarbasheva M.M., Mantaeva S.Sh., Shikhalieva M.A., Bittirov A.M. *Ekologo-vidovaya i epizootologicheskaya kharakteristika gel'mintov volka v Kabardino-Balkarskoi Respublike* [Eco-specific and epizootological characteristics of wolf helminths in the Kabardino-Balkar Republic]. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka*. 2012, No. 5 (30), pp. 58-61.

15. Bittirov A.M., Kudaev A.S., Tamaev T.I. *Problemy epizootologii i epidemiologii cheloveka i zhivotnykh v yuzhnym federal'nom okruzheniye* [Problems of epizootology and epidemiology of human and animal echinococcosis in some regions of the Southern federal district of the Russian Federation]. *Problemy i perspektivnye napravleniya prikladnoi biologicheskoi nauki v nachale XXI v.* [Problems and perspective directions of applied biological science at the beginning of the 21st century]. Materials of the all-Russian Scientific-Practical Conference. Nalchik; Moscow, 2003, ch. 1, pp. 34-35.

16. Bittirov A.M., Bidzhiev A.Z., Mantaeva S.Sh., Shikhalieva M.A., Sarbasheva M.M., Golubev A.A., Akieva O.M. *Epizootologicheskaya otsenka gel'mintov sobak i dikikh psovykh v Kabardino-Balkarii* [Epizootological assessment of helminths of dogs and wild canines in Kabardino-Balkaria]. *Agrarnaya nauka*. 2012, No. 9, pp. 31-32.

17. Bittirov A.M., Gazeva A.A., Begieva S.A., Bittirova A.A., Uyanaeva F.B. *Integrated Assessment of Pollution of Objects and Infrastructure of the North Caucasian Region with Eggs Toxokara canis*. *Hygiene and Sanitation*. 2018, No. 4 (97), pp. 301-305.

18. Sarbasheva M.M., Bittirova A.A., Atabieva Zh.A., Bittirov A.M., Bittirov A.M. *Otsenka sanitarno-gel'mintologicheskogo sostoyaniya pochvy i vody* [Assessment of sanitary and parasitological conditions of the soil and water]. *Epidemiologiya i infeksionnye bolezni*. 2013, No. 1, pp. 46-48.

19. Sarbasheva M.M., Bittirov A.M., Ardavova Zh.M., Aripshcheva B.M. *Uluchshenie sanitarno-parazitologicheskogo sostoyaniya ob"ektov okruzhayushchei sredy v*

Kabardino-Balkarskoi Respublike [Improvement of a sanitary and parasitological condition of objects of the environment in Kabardino-Balkar Republic]. *Ros. parazitol. zhurn.* 2010, No. 4, pp. 98-100.

20. Sarbasheva M.M., Bittirova A.A., Atabieva Zh.A., Bittirov A.M. Kolichestvennyi analiz fauny gel'mintov, obshchikh dlya cheloveka i zhivotnykh v Kabardino-Balkarskoi Respublike [The quantitative analysis of fauna of general helminthes for the person and animals in Kabardino-Balkar Republic]. *Uspekhi sovr. estestvoznaniya.* 2013, No. 2, pp. 33-35.

21. Chin T.H. The cestode soonoses of China. *Sixth International Congrese of Parasitology.* Brisbane, Australia, August 25-29, 2016. Australian Academy of Science. Canberra, 2016, No. 30, pp. 323-326.

22. Sarbasheva M.M., Bittirova A.A., Atabieva Zh.A., Bittirov A.M., Bittirov A.M. Kraevaya epidemiologiya tsetodozov cheloveka v Kabardino-Balkarskoi respublike [Regional epidemiology of cestodoses of the person in Kabardino-Balkar Republic]. *Epidemiologiya i infektsionnye bolezni.* 2012, No. 6, pp. 35-37.

23. Shikhalieva M.A., Atabieva Zh.A., Kolodii I.V., Bittirov A.M., Sarbasheva M.M., Bichieva M.M., Bittirov A.M. Struktura parazitotsenozov ravninnogo poyasa regiona Severnogo Kavkaza [Structure of parasitocenosis of a flat belt of the region of the North Caucasus]. *Veterinarnaya patologiya.* 2012, No. 2 (40), pp. 109-113.

24. Zalikhanov M.Ch., Bittirov A.M., Begieva S.A. Modern Biological Threats and World Regulations to Provide Biosafety of Animal Products. *Breeding on Modern*

Populations of Domestic Dairy Cathedral as a Basis of Import Substitution of Animal Production. Materials of the All-Russian Scientific-Practical Conference with International Participation. Belgorod, 2018, pp. 245-253.

25. Bittirov A.M. Epidemiological Situation in helminthoses of Animals and Man in the Kabardino-Balkaria Republic. *Problems and Prospective Directions of Applied Biological Science at the Beginning of the 21st Century.* Proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference, May 19-21, 2013. Moscow, 2013.

26. Vasilevich F.I., Bittirov A.M., Kalabekov M.I., Aliev Sh.K., Sarbasheva M.M. *Biodiversity, biogeography and epidemiological monitoring of zoonoses of dogs and wild dogs family (Canidae) in the North Caucasus region.* Nalchik: PoligrafServis, 2010, 168 p.

27. Atabieva Zh.A., Bichieva M.M., Kolodii I.V., Bittirov A.M., Shikhalieva M.A., Sarbasheva M.M., Zhekamukhova M.Z. Forecasting of epizootic and epidemic situation on zoonotic invasions in the south of Russia. *Veterinary Pathology.* 2012, No. 1 (39), pp. 119-122.

28. Limbery A.J. *Dicrocoelium lanceatum (Stilles et Hassall, 1896).* Wallingford, UK; CAB International, 2005, 479 p.

29. Prasad B.N., Prasad L.N. Note on the Pathology of Hydatidosis in Sheep and Goat Indian. *Vet. Med. J.* 2010, vol. 44, No. 2, pp. 89-94.

30. Gemmell M.A., Varela-Diaz V.M. *Review of Programs for the Control of Dicrocoelium lanceatum (Stilles et Hassall, 1896).* Pan American Zoonoses Centre, Pan American Healths Organization, Buenos Aires, 2013, No. 4, pp. 307-311.

УДК 616-006; 61:578.7; 57.085.23

DOI 10.23683/0321-3005-2018-4-124-130

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ОНКОЛИТИЧЕСКИХ ЭФФЕКТОВ IN VITRO ВИРУСОВ ИЗ СЕМЕЙСТВ REOVIRIDAE И PARAMYXOVIRIDAE

© 2018 г. А.О. Ситковская¹, Е.Ю. Златник¹, И.А. Новикова¹, С.А. Колпак², Е.П. Колпакова²,
Д.С. Потемкин¹, Н.Г. Васильченко¹, Е.И. Триандафилиди¹, О.В. Быкадорова¹

¹Ростовский научно-исследовательский онкологический институт, Ростов-на-Дону, Россия,

²Ростовский научно-исследовательский институт микробиологии и паразитологии, Ростов-на-Дону, Россия

STUDY OF THE POSSIBILITY OF ONCOLYTIC EFFECTS IN VITRO OF VIRUSES FROM THE REOVIRIDAE AND PARAMYXOVIRIDAE FAMILIES

A.O. Sitkovskaya¹, E.Yu. Zlatnik¹, I.A. Novikova¹, S.A. Kolpakov², E.P. Kolpakova²,
D.S. Potyomkin¹, N.G. Vasil'chenko¹, E.I. Triandafilidi¹, O.V. Bykadorova¹

¹Rostov Research Institute of Oncology, Rostov-on-Don, Russia,

²Rostov Research Institute of Microbiology and Parasitology, Rostov-on-Don, Russia

Ситковская Анастасия Олеговна – младший научный сотрудник, лаборатория иммунофенотипирования опухолей, Ростовский научно-исследовательский онкологический институт, ул. 14-я линия, 63, г. Ростов-на-Дону, 344037, Россия, e-mail: Iftrnioi@yandex.ru

