

ISSN 0321–3005

DOI 10. 23683/0321-3005

ИЗВЕСТИЯ
ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

*Северо-Кавказский
регион*

ЕСТЕСТВЕННЫЕ

НАУКИ

2017

4-1

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 ВНЦ РАН, Россия
В.Г. Лобанов – доктор техн. наук, профессор, Кубанский государственный технологический университет, Россия
Г.Г. Машишов – 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. Фаталь – доктор наук, профессор, Университет Нанта, Франция
Ю.А. Федоров – доктор геогр. наук, профессор, Южный федеральный университет, Россия
А.Д. Хованский – кандидат геол.-мин. наук, доктор геогр. наук, профессор, Южный федеральный университет, Россия
С.П. Чернышева – кандидат физ.-мат. наук, доцент Южный федеральный университет, Россия

Учредители:

Министерство образования и науки Российской Федерации, Дагестанский государственный технический университет, Дагестанский государственный университет, Донской государственный технический университет, Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова, Кубанский государственный 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 14.12.2017. Выход в свет 21.12.2017. Формат 60×84 1/8. Бумага офсетная.

Шрифт Times. Усл. печ. л. 18,47. Уч.-изд. л. 23,33. Тираж 250 экз. Заказ № 6102

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
V.G. Lobanov - Doctor of Technical Sciences, Professor, Kuban State Technological University, 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. Saghatelyan - Doctor of Geology and Mineralogy, Center for Ecological and Noospheric Studies, National Academy of Sciences of Armenia, Armenia
E.S. Sianisyan - Doctor of Geology and Mineralogy, Professor, Southern Federal University, Russia
Yu.A. Ustinov - Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Southern Federal University, Russia
P. Fattal - PhD, Professor, University of Nantes, France
Yu.A. Fedorov - Doctor of Geography, Professor, Southern Federal University, Russia
A.D. Khovanskiy - Candidate of Geology and Mineralogy, Doctor of Geography, Professor, Southern Federal University, Russia
S.P. Chernysheva - Candidate of Physics and Mathematics, Southern Federal University, Russia

The Founders

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

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

Signed print 14.12.2017. The publication 21.12.2017. Format 60×84 1/8. Offset paper. Font Times.
Conv. print. sheets 18,47. Publ. sign. 23,33. Edition 250 copies. Order number 6102.

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

Address of Editorial Board of the series "Natural Science": 344090, Rostov-on-Don, Stachki Ave, 200/1, build. 2, room 110,
phone +7 (863) 218-40-00 ext. 11-093; ext. 11-094.

Printed in the printing department, and corporate souvenirs,
Publishing and printing complex KIBI MEDIA CENTER, SFU,
344090, Rostov-on-Don, Stachki Ave, 200/1, build. 1, room 104, phone (863) 247-80-51

ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ. СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ РЕГИОН

IZVESTIYA VUZOV. SEVERO-KAVKAZSKII REGION

DOI 10.23683/0321-3005-2017-4-1

Регистрационный номер 011019
Комитета Российской Федерации по печати
Научно-образовательный и прикладной журнал
Издается с 1973 г.
Периодичность серии 4 номера в год
№ 4-1 (196-1) 2017 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. 4-1 (196-1) 2017.

ЕСТЕСТВЕННЫЕ НАУКИ

NATURAL SCIENCE

СОДЕРЖАНИЕ

CONTENTS

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ

PHYSICAL AND MATHEMATICAL SCIENCES

<i>Гиль А.В., Ногин В.А.</i> Комплексные степени одного дифференциального оператора, связанного с оператором Гельмгольца.....	4
<i>Зинченко А.Б.</i> Специальные классы игр с нечеткими коалиционными структурами.....	13
<i>Каменецкий Е.С., Орлова Н.С., Волик М.В., Минасян Д.Г.</i> Тестирование модели вибрирующего слоя, использующей метод дискретного элемента.....	18
<i>Куракин Л.Г., Мелехов А.П., Островская И.В.</i> Об устойчивости правильной системы вихревых зарядов вне круговой области.....	24
<i>Мелехина Т.Л., Рустанов А.Р.</i> Конгармонические аналоги тождеств Грея для почти контактных метрических многообразий класса C_{10}	31
<i>Николенко П.В.</i> О множестве разреза в некоторых экстремальных задачах, связанных с перемещением в поле скоростей.....	37
<i>Полякова Н.М., Ширяева Е.В.</i> О вычислении коэффициента турбулентного переноса в задаче о седиментации примеси.....	44
<i>Чебаков М.И., Данильченко С.А., Ляпин А.А.</i> Моделирование износа на контакте двух упругих тел с учетом тепловыделения от трения.....	51
<i>Чеголин А.П.</i> Отрицательные комплексные степени классического двумерного телеграфного оператора в пространствах $L_p(R^2)$	58

<i>Gil A.V., Nogin V.A.</i> Complex Powers of a Differential Operator Related to the Helmholtz Operator.....	4
<i>Zinchenko A.B.</i> Special Classes of Games with Fuzzy Coalition Structures.....	13
<i>Kamenetsky E.S., Orlova N.S., Volik M.V., Minasyan D.G.</i> Testing of the Vibrated Fluidized Layer Model Using the Discrete Element Method.....	18
<i>Kurakin L.G., Melekhov A.P., Ostrovskaya I.V.</i> On the Stability of a Regular System of the Vortex Charges Out-Side a Circular Domain.....	24
<i>Melekhina T.L., Rustanov A.R.</i> Conharmonic Analogues of Gray Identities for Almost Contact Metric Manifolds of the Class C_{10}	31
<i>Nikolenko P.V.</i> On the Set of Cut in Some Extremal Problems of Movement in the Velocity Field.....	37
<i>Polyakova N.M., Shiryayeva E.V.</i> On the Calculation of the Coefficient of Turbulent Transfer in the Problem of Impurities Sedimentation.....	44
<i>Chebakov M.I., Danilchenko S.A., Lyapin A.A.</i> Modelling of Wear on Contact of Two Elastic Bodies Taking into Account Thermal Emission from Friction.....	51
<i>Chegolin A.P.</i> The Negative Complex Powers of Classical Two-Dimensional Telegraph Operator in $L_p(R^2)$ -Spaces.....	58

БИОЛОГИЧЕСКИЕ НАУКИ

BIOLOGICAL SCIENCES

<i>Гречишниковая Д.А., Попцова М.С.</i> Распознавание структур стебель – петля транспозонов человека и прогнозирование их функции при помощи модели машинного обучения.....	63
---	----

<i>Grechishnikova D.A., Poptsova M.S.</i> Identifying Stem-Loop Structures in Human Transposons and Predicting Their Function by Machine Learning Model.....	63
--	----

<i>Касьяненко А.В., Краснов И.Н., Кравченко И.А., Толстоухова Т.Н.</i> О совершенствовании технологии подготовки семян зерновых перед посевом в условиях аридизации климата.....	70
<i>Кит О.И., Горошинская И.А., Зудерман Н.Е., Ушакова Н.Д., Лысенко И.Б., Немашкалова Л.А., Нескубина И.В., Николаева Н.В., Капуза Е.А., Шатохина О.Н.</i> Показатели эндогенной интоксикации у больных множественной миеломой в динамике комплексного лечения.....	75
<i>Самбыла Ч.Н.</i> Изучение содоминирующих и сопутствующих видов в запасе надземной фитомассы сообществ гумидных высокогорий Алтае-Саянской горной области ..	82
<i>Суншева Б.М., Шаов М.Т., Пшикова О.В., Паритов А.Ю., Хаишхожева Д.А., Маршенкулова Ф.А., Башиева И.А., Хотова А.Р.</i> Сравнительная оценка влияния желтого-красного света и бета-каротина на показатели сердечно-сосудистой системы.....	87

НАУКИ О ЗЕМЛЕ

<i>Абукова Л.А., Абрамова О.П., Анисимов Л.А., Сианисян Э.С., Воронцова И.В., Исаева Г.Ю.</i> Геохимия пластовых вод месторождений углеводородов Северного и Среднего Каспия.....	93
<i>Гурбанов М.Ф.</i> Солевой режим орошаемых земель на фоне сифонно-вакуумного дренажа в условиях малоклонной местности.....	104
<i>Ершов В.В., Никитенко О.А.</i> Изотопный и химический состав вод Южно-Сахалинского грязевого вулкана (по результатам опробования 2009 и 2010 годов).....	110
<i>Закруткин В.Е., Меринова Ю.Ю., Гибков Е.В., Меринов Ю.Н.</i> Основные тенденции изменения состояния окружающей среды и социально-экономического развития углепромышленных районов Восточного Донбасса в связи с реструктуризацией угольной отрасли.....	121
<i>Каранина С.Ю., Кочеева Н.А., Каранин А.В.</i> Пространственное и временное распределение молниевых разрядов по территории Алтае-Саянского региона.....	128
<i>Хованский А.Д., Хоросhev О.А., Латун В.В.</i> Анализ и совершенствование системы управления природоохранной деятельностью в регионе.....	139

НАУЧНАЯ ЖИЗНЬ

<i>Миноранский В.А.</i> 1-я и 2-я Международные конференции «Содержание и разведение сайгака в искусственных условиях» (Ростов-на-Дону, Москва, 2013, 2017 г.).....	146
<i>Назаренко О.В.</i> VIII Международная научно-практическая конференция «Экологические проблемы. Взгляд в будущее» (Ростов-на-Дону; Абрау, 8 – 11 сентября 2017 г.).....	148
<i>Паринов И.А.</i> Международная конференция PHENMA-2017 (Джабалпур (Индия), 14–16 октября 2017 г.).....	150

НАШИ ЮБИЛЯРЫ

<i>Миноранский В.А.</i> Гайирбег Магомедович Абдурахманов....	151
<i>Назаренко О.В.</i> Виктор Трофимович Богучарсков (к 80-летию со дня рождения).....	153

Указатель материалов, опубликованных в журнале «Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Естественные науки» в 2017 г.	155
---	-----

<i>Kasyanenko A.V., Krasnov I.N., Kravchenko I.A., Tolstoukhova T.N.</i> On Improving the Technology of Preparation of Grain Seeds Before Sowing in Conditions of Climate Aridization.....	70
<i>Kit O.I., Goroshinskaya I.A., Zuderman N.E., Ushakova N.D., Lysenko I.B., Nemashkalova L.A., Neskubina I.V., Nikolaeva N.V., Kapuza E.A., Shatohina O.N.</i> Indicators of Endogenous Intoxication in Patients with Multiple Myeloma in the Dynamics of Integrated Treatment.....	75
<i>Sambyla Ch.N.</i> Study of Co-Dominating and Associated Species in the Volume of Above-Ground Phytomass of Humid Alpine Communities (A Case Study of the Altai-Sayan Mountain Region).82	82
<i>Sunshcheva B.M., Shaov M.T., Pshikova O.V., Paritov A.Yu., Khashkhozheva D.A., Marshenkulova F.A., Bashieva I.A., Khotova A.R.</i> Comparative Assessment of Yellow-Red Light and Beta-Carotene in dicators for Cardiovascular System.....	87

SCIENCE OF EARTH

<i>Abukova L.A., Abramova O.P., Anisimov L.A., Sianisyan E.S., Vorontsova I.V., Isaeva G.U.</i> Formation Waters Geochemistry of the Hydrocarbons Fields of the North and Central Caspian.....	93
<i>Gurbanov M.F.</i> Saline Regime of Irrigated Lands with Application of the Siphon-Vacuum Drainage Under the Condition of the Low-Grade Terrain.....	104
<i>Ershov V.V., Nikitenko O.A.</i> Isotopic and Chemical Composition of Waters of the Yuzhno-Sakhalinsk Mud Volcano (Sampling in 2009 and 2010).....	110
<i>Zakrutkin V.E., Merinova Yu.Yu., Gibkov E.V., Merinov Yu.N.</i> The Main Trends of Environment State and Socio-Economic Development of Coal Mining Regions in Eastern Donbass in Connection with the Coal Industry Restructuring.....	121
<i>Karanina S.Yu., Kochееva N.A., Karanin A.V.</i> Spatial and Temporal Distribution of Lightning Discharges on the Territory of the Altai-Sayan Region.....	128
<i>Khovanskiy A.D., Khoroshev O.A., Latun V.V.</i> Analysis and Improvement of the System of Environmental Management in the Region.....	139

SCIENTIFIC LIFE

<i>Minoranskii V.A.</i> 1st and 2nd International Conference "The Saiga Content and Breeding in Artificial Conditions" (Rostov-on-Don, Moscow, 2013, 2017).....	146
<i>Nazarenko O.V.</i> VIII International Scientific and Practical Conference "Environmental Problems. Looking to the Future" (Rostov-on-Don; Abrau, 8-11, September, 2017).....	148
<i>Parinov I.A.</i> International Conference PHENMA-2017 (Jabalpur (India), October, 14-16, 2017.....	150

OUR PERSONS

<i>Minoranskii V.A.</i> Hairbeg Magomedovich Abdurakhmanov	151
<i>Nazarenko O.V.</i> Viktor Trofimovich Bogucharskov (To the 80th Anniversary).....	153

Index of articles published in the journal "Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Severo-Kavkazskii region. Estestvennye nauki" in 2017.....	155
--	-----

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ

PHYSICAL AND MATHEMATICAL SCIENCES

УДК 517.983.2

DOI 10.23683/0321-3005-2017-4-1-4-12

КОМПЛЕКСНЫЕ СТЕПЕНИ ОДНОГО ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО ОПЕРАТОРА, СВЯЗАННОГО С ОПЕРАТОРОМ ГЕЛЬМГОЛЬЦА*

© 2017 г. А.В. Гиль¹, В.А. Ногин¹

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

COMPLEX POWERS OF A DIFFERENTIAL OPERATOR RELATED TO THE HELMHOLTZ OPERATOR

A.V. Gil¹, V.A. Nogin¹

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

Гиль Алексей Викторович – кандидат физико-математических наук, доцент, кафедра дифференциальных и интегральных уравнений, Институт математики, механики и компьютерных наук им. И.И. Воровича, Южный федеральный университет, ул. Мильчакова, 8а, г. Ростов-на-Дону, 344090, Россия, e-mail: gil-alexey@yandex.ru

Alexey V. Gil - Candidate of Physics and Mathematics, Associate Professor, Department of Differential and Integral Equation, Vorovich Institute of Mathematics and Computer Sciences, Southern Federal University, Milchakova St., 8a, Rostov-on-Don, 344090, Russia, e-mail: gil-alexey@yandex.ru

Ногин Владимир Александрович – кандидат физико-математических наук, доцент, кафедра дифференциальных и интегральных уравнений, Институт математики, механики и компьютерных наук им. И.И. Воровича, Южный федеральный университет, ул. Мильчакова, 8а, г. Ростов-на-Дону, 344090, Россия, e-mail: vnogin@math.sfedu.ru

Vladimir A. Nogin - Candidate of Physics and Mathematics, Associate Professor, Department of Differential and Integral Equation, Vorovich Institute of Mathematics and Computer Sciences, Southern Federal University, Milchakova St., 8a, Rostov-on-Don, 344090, Russia, e-mail: vnogin@math.sfedu.ru

Исследуются комплексные степени обобщённого дифференциального оператора второго порядка $G_{\lambda}^{-\alpha}$ (в R^n)

$m^2 I + \Delta - \sum_{k=1}^l i \lambda_k \frac{\partial^2}{\partial x_k^2}$, $\lambda_k > 0$, с комплексными коэффициентами в главной части. Рассмотрено два случая:

$1 \leq l < n$ и $l = n$.

Комплексные степени этого оператора с отрицательной вещественной частью реализованы в виде анизотропных потенциалов $B_{\lambda}^{\alpha} \varphi$ с нестандартной метрикой. Положительные степени, обратные к отрицательным, – как аппроксимативные обратные операторы (АОО). Комплексные степени оператора $G_{\lambda}^{-\alpha}$ с отрицательными вещественными частями на «достаточно хороших» функциях $\varphi(x)$ определяются как мультипликативные операторы, действие которых в образах Фурье сводится к умножению на соответствующую степень символа рассматриваемого оператора

$F(G_{\lambda}^{-\alpha/2} \varphi)(\xi) = \left(m^2 - |\xi|^2 + i \sum_{k=1}^l \lambda_k \xi_k^2 \right)^{-\alpha/2} \hat{\varphi}(\xi)$, где $\xi \in R^n$, $\operatorname{Re} \alpha > 0$.