Anastasia O. Sitkovskaya - Junior Researcher, Laboratory of Immunophenotyping of Tumors, Rostov Research Institute of Oncology, 14-ya Liniya St., 63, Rostov-on-Don, 344037, Russia, e-mail: Iftrnioi@yandex.ru

Златник Елена Юрьевна – доктор медицинских наук, профессор, главный научный сотрудник, лаборатория иммунофенотипирования опухолей, Ростовский научно-исследовательский онкологический институт, ул. 14-я линия, 63, г. Ростов-на-Дону, 344037, Россия, e-mail: elena-zlatnik@mail.ru

Elena Yu. Zlatnik - Doctor of Medicine, Professor, Main Researcher, Laboratory of Immunophenotyping of Tumors, Rostov Research Institute of Oncology, 14-ya Liniya St., 63, Rostov-on-Don, 344037, Russia, e-mail: elena-zlatnik@mail.ru

Новикова Инна Арнольдовна – кандидат медицинских наук, заместитель генерального директора по науке, Ростовский научно-исследовательский онкологический институт, ул. 14-я линия, 63, г. Ростов-на-Дону, 344037, Россия, e-mail: novikovainna@yahoo.com

Inna A. Novikova - Candidate of Medicine, Deputy General Director, Rostov Research Institute of Oncology, 14-ya Liniya St., 63, Rostov-on-Don, 344037, Russia, e-mail: novikovainna@yahoo.com

Колпак Сергей Анатольевич – кандидат медицинских наук, старший научный сотрудник, лаборатория вирусологии, микробиологии и молекулярно-биологических методов исследования, Ростовский научно-исследовательский институт микробиологии и паразитологии Роспотребнадзора, пер. Газетный, 119, г. Ростов-на-Дону, 344011, Россия, e-mail: kolpakov1953@mail.ru

Sergey A. Kolpakov - Candidate of Medicine, Senior Researcher, Laboratory of Virology, Microbiology and Molecular Biological Research Methods, Rostov Research Institute of Microbiology and Parasitology, Rospotrebnadzor, Gasetnyi St., 119, Rostov-on-Don, 344011, Russia, e-mail: kolpakov1953@mail.ru

Колпакова Елена Павловна – научный сотрудник, лаборатория вирусологии, микробиологии и молекулярно-биологических методов исследования, Ростовский научно-исследовательский институт микробиологии и паразитологии Роспотребнадзора, пер. Газетный, 119, г. Ростов-на-Дону, 344011, Россия, e-mail: kolpakov1953@mail.ru

Elena P. Kolpakova - Researcher, Laboratory of Virology, Microbiology and Molecular Biological Research Methods, Rostov Research Institute of Microbiology and Parasitology, Rospotrebnadzor, Gasetnyi St., 119, Rostov-on-Don, 344011, Russia, e-mail: kolpakov1953@mail.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. Potyomkin - Junior Researcher, Laboratory of Molecular Oncology, 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: onko-sekretar@mail.ru

Nikita G. Vasil'chenko - Junior Researcher, Laboratory of Molecular Oncology, Rostov Research Institute of Oncology, 14-ya Liniya St., 63, Rostov-on-Don, 344037, Russia, e-mail: onko-sekretar@mail.ru

Триандафилиди Елена Ивановна – врач функциональной диагностики, Ростовский научно-исследовательский онкологический институт, ул. 14-я линия, 63, г. Ростов-на-Дону, 344037, Россия, e-mail: onko-sekretar@mail.ru

Elena I. Triandafilidi - Functional Diagnostics Physician, Rostov Research Institute of Oncology, 14-ya Liniya St., 63, Rostov-on-Don, 344037, Russia, e-mail: onko-sekretar@mail.ru

Быкадорова Оксана Владимировна – врач функциональной диагностики, Ростовский научно-исследовательский онкологический институт, ул. 14-я линия, 63, г. Ростов-на-Дону, 344037, Россия, e-mail: onko-sekretar@mail.ru

Oksana V. Bykadorova - Functional Diagnostics Physician, Rostov Research Institute of Oncology, 14-ya Liniya St., 63, Rostov-on-Don, 344037, Russia, e-mail: onko-sekretar@mail.ru

Все более актуальным становится вопрос о развитии онколитической виротерапии и изучении возможности ее применения в качестве одного из противоопухолевых методов лечения. Ключевой особенностью ряда вирусов, представляющих интерес в данной области, выступает их избирательное инфицирование опухолевых клеток. В качестве кандидатов для противоопухолевой терапии в литературе рассматриваются вирусы многих семейств: аденовирусы, герпес-вирусы, реовирусы, парвовирусы, пикорнавирусы, поксвирусы, парамиксовирусы, геномы которых представлены молекулами как ДНК, так и РНК. Цель нашей статьи – изучение возможной онколитической активности вируса болезни Ньюкасла (ВБН) и реовируса на разных опухолевых культурах клеток *in vitro*. В работе в качестве вирусного материала использовали вирус-вакцину против ВБН штамм LaSota (ООО «НПП АВИБАК», 5000 доз) и реовирус (3-го серотипа), линии опухолевых клеток: HeLa (рак шейки матки), A549 (аденокарцинома легкого), BT20 (рак молочной железы), PC3 (рак предстательной железы), HT29 (аденокарцинома толстой кишки). Полученные результаты свидетельствуют о выраженном литическом действии реовируса *in vitro*, а также о неодинаковой чувствительности исследованных опухолевых линий к нему, что может зависеть от их молекулярно-генетических особенностей, например от наличия или отсутствия Ras-мутаций. Несмотря на неоднозначные результаты, мы считаем целесообразным продолжение исследований этих и других вирусов на опухолевых моделях как *in vitro*, так и *in vivo*.

Ключевые слова: онколитические вирусы, культуры опухолевых клеток, биотерапия, вирус болезни Ньюкасла, реовирус.

The question of the development of oncolytic virotherapy and the study of the possibility of its use as one of the antitumor treatment methods is becoming increasingly relevant. A key feature of a number of viruses of interest in this area is their selective infection of tumor cells. The candidates for antitumor therapy in the literature are viruses of many families: adenoviruses, herpes viruses, reoviruses, parvoviruses, picornaviruses, poxviruses, paramyxoviruses, whose genomes are represented by both DNA and RNA molecules. The aim of our work was to study the possible oncolytic activity of the Newcastle disease virus and reovirus in various tumor cell cultures *in vitro*. In the work as a viral material used virus-vaccine against VBN strain LaSota ("AVIVAC", 5000 doses) and reovirus (3d serotype). Tumor cell lines were used: HeLa (cervical cancer), A549 (lung adenocarcinoma), BT20 (breast cancer), PC3 (prostate cancer), HT29 (colon adenocarcinoma). The results indicate a pronounced lytic effect of reovirus *in vitro*, as well as unequal sensitivity of the studied tumor lines to it, which may depend on their molecular genetic features, for example, on the presence or absence of Ras mutations. Despite ambiguous results, we consider it expedient to continue the studies of these and other viruses in tumor models both *in vitro* and *in vivo*.

Keywords: oncolytic viruses, tumor cell cultures, biotherapy, Newcastle disease virus, reovirus.

Введение

В последнее время все более актуальным становится вопрос о развитии онколитической виротерапии и изучении возможности ее применения в качестве одного из противоопухолевых методов лечения. Виротерапия – один из видов биологической терапии. Это – сравнительно новое направление в онкологии, основанное на онкотропных и онколитических свойствах некоторых вирусов, хотя открытие онколитического эффекта вирусов относят еще к

началу XX в., когда была описана спонтанная регрессия опухолей у больных после вакцинации против бешенства [1]. Ключевой особенностью ряда вирусов, представляющих интерес в данной области, выступает их избирательное инфицирование опухолевых клеток [2]. Кроме того, введение в организм вируса (как и всякого чужеродного агента) косвенно вызывает антигенную стимуляцию иммунной системы, что в совокупности с онколитическим действием ведет к индукции долгосрочных противоопухолевых иммунных реакций [3].

В качестве кандидатов для противоопухолевой терапии в литературе рассматриваются вирусы многих семейств: аденовирусы, герпес-вирусы, реовирусы, парвовирусы, пикорнавирусы, поксвирусы, парамиксовирусы, геномы которых представлены молекулами как ДНК, так и РНК [4]. Часть из них уже стала основой разработки препаратов, которые были аккредитованы для применения у онкологических больных. Например, известен латвийский RIGVIR, являющийся первым в мире препаратом для виротерапии злокачественных опухолей, в частности для лечения меланомы. Он был зарегистрирован в 2004 г. RIGVIR содержит живой, непатогенный, генетически немодифицированный энтеровирус ECHO-7, обладающий онкотропизмом и избирательно инфицирующий клетки опухоли, лизирующий их при своей репликации [5, 6]. В 2005 г. в Китае был запатентован препарат Oncorine, основу которого составляет генетически модифицированный аденовирус H101. Его используют для терапии злокачественных опухолей головы и шеи и применяют совместно с химиотерапией [7]. Целую декаду XXI в. два этих вирусных противоопухолевых препарата оставались единственными, пока в 2015 г. в США не получил регистрацию препарат Imlygic (другое название Talimogene laherparepvec (T-VEC)), базисом которого является генетически модифицированный вирус простого герпеса I типа со встроенным геном GM-CSF (гранулоцитарно-макрофагальный колониестимулирующий фактор) для лечения пациентов с неоперабельной метастатической меланомой [8, 9]. В том же году FDA одобрила использование препарата на основе реовирусов Reolysin (Oncolytics Biotech) для терапии злокачественных глиом, а в 2017 г. – для метастатического рака молочной железы [10].

Несмотря на то что современные технологии открывают возможности для получения генетически модифицированных конструкций, продолжают активно изучаться природные штаммы онколитических вирусов (реовирус, вирус кори, вирус болезни Ньюкасла (ВБН)), содержащих на поверхности вирионов гемагглютинины, повышающие нейротропизм этих вирусов (что важно для лечения глиом), и белок фьюжн (F), способствующий слиянию инфицированной клетки с соседними, распространяя вирусы по опухоли [11].

Реовирусы у человека обычно не вызывают тяжелых заболеваний, несмотря на их связь с желудочно-кишечными и респираторными симптомами, протекающими без серьезных последствий. Геном образует двухцепочечная фрагментированная РНК. Попадание вируса в нормальные клетки активирует РНК-зависимую протеинкиназу R (PKR), тормозя-

щую синтез белка и репликацию вируса в клетке-хозяине. Однако многие опухолевые клетки подавляют активацию PKR вследствие действия онкогена Ras, что создает условия для репликации вируса в таких клетках [11].

Среди парамиксовирусов огромный интерес вызывает ВБН, патогенный для множества видов птиц, но у человека вызывающий лишь легкую форму лихорадки [12]; при введении экспериментальным животным у них развивается ряд иммунологических изменений [13]. У ВБН описаны онколитическая активность, а также избирательная репликация в опухолевых клетках. Таким образом, ВБН рассматривается в качестве потенциального терапевтического средства для лечения рака [12, 14].

Цель нашей работы – изучение возможной онколитической активности ВБН и реовируса на разных опухолевых культурах клеток *in vitro*.

Материалы и методы

В работе в качестве вирусного материала использовали вирус-вакцину против ВБН штамм LaSota (ООО «НПП АВИБАК», 5000 доз) и реовирус, выделенный из фекальной суспензии больной с гепатитом неустановленной этиологии, адаптированный к росту в перевиваемой культуре клеток СПЭВ (клетки почки эмбриона свиньи) и охарактеризованный как относящийся предположительно к 3-му серотипу [15].

Первоначально мы наращивали ВБН на культуре клеток СПЭВ в питательной среде 199. Для этого в 3 флакона Т75 со 100%-м конфлюентным монослоем СПЭВ вносили ВБН в разных разведениях: 1:20, 1:40, 1:60. После инкубации в течение 2 сут в условиях 5%-го CO₂ при температуре 37 °С визуально оценивали монослойность, микроскопически – морфологические изменения клеточных линий.

Предварительным этапом исследования онколитической активности вирусов в экспериментах *in vitro* во флаконах Т25 наращивали клеточную биомассу до 100%-й конфлюентности монослоя в питательной среде RPMI-1640 с L-глутамином, 10%-й фетальной бычьей сывороткой и 0,5%-м пенициллином-стрептомицином в условиях 5%-го CO₂ при температуре 37 °С. Использовались линии опухолевых клеток: HeLa (рак шейки матки), A549 (аденокарцинома легкого), BT20 (рак молочной железы), PC3 (рак предстательной железы), HT29 (аденокарцинома толстой кишки), полученные из российской коллекции культур клеток Института цитологии РАН. Декантировали питательную среду, промывали клетки раствором Хенкса. Далее в каждый флакон добавляли по 100 мкл ВБН, наращенного на культуре клеток СПЭВ, и 200 мл питательной среды

RPMI-1640; равномерно распределяли раствор по поверхности флакона с клетками, инкубировали в течение 3 мин при постоянном покачивании, после чего вносили по 10 мл той же питательной среды и культивировали в условиях 5%-го CO₂ при температуре 37 °C (Sanyo MCO-18AC). Через 5 дней вносили по 100 мкл реовируса, не производя декантирование среды. Визуализацию проводили с помощью инвертированного микроскопа Zeiss Axio Vert при увеличении ×100. Положительным контролем являлась инкубация ВБН и реовируса на культуре клеток СПЭВ.

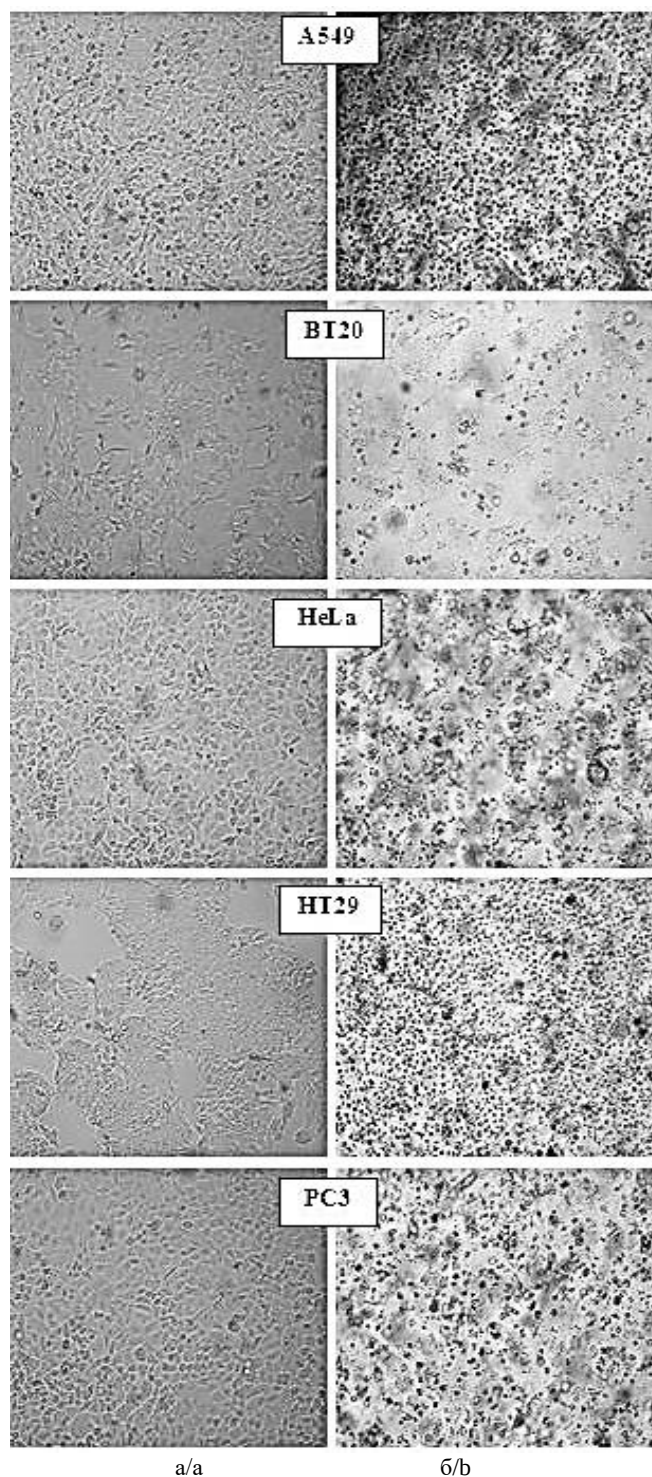
Культуральную жидкость после заражения реовирусом изучали в РНГА с тест-системой «Реотест», представляющей собой эритроцитарный антителы диагностический.