Комплексные степени $G_{\lambda}^{-\alpha/2} \varphi$, $\operatorname{Re} \alpha > 0$, понимаются в смысле обобщенных функций над основным пространством типа Лизоркина $\langle S_{\lambda}^{-\alpha/2} \varphi, \omega \rangle \stackrel{\text{def}}{=} \langle \varphi, \overline{S_{\lambda}^{-\alpha/2} \omega} \rangle$, где ω – функции из пространства Лизоркина Φ , преобразо-

* Работа первого соавтора выполнена в рамках совместного научного проекта международного конкурса «ГКН МОН РА – ЕГУ – ЮФУ РФ».

вания Фурье которых исчезают вместе со всеми своими производными на совокупности координатных гиперплоскостей; $\overline{S_{\bar{\lambda}}^{-\alpha/2}}$ – оператор с символом $\left(m^2 - |\xi|^2 + i \sum_{k=1}^l \lambda_k \xi_k^2\right)^{-\alpha/2}$.

Указанные потенциалы обобщают хорошо известные параболические потенциалы Джонса – Сэмсона, которые широко используются в различных задачах анализа и математической физики.

Получены оценки для оператора $B_{\bar{\lambda}}^{\alpha}$ из L_p в $L_p + L_s$ в случае $l < n$ и из L_p в L_p в случае $l = n$ (во втором случае показано, что $b_{\bar{\lambda}}^{\alpha}(y) \in L_1$). В рамках метода АОО построено обращение потенциалов $B_{\bar{\lambda}}^{\alpha} \varphi$ с плотностями из L_p . Дано описание образа $B_{\bar{\lambda}}^{\alpha}(L_p)$ в терминах оператора, левого обратного к $B_{\bar{\lambda}}^{\alpha}$.

Ключевые слова: дифференциальный оператор, образ, потенциал, комплексные степени, аппроксимативные обратные операторы, мультипликатор.

We study complex powers of the differential operator of the second order $G_{\bar{\lambda}}$ (in R^n) $m^2 I + \Delta - \sum_{k=1}^l i \lambda_k \frac{\partial^2}{\partial x_k^2}$, $\lambda_k > 0$, with complex coefficients in the principal part. Reviewed two cases $1 \leq l < n$ and $l = n$.

Complex powers of this operator with negative real parts are realized as anisotropic potentials $B_{\bar{\lambda}}^{\alpha} \varphi$ with nonstandard metric. Positive powers, reverse negative - as of approximative inverse operators (AIO). Complex powers of the operator $G_{\bar{\lambda}}$ with negative real parts on "sufficiently nice" functions $\varphi(x)$ are defined as multiplier operators, whose action in the Fourier pre-images is reduced to multiplication by the corresponding power of the symbol of the operator under consideration: $F(G_{\bar{\lambda}}^{-\alpha/2} \varphi)(\xi) = \left(m^2 - |\xi|^2 + i \sum_{k=1}^l \lambda_k \xi_k^2\right)^{-\alpha/2} \hat{\varphi}(\xi)$, where $\xi \in R^n$, $\text{Re} \alpha > 0$.

Complex powers $G_{\bar{\lambda}}^{-\alpha/2} \varphi$, $\text{Re} \alpha > 0$ are interpreted as distributions: $\langle S_{\bar{\lambda}}^{-\alpha/2} \varphi, \omega \rangle \stackrel{\text{def}}{=} \langle \varphi, \overline{S_{\bar{\lambda}}^{-\alpha/2} \omega} \rangle$, where ω is the Lizorkin space of functions in S , whose Fourier transforms vanish on coordinate hyperplanes, and $\overline{S_{\bar{\lambda}}^{-\alpha/2}}$ - operator with the symbol $\left(m^2 - |\xi|^2 + i \sum_{k=1}^l \lambda_k \xi_k^2\right)^{-\alpha/2}$.

These potentials generalize well known Jones-Sampson parabolic potentials which are widely used in various problems of analysis and mathematical physics.

The estimates for the operator $B_{\bar{\lambda}}^{\alpha}$ are obtained from L_p to $L_p + L_s$ in the case $l < n$ and from L_p to L_p in the case $l = n$ (in the latter case it is shown that $b_{\bar{\lambda}}^{\alpha}(y) \in L_1$). Within the framework of the method of approximative inverse operators we construct the inversion of potentials $B_{\bar{\lambda}}^{\alpha} \varphi$ with densities in L_p . We also describe the range $B_{\bar{\lambda}}^{\alpha}(L_p)$ in terms of the operator left inverse to $B_{\bar{\lambda}}^{\alpha}$.

Keywords: differential operator, range, potential, complex powers, approximative inverse operators, multiplier.

Введение

В работе исследуются комплексные степени обобщенного оператора Гельмгольца в R^n с комплексными коэффициентами в главной части

$$G_{\bar{\lambda}} = m^2 I + \Delta - \sum_{k=1}^l i \lambda_k \frac{\partial^2}{\partial x_k^2}, \quad m > 0, \quad (1)$$

где $\Delta = \frac{\partial^2}{\partial x_1^2} + \dots + \frac{\partial^2}{\partial x_n^2}$ – оператор Лапласа;

$$\bar{\lambda} = (\lambda_1, \dots, \lambda_l), \quad 0 < \lambda_k < 1, \quad 1 \leq l \leq n.$$

Комплексные степени оператора $G_{\bar{\lambda}}$ с отрицательными вещественными частями на «достаточно хороших» функциях $\varphi(x)$ определяются как мультипликаторные операторы, действие которых в образах Фурье сводится к умножению на соответствующую степень символа рассматриваемого оператора

$$F(G_{\bar{\lambda}}^{-\alpha/2} \varphi)(\xi) = \left(m^2 - |\xi|^2 + i \sum_{k=1}^l \lambda_k \xi_k^2 \right)^{-\alpha/2} \hat{\varphi}(\xi), \quad (2)$$

где $\xi \in R^n$, $\operatorname{Re} \alpha > 0$.

Получены интегральные представления для комплексных степеней (2) в виде интегралов типа потенциала с нестандартной метрикой. Соответствующие дробные потенциалы имеют вид

$$(B_{\bar{\lambda}}^{\alpha} \varphi)(x) = C_{l,\alpha}(\bar{\lambda}) \int_{R^n} b_{\bar{\lambda}}^{\alpha}(y) \varphi(x-y) dy, \quad (3)$$

$$\text{где } b_{\bar{\lambda}}^{\alpha}(y) = \frac{K_{\frac{n-\alpha}{2}}(mw_{\bar{\lambda}}(y))}{(w_{\bar{\lambda}}(y))^{\frac{n-\alpha}{2}}}, \quad (4)$$

$K_{\frac{n-\alpha}{2}}(mw_{\bar{\lambda}}(y))$ – функция Макдональда порядка

$$\frac{n-\alpha}{2}, \quad w_{\bar{\lambda}}(y) = \sqrt{-\sum_{k=1}^l \frac{y_k^2}{1+\lambda_k^2} - |\tilde{y}|^2 - i \sum_{k=1}^l \frac{\lambda_k y_k^2}{1+\lambda_k^2}},$$

$$l \leq n-1, \quad \tilde{y} = (y_{n+1}, \dots, y_n),$$

$$w_{\bar{\lambda}}(y) = \sqrt{-\sum_{k=1}^n \frac{y_k^2}{1+\lambda_k^2} - i \sum_{k=1}^n \frac{\lambda_k y_k^2}{1+\lambda_k^2}}, \quad l = n;$$

$$C_{l,\alpha}(\bar{\lambda}) = \frac{m^{\frac{n-\alpha}{2}} 2^{1-\frac{\alpha}{2}} \exp(-\frac{n-l}{2} \pi i)}{(2\pi)^{n/2} \Gamma(\frac{\alpha}{2}) \prod_{k=1}^n \sqrt{-1+i\lambda_k}}, \quad l \leq n. \quad (5)$$

На функциях $\varphi(x) \in L_p$ отрицательные степени оператора $G_{\bar{\lambda}}$ понимаются как потенциалы (3).

Получены оценки для оператора $B_{\bar{\lambda}}^{\alpha}$ из L_p в $L_p + L_s$ в случае $l < n$; из L_p в L_p в случае $l = n$ (во втором случае показано, что $b_{\bar{\lambda}}^{\alpha}(y) \in L_1$). В рамках метода АОО построено обращение потенциалов $B_{\bar{\lambda}}^{\alpha} \varphi$, $\varphi \in L_p$; дано описание образа $B_{\bar{\lambda}}^{\alpha}(L_p)$ в терминах оператора, левого обратного к $B_{\bar{\lambda}}^{\alpha}$.

Таким образом, в работе получены явные выражения для комплексных степеней $G_{\bar{\lambda}}^{-\alpha/2}$ с положительными вещественными частями и описаны области определения этих степеней.

В настоящее время имеется ряд работ по теории комплексных степеней вырождающихся дифференциальных операторов 2-го порядка с постоянными коэффициентами [1, гл. 9, 11; 2–9]. Рассмотренный здесь случай оператора (1) является одним из наиболее трудных, что обусловлено нестандартным видом дробных потенциалов (3). Последнее, в свою очередь, связано с наличием комплексных коэффициентов в главной части оператора $G_{\bar{\lambda}}$.

Вспомогательные сведения

Обозначения. $\langle f, w \rangle = \int_{R^n} \overline{f(x)} w(x) dx$;

$(W_{\delta} \varphi)(x) = (w(\bullet, \delta) * \varphi)(x)$ – интеграл Гаусса – Вейерштрасса, где $w(x, \delta) = (4\pi\delta)^{-n/2} e^{-|x|^2/(4\delta)}$ – ядро Гаусса – Вейерштрасса; если A – оператор свертки с символом $m(\xi)$, то через \bar{A} обозначается оператор с символом $\overline{m(\xi)}$; S – класс Шварца быстроубывающих гладких функций;

$$L_p + L_s = \{f : f = f_1 + f_2, f_1 \in L_p, f_2 \in L_s\},$$

$\|f\|_{L_p+L_s} = \inf \{\|f_1\|_{L_p} + \|f_2\|_{L_s}\}$, где нижняя грань берется по всевозможным представлениям f в виде суммы $f_1 + f_2$; \mathfrak{R}_0 – банахова алгебра преобразований Фурье интегрируемых функций в R^n ;

$$C_0(R^n) = \{f : f \in C(R^n), f(\infty) = 0\}.$$

Через z^{α} обозначается главная ветвь рассматриваемой многозначной функции, аналитическая в комплексной плоскости с разрезом по отрицательной вещественной полуоси.

Об аналитичности интеграла по параметру.

Лемма 1 [1, лемма 1.31]. Пусть функция $f(x, z)$ аналитична по z в некоторой области

$D \subset \mathbb{C}$ для почти всех $x \in \Omega \subseteq R^n$ и имеет суммируемую мажоранту: $|f(x, z)| \leq F(x) \in L_1(\Omega)$.

Тогда интеграл $\int_{\Omega} f(x, z) dx$ аналитичен по z в области D .

Равномерные оценки для функции Макдональда $K_{\nu}(z)$. В дальнейшем нам понадобятся равномерные оценки для функции Макдональда $K_{\nu}(z)$.

Лемма 2 (см. [9]). Пусть $|\operatorname{Re} \nu| \leq M$, $|\operatorname{Im} \nu| \leq N$, где M и N – произвольные положительные числа. Тогда справедливы оценки

$$|K_{\nu}(z)| \leq \exp\left(\frac{7\pi|\operatorname{Im} \nu|}{2}\right) \times \quad (6)$$

$$\times \begin{cases} A(\delta)|z|^{-|\operatorname{Re} \nu|}, & |\operatorname{Re} \nu| > \delta, |z| < 1, \\ |z|^{-|\operatorname{Re} \nu|} \left(C(M) + \ln \frac{1}{|z|} \right), & |\operatorname{Re} \nu| \geq 0, |z| < 1, \\ C(M) \exp(-\operatorname{Re} z) |z|^{-1/2}, & |z| > 1, -\frac{\pi}{2} < \arg z < \frac{\pi}{2}, \end{cases}$$

где $\delta \in (0, M)$ – фиксированное число; постоянные $A(\delta)$ и $C(M)$ не зависят от ν .

О пространствах Φ, Ψ Лизоркина. Обозначим через Ψ класс функций из S , исчезающих вместе со всеми своими производными на совокупности координатных гиперплоскостей $\xi_1 = 0, \dots, \xi_n = 0$ в R^n .

Пространство Ψ является счетно-нормированным, полным относительно набора попарно-согласованных сравнимых норм, определяемых равенствами

$$\|\psi\|_N = \sup_{|k| \leq N, x \in R^n \setminus V} (M_N(x))^N |D^k \psi(x)|, \quad N=0, 1, 2, \dots,$$

где $M(x) = \max \left\{ \sqrt{1+|x|^2}, 1/\rho(x) \right\}$, $\rho(x) = \min_{j=1, \dots, n} |\xi_j|$,

$V = \bigcup_{i=1}^n \{ \xi \in R^n : \xi_i = 0 \}$ – совокупность координатных гиперплоскостей в R^n .

Обозначим через Φ пространство преобразов Фурье функций из Ψ : $\Phi = F^{-1}(\Psi)$. Пространства Φ и Ψ были введены П. И. Лизоркиным [10].

Нам понадобится информация о плотности пространства Φ в L_p .

Теорема 1 [1]. Класс Φ плотен в L_p , $1 < p < \infty$, и в C_0 .

Замечание 1. Как показано в [1], для любой функции $u(x) \in S$ существует последовательность функций $w_N(x) \in \Phi$, аппроксимирующая $u(x)$ по норме L_p , $1 < p < \infty$, и по норме C_0 .

Комплексные степени оператора $G_{\bar{\lambda}}$

Комплексные степени оператора (1) с отрицательными вещественными частями на функциях $\varphi \in \Phi$ определим равенством (2). Заметим, что такое определение корректно, так как функция $(m^2 - |\xi|^2 + i \sum_{k=1}^l \lambda_k \xi_k^2)^{-\alpha/2}$ является мультипликативным в пространстве Ψ в силу [1, теорема 2.20].

Интегральное представление для комплексных степеней оператора (1). Интегральное представление комплексных степеней (2) дает

Теорема 2. Пусть $\operatorname{Re} \alpha > 0$, $\varphi \in \Phi$. Тогда справедливо равенство

$$(G_{\bar{\lambda}}^{-\alpha/2} \varphi)(x) = (B_{\bar{\lambda}}^{\alpha} \varphi)(x), \quad (7)$$

где $B_{\bar{\lambda}}^{\alpha}$ – оператор (3).

Доказательство. Рассмотрим случай, когда $l < n$ в (1); доказательство в случае $l = n$ аналогично.

Утверждение теоремы будет следовать из равенства

$$\begin{aligned} & \frac{1}{(2\pi)^n} \int_{R^n} \frac{\hat{\varphi}(\xi) e^{-ix\xi} d\xi}{\left(m^2 - |\xi|^2 + i \sum_{k=1}^l \lambda_k \xi_k^2 \right)^{\alpha/2}} = \\ & = C_{l,\alpha}(\bar{\lambda}) \int_{R^n} \frac{K_{\frac{n-\alpha}{2}}(m w_{\bar{\lambda}}(y))}{(w_{\bar{\lambda}}(y))^{\frac{n-\alpha}{2}}} \varphi(x-y) dy, \quad (8) \end{aligned}$$

где постоянная $C_{l,\alpha}(\bar{\lambda})$ определена в (5). Для доказательства (8) воспользуемся формулой [11]

$$\begin{aligned} & \int_{R^n} \frac{\hat{\varphi}(\xi) \exp(-ix\xi) d\xi}{\left(z + \sum_{k=1}^n \gamma_k \xi_k^2 \right)^{\alpha/2}} = \\ & = \frac{(2\pi)^n z^{\frac{n-\alpha}{4}}}{A_n(\alpha) \prod_{k=1}^n \sqrt{\gamma_k}} \int_{R^n} \frac{K_{\frac{n-\alpha}{2}} \left(\sqrt{z \sum_{k=1}^n \frac{x_k^2}{\gamma_k}} \right)}{\left(\sum_{k=1}^n \frac{x_k^2}{\gamma_k} \right)^{\frac{n-\alpha}{4}}} \varphi(x-y) dy, \end{aligned}$$

где $A_n(\alpha) = (2\pi)^{n/2} 2^{\frac{\alpha-1}{2}} \Gamma(\frac{\alpha}{2})$, $\varphi \in S$, $\operatorname{Re} z > 0$, $\operatorname{Im} z \geq 0$, $\operatorname{Re} \alpha > 0$, $-\infty < \operatorname{Re} \gamma_k < +\infty$, $\operatorname{Im} \gamma_k > 0$, $k = 1, \dots, n$.

Положим $z = m^2$, $\gamma_k = -1 + i\lambda_k$ для $k = 1, \dots, l$; $\gamma_k = -1 + i\varepsilon$ для $l < k \leq n$, где $0 < \varepsilon < 1$.

Будем иметь

$$\begin{aligned} & \frac{1}{(2\pi)^n} \int_{R^n} \frac{\hat{\varphi}(\xi) e^{-ix\xi} d\xi}{\left(m^2 - |\xi|^2 + i \left(\sum_{k=1}^l \lambda_k \xi_k^2 + \varepsilon |\tilde{\xi}|^2 \right) \right)^{\alpha/2}} = \\ & = C_{l,\alpha}(\bar{\lambda}, \varepsilon) \int_{R^n} \frac{K_{\frac{n-\alpha}{2}}(m w_{\bar{\lambda},\varepsilon}(y))}{(w_{\bar{\lambda},\varepsilon}(y))^{\frac{n-\alpha}{2}}} \varphi(x-y) dy, \quad (9) \end{aligned}$$

где $w_{\bar{\lambda},\varepsilon}(y) = \sqrt{-\sum_{k=1}^l \frac{y_k^2}{1+\lambda_k^2} - \frac{|\tilde{y}|^2}{1+\varepsilon^2} - i \left(\sum_{k=1}^l \frac{\lambda_k y_k^2}{1+\lambda_k^2} + \varepsilon |\tilde{y}|^2 \right)}$,

$$C_{l,\alpha}(\bar{\lambda}, \varepsilon) = \frac{m^{(n-\alpha)/2}}{A_n(\alpha) \prod_{k=1}^l (-1 + i\lambda_k)^{1/2} (-1 + i\varepsilon)^{(n-l)/2}}.$$

Переходя в (9) к пределу при $\varepsilon \rightarrow 0$, получаем (8).

Обоснуем указанный предельный переход. В правой части (9) можно перейти к пределу под знаком интеграла на основании мажорантной теоремы Лебега, применимой с учетом вытекающих из (6) оценок

$$|b_{\lambda, \varepsilon}^\alpha(y)| \leq c \begin{cases} |y|^{\operatorname{Re} \alpha - n}, & \operatorname{Re} \alpha < n, \\ \left(1 - \ln \sqrt{\sum_{k=1}^l \frac{\lambda_k y_k^2}{1 + \lambda_k^2}}\right), & \operatorname{Re} \alpha = n, \\ 1, & \operatorname{Re} \alpha > n, \end{cases}$$

если $|w_{\lambda, \varepsilon}(y)| \leq 1/m$ и

$$|b_{\lambda, \varepsilon}^\alpha(y)| \leq c \frac{\exp(-\operatorname{Re}(w_{\lambda, \varepsilon}(y)))}{|w_{\lambda, \varepsilon}(y)|^{(n - \operatorname{Re} \alpha + 1)/2}} \leq C_1, \quad (10)$$

если $|w_{\lambda, \varepsilon}(y)| > 1/m$.

Здесь через $b_{\lambda, \varepsilon}^\alpha(y)$ обозначено ядро оператора свертки, содержащее функцию Макдональда (см. (9)). При этом второе неравенство в (10) вытекает из того, что $\operatorname{Re}(w_{\lambda, \varepsilon}(y)) > 0$, а постоянные c и C_1 в приведенных оценках не зависят от ε .

Возможность предельного перехода под знаком интеграла в левой части (9) очевидна для $\varphi \in \Phi$.

Из (8) вытекает (7). Теорема доказана.

Действие оператора B_{λ}^α в L_p -пространствах.

Как отмечалось во введении, на функциях $\varphi \in L_p$ отрицательные степени $(G_{\lambda}^{-\alpha/2} \varphi)(x)$ будем понимать как потенциалы $(B_{\lambda}^\alpha \varphi)(x)$. Ядро (4) запишем в виде $b_{\lambda}^\alpha(y) = b_{\lambda, 0}^\alpha(y) + b_{\lambda, \infty}^\alpha(y)$, где

$$b_{\lambda, 0}^\alpha(y) = \begin{cases} b_{\lambda}^\alpha(y), & |w_{\lambda}(y)| \leq 1/m, \\ 0, & |w_{\lambda}(y)| > 1/m, \end{cases}$$

$$b_{\lambda, \infty}^\alpha(y) = b_{\lambda}^\alpha(y) - b_{\lambda, 0}^\alpha(y).$$

Пусть $B_{\lambda, 0}^\alpha$ и $B_{\lambda, \infty}^\alpha$ – операторы свертки с ядрами $b_{\lambda, 0}^\alpha(y)$ и $b_{\lambda, \infty}^\alpha(y)$ соответственно.

Лемма 3. Ядро $b_{\lambda, 0}^\alpha(y)$ принадлежит L_1 для $\operatorname{Re} \alpha > 0$.

Доказательство. Рассмотрим вначале случай, когда $l < n$ в (4).

$$\text{Обозначим } S_1(t) = \sum_{k=1}^l t_k^2, \quad S_2(t) = \sum_{k=1}^l \lambda_k t_k^2,$$

$S_3(t) = S_2^2(t) + S_1^2(t) + 2S_1(t) + 1$. Воспользовавшись оценкой (6) для функции Макдональда, в случае $0 < \operatorname{Re} \alpha < n$ получим

$$\|b_{\lambda, 0}^\alpha\|_1 \leq c \int_{|w_{\lambda}(y)| \leq 1/m} \frac{dy}{|w_{\lambda}(y)|^{n - \operatorname{Re} \alpha}}. \quad (11)$$

Запишем интеграл в правой части (11) в виде повторного интеграла, в котором внутреннее инте-

грирование ведется по dy_1, \dots, dy_l . Сделав последовательно замены

$$y_1 = t_1 |\tilde{y}| \sqrt{1 + \lambda_1^2}, \dots, y_l = t_l |\tilde{y}| \sqrt{1 + \lambda_l^2} \quad (12)$$

и поменяв порядок интегрирования, будем иметь

$$\|b_{\lambda, 0}^\alpha\|_1 \leq c \int_{R_+^l} \frac{\prod_{k=1}^l \sqrt{1 + \lambda_k^2}}{(S_3(t))^{(n - \operatorname{Re} \alpha)/4}} dt_1 \dots dt_l \int_{|\tilde{y}| \leq 1/(m(S_3(t))^{1/4})} |\tilde{y}|^{\operatorname{Re} \alpha + l - n} d\tilde{y}. \quad (13)$$

Вычисляя внутренний интеграл в правой части (13), получаем $\|b_{\lambda, 0}^\alpha\|_1 \leq c_2 \int_{R_+^l} \frac{dt_1 \dots dt_l}{(S_3(t))^{(n+l)/4}} < \infty$.

Применив затем оценку (6) для функции Макдональда при $\operatorname{Re} \alpha = n$, имеем

$$\|b_{\lambda, 0}^\alpha\|_1 = c \int_{|w_{\lambda}(y)| \leq 1/m} \left(C(M) + \ln \frac{1}{|w_{\lambda}(y)|} \right) dy < \infty$$

(с учетом ограниченности множества $\{y : |w_{\lambda}(y)| \leq 1/m\}$).

В случае $\operatorname{Re} \alpha > n$ ядро $b_{\lambda, 0}^\alpha(y)$ ограничено, как это видно из (6), откуда также получаем нужное. Если $l = n$ в (4), то $|w_{\lambda}(t)| = \sqrt[4]{(S_1(t))^2 + (S_2(t))^2} \geq c|t|$, откуда также получаем, что $b_{\lambda, 0}^\alpha(y) \in L_1$. Лемма доказана.

Из леммы 3 вытекает

Теорема 3. Пусть $\operatorname{Re} \alpha > 0$. Тогда оператор $B_{\lambda, 0}^\alpha$ ограничен в L_p , $1 < p < \infty$.

Оценим далее $\|b_{\lambda, \infty}^\alpha\|_q$.

Лемма 4. Пусть $0 < \operatorname{Re} \alpha < n + 1$. Тогда ядро $b_{\lambda, \infty}^\alpha(y)$ принадлежит L_q , если $q > \frac{2n - l}{n - \operatorname{Re} \alpha + 1}$.

Доказательство. Используя оценку (6) для функции Макдональда, получаем

$$\|b_{\lambda, \infty}^\alpha\|_q^q \leq c \int_{|w_{\lambda}(y)| > 1/m} \frac{\exp(-q \operatorname{Re} w_{\lambda}(y)) dy}{|w_{\lambda}(y)|^{q(n - \operatorname{Re} \alpha + 1)/2}}.$$

С помощью замены (12) будем иметь

$$\|b_{\lambda, \infty}^\alpha\|_q^q \leq$$

$$\leq c \int_{R_+^l} \frac{dt_1 \dots dt_l}{(S_3(t))^{q(n - \operatorname{Re} \alpha + 1)/8}} \int_{|\tilde{y}| > 1/(m(S_3(t))^{1/4})} \frac{\exp(-mq |\tilde{y}| \sqrt{\sqrt{S_3(t)} - S_1(t)}) d\tilde{y}}{|\tilde{y}|^{q(n - \operatorname{Re} \alpha + 1)/2 - l}}.$$

Производя далее в интеграле по $d\tilde{y}$ замену

$$\tilde{y} = \frac{\tau}{m \sqrt{\sqrt{S_3(t)} - S_1(t)}}, \quad \text{используя равенство}$$

$$\sqrt{\sqrt{S_3(t)} - S_1(t)} = \frac{S_2^2(t)}{1 + S_1(t) + \sqrt{S_3(t)}} \quad \text{и обозначая}$$

$$\chi(t) = \frac{\sqrt{\sqrt{S_3(t)} - 1 - S_1(t)}}{\sqrt[4]{S_3(t)}}, \text{ получаем}$$

$$\|b_{\lambda, \infty}^\alpha\|_q^q \leq$$

$$\leq c \int_{R_+^l} g(t) dt_1 \dots dt_l \int_{\{\tau \in R^{n-l}, |\tau| > \chi(t)\}} \frac{\exp(-q|\tau|) d\tau}{|\tau|^{q(n-\operatorname{Re} \alpha + 1)/2-l}} \equiv I, \quad (14)$$

где

$$g(t) = \frac{[S_2(t)]^{q(n-\operatorname{Re} \alpha + 1) - 2n/2} dt_1 \dots dt_l}{(S_3(t))^{q(n-\operatorname{Re} \alpha + 1)/8} [\sqrt{S_3(t)} + 1 + S_1(t)]^{(q(n-\operatorname{Re} \alpha + 1) - 2n)/4}}.$$

Учитывая, что $\chi(t) < 1$, разобьем область интегрирования в интеграле по $d\tau$ на две части:

$$\{\tau \in R^{n-l}, 1 \geq |\tau| > \chi(t)\} \text{ и } \{\tau \in R^{n-l}, |\tau| > 1\}.$$

Тогда $I \leq c(I_1 + I_2)$, где

$$I_1 = \int_{R_+^l} g(t) dt_1 \dots dt_l \int_{\{\tau \in R^{n-l}, 1 \geq |\tau| > \chi(t)\}} \frac{\exp(-q|\tau|) d\tau}{|\tau|^{q(n-\operatorname{Re} \alpha + 1)/2-l}};$$

$$I_2 = \int_{R_+^l} g(t) dt_1 \dots dt_l \int_{\{\tau \in R^{n-l}, |\tau| > 1\}} \frac{\exp(-q|\tau|) d\tau}{|\tau|^{q(n-\operatorname{Re} \alpha + 1)/2-l}}.$$

Рассмотрим I_1 . Вычисляя внутренний интеграл, будем иметь $I_1 \leq A_1 + A_2 - A_3$, где $A_1 = \int_{\{\tau \in R_+^l, |\tau| \leq 1\}} g(t) dt_1 \dots dt_l$,

$$A_2 = \int_{\{\tau \in R_+^l, |\tau| \leq 1\}} g(t) dt_1 \dots dt_l, \quad A_3 = \int_{R_+^l} \frac{dt_1 \dots dt_l}{(S_3(t))^{n/4}}.$$

Заметим, что подынтегральные функции в интегралах A_1 и A_3 непрерывны в R_+^l и на бесконечности оцениваются через $C(S_1(t))^{-n/2}$. Учитывая это, получаем, что $A_1, A_3 < \infty$ (при любом $q \geq 1$).

Легко видеть, что $A_2 < \infty$, если $q > \frac{2n-l}{n-\operatorname{Re} \alpha + 1}$.

С учетом оценки $\int_{\{\tau \in R^{n-l}, |\tau| > 1\}} \frac{\exp(-q|\tau|) d\tau}{|\tau|^{q(n-\operatorname{Re} \alpha + 1)/2-l}} < \infty$

будем иметь $I_2 \leq A_1 + A_2 < \infty$ при $q > \frac{2n-l}{n-\operatorname{Re} \alpha + 1}$.

Лемма доказана.

Применяя теорему Юнга о свертках, с учетом леммы 4 получаем следующее утверждение.

Теорема 4. Пусть $0 < \operatorname{Re} \alpha < n+1$,

$1 \leq p < \frac{2n-l}{n-\operatorname{Re} \alpha - l + 1}$, $q > \frac{2n-l}{n-\operatorname{Re} \alpha + 1}$. Тогда опе-

ратор $B_{\lambda, \infty}^\alpha$ ограничен из L_p в L_s , $\frac{1}{s} = \frac{1}{p} + \frac{1}{q} - 1$.

Из теорем 3 и 4 вытекает

Теорема 5. Пусть $0 < \operatorname{Re} \alpha < n+1$,

$1 \leq p < \frac{2n-l}{n-\operatorname{Re} \alpha - l + 1}$, $l < n$. Тогда оператор B_{λ}^α

ограничен из L_p в сумму пространств $L_p + L_s$, где

$$\frac{1}{s} = \frac{1}{p} + \frac{1}{q} - 1, \quad \frac{2n-l}{n-\operatorname{Re} \alpha + 1} < q < \infty.$$

Обращение потенциалов $B_{\lambda}^\alpha \varphi$ с L_p -плотностями. В рамках метода АОО левый обратный к $G_{\lambda}^{-\alpha/2}$ оператор будем строить в виде

$$(T_{\lambda}^\alpha f)(x) = \lim_{\delta \rightarrow 0} (T_{\delta, \bar{\lambda}}^\alpha f)(x), \quad (15)$$

где

$$(T_{\delta, \bar{\lambda}}^\alpha f)(x) = \int_{R^n} \rho_{\delta, \bar{\lambda}}^\alpha(t) f(x-t) dt, \quad (16)$$

$$\rho_{\delta, \bar{\lambda}}^\alpha(t) = F^{-1} \left[\left(m^2 - |\xi|^2 + i \sum_{k=1}^l \lambda_k \xi_k^2 \right)^{\frac{\alpha}{2}} \times \left(\frac{\xi_1}{\xi_1 + i\delta} \right)^d e^{-\delta|\xi|^2} \right](t), \quad \delta > 0, \quad d > n - \frac{\operatorname{Re} \alpha}{2}, \quad l < n.$$

Предел в (15) понимается по L_p -норме или почти всюду.