Результаты и обсуждение

Культивирование ВБН in vitro. Классическим способом наращивания инфекционных вирусных частиц в вирусологии является введение вируса в аллантоисную полость куриных эмбрионов [16]. Однако этот метод трудоемок и подвергается сомнению в аспекте стерильности. Мы нашли решение этой задачи в наращивании ВБН на культуре клеток СПЭВ, часто применяемой в вирусологии. В ходе 3 проведенных экспериментов in vitro с различными разведениями ВБН было показано, что данный вирус оказывает значительное цитопатическое действие (ЦПД) независимо от концентрации. В течение инкубации происходили морфологические изменения: клетки меняли свой привычный вид, обретая острую вытянутую форму, визуально нарушалось межклеточное сообщение, так как встречалось много единичных клеток, а за двое суток наблюдался полный лизис монослоя, что мы связываем с увеличением количества инфекционных вирусных частиц, а следовательно, активной репликацией ВБН в клетках СПЭВ.

Исследование онколитической активности вирусов in vitro. Опухолевые клеточные линии заражали вирусом ВБН (100 мкл), предварительно выращенным на культуре клеток СПЭВ, где он показал выраженную литическую активность. Визуальную оценку роста культур проводили в течение 5 дней. За это время признаков ЦПД не наблюдалось (рисунк).

В положительном контроле СПЭВ за первые двое суток наблюдалось активное ЦПД, а к третьим – полный лизис клеточной биомассы. Не получив ЦПД на культурах опухолевых линий, мы приняли решение добавить в исследуемые образцы (без предварительной отмывки питательной среды от ВБН) аналогичное количество аттенуированного реовируса (100 мкл).



Онколитический эффект реовируса in vitro: а – монослой опухолевых линий до внесения вируса, клетки имеют характерную морфологию (отросчатая, вытянутая, ромбовидная, клеточные конгломераты) для каждой линии; б – разрушенный клеточный монослой, открепленные и лизированные клетки через 5 дней после введения реовируса / The oncolytic effect of reovirus in vitro: a - a monolayer of tumor lines before the introduction of the virus, the cells have a characteristic morphology (growth, elongated, diamond-shaped, cellular conglomerates) for each line; b - destroyed cell monolayer, detached and lysed cells 5 days after the introduction of reovirus

После инкубации с реовирусом уже через 24 ч отмечались онколитическая активность, проявлявшаяся в частичном или полном разрушении монослоя, уменьшении адгезии клеток (на дне флаконов оставались лишь отдельные клеточные конгломераты), потеря клетками типичного вида. Через 2 дня после внесения реовируса в культуры клеток РС-3, ВТ-20, А549 и НТ-29 наблюдался полный цитопатический эффект, наиболее выраженный в клеточной линии НТ-29; все клетки были лизированы. Однако культура клеток HeLa сохраняла 100%-ю конfluenceность монослоя в течение 4 дней, и только на 5-й день мы обнаружили «ошаривание» клеток, сопровождающееся полным откреплением их от поверхности флакона (рисунок). По-видимому, репликация реовируса в клетках HeLa происходит медленнее, чем в других культурах, однако и она подверглась полному клеточному лизису.

Влияние реовируса на те же опухолевые клеточные линии было исследовано в отдельных экспериментах, результаты которых показали развитие активного ЦПД с полным лизисом монослоя культур в течение 1–2 дней. При развитии ЦПД титры реовируса в культуральной жидкости составляли $1:8 \div 1:16$, как и в культуре реовируса, растущего на СПЭВ, т.е. полученный эффект связан с репликацией реовируса.

Заключение

Итак, ВБН штамм LaSota в виде вирус-вакцины «АВИВАК» не показал литического действия на исследованные культуры опухолей человека, несмотря на то что во многих исследованиях представлена весьма убедительная доказательная база, подтверждающая противоопухолевое действие ВБН [3, 11, 12, 14, 17]. В литературе описаны литические и нелитические штаммы ВБН, и штамм LaSota различные авторы относят к разным группам [16]. Одним из предположений о причинах полученного нами результата является вероятность того, что вирус в данной форме, по-видимому, не проникает в клетки, поскольку в противном случае это препятствовало бы действию реовируса. Возможно, внесение протеаз, обеспечивающих активацию белка F0 с расщеплением на F1 и F2, будет способствовать попаданию ВБН в клетку благодаря стимуляции процессов, ответственных за слияние оболочек вируса и опухолевой клетки. Хотя есть публикации, указывающие на собственную секрецию опухолевыми клетками необходимых протеолитических ферментов [18], такое свойство,

возможно, есть не у всех культур или не всегда реализуется *in vitro*. Полученные результаты свидетельствуют о выраженном литическом действии реовируса *in vitro*, а также о неодинаковой чувствительности исследованных опухолевых линий к нему, что может зависеть от их молекулярно-генетических особенностей, например от наличия или отсутствия Ras-мутаций.

Несмотря на неоднозначные результаты, мы считаем целесообразным продолжение исследований этих и других вирусов на опухолевых моделях как *in vitro*, так и *in vivo*. Последнее позволит дополнить прямое воздействие вирусов иммуностимулирующим.

Литература

1. De Pace N. Sulla scomparsa di un enorme cancro vegetante del collo dell'utero senza cura chirurgica // *Ginecologia*. 1912. Vol. 9. P. 82–89.
2. Kelly E., Russell S.J. History of oncolytic viruses: genesis to genetic engineering // *Molecular Therapy*. 2007. Vol. 15, № 4. P. 651–659.
3. Schirrmacher V. Immunobiology of Newcastle disease virus and its use for prophylactic vaccination in poultry and as adjuvant for therapeutic vaccination in cancer patients // *Intern. j. of Molecular Sciences*. 2017. Vol. 18, № 5. P. 1103.
4. Матвеева О.В., Кочнева Г.В., Немесов С.В., Оникиенко С.Б., Чумаков П.М. Механизмы онколитического действия парамиксовируса Сендай // *Acta Naturae*. 2015. Т. 7, № 2 (25). С. 6–17.
5. Alberts P., Olmane E., Brokane L., Krastina Z., Romanovska M., Kupčs K., Isajevs S., Proboka G., Erdmanis R., Nazarovs J., Venskus D. Long term treatment with the oncolytic ECHO-7 virus Rignvir of a melanoma stage IV M1c patient, a small cell lung cancer stage IIIA patient, and a histiocytic sarcoma stage IV patient - three case reports // *Apmis*. 2016. Vol. 124, № 10. P. 896–904.
6. Doniņa S., Strēle I., Proboka G., Auziņš J., Alberts P., Jonsson B., Venskus D., Muceniece A. Adapted ECHO-7 virus Rignvir immunotherapy (oncolytic virotherapy) prolongs survival in melanoma patients after surgical excision of the tumour in a retrospective study // *Melanoma Research*. 2015. Vol. 25, № 5. P. 421.
7. Garber K. China approves world's first oncolytic virus therapy for cancer treatment // *J. of the National Cancer Institute*. 2006. Vol. 98, № 5. P. 298–300.
8. Andtbacka R.H., Kaufman H.L., Collichio F., Amatruda T., Senzer N., Chesney J., Delman K.A., Spitler L.E., Puzanov I., Agarwala S.S., Milhem M., Cranmer L., Curti B., Lewis K., Ross M., Guthrie T., Linette G.P., Daniels G.A., Harrington K., Middleton M.R., Miller W.H., Jr, Zager J.S.