Справедлива следующая

Теорема 6. Пусть $0 < \operatorname{Re} \alpha < n+1$,

$1 \leq p < \frac{2n-l}{n-\operatorname{Re} \alpha - l + 1}$, $l < n$, $\varphi \in L_p$. Тогда

$$(T_{\lambda}^\alpha B_{\lambda}^\alpha \varphi)(x) = \varphi(x). \quad (17)$$

Доказательство. Заметим, что функция

$$\left(m^2 - |\xi|^2 + i \sum_{k=1}^l \lambda_k \xi_k^2 \right)^{\frac{\alpha}{2}} \left(\frac{\xi_1}{\xi_1 + i\delta} \right)^d e^{-\delta|\xi|^2}$$

принадлежит \mathfrak{R}_0 [1, теорема 3.5]. Следовательно,

$$(\rho_{\delta, \bar{\lambda}}^\alpha f)(t) \in L_1.$$

Доказательство равенства (17) основано на представлении

$$(T_{\delta, \bar{\lambda}}^\alpha B_{\lambda}^\alpha \varphi)(x) = (M_\delta W_\delta \varphi)(x) + (W_\delta \varphi)(x) \equiv (H_\delta \varphi)(x). \quad (18)$$

Здесь $0 < \operatorname{Re} \alpha < n+1$, $\varphi \in L_p$, $1 \leq p < \frac{2n-l}{n-\operatorname{Re} \alpha - l + 1}$.

Оператор M_δ имеет вид

$$(M_\delta \varphi)(x) = \sum_{j=1}^d C_d^j(-\delta)^j (A_\delta^j \varphi)(x),$$

$$\begin{aligned} & (A_{\delta}^j \varphi)(x) = \\ & = \underbrace{\int \dots \int}_j \underbrace{e^{-\delta(t_1 + \dots + t_j)}}_0 \varphi(x_1 - t_1 - \dots - t_j, x_2, \dots, x_l, \tilde{x}) dt_1 \dots dt_j, \\ & F(M_{\delta} \varphi)(x) = \left(\left(\frac{\xi_1}{\xi_1 + i\delta} \right)^d - 1 \right) \hat{\varphi}(\xi), \quad \varphi \in S. \end{aligned} \quad (19)$$

Равенство (18) с учетом (19) проверяется переходом к образам Фурье для $\varphi \in \Phi$ и распространяется по ограниченности на все L_p , $1 \leq p < \frac{2n-l}{n-\operatorname{Re} \alpha - l + 1}$, на основании теоремы 1 и ограниченности операторов в обеих частях (18) из L_p в $L_p + L_s$ (для оператора в левой части (18) это следует из теоремы 5).

В случае, когда $\varphi \in L_1$, равенство (18) доказывается вначале в смысле Φ' :

$$\langle T_{\delta, \bar{\lambda}}^{\alpha} B_{\bar{\lambda}, 0}^{\alpha} \varphi, \omega \rangle + \langle T_{\delta, \bar{\lambda}}^{\alpha} B_{\bar{\lambda}, \infty}^{\alpha} \varphi, \omega \rangle = \langle H_{\delta} \varphi, \omega \rangle, \quad (20)$$

$\omega \in \Phi$.

Пусть далее $\omega(x) \in S$, $\omega_N(x)$ – последовательность функций из Φ , аппроксимирующая $\omega(x)$ по норме L_q , $q > \frac{2n-l}{n-\operatorname{Re} \alpha + 1}$, и по норме C_0 (см. замечание 1). В силу (20) имеем

$$\langle T_{\delta, \bar{\lambda}}^{\alpha} B_{\bar{\lambda}, 0}^{\alpha} \varphi, \omega_N \rangle + \langle T_{\delta, \bar{\lambda}}^{\alpha} B_{\bar{\lambda}, \infty}^{\alpha} \varphi, \omega_N \rangle = \langle H_{\delta} \varphi, \omega_N \rangle. \quad (21)$$

Переходя в (21) к пределу при $N \rightarrow \infty$, получаем

$$\langle T_{\delta, \bar{\lambda}}^{\alpha} B_{\bar{\lambda}}^{\alpha} \varphi, \omega \rangle = \langle H_{\delta} \varphi, \omega \rangle. \quad (22)$$

Соотношение $\langle T_{\delta, \bar{\lambda}}^{\alpha} B_{\bar{\lambda}, \infty}^{\alpha} \varphi, \omega_N \rangle \rightarrow \langle T_{\delta, \bar{\lambda}}^{\alpha} B_{\bar{\lambda}, \infty}^{\alpha} \varphi, \omega \rangle$ обосновывается применением неравенства Гельдера, а соотношения $\langle T_{\delta, \bar{\lambda}}^{\alpha} B_{\bar{\lambda}, 0}^{\alpha} \varphi, \omega_N \rangle \rightarrow \langle T_{\delta, \bar{\lambda}}^{\alpha} B_{\bar{\lambda}, 0}^{\alpha} \varphi, \omega \rangle$ и $\langle H_{\delta} \varphi, \omega_N \rangle \rightarrow \langle H_{\delta} \varphi, \omega \rangle$ – применением мажорантной теоремы Лебега.

Из (22) вытекает (18) для $\varphi \in L_1$.

В [7] показано, что если $g(x) \in L_p$, $1 \leq p < \infty$, то $(W_{\delta} M_{\delta} g)(x) \rightarrow 0$ по норме L_p или почти всюду. Учитывая это и переходя в (18) к пределу при $\delta \rightarrow 0$ в указанном смысле, получаем (17).

Теорема доказана.

Замечание 2. Заметим, что при оценке нормы $\|b_{\bar{\lambda}, \infty}^{\alpha}\|_q$ можно использовать более «тонкие» средства. Например, можно воспользоваться асимптотическим разложением функции Макдональда

(вместо оценок (6)) и неполной Γ -функцией $\Gamma(\beta, z)$, через которую выражается внутренний интеграл в правой части (14) (вместо оценки экспоненты единицей). Однако использование этих средств вносит дополнительные технические трудности и не приводит к расширению интервала изменения q в формулировке леммы.

Описание образа $B_{\bar{\lambda}}^{\alpha}(L_p)$. Через $B_{\bar{\lambda}}^{\alpha}(L_p)$ обозначим образ оператора $B_{\bar{\lambda}}^{\alpha}$:

$$B_{\bar{\lambda}}^{\alpha}(L_p) = \{f(x) : f(x) = (B_{\bar{\lambda}}^{\alpha} \varphi)(x), \varphi \in L_p\}.$$

Положим $\|f\|_{B_{\bar{\lambda}}^{\alpha}(L_p)} = \|\varphi\|_p$, где $f = B_{\bar{\lambda}}^{\alpha} \varphi$, $\varphi \in L_p$.

Основным результатом статьи является теорема, содержащая описание комплексных степеней оператора (1).

Теорема 7. Пусть $0 < \operatorname{Re} \alpha < n + 1$,

$1 \leq p < \frac{2n-l}{n-\operatorname{Re} \alpha - l + 1}$, $l < n$. Тогда

$$B_{\bar{\lambda}}^{\alpha}(L_p) = \{f(x) \in L_p + L_s : \varphi(x) = T_{\bar{\lambda}}^{\alpha} f \in L_p\},$$

где $\frac{1}{s} = \frac{1}{p} + \frac{1}{q} - 1$; $q > \frac{2n-l}{n-\operatorname{Re} \alpha + 1}$; $T_{\bar{\lambda}}^{\alpha}$ – оператор

(15); предел в (15) понимается по норме L_p .

Доказательство. Вложение

$$B_{\bar{\lambda}}^{\alpha}(L_p) \subset \{f(x) \in L_p + L_s : \varphi(x) = T_{\bar{\lambda}}^{\alpha} f \in L_p\}$$

вытекает из теорем 5 и 6.

Докажем вложение

$$B_{\bar{\lambda}}^{\alpha}(L_p) \supset \{f(x) \in L_p + L_s : \varphi(x) = T_{\bar{\lambda}}^{\alpha} f \in L_p\}.$$

Пусть $f = f_1 + f_2$, где $f_1 \in L_p$, $f_2 \in L_s$

и $\varphi = T_{\bar{\lambda}}^{\alpha} f \in L_p$. Справедливо равенство

$$\langle B_{\bar{\lambda}}^{\alpha} \varphi, \omega \rangle = \langle \varphi, \overline{B_{\bar{\lambda}}^{\alpha} \omega} \rangle, \quad \omega \in \Phi,$$

которое обосновывается применением теоремы Фубини с учетом ограниченности оператора $B_{\bar{\lambda}}^{\alpha}$ из L_p в $L_p + L_s$, доказанной в теореме 5.

Далее имеем

$$\begin{aligned} \langle B_{\bar{\lambda}}^{\alpha} \varphi, \omega \rangle &= \langle \varphi, \overline{B_{\bar{\lambda}}^{\alpha} \omega} \rangle = \left\langle \lim_{\delta \rightarrow 0}^{(L_p)} T_{\delta, \bar{\lambda}}^{\alpha} f, \overline{B_{\bar{\lambda}}^{\alpha} \omega} \right\rangle = \\ &= \lim_{\delta \rightarrow 0} \langle T_{\delta, \bar{\lambda}}^{\alpha} f, \overline{B_{\bar{\lambda}}^{\alpha} \omega} \rangle = \lim_{\delta \rightarrow 0} \langle f, \overline{T_{\delta, \bar{\lambda}}^{\alpha} B_{\bar{\lambda}}^{\alpha} \omega} \rangle. \end{aligned} \quad (23)$$

Второе из равенств (23) вытекает из того, что сходимость в L_p влечет сходимость в Φ' .

С учетом (3) и (18) будем иметь

$$\begin{aligned} \langle B_{\lambda}^{\alpha} \varphi, \omega \rangle &= \lim_{\delta \rightarrow 0} \langle f, \overline{B_{\delta} \omega} \rangle = \lim_{\delta \rightarrow 0} \langle B_{\delta} f, \omega \rangle = \\ &= \lim_{\delta \rightarrow 0} \langle B_{\delta} f_1, \omega \rangle + \lim_{\delta \rightarrow 0} \langle B_{\delta} f_2, \omega \rangle = \langle f_1, \omega \rangle + \langle f_2, \omega \rangle. \end{aligned}$$

Последнее из равенств этой цепочки обосновывается применением неравенства Гельдера при $p > 1$ и мажорантной теоремы Лебега при $p = 1$.

Таким образом,

$$\langle f_1, \omega \rangle + \langle f_2, \omega \rangle = \langle B_{\lambda, 0}^{\alpha} \varphi, \omega \rangle + \langle B_{\lambda, \infty}^{\alpha} \varphi, \omega \rangle, \quad \omega \in \Phi.$$

Используя рассуждения, аналогичные применявшимся при переходе от (20) к (22), будем иметь $\langle f, \omega \rangle = \langle B_{\lambda}^{\alpha} \varphi, \omega \rangle$, $\omega \in \Phi$, откуда вытекает, что

$$f(x) = B_{\lambda}^{\alpha} \varphi(x) \text{ для почти всех } x \in R^n.$$

Следовательно, $f(x) \in B_{\lambda}^{\alpha}(L_p)$.

Теорема доказана.

Замечание 3. При доказательстве теоремы 7 получено равенство $\|f\|_{B_{\lambda}^{\alpha}(L_p)} = \|T_{\lambda}^{\alpha} f\|_p$.

Случай $l = n$. Как отмечалось выше (см. лемму 3), $b_{\lambda, 0}^{\alpha}(y) \in L_1$. Кроме того, справедлива

Лемма 5. Ядро $b_{\lambda, \infty}^{\alpha}(y)$ принадлежит L_1 .

Доказательство. Используя оценку (6) для функции Макдональда, будем иметь

$$\|b_{\lambda, \infty}^{\alpha}\|_1 \leq c_2 \int_{\left\{y \in R^n : |v(y)| > \frac{1}{m^4}\right\}} \frac{\exp\left(-\frac{m}{\sqrt{2}} \sqrt{\sqrt{v(y)} - |y|^2}\right)}{|v(y)|^{(n - \operatorname{Re} \alpha + 1)/2}} dy,$$

где $v(y) = \left(\sum_{k=1}^n y_k^2\right)^2 + \left(\sum_{k=1}^n \lambda_k y_k^2\right)^2$, $c_2 = c \prod_{k=1}^n \sqrt{\gamma_k}$. От-

сюда получаем $\|b_{\lambda, \infty}^{\alpha}\|_1 \leq c_2 \int_{|y| \geq \frac{1}{m}} \frac{dy}{|y|^{2(n - \operatorname{Re} \alpha + 1)}} < \infty$.

Лемма доказана.

Обращение потенциалов $B_{\lambda}^{\alpha} \varphi$ в случае $l = n$ также строится в виде (15). Аналогично теоремам 5, 6 и 7 доказываются следующие утверждения.

Теорема 8. Пусть $\operatorname{Re} \alpha > 0$, $l = n$. Тогда оператор B_{λ}^{α} ограничен в L_p , $1 \leq p < \infty$.

Теорема 9. Пусть $\operatorname{Re} \alpha > 0$, $1 \leq p < \infty$, $l = n$. Тогда $(T_{\lambda}^{\alpha} B_{\lambda}^{\alpha} \varphi)(x) = \varphi(x)$.

Теорема 10. Пусть $\operatorname{Re} \alpha > 0$, $1 \leq p < \infty$, $l = n$.

Тогда $B_{\lambda}^{\alpha}(L_p) = \{f(x) \in L_p : T_{\lambda}^{\alpha} f \in L_p\}$.

Кроме того, $\|f\|_{B_{\lambda}^{\alpha}(L_p)} = \|T_{\lambda}^{\alpha} f\|_p$.

Литература

1. Samko S.G. Hypersingular integrals and their applications // Analytical Methods and Special Functions. Vol. 5. London; New York : Taylor & Frances, 2002. 376 p.
2. Ногин В.А., Рубин Б.С. Оценки для потенциалов с осциллирующими ядрами, связанных с уравнениями Гельмгольца // Диф. уравнения. 1990. Т. 26, № 9. С. 1608–1613.
3. Nogin V.A., Abramyan A.V. Integral transforms, connected with fractional powers of nonhomogeneous differential operators in L_p -spaces // Integral Transforms and Special Functions. 1994. Vol. 2, № 1. P. 1.
4. Nogin V.A., Abramyan A.V. Fractional powers of differential operators of the second order with constant coefficients in L_p -spaces // Докл. РАН. 1995. Т. 341, № 3. С. 295.
5. Гиль А.В., Ногин В.А. Описание функциональных пространств, связанных с обобщенными операторами Шредингера // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2014. № 1. С. 10–13.
6. Гиль А.В., Ногин В.А. Комплексные степени одного дифференциального оператора, связанного с оператором Шредингера // Владикавк. мат. журн. 2017. Т. 19, № 1. С. 18–25.
7. Karapetyants A.N., Nogin V.A. Complex powers of the second order non-homogeneous elliptic differential operators with degenerating symbols in the spaces $L_p(R_n)$ // Bol. Soc. Mat. Mexicana. 2001. Vol. 7. P. 193–209.
8. Гиль А.В., Ногин В.А. Комплексные степени одного дифференциального оператора в L_p -пространствах // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2014. № 5. С. 5–10.
9. Возжсов Д.В., Ногин В.А. Комплексные степени некоторых вырождающихся дифференциальных операторов, связанных с оператором Гельмгольца // Диф. уравнения. 2009. Т. 45, № 3. С. 382–390.
10. Лизоркин П.И. Обобщенное лиувиллевское дифференцирование и метод мультипликаторов в теории вложений классов дифференцируемых функций // Тр. МИАН. 1969. Т. 105. С. 89–167.
11. Возжсов Д.В., Ногин В.А. Обращение некоторых операторов типа потенциала с символами, вырождающимися на гиперблоидах или параболоидах // Мат. заметки. 2006. Т. 80, № 6. С. 814–824.