Ye Y., Yao B., Li A., Doleman S., VanderWalde A., Gansert J., Coffin R.S. Talimogene laherparepvec improves durable response rate in patients with advanced melanoma // *J. Clin. Oncol.* 2015. Vol. 33, № 25. P. 2780–2788.

9. Габдрахманова А.Ф. Вирусный онколиз // Таврический науч. обозреватель. 2017. № 1 (18). С. 151–153.

10. Eissa I., Bustos-Villalobos I., Ichinose T., Matsu-mura S., Naoe Y., Miyajima Morimoto D., Mukoyama N., Zhiwen W., Tanaka M., Hasegawa H., Sumigama S., Aleksic B., Kodera Y., Kasuya H. The Current Status and Future Prospects of Oncolytic Viruses in Clinical Trials against Melanoma, Glioma, Pancreat and Breast Cancers // *Cancers*. 2018. Vol. 10, № 10. P. 356.

11. Тарасова М.В., Губанова Н.В., Разумов И.А., Сергеева И.Г., Тулупов А.А., Немцов С.В. Онколитические вирусы в терапии глиом : учеб. пособие. Новосибирск: РИЦ НГУ, 2015. 27 с.

12. Schirrmacher V. Fifty years of clinical application of Newcastle disease virus: time to celebrate! // *Biomed-icines*. 2016. Vol. 4, № 3. P. 16.

13. Златник Е.Ю., Ситковская А.О., Шульгина О.Г., Бондаренко Е.С., Золотарева Е.И., Гречкин Ф.Н., Харагезов Д.А., Каймакчи Д.О. Влияние вируса болезни Ньюкасла на показатели клеточного иммунитета крыс-опухоленосителей (экспериментальное исследование) // Современные проблемы науки и образования. 2018. № 4. С. 1–8.

14. Wang B., Song L., Ma D., Dong Y., Wang X. Progress in Newcastle disease virus against tumor // *Chinese J. of Biotechnology*. 2018. Vol. 34, № 9. P. 1432–1441.

15. Колпаков С.А., Колпакова Е.П. Неклассифицированные вирусы человека семейства Reoviridae // Актуальные вопросы диагностики и профилактики инфекционных и паразитарных заболеваний на Юге России : материалы межрегион. науч.-практ. конф. с междунар. участием. Ростов н/Д., 2016. С. 243–247.

16. Кешелава В. Рак. Реалии и возможности применения вируса болезни Ньюкасла. Palmarium Academic Publishing, 2014. С. 140.

17. Юрченко К.С., Губанова Н.В., Шестопалова Л.В., Щелканов М.Ю., Шестопалов А.М. Онколитические свойства вируса болезни Ньюкасла // Тихоокеанский мед. журн. 2015. № 3 (61). С. 14–18.

18. Журнов О.П. Активация парамиксовирусов протеазами в культурах нормальных и раковых клеток // Вопросы вирусологии. 2017. Т. 62, № 2. С. 65–72.

Reference

1. De Pace N. Sulla scomparsa di un enorme cancro vegetante del collo dell'utero senza cura chirurgica. *Ginecologia*. 1912, vol. 9, pp. 82-89.

2. Kelly E., Russell S.J. History of oncolytic viruses: genesis to genetic engineering. *Molecular Therapy*. 2007, vol. 15, No. 4, pp. 651-659.

3. Schirrmacher V. Immunobiology of Newcastle disease virus and its use for prophylactic vaccination in poultry and as adjuvant for therapeutic vaccination in cancer patients. *Intern. J. of Molecular Sciences*. 2017, vol. 18, No. 5, p. 1103.

4. Matveeva O.V., Kochneva G.V., Netesov S.V., Onikienko S.B., Chumakov P.M. Mekhanizmy onkoliticheskogo deistviya paramiksovirusa Sendai [Mechanisms of action of oncolytic paramyxovirus Sendai]. *Acta Naturae*. 2015, vol. 7, No. 2 (25), pp. 6-17.

5. Alberts P., Olmane E., Brokane L., Krastina Z., Romanovska M., Kupčs K., Isajevs S., Proboka G., Erdmanis R., Nazarovs J., Venskys D. Long-term treatment with the oncolytic ECHO-7 virus Riggvir of a melanoma stage IV M1c patient, a small cell lung cancer stage IIIA patient, and a histiocytic sarcoma stage IV patient-three case reports. *Apmis*. 2016, vol. 124, No. 10, pp. 896-904.

6. Doniņa S., Strēle I., Proboka G., Auziņš J., Alberts P., Jonsson B., Venskys D., Muceniece A. Adapted ECHO-7 virus Riggvir immunotherapy (oncolytic virotherapy) prolongs survival in melanoma patients after surgical excision of the tumour in a retrospective study. *Melanoma Research*. 2015, vol. 25, No. 5, p. 421.

7. Garber K. China approves world's first oncolytic virus therapy for cancer treatment. *J. of the National Cancer Institute*. 2006, vol. 98, No. 5, pp. 298-300.

8. Andtbacka R.H., Kaufman H.L., Collichio F., Amatruda T., Senzer N., Chesney J., Delman K.A., Spitzer L.E., Puzanov I., Agarwala S.S., Milhem M., Cranmer L., Curti B., Lewis K., Ross M., Guthrie T., Linette G.P., Daniels G.A., Harrington K., Middleton M.R., Miller W.H., Jr, Zager J.S., Ye Y., Yao B., Li A., Doleman S., VanderWalde A., Gansert J., Coffin R.S. Talimogene laherparepvec improves durable response rate in patients with advanced melanoma. *J. Clin. Oncol.* 2015, vol. 33, No. 25, pp. 2780-2788.

9. Gabdrakhmanova A.F. Virusnyi onkoliz [Viral oncolysis]. *Tavrisheskii nauch. obozrevatel'*. 2017, No. 1 (18), pp. 151-153.

10. Eissa I., Bustos-Villalobos I., Ichinose T., Matsu-mura S., Naoe Y., Miyajima Morimoto D., Mukoyama N., Zhiwen W., Tanaka M., Hasegawa H., Sumigama S., Aleksic B., Kodera Y., Kasuya H. The Current Status and Future Prospects of Oncolytic Viruses in Clinical Trials against Melanoma, Glioma, Pancreat, and Breast Cancers. *Cancers*. 2018, vol. 10, No. 10, p. 356.

11. Tarasova M.V., Gubanov N.V., Razumov I.A., Sergeeva I.G., Tulupov A.A., Netesov S.V. *Onkoliticheskie virusy v terapii gliom* [Oncolytic viruses in the therapy of gliomas]. Study guide. Novosibirsk: RITs NGU, 2015, 27 p.

12. Schirmacher V. Fifty years of clinical application of Newcastle disease virus: time to celebrate! *Biomedicine*. 2016, vol. 4, No. 3, p. 16.

13. Zlatnik E.Yu., Sitkovskaya A.O., Shul'gina O.G., Bondarenko E.S., Zolotareva E.I., Grechkin F.N., Kharagezov D.A., Kaimakchi D.O. Vliyanie virusa bolezni N'yukasla na pokazateli kletchnogo immuniteta kryss-opukhloshenositeli (eksperimental'noe issledovanie) [Influence of the virus of Newcastle disease on the indicators of cellular immunity of rats, tumours (experimental study)]. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya*. 2018, No. 4, pp. 1-8.

14. Wang B., Song L., Ma D., Dong Y., Wang X. Progress in Newcastle disease virus against tumor. *Chinese J. of Biotechnology*. 2018, vol. 34, No. 9, pp. 1432-1441.