References

1. Samko S.G. Hypersingular integrals and their applications. *Analytical Methods and Special Functions*. Vol. 5. London; New-York : Taylor & Frances, 2002, 376 p.
2. Nogin V.A., Rubin B.S. Otsenki dlya potentsialov s ostsilliruyushchimi yadrami, svyazannykh s uravneniyami Gel'mgol'tsa [Estimates for potentials with oscillating nuclei related to Helmholtz equations]. *Dif. uravneniya*. 1990, vol. 26, No. 9, pp. 1608-1613.
3. Nogin V.A., Abramyan A.V. Integral transforms, connected with fractional powers of nonhomogeneous differential operators in L_p -spaces. *Integral Transforms and Special Functions*. 1994, vol. 2, No. 1, p. 1.
4. Nogin V.A., Abramyan A.V. Fractional powers of differential operators of the second order with constant coefficients in L_p -spaces. *Dokl. RAN*. 1995, vol. 341, No. 3, p. 295.
5. Gil' A.V., Nogin V.A. Opisanie funktsional'nykh prostranstv, svyazannykh s obobshchennymi operatorami Shredingera [Description of the functional spaces associated with generalized Schrödinger operators]. *Izv. vuzov. Sev.-Kavk. region. Estestv. nauki*. 2014, No. 1, pp. 10-13.
6. Gil' A.V., Nogin V.A. Kompleksnye stepeni odnogo differentsial'nogo operatora, svyazannogo s operatorom Shredingera [Complex powers of a differential operator connected with the Schrödinger operator]. *Vladikavk. mat. zhurn*. 2017, vol. 19, No. 1, pp. 18-25.
7. Karapetyants A.N., Nogin V.A. Complex powers of the second order non-homogeneous elliptic differential operators with degenerating symbols in the spaces $L_p(\mathbb{R}^n)$. *Bol. Soc. Mat. Mexicana*. 2001, vol. 7, pp. 193-209.
8. Gil' A.V., Nogin V.A. Kompleksnye stepeni odnogo differentsial'nogo operatora v L_p -prostranstvakh [Complex powers of a differential operator in L_p -spaces]. *Izv. vuzov. Sev.-Kavk. region. Estestv. nauki*. 2014, No. 5, pp. 5-10.
9. Vozzhov D.V., Nogin V.A. Kompleksnye stepeni nekotorykh vyrozhdnykh differentsial'nykh operatorov, svyazannykh s operatorom Gel'mgol'tsa [Complex degrees of certain degenerate differential operators connected with the Helmholtz operator]. *Dif. uravneniya*. 2009, vol. 45, No. 3, pp. 382-390.
10. Lizorkin P.I. Obobshchennoe liouvillevskoe differentsirovanie i metod mul'tiplikatorov v teorii vlozhenii klassov differentsiruemykh funktsii [Generalized Liouville differentiation and the multiplier method in the embedding theory of classes of differentiable functions]. *Tr. MIAN*. 1969, vol. 105, pp. 89-167.
11. Vozzhov D.V., Nogin V.A. Obrashchenie nekotorykh operatorov tipa potentsiala s simvolami, vyrozhdnykh na giperboloidakh ili paraboloidakh [Inversion of certain operators of potential type with symbols degenerating on hyperboloids or paraboloids]. *Mat. zametki*. 2006, vol. 80, No. 6, pp. 814-824.

СПЕЦИАЛЬНЫЕ КЛАССЫ ИГР С НЕЧЕТКИМИ КОАЛИЦИОННЫМИ СТРУКТУРАМИ

© 2017 г. А.Б. Зинченко¹

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

SPECIAL CLASSES OF GAMES WITH FUZZY COALITION STRUCTURES

A.B. Zinchenko¹

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

Зинченко Александра Борисовна – кандидат физико-математических наук, доцент, кафедра исследования операций, Институт математики, механики и компьютерных наук им. И.И. Воровича, Южный федеральный университет, ул. Мильчакова, 8а, г. Ростов-на-Дону, 344090, Россия, e-mail: zinch46@mail.ru

Alexandra B. Zinchenko - Candidate of Physics and Mathematics, Associate Professor, Department of Operation Research, Vorovich Institute of Mathematics, Mechanics and Computer Science, Southern Federal University, Milchakova St., 8a, Rostov-on-Don, 344090, Russia, e-mail: zinch46@mail.ru

Предметом исследования статьи являются кооперативные игры, разрешающие агентам участвовать в нескольких коалициях одновременно, распределяя между ними капиталы, ресурсы, доступную информацию. Цель работы - описание кооперативных игр, в которых нечеткие коалиционные структуры экономически более выгодны, чем четкие. Рассмотрены два класса игр. Первый класс состоит из нечетких игр со специальными структурами. Доказано, что без потери оптимальных элементов множество нечетких структур можно заменить подмножеством структур, компоненты которых имеют разные носители. Описан простой метод нахождения оптимальных структур. Другой класс состоит из нечетких игр с коалиционной структурой и ограниченной кооперацией. Предложен способ построения вспомогательной игры без ограничений. При доказательстве теорем используются теория линейного программирования и условие Бондаревой – Шепли. Полученные результаты могут быть полезными для моделирования ситуаций коллективного инвестирования, в которых объединение капиталов увеличивает прибыль.

Ключевые слова: нечеткая коалиция, нечеткая кооперативная игра, нечеткая коалиционная структура, ограниченная кооперация, оптимальная структура.

The subject of paper's study are the cooperative games that allow the agents to participate in several coalitions simultaneously and distribute between them the capitals, resources, available information. The purpose of work is a description of cooperative games in which the fuzzy coalition structures are economically more profitable than crisp ones. Two classes of games are considered. The first class consists of fuzzy games with special structure. It is proved that, without loss of optimal elements, the set of fuzzy structures can be changed by the subset of structures which components have different carriers. An easy method to find such optimal structure is described. Another class consists of fuzzy games with coalition structure and restricted cooperation. The way of constructing an auxiliary game without restrictions is offered. At the proof of theorems we use the Bondareva-Shapley condition and linear programming theory. The obtained results can be useful for modeling collective investment situations where the combining of capitals increases the profit.

Keywords: fuzzy coalition, fuzzy cooperative game, fuzzy coalition structure, restricted cooperation, optimal structure.

В четкой кооперативной игре (N, v) , где $N = \{1, 2, \dots, n\}$, $v: 2^N \rightarrow R$ и $v(\emptyset) = 0$, коалицией является подмножество множества игроков $S \in 2^N$, которое можно отождествить с вектором $e^S = (e_i^S)_{i \in N}$, где $e_i^S = 1$ для $i \in S$, $e_i^S = 0$ для $i \notin S$. Предполагается, что сформировалась максимальная коалиция N . Четкая коалиционная структура $C = \{C_1, \dots, C_m\}$ состоит из четких коалиций

$C_i \in 2^N \setminus \{\emptyset\}$, $i \in N$, удовлетворяющих условию $C_j \cap C_i = \emptyset$, $j \neq i$, $\bigcup_{j=1}^m C_j = N$.

Четкая кооперативная игра с коалиционной структурой имеет вид (N, v, C) .

В нечеткой кооперативной игре (N, u) , где $u: [0, 1]^n \rightarrow R_+$, коалицией является вектор $FS = (FS_1, \dots, FS_n)$, компоненты которого $FS_i \in [0, 1]$ интерпретируются как степени (inten-

сивности) участия игроков в \mathbf{FS} [1]. Множество $suppFS = \{i \in N \mid FS_i > 0\}$ называется носителем \mathbf{FS} . Нечеткая коалиционная структура [2] $FC = \{\mathbf{FC}^1, \dots, \mathbf{FC}^m\}$ состоит из нечетких коалиций $\mathbf{FC}^k = (FC_1^k, \dots, FC_n^k)$, $k = \overline{1, m}$, удовлетворяющих условию

$$\sum_{k=1}^m FC_i^k = 1, i \in N. \quad (1)$$

Пусть \mathbf{F} – семейство таких структур; \mathbf{C}^F – подмножество структур $FC \in \mathbf{F}$ с компонентами из $\{0,1\}^n$. Существует другое определение нечеткой структуры [3], которое в данной работе не используется. Нечеткая кооперативная игра с коалиционной структурой имеет вид (N, u, FC) . Если структура FC не сформировалась до начала игры, то, кроме поиска решения игры, возникает дополнительная проблема нахождения структуры с максимальным весом $\max_{FC \in \mathbf{F}} u(FC) = \max_{FC \in \mathbf{F}} \sum_{\mathbf{FC}^k \in FC} u(\mathbf{FC}^k)$.

Такие структуры будем называть оптимальными.

Явный вид функции u часто бывает неизвестным, но можно вычислить $u(\mathbf{FS})$ для $\mathbf{FS} \in \{0,1\}^n$. В этом случае вместо (N, u) используют продолжение на куб $[0,1]^n$ соответствующей четкой игры (N, v) , где $v(S) = u(\mathbf{e}^S)$, $S \in \Omega = 2^N \setminus \{\emptyset\}$.

Существует несколько способов такого продолжения, но они могут давать сильно отличающиеся результаты. Например, пусть в игре трех лиц известны значения:

$$\begin{aligned} u(\mathbf{e}^{\{1\}}) &= v(1) = 3, \quad u(\mathbf{e}^{\{2\}}) = v(2) = 5, \\ u(\mathbf{e}^{\{3\}}) &= v(3) = 2, \quad u(\mathbf{e}^{\{1,2\}}) = v(1,2) = 10, \\ u(\mathbf{e}^{\{1,3\}}) &= v(1,3) = 8, \quad u(\mathbf{e}^{\{2,3\}}) = v(2,3) = 12, \\ u(\mathbf{e}^N) &= v(N) = 18. \end{aligned}$$

Тогда для нечеткой коалиции $\mathbf{FS} = (0,5, 0,3, 0,8)$, используя интегральную форму [4], получаем $u(\mathbf{FS}) \approx 14,34$. А при каноническом представлении [2] – $u(\mathbf{FS}) \approx 7$.

Цель данной работы – описание кооперативных игр, для которых нечеткие коалиционные структуры экономически более выгодны, чем четкие. Рассмотрены два класса таких игр. В первом из них функция u однозначно определяется соответствующей четкой игрой, во втором – оптимизационной задачей. Если u и FC известны, то решение игры (N, u, FC) можно найти методами, предложенными в [3, 5].

Игры с коалиционными структурами специального вида

Предположим, что коалиционная структура FC удовлетворяет условию

$$FC_i^k = \begin{cases} \lambda_k, & i \in suppFC^k, \\ 0, & i \notin suppFC^k, \end{cases} \quad \lambda_k \in (0,1], \quad (2)$$

для всех $\mathbf{FC}^k \in FC$. Семейство таких структур обозначим через \mathbf{F}^1 . Экономическая целесообразность условия (2) обоснована в [6]. Структуры $FC \in \mathbf{F}^1$ аналогичны сбалансированным множествам, используемым при выводе условия непустоты S -ядра классической кооперативной игры. Если сформировалась структура $FC \in \mathbf{F}^1$, то естественно предположение

$$u(\mathbf{FC}^k) = \lambda_k v(suppFC^k), \quad \lambda_k \in (0,1], \quad (3)$$

где $v(S) = u(\mathbf{e}^S)$, $S \in \Omega$. Условию (3) удовлетворяют, например, инвестиционные игры со ставками, зависящими от срока вклада, частные классы игр коллективного страхования.

Первая теорема данной работы посвящена проблеме поиска оптимальной нечеткой структуры. В теореме доказывается, что множество \mathbf{F}^1 можно заменить подмножеством $\mathbf{F}^2 \subset \mathbf{F}^1$, состоящим из структур FC , все компоненты которых имеют разные носители, т.е. для каждой пары нечетких коалиций $\mathbf{FC}^j, \mathbf{FC}^p \in FC$ справедливо

$$suppFC^j \neq suppFC^p, \quad j \neq p. \quad (4)$$

Доказывается также, что поиск оптимальной в \mathbf{F}^2 структуры сводится к решению задачи линейного программирования.

Теорема 1. Пусть (N, v, FC) – игра, удовлетворяющая условиям (2), (3). Тогда

$$\max_{FC \in \mathbf{F}^1} u(FC) = \max_{FC \in \mathbf{F}^2} u(FC). \quad (5)$$

Существует биекция между структурами $FC^* \in \arg \max_{FC \in \mathbf{F}^2} u(FC)$ и оптимальными решениями задачи

$$\left. \begin{aligned} f(\lambda) &= \sum_{S \in \Omega} v(S) \lambda_S \rightarrow \max, \\ \sum_{\substack{S \in \Omega, \\ i \in S}} \lambda_S &= 1, \quad i \in N, \quad \lambda = (\lambda_S)_{S \in \Omega} \in R_+^{2^n - 1}. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Доказательство. Возьмем $\overline{FC} \in \mathbf{F}^1 \setminus \mathbf{F}^2$. Тогда для некоторых $\overline{\mathbf{FC}}^j, \overline{\mathbf{FC}}^p \in \overline{FC}$, $j \neq p$, справедливо $supp\overline{\mathbf{FC}}^j = supp\overline{\mathbf{FC}}^p$. Из $\overline{FC} \in \mathbf{F}^1$ следует, что

$\overline{\mathbf{FC}}^j = \lambda_j \mathbf{e}^{supp \overline{\mathbf{FC}}^j}$ и $\overline{\mathbf{FC}}^p = \lambda_p \mathbf{e}^{supp \overline{\mathbf{FC}}^p}$. Рассмотрим новую коалиционную структуру

$$FC = ((\overline{FC} \setminus \overline{\mathbf{FC}}^j) \setminus \overline{\mathbf{FC}}^p) \cup \mathbf{FC}^r,$$

где $\mathbf{FC}^r = (FC_1^r, \dots, FC_n^r)$, $FC_i^r = \overline{FC}_i^j + \overline{FC}_i^p$, $i \in N$.

В этой структуре $supp FC^r = supp \overline{FC}^j = supp \overline{FC}^p$ и $\mathbf{FC}^r = (\lambda_j + \lambda_p) \mathbf{e}^{supp \mathbf{FC}^r}$. Следовательно, $FC \in F^1$

и $|FC| < |\overline{FC}|$. Согласно (3), $u(FC) = u(\overline{FC})$. Повторное использование аналогичных преобразований приводит к структуре из множества F^2 с весом, равным $u(\overline{FC})$. Таким образом, из $FC^* \in \arg \max_{FC \in F^1} u(FC)$ следует существование та-

кой структуры $FC^{**} \in F^2$, что $u(FC^{**}) = u(FC^*)$. Соотношение (5) доказано.

Обозначим через Λ множество допустимых решений задачи (6). Каждому $\lambda \in \Lambda$ однозначно соответствует структура $FC = \{\lambda_S \mathbf{e}^S\}_{\lambda_S > 0}$, удовлетворяющая (4). Следовательно, $FC \in F^2$. Обратно, пусть $FC \in F^2$. Согласно (1), (2),

$$FC = \{\alpha_1 \mathbf{e}^{supp FC^1}, \dots, \alpha_m \mathbf{e}^{supp FC^m}\}, \sum_{k=1}^m \alpha_k = 1,$$

$\alpha_k \in (0, 1]$. Числа $\alpha_1, \dots, \alpha_m$ определяют единственный вектор $\lambda = (\lambda_S)_{S \in 2^N \setminus \emptyset} \in R_+^{2^n - 1}$, где

$$\lambda_S = \begin{cases} \alpha_k, & (S = supp FC^k) \wedge (\mathbf{FC}^k \in FC), \\ 0, & \text{в остальных случаях.} \end{cases}$$

Равенство $\sum_{S \in \Omega, i \in S} \lambda_S = 1$ следует из $\sum_{k=1}^m \alpha_k = 1$.

Получили, что $\lambda \in \Lambda$. Обозначим через Λ^* оптимальное множество задачи (6). Тогда каждому $\lambda^* \in \Lambda^*$ взаимно однозначно соответствует структура $FC^* \in \arg \max_{FC \in F^2} u(FC)$, где $FC^* = \{\lambda_S^* \mathbf{e}^S\}_{\lambda_S^* > 0} \in F^2$.

Теорема 1 доказана.

Во многих играх (N, ν, C) , моделирующих экономические ситуации, вес оптимальной структуры равен $\nu(N)$. Практический интерес представляют условия, при которых использование нечетких коалиций позволяет увеличить суммарную полезность, распределяемую между участниками игры.