15. Kolpakov S.A., Kolpakova E.P. [Unclassified human viruses of the Reoviridae family]. *Aktual'nye voprosy diagnostiki i profilaktiki infektsionnykh i parazitarnykh zabolevanii na Yuge Rossii* [Topical is-

sues of diagnosis and prevention of infectious and parasitic diseases in the South of Russia]. Proceedings of the Interregional Scientific-Practical Conference with international participation. Rostov-on-Don, 2016, pp. 243-247.

16. Keshelava V. *Rak. Realii i vozmozhnosti primeniya virusa bolezni N'yukasla* [Cancer. Realities and possibilities of application of Newcastle disease virus]. Palmarium Academic Publishing, 2014, 140 p.

17. Yurchenko K.S., Gubanova N.V., Shestopalova L.V., Shchelkanov M.Yu., Shestopalov A.M. Onkoliticheskie svoistva virusa bolezni N'yukasla [Oncolytic properties of the virus of Newcastle disease]. *Tikhookeanskii med. zhurn*. 2015, No. 3 (61), pp. 14-18.

18. Zhirnov O.P. Aktivatsiya paramiksovirusov proteazami v kul'turakh normal'nykh i rakovykh kletok [Activation of the paramyxoviruses proteases in cultures of normal and cancer cells]. *Voprosy virusologii*. 2017, vol. 62, No. 2, pp. 65-72.

НАУЧНАЯ ЖИЗНЬ

SCIENTIFIC LIFE

DOI 10.23683/0321-3005-2018-4-131-132

УЧАСТИЕ АССОЦИАЦИИ «ЖИВАЯ ПРИРОДА СТЕПИ» В МЕЖДУНАРОДНОЙ КОНФЕРЕНЦИИ «БИОЛОГИЧЕСКОЕ РАЗНООБРАЗИЕ: ИЗУЧЕНИЕ, СОХРАНЕНИЕ, ВОССТАНОВЛЕНИЕ, РАЦИОНАЛЬНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ» (Керчь, 19–23 сентября 2018 г.)

PARTICIPATION OF THE ASSOCIATION “LIVING NATURE OF THE STEPPE” IN THE INTERNATIONAL CONFERENCE “BIOLOGICAL DIVERSITY: STUDY, PRESERVATION, RESTORATION, RATIONAL USE” (Kerch, September 19-23, 2018)

Еще в 60–80-е гг. XX в. научные сотрудники Ростовского госуниверситета (РГУ), Азовского НИИ рыбного хозяйства (АзНИИРХ) и других вузов, НИИ Ростовской области (РО) выполняли совместные исследования с Институтом биологии южных морей им. А.О. Ковалевского, Карадагской научной станцией и другими научными структурами, обменивались опытом, проводили конференции. В этих организациях многие студенты РГУ проходили производственную практику, готовили дипломные работы. Некоторые из них впоследствии работали в Крыму. К сожалению, эти и другие связи в последние десятилетия нарушились. Одной из задач Ассоциации «Живая природа степи» (Ассоциация) является координация и объединение природоохранной деятельности на юге страны. В последние годы она подключилась к природоохранной работе в Крыму и восточных районах Украины, начала восстанавливать имевшиеся в прошлом научные, образовательные и просветительские связи. Летом 2014 г. Ассоциация совместно с ООО «Газпром межрегионгаз Ростов-на-Дону» участвовала в приеме беженцев с восточных районов Украины (их размещение в гостиницах, пансионатах Азова и Новочеркасска, питание, досуг и т.д.). В июле её сотрудники провели ряд экскурсий и других экологических акций с жителями Луганской и Донецкой областей в Ростовском зоопарке, вывозили их в Центр редких животных европейских степей и свой питомник животных в Орловском районе РО. В июне 2015 г. в Академии биологии и биотехнологии ЮФУ члены Ассоциации участвовали в приеме госэкзаменов и защите

дипломных работ студентов Донецкого университета. В 2018 г. Ассоциация стала членом редакционной коллегии научного журнала «Труды Карадагской научной станции им. Т.И. Вяземского – природного заповедника РАН».

Обладая опытом по организации международных конференций по сохранению, рациональному использованию биоразнообразия, Ассоциация оказала содействие Керчинскому государственному морскому техническому университету (КГМТУ) в проведении Международной научно-практической конференции «Биологическое разнообразие: изучение, сохранение, восстановление, рациональное использование», состоявшейся в КГМТУ и приуроченной к 15-летию кафедры водных биоресурсов и марикультуры университета. В программный комитет вошли ректор КГМТУ Е.П. Масюткин – председатель; президент Ассоциации В.А. Миоранский – сопредседатель; директора АзНИИРХа, Карадагской научной станции им. Т.И. Вяземского – природного заповедника РАН (КНС-ПЗ), природного заповедника «Опукский» (ПЗО), профессора Костанайского госпедуниверситета (Казахстан) и Бенгельского ун-та (Турция) – члены (Н.В. Господарев, Р.В. Горбунов, В.И. Плетюк, Т.М. Брагин, В.С. Недзведский). Основную организационную работу провела кафедра водных биоресурсов и марикультуры КГМТУ во главе с её заведующим (А.В. Кулиш). Участие в конференции приняли 44 организации и 114 докладчиков – научных работников и сотрудников из различных учреждений России, Украины, Белоруссии, Казахстана, Турции.

Конференция проходила в здании КГМТУ и состояла из пленарного заседания (выступления сотрудников КГМТУ, Ассоциации, Воронежского заповедника, АзНИИРХа) и работы секций. О ситуации в заповедниках сообщили сотрудники Карадагского и Воронежского заповедников, заповедника «Опукский». Профессор КГМТУ Е.И. Назимко осветила роль экологического образования в экологической политике государства. Представители Ассоциации уделили внимание организации и деятельности структур государственно-частного партнерства по координации природоохранной деятельности, охране и восстановлению биоразнообразия, экопросвещению и экотуризму.

Большое количество докладов касалось водных экосистем (водоемов, групп растений, животных). Интересные сообщения по экологическому состоянию и зоопланктону Балтийского моря сделали сотрудники Атлантического НИИ рыбного хозяйства и океанографии (г. Калининград), по формированию промысловой продуктивности подводных гор в Мировом океане – КГМТУ (г. Керчь), по паразитическим клещам *Unionicola* моллюсков *Unionida* бассейнов древних рек ориентального региона – сотрудники Федерального исследовательского центра комплексного изучения Арктики им. акад. Н.П. Лаверова РАН и Северного (Арктического) федерального ун-та им. М.В. Ломоносова (Архангельск). Ряд специалистов представили результаты экспериментальных работ: определение содержания эпендимных в спинномозговой жидкости карася в зависимости от солености среды (Ин-т биологии внутренних вод РАН (п. Борок, Ярославская обл.)); роль гетерохроний в формировании разнообразия окрасок костистых рыб на примере цихловых рыб (ИПЭЭ им. А.Н. Северцова РАН (Москва)); температурный фактор при гормональной стимуляции черноморско-азовской шемаи в целях получения икры двух генераций за один рыбоводный сезон (АзНИИРХ); исследование состояния структурированной поверхности судостроительной стали при контакте с морской водой (проблемы обрастания судов организмами) (КГМТУ) и т.д.

Многие сообщения затрагивали вопросы экологии, биоресурсов соленых и пресных водоемов Крыма, Северного Кавказа, Нижнего Дона, Черного и Азовского морей (КГМТУ, АзНИИРХ, его Керченский филиал и Краснодарское отделение, Ин-т морских биологических исследований им. А.О. Ковалевского РАН (Севастополь), КНС-ПЗ, Российский ун-т дружбы народов (Москва) и др.). В них

рассматривались состояние водоемов и отдельных их участков, состав и ресурсы различных групп животных. Освещались вопросы выращивания рыб в искусственных водоемах (Кубанский госуниверситет), ситуация с интродуцированными видами (солнечный окунь в бассейне рек Северский Донец и Миус Луганской обл.) и т.д.