Теорема 2. Пусть (N, u, FC) – игра, удовлетворяющая (2), (3), и $\nu(S) = u(\mathbf{e}^S)$, $S \in \Omega$. Для су-

ществования такой структуры $FC \in F^2$, что $u(FC) > \nu(N)$, необходима и достаточна пустота C-ядра игры (N, ν) .

Доказательство. Игра (N, ν) имеет непустое C-ядро тогда и только тогда, когда

$$\sum_{S \in \Omega} \nu(S) \lambda_S \leq \nu(N), \lambda \in \Lambda. \quad (7)$$

Если $C(\nu) = \emptyset$, то $\sum_{S \in \Omega} \nu(S) \bar{\lambda}_S > \nu(N)$ для

некоторого $\bar{\lambda} \in \Lambda$. Рассмотрим структуру

$$\overline{FC} = \{\bar{\lambda}_S \mathbf{e}^S\}_{\bar{\lambda}_S > 0} \in F^2. \text{ Согласно (3),}$$

$$u(\overline{FC}) = \sum_{S: \bar{\lambda}_S > 0} \nu(S) \bar{\lambda}_S = \sum_{S \in \Omega} \nu(S) \bar{\lambda}_S > \nu(N).$$

Пусть теперь $u(\overline{FC}) > \nu(N)$ для некоторой структуры $\overline{FC} \in F^2$. Тогда из доказательства теоремы 1 следует, что $\overline{FC} = \{\bar{\lambda}_S \mathbf{e}^S\}_{\bar{\lambda}_S > 0}$, где $\bar{\lambda} \in \Lambda$, и

$$u(\overline{FC}) = f(\bar{\lambda}). \text{ Возьмем } \lambda^* \in \Lambda^*. \text{ Тогда}$$

$$FC^* = \{\lambda_S^* \mathbf{e}^S\}_{\lambda_S^* > 0} \in F^2 \text{ и } u(FC^*) = f(\lambda^*).$$

Из соотношения $f(\lambda^*) = \sum_{S \in \Omega} \nu(S) \lambda_S^* \geq f(\bar{\lambda}) = u(\overline{FC}) > \nu(N)$

вытекает невыполнение неравенства из (7), соответствующего $\lambda^* \in \Lambda^* \subseteq \Lambda$. Значит, $C(\nu) = \emptyset$. Теорема 2 доказана.

Следствие 1. Пусть (N, u, FC) – игра, удовлетворяющая (2), (3), и $C(\nu) = \emptyset$, где $\nu(S) = u(\mathbf{e}^S)$, $S \in \Omega$. Тогда существует такая структура $FC \in F^2$, что $u(FC) > \nu(N)$ и $|FC| \leq n$.

Доказательство. Согласно теореме 2, из $C(\nu) = \emptyset$ следует существование такой структуры

$$FC \in F^2, \text{ что } u(FC) > \nu(N). \text{ Значит, для любой оп-}$$

тимальной структуры $FC^* \in F^2$ справедливо нера-

венство $u(FC^*) > \nu(N)$. Ранг матрицы ограничений задачи (6) равен n . Поэтому любое базисное реше-

ние $\lambda^* \in \Lambda^*$ имеет количество ненулевых компонент $m \leq n$. По теореме 1 λ^* однозначно определяет оп-

тимальную структуру $FC^* = \{\lambda_S^* \mathbf{e}^S\}_{\lambda_S^* > 0}$, где

$$|FC^*| = m. \text{ Следствие 1 доказано.}$$

Следствие 2. Пусть (N, u, FC) – игра, удовлетворяющая (2), (3). Тогда существует такая структура $\overline{FC} \in F^2 \setminus C^F$, что $u(\overline{FC}) > \max_{FC \in C^F} u(FC)$.

Доказательство. Рассмотрим игру (N, u, FC) трёх лиц, для которой известны значения: $u(\mathbf{e}^{\{1\}}) = u(\mathbf{e}^{\{2\}}) = u(\mathbf{e}^{\{3\}}) = 0$,

$u(\mathbf{e}^{\{1,2\}}) = u(\mathbf{e}^{\{1,3\}}) = u(\mathbf{e}^{\{2,3\}}) = u(\mathbf{e}^N) = 1$. Множество C^F состоит из пяти структур

$$C^F = \{ \{(1,0,0), (0,1,0), (0,0,1)\}, \{(1,1,0), (0,0,1)\}, \{(1,0,1), (0,1,0)\}, \{(0,1,1), (1,0,0)\}, \{(1,1,1)\} \}.$$

Вес первой структуры равен 0, а веса всех остальных структур равны 1. Значит, $\max_{FC \in C^F} u(FC) = 1$. Возьмем

$$\overline{FC} = \{ (0, \frac{1}{2}, \frac{1}{2}), (\frac{1}{2}, 0, \frac{1}{2}), (\frac{1}{2}, \frac{1}{2}, 0) \} \in F^2 \setminus C^F.$$

Согласно (3), $u(\overline{FC}) = \frac{3}{2}$. Следствие 2 доказано.

Нечеткие игры с коалиционными структурами и ограниченной кооперацией

Пусть (N, v, \mathfrak{Z}) – четкая игра, где \mathfrak{Z} – математический объект, содержащий информацию о запрещенных коалициях. Игре (N, v, \mathfrak{Z}) соответствует нечеткая игра $(N, u, F\mathfrak{Z})$, где $u(\mathbf{e}^S) = v(S)$ для разрешенных коалиций; $F\mathfrak{Z}$ – список запрещенных носителей коалиций $FC \in [0,1]^n$. Стандартный прием поиска решений игр (N, v, \mathfrak{Z}) заключается в переходе к вспомогательной игре $(N, v^{\mathfrak{Z}})$, характеристическая функция которой $v^{\mathfrak{Z}} : 2^N \rightarrow R$ определена для всех коалиций. Например, если задан коммуникационный граф $G = (N, E)$ с множеством ребер $E \subseteq \{ \{i, j\} | i, j \in N, i \neq j \}$, то допустимы коалиции S , соответствующие его связным подграфам $G^S = (S, E^S)$. Значения $v^G(S)$ в игре (N, v^G) без ограничений полагаются равными сумме $v(S)$ для компонент связности подграфа G^S [7].

Предположим, что ограниченная кооперация связана с личными взаимоотношениями игроков и \mathfrak{Z} – список запрещенных коалиций. В этом случае нельзя использовать классический способ [7] перехода к игре без ограничений, а также способы, предложенные для игр с запретами, описанными с помощью гиперграфа, матроида, антиматроида и т.д. Например, пусть $N = \{1,2,3,4\}$, $S = \{1,2,3\}$, $\mathfrak{Z} = \{K \in \Omega | \{1,3\} \subseteq K, \{2,4\} \subseteq K, \{3,4\} \subseteq K\}$. Граф $G^S = (S, E^S)$, где $E^S = \{ \{1,2\}, \{2,3\} \}$, связный.

Значит, $v^G(S) = v(1,2,3)$. Но значение $v(1,2,3)$ не определено, так как $\{1,2,3\} \in \mathfrak{Z}$.

Для нечеткой игры с коалиционной структурой и ограниченной кооперацией $(N, u, FC, F\mathfrak{Z})$ предлагается следующий метод построения вспомогательной игры $(N, u^{F\mathfrak{Z}}, FC)$ без запретов. Вес коалиции FS с запрещенным носителем $suppFS \in F\mathfrak{Z}$ полагается равным весу оптимальной нечеткой структуры с допустимыми носителями, содержащимися в $suppFS$. Этот метод похож на способ вычисления значений характеристической функции четкой игры, в которой все коалиции разрешены, но некоторые из них убыточны [8].

Предположим, что характеристическая функция нечеткой игры определяется оптимизационной задачей. Соответствующие экономические ситуации описаны в [9] и других работах. На примере коллективного инвестирования покажем, что существуют игры с запретами, в которых нечеткие коалиции более выгодны, чем четкие.

Пусть N – множество инвесторов; $\mathbf{K} = (K^i)_{i \in N} \in R_{++}^n$ – вектор капиталов; $P = \{P_1, \dots, P_p\}$ – множество инвестиционных проектов; $\mathbf{d} \in R_+^p$ – вектор минимальных допустимых вкладов в проекты; x_j^{FS} – количество денег, вкладываемых коалицией $\mathbf{FS} \in [0,1]^n$ в проект $P_j \in P$; $\mathbf{x}^{FS} = (x_1^{FS}, \dots, x_p^{FS})$ – инвестиционный план коалиции \mathbf{FS} ; $g_j(\mathbf{x}^{FS})$ – функция доходности j -го проекта. Максимальное количество денег $u(\mathbf{FS})$, которое может получить коалиция \mathbf{FS} , определяется ее капиталом $K^{FS} = \sum_{i=1}^n (FS_i \cdot K^i)$, т.е. $u(\mathbf{FS})$ – оптимальное значение задачи

$$\left. \begin{aligned} \sum_{j=1}^p g_j(\mathbf{x}^{FS}) &\rightarrow \max, \\ \sum_{j=1}^p x_j^{FS} &\leq K^{FS}, \quad \mathbf{x}^{FS} \geq \mathbf{d} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

Рассмотрим игру, моделирующую ситуацию двухгодичного инвестирования (капиталы 700, 700 и 600 д.е. в иностранной валюте) с тремя проектами:

- двухлетний срочный вклад (сумма вклада не меньше 1000 д.е., ставка по вкладу 2 %);
- срочный вклад на первый период (сумма вклада не меньше 500 д.е., ставка по вкладу 0,8 % годовых);
- реинвестирование всех денег, полученных на первом этапе (ставка 0,8 % годовых).

Имеем $N=\{1,2,3\}$, $P=\{P_1, P_2, P_3\}$, $\mathbf{d}=(1000, 500, 500)$,
 $K^{\{1\}} = K^{\{2\}} = 700$, $K^{\{3\}} = 600$, $K^{\{1,2\}} = 1400$,
 $K^{\{1,3\}} = K^{\{2,3\}} = 1300$, $K^{\{1,2,3\}} = 2000$,
 $g_1(\mathbf{x}^{\text{FS}}) = 1,02 \cdot x_1^S$, $g_2(\mathbf{x}^{\text{FS}}) = 1,008 \cdot x_2^S$,
 $g_3(\mathbf{x}^{\text{FS}}) = 0,008 \cdot g_2(\mathbf{x}^{\text{FS}}) \cdot x_3^S$.

В инвестиционных планах $\mathbf{x}^S = (x_1^S, x_2^S, x_3^S)$ переменная $x_3^S \in \{0,1\}$ имеет отличную от $x_1^S, x_2^S \in R_+$ интерпретацию ($x_3^S = 1$ при реинвестировании и $x_3^S = 0$ в противном случае). Из определения $u(\mathbf{FS})$ следует, что $u(\mathbf{FS}^1) > u(\mathbf{FS}^2)$, если $K^{\text{FS}^1} > K^{\text{FS}^2}$.

Поэтому $\max\{u(\mathbf{FS}) \mid \text{supp} \mathbf{FS} = K \in \Omega\} = u(\mathbf{e}^K)$ для всех $\mathbf{FS} \in [0,1]^n$. Предположим, что первый и второй инвесторы не желают сотрудничать друг с другом, т.е. $F\mathfrak{Z} = \{K \in \Omega \mid K \supseteq \{1,2\}\}$. Для $K \notin F\mathfrak{Z}$ получаем

$$u(\mathbf{e}^K) = \begin{cases} 711,2448, & (K = \{1\}) \vee (K = \{2\}), \\ 609,6384, & K = \{3\}, \\ 1326, & (K = \{1,3\}) \vee (K = \{2,3\}). \end{cases}$$

В игре $(N, u^{F\mathfrak{Z}}, FC)$ без запретов:

$$\begin{aligned} u^{F\mathfrak{Z}}(\mathbf{e}^K) &= u(\mathbf{e}^K) \text{ для } K \notin F\mathfrak{Z}, \\ u^{F\mathfrak{Z}}(\mathbf{e}^N) &= \max\{u^{F\mathfrak{Z}}(\mathbf{e}^{\{1\}}) + u^{F\mathfrak{Z}}(\mathbf{e}^{\{2\}}) + u^{F\mathfrak{Z}}(\mathbf{e}^{\{3\}}), \\ &u^{F\mathfrak{Z}}(\mathbf{e}^{\{1,3\}}) + u^{F\mathfrak{Z}}(\mathbf{e}^{\{2\}})\} = 2037,2448, \\ u^{F\mathfrak{Z}}(\mathbf{e}^{\{1,2\}}) &= u^{F\mathfrak{Z}}(\mathbf{e}^{\{1\}}) + u^{F\mathfrak{Z}}(\mathbf{e}^{\{2\}}) = 1422,4896. \end{aligned}$$

Следовательно, $\max_{FC \in C^F} u^{F\mathfrak{Z}}(FC) = u^{F\mathfrak{Z}}(\mathbf{e}^N)$.

Нечеткая структура $\overline{FC} = \{\overline{FC}^1, \overline{FC}^2\} = \{\{1, 0, 0,5\}, \{0, 1, 0,5\}\} \in F \setminus C^F$ не содержит компонент с запрещенными носителями, $K^{\overline{FC}^1} = K^{\overline{FC}^2} = 1000$ и, согласно (8), $u(\overline{FC}^1) = u(\overline{FC}^2) = 1200$. Значит, $u^{F\mathfrak{Z}}(\overline{FC}) = u(\overline{FC}) = u(\overline{FC}^1) + u(\overline{FC}^2) = 2400$. Получили, что $\max_{FC \in C^F} u^{F\mathfrak{Z}}(FC) < u^{F\mathfrak{Z}}(\overline{FC})$.

Литература

1. Aubin J.P. Cooperative fuzzy games // *Mathematics of Operations Research*. 1981. № 6. P. 1–13.
2. Mares M., Vlach M. Fuzzy coalitional structures (alternatives) // *Mathware & Soft Computing*. 2006. Vol. 13. P. 59–70.

3. Meng F.Y., Zhang Q., Cheng H. The Owen value for fuzzy games with a coalition structure // *International J. of Fuzzy Systems*. 2012. Vol. 14, № 1. P. 22–34.

4. Meng F.Y., Zhang Q. The Shapley value on a kind of cooperative fuzzy games // *J. of Computational Information Systems*. 2011. Vol. 7, № 6. P. 1846–1854.

5. Meng F.Y., Zhang Q. The Symmetric Banzhaf Value for Fuzzy Games with a Coalition Structure // *International Journal of Automation and Computing*. 2012. Vol. 9, № 6. P. 600–608.

6. Billot A. *Economic theory of fuzzy equilibria: an axiomatic analysis*. Springer, 2013. 166 p.

7. Myerson R. Graphs and cooperation in games // *Mathematics of Operations Research*. 1977. № 2. P. 225–229.

8. Мулен Э. Кооперативное принятие решений: аксиомы и модели. М.: Мир, 1991. 464 с.

9. Fukuda E., Ishihara S. Muto S. Tijs S.H., Branzei R. Cooperative fuzzy games arising from economic situations // *Fuzzy economic review: the review of the International Association for Fuzzy-Set Management and Economy*. 2005. Vol. 10, № 1. P. 3–15.

References

1. Aubin J.P. Cooperative fuzzy games. *Mathematics of Operations Research*. 1981, No. 6, pp. 1-13.

2. Mares M., Vlach M. Fuzzy coalitional structures (alternatives). *Mathware & Soft Computing*. 2006, vol. 13, pp. 59-70.

3. Meng F.Y., Zhang Q., Cheng H. The Owen value for fuzzy games with a coalition structure. *International J. of Fuzzy Systems*. 2012, vol. 14, No. 1, pp. 22-34.

4. Meng F.Y., Zhang Q. The Shapley value on a kind of cooperative fuzzy games. *J. of Computational Information Systems*. 2011, vol. 7, No. 6, pp. 1846-1854.

5. Meng F.Y., Zhang Q. The Symmetric Banzhaf Value for Fuzzy Games with a Coalition Structure. *International Journal of Automation and Computing*. 2012, vol. 9, No. 6, pp. 600-608.

6. Billot A. *Economic theory of fuzzy equilibria: an axiomatic analysis*. Springer, 2013, 166 p.

7. Myerson R. Graphs and cooperation in games. *Mathematics of Operations Research*. 1977, No. 2, pp. 225-229.

8. Mulen E. *Kooperativnoe prinyatie reshenii: aksiomy i modeli* [Co-operative decision-making: axioms and models]. Moscow: Mir, 1991, 464 p.

9. Fukuda E., Ishihara S. Muto S. Tijs S.H., Branzei R. Cooperative fuzzy games arising from economic situations. *Fuzzy economic review: the review of the International Association for Fuzzy-Set Management and Economy*. 2005, vol. 10, No. 1, pp. 3-15.

УДК 519.87:66.096.5

DOI 10.23683/0321-3005-2017-4-1-18-23

ТЕСТИРОВАНИЕ МОДЕЛИ ВИБРОКИПЯЩЕГО СЛОЯ, ИСПОЛЬЗУЮЩЕЙ МЕТОД ДИСКРЕТНОГО ЭЛЕМЕНТА*

© 2017 г. **Е.С. Каменецкий¹, Н.С. Орлова^{1,2}, М.В. Волик^{1,2}, Д.Г. Минасян¹**

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

²Финансовый университет при Правительстве РФ, Владикавказ, Россия

TESTING OF THE VIBRATED FLUIDIZED LAYER MODEL USING THE DISCRETE ELEMENT METHOD

E.S. Kamenetsky¹, N.S. Orlova^{1,2}, M.V. Volik^{1,2}, D.G. Minasyan¹

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

²Financial University under the Government of Russian Federation, Vladikavkaz, Russia

Каменецкий Евгений Самойлович – доктор физико-математических наук, доцент, главный научный сотрудник, Южный математический институт – филиал Владикавказского научного центра РАН, ул. Маркуса, 22, г. Владикавказ, РСО-Алания, 362027, Россия, e-mail: esk@smath.ru

Evgeny S. Kamenetsky - Doctor of Physics and Mathematics, Associate Professor, Southern Mathematical Institute - Branch of the Vladikavkaz Scientific Center, Russian Academy of Sciences, Marcusa St., 22, Vladikavkaz, Republic of North Ossetia - Alania, 362027, Russia, e-mail: esk@smath.ru

Орлова Наталья Сергеевна – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Южный математический институт – филиал Владикавказского научного центра РАН, ул. Маркуса, 22, г. Владикавказ, РСО-Алания, 362027, Россия; старший преподаватель, кафедра математики и информатики, Владикавказский филиал Финансового университета при Правительстве РФ, ул. Молодежная, 7, г. Владикавказ, РСО-Алания, 362001, Россия, e-mail: norlova.umi.vnc@gmail.com

Natalya S. Orlova - Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher, Southern Mathematical Institute - Branch of the Vladikavkaz Scientific Center, Russian Academy of Sciences, Marcusa St., 22, Vladikavkaz, Republic of North Ossetia - Alania, 362027, Russia; Senior Lecturer, Department of Mathematics and Informatics, Vladikavkaz Branch, Financial University under the Government of Russian Federation, Molodezhnaya St., 7, Vladikavkaz, Republic of North Ossetia - Alania, 362027, Russia, e-mail: norlova.umi.vnc@gmail.com

Волик Мария Владимировна – научный сотрудник, Южный математический институт – филиал Владикавказского научного центра РАН, ул. Маркуса, 22, г. Владикавказ, РСО-Алания, 362027, Россия; старший преподаватель, кафедра математики и информатики, Владикавказский филиал Финансового университета при Правительстве РФ, ул. Молодежная, 7, г. Владикавказ, РСО-Алания, 362001, Россия, e-mail: volikmv@mail.ru

Maria V. Volik - Researcher, Southern Mathematical Institute - Branch of the Vladikavkaz Scientific Center, Russian Academy of Sciences, Marcusa St., 22, Vladikavkaz, Republic of North Ossetia - Alania, 362027, Russia; Senior Lecturer, Department of Mathematics and Informatics, Vladikavkaz Branch, Financial University under the Government of Russian Federation, Molodezhnaya St., 7, Vladikavkaz, Republic of North Ossetia - Alania, 362027, Russia, e-mail: volikmv@mail.ru

Минасян Давид Григорьевич – научный сотрудник, Южный математический институт – филиал Владикавказского научного центра РАН, ул. Маркуса, 22, г. Владикавказ, РСО-Алания, 362027, Россия, e-mail: davidmd@yandex.ru

David G. Minasyan - Researcher, Southern Mathematical Institute - Branch of the Vladikavkaz Scientific Center, Russian Academy of Sciences, Marcusa St., 22, Vladikavkaz, Republic of North Ossetia - Alania, 362027, Russia, e-mail: davidmd@yandex.ru

Исследовалась модель виброкипящего слоя, в которой используется метод дискретного элемента. Рассматривался тонкий слой частиц силикагеля (монослой), средний диаметр которых равен 4 мкм. Проведены численные расчеты среднего по времени распределения объемной доли частиц в слое в процессе виброкипания при разных значениях амплитуды и частоты колебаний. Для проведения вычислений использовался свободный открытый программный код LIGGGHTS, в котором реализован метод дискретного элемента. Представлены результаты сравнения численных расчетов с экспериментальными данными. В нижней и верхней части слоя по результатам расчетов значения объемной доли частиц занижены по сравнению с экспериментальными данными, в средней части слоя – завышены. В верхней части слоя наблюдаются единичные частицы. Во всех случаях площадь области, ограниченной расчетной

* Работа выполнена в рамках программы фундаментальных исследований по стратегическим направлениям развития науки Президиума РАН I.33П «Фундаментальные проблемы математического моделирования. Фундаментальные проблемы факторизационных методов в различных областях. Алгоритмы и математическое обеспечение для вычислительных систем сверхвысокой производительности».

кривой, примерно совпадает с площадью области, ограниченной экспериментальной кривой, что свидетельствует о качественном совпадении результатов. Проведено сравнение результатов расчетов среднего значения высоты виброкипящего слоя с экспериментальными данными. Получено удовлетворительное совпадение результатов расчетов с экспериментальными данными.

Ключевые слова: виброкипящий слой, континуальный подход, метод дискретного элемента, численные расчеты, LIGGGHTS, сравнение с экспериментальными данными.

A model of the vibrated fluidized layer was investigated, in which the discrete element method is used. A thin layer of silica gel particles (a monolayer) was considered. The average particle diameter is 4 mm. Numerical calculations of the time-average distribution of the volume fraction of particles in the layer during the vibrated fluidization are performed. The results were obtained at different values of amplitude and frequency of vibrations. The free open source code LIGGGHTS was used for the calculations, in which the discrete element method was implemented. The results of comparison of numerical calculations with experimental data are presented. The values of the particle volume fraction in the lower and upper parts of the layer are underestimated in comparison with the experimental data, and in the middle part of the layer they are overestimated. Single particles are observed in the upper part of the layer. In all cases, the area of the region bounded by the calculated curve roughly coincides with the area of the region bounded by the experimental curve. It indicates a qualitative coincidence of the results. The results of calculations of the average value of the height of the vibrated fluidized layer with experimental data were compared. A satisfactory agreement between the results of the calculations and the experimental data was obtained.

Keywords: vibrated fluidized layer, continuum approach, discrete element method, numerical calculations, LIGGGHTS, comparison with experimental data.

Существуют два основных подхода к моделированию процесса виброкипания: континуальный и дискретный. Для описания виброкипания тонких слоев (монослоев, т.е. слоев с толщиной засыпки, высота которых лежит в диапазоне между характерным размером частицы и ее полуторным значением) целесообразно использовать дискретный подход. Движение частиц описывается как детерминированное движение их достаточно представительного дискретного набора. В вычислительном отношении такой подход является достаточно трудоемким, так как для имитации движения слоя частиц требуется проведение большого числа расчетов движения отдельных частиц, поэтому модели, основанные на этом подходе, в отличие от остальных, требуют мощных вычислительных ресурсов [1].

Дискретный подход непосредственным образом связан с реальными движениями отдельных частиц, поэтому его можно считать физически более естественным, чем континуальный. При использовании континуального подхода, при котором движение слоя рассматривается как движение двух взаимодействующих континуумов, связанных с газом и частицами, необходимо учитывать отношение размера ячейки к размеру (диаметру) частиц, поэтому моделирование монослоев в рамках континуального подхода представляется практически невыполнимой задачей. Более подробное описание моделей на основе континуального подхода представлено в работах [2–4].

Если сравнивать два подхода (континуальный и дискретный), то следует отметить, что континуальный подход больше подходит для моделирования

динамики относительно тонких виброкипящих слоев (но не монослоев, так как необходимо учитывать отношение размера ячейки к размеру частиц), дискретный подход больше подходит для моделирования динамики тонких слоев и монослоев, так как требует мощных вычислительных ресурсов. Моделирование более толстых слоев с использованием дискретного метода возможно в случае наличия суперкомпьютеров и больших объемов внешней памяти.

Метод дискретного описания движения каждой отдельной частицы с учетом ее взаимодействия с соседними частицами получил название метода дискретного элемента (МДЭ) (discrete element method) [5]. В основе МДЭ – баланс механического движения частицы [6, 7]:

$$\begin{cases} m_i \frac{d\mathbf{V}_i}{dt} = m_i \mathbf{b} + \sum_{j=1}^k \mathbf{F}_{ij}; \\ I_i \frac{d\boldsymbol{\omega}_i}{dt} = \sum_{j=1}^k (\mathbf{T}_{ij} + \mathbf{M}_{ij}), \end{cases} \quad (1)$$

где m_i – масса частицы; i – индекс частицы, относительно которой рассматривается система уравнений (1); \mathbf{V}_i – вектор линейной скорости центра масс; I_i – момент инерции; $\boldsymbol{\omega}_i$ – вектор угловой скорости; \mathbf{b} – вектор массовой силы; \mathbf{F}_{ij} – внешняя сила, действующая на частицу i через контакт с частицей j ; j – индекс частицы, находящейся в контакте с частицей i ; k – число частиц в контакте с частицей i ; \mathbf{T}_{ij} – внешний крутящий момент, связанный с контактным взаимодействием частиц i и j ; \mathbf{M}_{ij} – момент сопротивления качению.

В МДЭ применяется допущение, что каждая частица представляет собой сферу радиусом R_i . Схематически взаимодействие между частицами i и j представлено на рис. 1 (где $\mathbf{V}_i, \mathbf{V}_j$ – векторы скорости центров масс частиц; $\boldsymbol{\omega}_i, \boldsymbol{\omega}_j$ – векторы угловой скорости; $\mathbf{r}_i, \mathbf{r}_j$ – радиус-векторы; \mathbf{n} – вектор нормали вдоль линии, соединяющей центры частиц i и j).

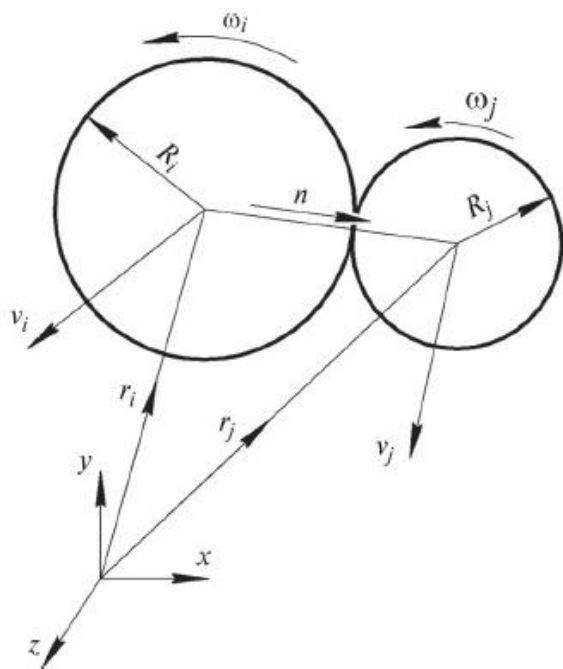


Рис. 1. Две контактирующие сферические частицы i и j
 / Fig. 1. Two contacting spherical particles i and j

Для описания контактного взаимодействия между частицами в МДЭ применяются различные постановки. Наиболее часто используется модель Герца – Миндлина [8], в которой предполагается, что частицы при контакте не деформируются, а перекрывают друг друга на величину ξ , образуя пятно контакта. Суммарная сила взаимодействия между двумя частицами состоит из нормальной и тангенциальной составляющих $\mathbf{F}_{n'ij}, \mathbf{F}_{t'ij}$ [5–9]:

$$\mathbf{F}_{n'ij} = k_n \xi_n \mathbf{n} - \gamma_n \mathbf{V}_n, \quad (2)$$

$$\mathbf{F}_{t'ij} = -\min \{k_t \xi_t \mathbf{t} - \gamma_t \mathbf{V}_t; \mu_s \mathbf{F}_n\}, \quad (3)$$

где $k_n = (4/3)E^* \sqrt{R^* \xi_n}$ – коэффициент упругости при контактном взаимодействии; $\frac{1}{E^*} = \frac{1 - \nu_i^2}{E_i} + \frac{1 - \nu_j^2}{E_j}$ – эффективный модуль упругости; E_i, E_j – модуль упругости при одноосном растяжении/сжатии; ν_i, ν_j – коэффициент Пуассона; $1/R^* = 1/R_i + 1/R_j$ – приведенный радиус частиц;

$\xi_n = R_i + R_j - \langle \mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i, \mathbf{n} \rangle$ – относительное нормальное перекрытие частиц при контактном взаимодействии; $\gamma_n = -2\sqrt{5/3}\beta\sqrt{E^* m^*} \sqrt{4R^* \xi_n} \geq 0$ – коэффициент демпфирования в нормальном направлении к контакту; $\beta = \ln e_{ij} / \sqrt{\ln^2 e_{ij} + \pi^2}$ – безразмерный коэффициент демпфирования; e_{ij} – коэффициент восстановления между материалами частиц i и j ; $1/m^* = 1/m_i + 1/m_j$ – соотношение для нахождения приведенной массы; $\mathbf{V}_{ij} = \mathbf{V}_i - \mathbf{V}_j + (R_i \boldsymbol{\omega}_i + R_j \boldsymbol{\omega}_j) \times \mathbf{n}$ – относительная скорость в точке контакта частиц; $\mathbf{V}_n = \langle \mathbf{V}_{ij}, \mathbf{n} \rangle \mathbf{n}$ – нормальная составляющая \mathbf{V}_n ; $\mathbf{V}_t = (\mathbf{n} \times \mathbf{V}_{ij}) \times \mathbf{n}$ – тангенциальная составляющая \mathbf{V}_{ij} ; μ_s – коэффициент трения скольжения; $\xi_t = \int_{t_0}^t |(\mathbf{n} \times \mathbf{V}_{ij}) \times \mathbf{n}| dt$ – относительное тангенциальное перекрытие частиц, которое началось в момент времени t_0 и длится до данного момента времени t ; $\mathbf{t} = \mathbf{V}_t / |\mathbf{V}_t|$ – единичный тангенциальный вектор; $k_t = 8G^* \sqrt{R^* \xi_n}$ – коэффициент сдвига при контактном взаимодействии;

$$\frac{1}{G^*} = \frac{2(2 + \nu_i)(1 - \nu_i)}{E_i} + \frac{2(2 + \nu_j)(1 - \nu_j)}{E_j} \text{ – эффективный}$$

модуль сдвига; $\gamma_t = -4\sqrt{5/3}\beta\sqrt{G^* m^*} \sqrt{4R^* \xi_n} \geq 0$ – коэффициент демпфирования в тангенциальном направлении к контакту.

Крутящий момент, действующий на частицу, создается тангенциальной силой $\mathbf{F}_{t'ij}$ и определяется выражением

$$\mathbf{T}_{ij} = (R_i \mathbf{n}) \times \mathbf{F}_{t'ij}. \quad (4)$$

При относительном движении частиц также возникает момент сопротивления качению \mathbf{M}_{ij} [9]

$$\mathbf{M}_{ij} = -\mu_r k_n \xi_n R^* \frac{\boldsymbol{\omega}_i}{|\boldsymbol{\omega}_i|}, \quad (5)$$

где μ_r – коэффициент трения качения.