Многие материалы освещали вопросы состава, распространения, значения, экологии наземных растений и животных. Большой интерес вызвали доклады «Роль зеленых насаждений в развитии юго-восточного и восточного рекреационных районов Крыма» (КНС-ПЗ), «Гербарий флоры Ярославской области» (Ин-т биологии внутренних вод РАН), «Новые и нуждающиеся в охране виды лишайников города Калининграда и Калининградской области» (Ин-т живых систем Балтийского федерального ун-та им. Иммануила Канта), «Фауна и систематика паразитических наездников трибы *Spilomicrini* (Diapriidae, Hymenoptera) Палеарктики» (ЗИН РАН (Санкт-Петербург)), «Актуальность энтомологических исследований степей и лесостепей южного Забайкалья на примере полужесткокрылых насекомых (Heteroptera)» (Ин-т географии им. В.Б. Сочавы Сибирского отд. РАН), «Результаты мониторинга раритетной фауны птиц природного заповедника "Опукский"» (ПЗО), «Кундрюченское охотничье хозяйство РО и восстановление его биоресурсов» (Ассоциация) и т.д. Все сообщения всесторонне обсуждались присутствующими, нередко возникали дискуссии и споры, которые продолжались и за пределами аудиторий. Участники обменивались информацией по обсуждаемым вопросам, налаживали научные и деловые связи между разными структурами и специалистами. Материалы конференции опубликованы.

Культурная программа охватывала наиболее интересные в историческом, природном и культурном отношении места Крыма. Она включала посещение музея обороны Аджимушкайских каменоломен («Подвиг героев Аджимушкая»), крепости Керчь (памятник XIX в.), Карадагского заповедника – вулканического массива юрского периода (экологическая тропа Большой Карадаг, музей Карадага) и сафари-парка львов «Тайган» – крупнейшего в Европе питомника львов и других видов животных. Участники конференции выразили благодарность организаторам за высокий уровень её проведения и высказали надежду на организацию по данной проблеме подобных конференций в дальнейшем, их периодичность.

*В.А. Миноранский, доктор сельскохозяйственных наук, профессор,
Южный федеральный университет*

**Указатель материалов, опубликованных в журнале
«Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Естественные науки» в 2018 г.**

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ

Абанин А.В., Кораблина Ю.В. К вопросу об аппроксимации выпуклых функций.....	3
Алдашев С.А. Корректность задачи Дирихле для одного класса вырождающихся многомерных эллипτικο-параболических уравнений	2
Андреева Т.М. Описание сопряженных для весовых пространств голоморфных функций заданного роста в выпуклых ограниченных областях	1
Белявский Г.И., Гирченко М.А. Вычисление вероятности выхода случайного процесса из области в связи с устойчивым развитием активных систем и вычисление цен барьерных опционов в субординированных моделях.....	1
Белявский Г.И., Кондратьева Т.Н. Две модели нейронных сетей для одношагового прогноза нестационарных временных рядов	4
Вагабов А.И. Регулярная краевая задача для дифференциального пучка порядка 15 с пятикратными характеристиками.....	2
Ватulyян А.О., Гуцина К.В. О реконструкции характеристик включения на основе модели Тимошенко.....	2
Ватulyян А.О., Паринова Л.И. Об исследовании дисперсионных свойств топографических волноводов.....	3
Веденев К.В., Деундяк В.М. Решётки подгрупп и кодов на диздральной группе.....	3
Данилова Н.В. Прогнозирование ожидаемых значений финансовых индексов.....	1
Деундяк В.М., Кокшаров Д.И. О свойствах подгрупп группы Гейзенберга над простым полем Галуа	4
Зинченко А.Б. Эффективно вычисляемое значение кооперативной ТП-игры	1
Казарников А.В., Ревина С.В. Монотонная неустойчивость в системе Фитцхью – Нагумо с диффузией.....	4
Карякин М.И., Обрезков Л.П. Устойчивость нелинейно-упругого цилиндра с клиновой дисклинацией при радиальном обжатии.....	4
Коробейник Ю.Ф. О наследовании некоторых свойств аналитической функции её производной.....	4
Куракин Л.Г., Курдоглыан А.В. Критические случаи устойчивости равновесий в дифференциальных уравнениях с двумя косимметриями	1
Ляпин А.А. Анализ контактного взаимодействия пьезоактуатора и упругого слоя в режиме установившихся колебаний на основе метода сосредоточенных усилий.....	2
Малиева Ф.Ф., Бейбалаев В.Д. О сходимости разностного метода решения задачи Коши для обыкновенного дифференциального уравнения с оператором дробного дифференцирования Римана – Лиувилля	2
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	2
Нигмедзянова А.М., Чеботарева Э.В. Решение краевых задач для одного многомерного сингулярного вырождающегося В-эллиптического уравнения	3
Норкин М.В., Говорина Л.А. Кавитационное торможение эллиптического цилиндра в жидкости после удара	1
Пожарский Д.А. Контактные задачи для неоднородного слоя	1
Полякова Д.А. Быстроубывающие ультрадифференцируемые функции	3
Ремизов М.Ю. Свойства акустического фильтра в периодической системе плоских дефектов.....	3
Рустанов А.Р. C_{10} -многообразия точно постоянной голоморфной конгармонической кривизны.....	4
Скалиух А.С., Герасименко Т.Е. Моделирование сегнетоэластиков в двумерном случае	4
Снопов А.И., Гетманский М.С. Установление размеров облаков взрыва Челябинского метеороида	3
Сумбатян М.А., Пискунов А.С. Применение метода глобального случайного поиска для расчета потока вязкой несжимаемой жидкости в канале	1
Тюриков Е.В. Граничная задача мембранной теории выпуклых оболочек для одного класса симметрических куполов.....	1
Хакимов Р.И., Снопов А.И. Моделирование и исследование течения газа в микроканалах, образованных тремя цилиндрами одинакового радиуса	3
Чебаков М.И., Данильченко С.А., Ляпин А.А. Моделирование контактного взаимодействия железнодорожного колеса и тормозной колодки с учетом износа, тепловыделения от трения и зависимости механических параметров от температур.....	4

НАУКИ О ЗЕМЛЕ

<i>Авакова А.Г., Беспалова Л.А., Иошпа А.Р., Цыганкова А.Е.</i> Опасные погодные явления на побережье Азовского и Черного морей.....	4
<i>Аджиев А.Х., Кулиев Д.Д., Аджиева А.А., Куповых Г.В., Тумгоева Х.А.</i> Определение параметров молниевых разрядов с использованием грозорегистратора LS8000	3
<i>Бабаев М.П., Рамазанова Ф.М., Мирза-заде Р.И.</i> Влияние промежуточных посевов на микроагрегатный состав почв сухостепной и полупустынной зон Азербайджана	2
<i>Бакшаев С.И., Аджиев А.Х., Куповых Г.В.</i> Особенности организации и проведения натурных климатических испытаний объектов техники и материалов в условиях высокогорья.....	3
<i>Беспалова Л.А., Скрипка Г.И., Ивлиева О.В., Швеиц Д.С.</i> Оценка антропогенной нагрузки на водоохранную зону Цимлянского водохранилища	3
<i>Блужина А.С., Бегдай И.В., Скрипчинский А.В., Седых Р.Ю.</i> К вопросу эколого-экономической оценки ущерба при несанкционированных сельскохозяйственных палах в Ставропольском крае.....	1
<i>Бондарева О.С., Эльшахат Р.</i> Минералого-петрографические и геохимические особенности палеоэоценовых цеолитсодержащих пород Синайского полуострова (Египет).....	1
<i>Васильева О.Е., Дмитриева А.А., Макеев И.В.</i> Особенности развития внутреннего водного транспорта России на современном этапе	4
<i>Дахова О.О., Хучунаев Б.М., Мустафаева З.А., Куповых Г.В., Даов И.С.</i> Экологические проблемы Кабардино-Балкарской Республики.....	4
<i>Дедова И.С., Селезнева А.В.</i> Геолого-геоморфологические условия Большой излучины Дона как факторы исторического расселения человека в ее границах	2
<i>Денисов В.И., Латун В.В.</i> Потоки химических элементов в составе осаждающегося взвешенного вещества на шельфе Чёрного моря (по данным седиментационных ловушек)	4
<i>Джалалова М.И., Гасанова З.У.</i> Сезонная динамика растительности Западного Прикаспия (на примере Терско-Сулакской низменности)	3
<i>Ергина Е.И., Жук В.О.</i> О росте опасных и стихийных гидрометеорологических явлений на Крымском полуострове.....	1
<i>Жуланова В.Н., Жарова Т.Ф.</i> Сидеральные пары в условиях лесостепи Улуг-Хемской котловины Тувы	2
<i>Журавлева О.В., Сухова М.Г., Чернова Е.О., Бабин В.Г., Каранин А.В.</i> Российская часть трансграничного Алтая в разрезе гидроэкологической безопасности и рекреационной привлекательности.....	1
<i>Закруткин В.Е., Гибков Е.В., Скляренко Г.Ю., Решетняк О.С.</i> Угледобывающие районы как очаг экологической напряженности.....	2
<i>Клово А.Г., Куповых Г.В., Свидельский С.С., Скляров Н.Е.</i> Исследования структуры электродного слоя в приземной атмосфере.....	1
<i>Клово А.Г., Куповых Г.В., Тимошенко Д.В., Свидельский С.С.</i> Моделирование структуры турбулентного электродного слоя в условиях аэрозольного загрязнения приземной атмосферы	3
<i>Косенко Ю.В., Баскакова Т.Е., Барабашии Т.О., Сафронова Л.М.</i> Фотосинтетические пигменты в фитопланктоне Азовского моря	3
<i>Красноярова Б.А., Платонова С.Г., Скрипко В.В., Шарабарина С.Н., Чернова Е.О.</i> Пространственная организация и конфликты развития природно-хозяйственных систем Западной Сибири	3
<i>Кузнецова И.Д., Федоров Ю.А.</i> Влияние солености и водного стока на распространенность черноморско-азовской проходной сельди в Азовском море	4
<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	2
<i>Мехтиев Г.Д.</i> Минералогический состав сероземных почв Нахичеванской Автономной Республики.....	4
<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	2
<i>Ткаченко О.В., Поважный В.В., Герасюк В.С.</i> Связь сезонной динамики биогенного стока р. Дон с концентрацией окрашенного растворенного вещества	3
<i>Федоров Ю.А., Гарькуша Д.Н., Трубник Р.Г., Талпа Б.В.</i> Гидрохимия группы соленых озер Ставропольского края	4

Хардигов А.Э., Сидоров В.А., Астахова А.А. Геохимические особенности золоторудно-кварцевых месторождений Омчакского рудно-россыпного узла Верхояно-Колымской складчатой области.....	1
Хардигов А.Э., Эльшахат О.Р. Литогенез палеоценово-эоценовых толщ Синайского полуострова (Египет).....	3
Хаишукоева М.Н. Влияние экологической ситуации на здоровье населения (на примере Кабардино-Балкарской Республики)	4
Хованский А.Д., Латун В.В., Хорошев О.А., Денисов В.И. Оценка воздействия на окружающую среду углубления и расширения судоходных каналов в дельтах рек.....	1
Хучунаев Б.М., Куповых Г.В., Ташилова А.А., Теунова Н.В., Хучунаев А.Б., Будаев А.Х. Исследование льдообразующих свойств нанотрубок оксида цинка	4
Шкура В.Н., Островская Е.Е. Классификация речных бассейнов по их рыбохозяйственной ценности	2

БИОЛОГИЧЕСКИЕ НАУКИ

Биттиров А.М., Хуламханова М.М., Мирзоева Н.М., Эльмурзаева Дж.А., Накова Л.В., Балаева С.М., Гринев Л.Г., Биттирова А.А., Бегиева С.А. Результаты санитарно-гигиенического мониторинга уровня загрязнения горных пастбищ Кабардино-Балкарии яйцами трематоды <i>Dicrocoelium Lanceatum</i> (Stilles et Hassall, 1896)	4
Водолажский Д.И., Назаралиева Н.А., Моисеенко Т.И., Франциянц Е.М., Потемкин Д.С., Васильченко Н.Г., Меньшенина А.П. Усиление цитотоксического действия 5-фторурацила при сочетанном применении с ультразвуком	2
Горошинская И.А., Нескубина И.В., Сурикова Е.И., Немашкалова Л.А., Шалашина Е.В., Качесова П.С., Верескунова М.И., Светицкая Я.В., Луганская Р.Г., Босенко Е.С., Мхитарьян О.В., Триндафилиди Е.И., Быкадорова О.В., Дурицкий М.Н., Кит О.И. Оценка эндогенной интоксикации и показателей свободнорадикального окисления у больных раком молочной железы и раком Педжета	1
Кит О.И., Франциянц Е.М., Шевченко А.Н., Бреус А.А., Погорелова Ю.А., Нескубина И.В. Уровень некоторых факторов роста семейства VEGF при светлоклеточном раке почки.....	1
Котиева И.М., Кит О.И., Франциянц Е.М., Бандовкина В.А., Каплиева И.В., Трепитаки Л.К., Черярина Н.Д., Погорелова Ю.А., Бликян М.В. Влияние экспериментальной хронической боли на уровень биогенных аминов в коже у мышей в динамике роста меланомы B16/F10.....	1
Котиева И.М., Кит О.И., Франциянц Е.М., Бандовкина В.А., Каплиева И.В., Трепитаки Л.К., Черярина Н.Д., Погорелова Ю.А., Бликян М.В. 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	2
Мельник В.А., Мельник С.Н. Динамика функциональных показателей городских школьников Беларуси (с конца 1980-х до 2010–2012 гг.).....	2
Миноранский В.А., Даньков В.И., Иванченко В.Н., Малиновская Ю.В. Повышение ресурсного потенциала хозяйства путем интенсификации охотхозяйственных и биотехнических мероприятий в Кундрюченском охотхозяйстве Ростовской области	3
Ситковская А.О., Златник Е.Ю., Новикова И.А., Колпаков С.А., Колпакова Е.П., Потемкин Д.С., Васильченко Н.Г., Триндафилиди Е.И., Быкадорова О.В. Исследование возможности онколитических эффектов in vitro вирусов из семейств <i>Reoviridae</i> и <i>Paramyxoviridae</i>	4

НАШИ ЮБИЛЯРЫ

Абанин А.В., Ватульян А.О., Карякин М.И., Климентов С.Б., Коробейник Ю.Ф., Мелихов С.Н., Устинов Ю.А. Выдающийся ученый и организатор науки (к 65-летию профессора А.Г. Кусраева).....	1
Ватульян А.О., Карякин М.И. Леонид Михайлович Зубов (75 лет со дня рождения)	3
Колесников С.И. Педагог, специалист по охране природы, общественный деятель (к 80-летию профессора В.А. Миноранского).....	1

НАУЧНАЯ ЖИЗНЬ

- Ватульян А.О., Карякин М.И., Соловьев А.Н.** Всероссийская конференция «Биомеханика-2018» (Дивноморское, 28 мая – 1 июня 2018 г.) 2
- Карапетянц А.Н.** 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.) 2
- Миноранский В.А.** VII Донской экологический фестиваль «Воспетая степь» (20–23 апреля 2018 г.) 2
- Миноранский В.А.** Участие Ассоциации «Живая природа степи» в Международной конференции «Биологическое разнообразие: изучение, сохранение, восстановление, рациональное использование» (Керчь, 19–23 сентября 2018 г.) 4
- Паринов И.А.** Международная конференция PHENMA-2018 (Пусан, Южная Корея, 9–11 августа 2018 г.) 3

ПАМЯТИ УЧЕНОГО

- Ватульян А.О., Радаев Ю.Н., Карякин М.И., Наседкин А.В., Сумбатян М.А.** А.В. Манжиров (1957–2018) 3

**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

ISSN 0321-3005. DOI 10.23683/0321-3005-2018-4. Известия высших учебных заведений.

Северо-Кавказский регион. Естественные науки.

2018. № 4