В качестве начальных условий примем координаты всех частиц системы и их начальные скорости, а в качестве граничных условий – взаимодействие с границами расчетной области.

Рассчитывая силы взаимодействия (2)–(5) и интегрируя по времени систему уравнений (1), находим скорости и перемещения каждой частицы системы [6].

Для проведения вычислений по виброкипению монослоев использовался свободный открытый программный код LIGGGHTS [10], в котором реализован МДЭ.

Рассматривалось виброкипение частиц силикагеля, средний диаметр которых равен 4 мкм. Толщина слоя – 6 мм. Результаты численных расчетов получены при амплитуде колебаний $A=1,5$ мм, частоте $f=24$ и 28 Гц, а также при $A=2$ мм и $f=36$ Гц. Полученные результаты расчетов сравнивались с экспериментальными данными, полученными в работе [11]. Следует отметить, что в качестве значения коэффициента восстановления в случае столкновения частиц друг с другом использовалось значение 0,15, полученное по результатам экспериментов.

При проведении параллельных вычислений на четырехядерном процессоре с частотой 3,1 ГГц время расчета одного варианта составляло примерно 10 ч.

Для обработки полученных численных расчетов применялась методика из работы [11] для обработки экспериментальных данных. Использовались кадры видеосъемки экспериментов; выделялся участок слоя шириной 20 мм, который разбивался на несколько одинаковых зон по высоте. В каждой зоне подсчитывалось число частиц у передней стенки. Количество частиц, пересекающих границы зон, уменьшалось вдвое. Форма частиц принималась шарообразной. По определенному среднему диаметру частиц рассчитывались объем материала и значения объемной доли частиц (α_s). Расчеты проведены в разные моменты времени (когда слой частиц начинает отрываться от полки; когда слой полностью отрывается от полки и высота слоя максимальна; когда слой частиц сталкивается с полкой и уплотняется). По результатам вычислений построены средние по времени графики изменения α_s по высоте слоя [11].

На рис. 2 представлено сравнение результатов численных расчетов среднего по времени распределения объемной доли частиц с экспериментальными данными.

Из рис. 2 видно, что средние по времени кривые распределения объемной доли частиц, полученные в результате расчетов, удовлетворительно описывают экспериментальные данные. В нижней и верхней части слоя по результатам расчетов значения объемной доли частиц занижены по сравнению с экспериментальными данными; в средней части слоя – завышены. В самой верхней части слоя наблюдаются единичные частицы (в этих зонах значение объемной доли частиц не превышает 0,1).

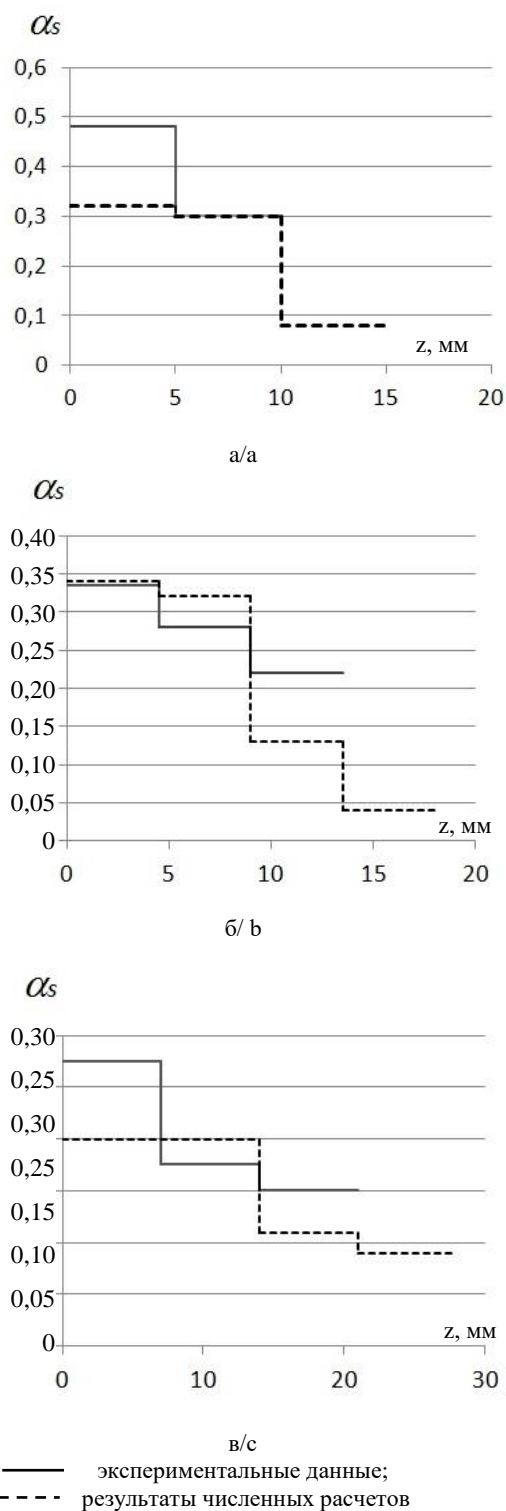


Рис. 2. Распределение объемной доли частиц по высоте: а – $A = 1,5$ мм, $f = 24$ Гц; б – $A = 1,5$ мм и $f = 28$ Гц; в – $A = 2$ мм и $f = 36$ Гц / Fig. 2. The distribution of volume fraction in height: a - $A = 1.5$ mm, $F = 24$ Hz; б - $A = 1.5$ mm and $F = 28$ Hz; в - $A = 2$ mm and $f = 36$ Hz

Во всех случаях площадь области, ограниченной расчетной кривой, примерно совпадает с площадью области, ограниченной экспериментальной кривой, что свидетельствует о качественном совпадении результатов.

Кроме того, было проведено сравнение результатов расчетов среднего значения высоты виброкипящего слоя с экспериментальными данными. Расчет высоты слоя проводился в разные моменты времени, затем выводилось среднее значение высоты. На рис. 3 представлены результаты сравнения при разных значениях частоты колебаний. В данном случае z^* – приведенная высота ($z^* = \frac{z}{A}$).

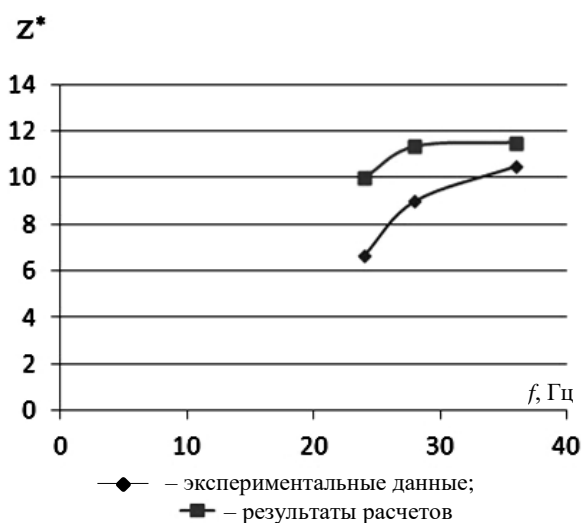


Рис. 3. Средняя высота виброкипящего слоя
 / Fig. 3. The average height of the vibrated fluidized layer

Из рис. 3 видно, что с увеличением частоты колебаний расхождение расчетных данных с экспериментальными уменьшается. Следует отметить, что при виброкипании монослоя, так же как и при виброкипании более толстых слоев, наблюдаются волнообразная поверхность и отдельные всплески над поверхностью слоя.

Как отмечалось ранее, дискретный подход и, в частности, метод дискретного элемента являются достаточно ресурсоемкими, т.е. требуют, во-первых, мощных вычислительных ресурсов; во-вторых, больших объемов оперативной и внешней памяти для хранения и обработки полученных результатов. Поэтому в настоящей работе представлены результаты только по виброкипению монослоя, так как с увеличением количества частиц в слое увеличивается время, затрачиваемое на выполнение расчетов. В дальнейшем планируется

проведение вычислительных экспериментов по виброкипению более толстых слоев.

Таким образом, использование дискретного подхода (в частности, метода дискретного элемента) позволяет получить результаты моделирования виброкипящего монослоя, которые хорошо согласуются с экспериментальными данными.

Литература

1. Орлова Н.С. Разработка и исследование математических моделей виброкипящего слоя. Deutschland, Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2013. 173 с.
2. Орлова Н.С. Сравнение расчетов по двухжидкостной модели виброоживленного слоя с экспериментальными данными // Инженерно-физ. журн. 2012. Т. 85, № 6. С. 1202–1207.
3. Орлова Н.С. Сравнение результатов экспериментального исследования виброкипящего слоя с расчетами по гидродинамической модели гранулярного газа // Инженерно-физ. журн. 2014. Т. 87, № 2. С. 429–435.
4. Каменецкий Е.С., Орлова Н.С., Тагиров А.М., Волик М.В. Трехмерное моделирование виброкипящего слоя с использованием двухжидкостной модели гранулярного газа // Инжен.-физ. журн. 2016. Т. 89, № 6. С. 1480–1486.
5. Pöschel T. Computational Granular dynamics models and algorithms. Berlin; Heidelberg; New York: Springer, 2005. 322 p.
6. K. Kesava Rao., Prabhu R. Nott. An Introduction to Granular Flow. New York: Cambridge University Press, 2008. 512 p.
7. Карвацкий А.Я., Лазарев Т.В. Оценка метода дискретного элемента для прогнозирования поведения сыпучих сред на примере нефтяного кокса // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2014. № 3. С. 32–36.
8. Makse H.A., Gland N., Johnson D.L., Schwartz L. Granular packings: Nonlinear elasticity, sound propagation, and collective relaxation dynamics // Phys. Rev. E. 2004. Vol. 70. P. 061302.
9. Jun Ai, Jian-Fei Chen, Rotter J.M., Jin Y.O. Assessment of rolling resistance models in discrete element simulations // Powder Technology. 2011. Vol. 206 (3). P. 269–282.
10. LIGGGHTS Open Source Discrete Element Method Particle Simulation Code. URL: <http://www.liggghts.com> (дата обращения: 11.04.2016).
11. Свердлик Г.И., Рево А.А., Каменецкий Е.С., Орлова Н.С. Сравнение результатов экспериментов и математического моделирования виброоживленного слоя // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Техн. науки. 2011. № 1. С. 24–27.

References

1. Orlova N.S. Razrabotka i issledovanie matematicheskikh modelei vibrokipyashchego sloya [Development and research of mathematical models of the vibrated fluidized layer]. Deutschland, Saarbrucken: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2013, 173 p.
2. Orlova N.S. Sravnenie raschetov po dvukhzhidkostnoi modeli vibroozhizhennogo sloya s eksperimental'nymi dannymi [Comparison of calculations for a two-fluid model of a vibrating fluid layer with experimental data]. *Inzhen.-fiz. zhurn.* 2012, vol. 85, No. 6, pp. 1305-1310.
3. Orlova N.S. Sravnenie rezul'tatov eksperimental'nogo issledovaniya vibrokipyashchego sloya s raschetami po gidrodinamicheskoi modeli granulyarnogo gaza [Comparison of the results of an experimental study of the vibro-boiling layer with calculations based on the hydrodynamic model of a granular gas]. *Inzhen.-fiz. zhurn.* 2014, vol. 87, No. 2, pp. 443-449.
4. Kamenetskii E.S., Orlova N.S., Tagirov A.M., Volik M.V. Trekhmernoe modelirovanie vibrokipyashchego sloya s ispol'zovaniem dvukhzhidkostnoi modeli granulyarnogo gaza [Three-dimensional modeling of the vibro-boiling layer using the two-fluid model of granular gas]. *Inzhen.-fiz. zhurn.* 2016, vol. 89, No. 6, pp. 1459-1465.
5. Pöschel T. *Computational Granular dynamics models and algorithms*. Berlin; Heidelberg; New York, Springer, 2005, 322 p.
6. K. Kesava Rao., Prabhu R. Nott. *An Introduction to Granular Flow*. New York, Cambridge University Press, 2008, 512 p.
7. Karvatskii A.Ya., Lazarev T.V. Otsenka metoda diskretnogo elementa dlya prognozirovaniya povedeniya sypuchikh sred na primere neftyanogo koksa [Estimation of discrete element method for forecasting the behavior of loose media on the example of petroleum coke]. *Khimicheskoe i neftegazovoe mashinostroenie*. 2014, No. 3, pp. 32-36.
8. Makse H.A., Gland N., Johnson D.L., Schwartz L. Granular packings: Nonlinear elasticity, sound propagation, and collective relaxation dynamics. *Phys. Rev. E*. 2004, vol. 70, p. 061302.
9. Jun Ai, Jian-Fei Chen, Rotter J.M., Jin Y.O. Assessment of rolling resistance models in discrete element simulations. *Powder Technology*. 2011, vol. 206 (3), pp. 269-282.
10. *LIGGGHTS Open Source Discrete Element Method Particle Simulation Code*. Available at: <http://www.liggghts.com> (accessed 11.04.2016).
11. Sverdlik G.I., Revo A.A., Kamenetskii E.S., Orlova N.S. Sravnenie rezul'tatov eksperimentov i matematicheskogo modelirovaniya vibroozhizhennogo sloya [Comparison of experimental results and mathematical modeling of the vibrated fluidized layer]. *Izv. vuzov. Sev.-Kavk. region. Tekhn. nauki*. 2011, No. 1, pp. 24-27.

УДК 532.517

DOI 10.23683/0321-3005-2017-4-1-24-30

ОБ УСТОЙЧИВОСТИ ПРАВИЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ВИХРЕВЫХ ЗАРЯДОВ ВНЕ КРУГОВОЙ ОБЛАСТИ*

© 2017 г. Л.Г. Куракин^{1,2}, А.П. Мелехов¹, И.В. Островская¹

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

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

ON THE STABILITY OF A REGULAR SYSTEM OF THE VORTEX CHARGES OUT-SIDE A CIRCULAR DOMAIN

L.G. Kurakin^{1,2}, A.P. Melekhov¹, I.V. Ostrovskaya¹

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

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

Куракин Леонид Геннадиевич – доктор физико-математических наук, доцент, профессор, кафедра вычислительной математики и математической физики, Институт математики, механики и компьютерных наук им. И.И. Воровича, Южный федеральный университет, ул. Мильчакова, 8а, г. Ростов-на-Дону, 344090, Россия; главный научный сотрудник, Южный математический институт – филиал Владикавказского научного центра РАН, ул. Маркуса, 22, г. Владикавказ, РСО-Алания, 362027, Россия, e-mail: kurakin@math.sfedu.ru

Leonid G. Kurakin - Doctor of Physics and Mathematics, Associate Professor, Professor, Department of Computational Mathematics and Mathematical Physics, Vorovich Institute of Mathematics, Mechanics and Computer Sciences, Southern Federal University, Milchakova St., 8a, Rostov-on-Don, 344090, Russia; Main Researcher, Southern Mathematical Institute - Branch of the Vladikavkaz Scientific Center, Russian Academy of Sciences, Marcusa St., 22, Vladikavkaz, Republic of North Ossetia - Alania, 362027, Russia, e-mail: kurakin@math.sfedu.ru

Мелехов Андрей Петрович – кандидат физико-математических наук, старший преподаватель, кафедра вычислительной математики и математической физики, Институт математики, механики и компьютерных наук им. И.И. Воровича, Южный федеральный университет, ул. Мильчакова, 8а, г. Ростов-на-Дону, 344090, Россия, e-mail: melekhov@math.sfedu.ru

Andrew P. Melekhov - Candidate of Physics and Mathematics, Senior Lecturer, Department of Computational Mathematics and Mathematical Physics, Vorovich Institute of Mathematics, Mechanics and Computer Sciences, Southern Federal University, Milchakova St., 8a, Rostov-on-Don, 344090, Russia, e-mail: melekhov@math.sfedu.ru

Островская Ирина Владимировна – кандидат физико-математических наук, старший преподаватель, кафедра вычислительной математики и математической физики, Институт математики, механики и компьютерных наук им. И.И. Воровича, Южный федеральный университет, ул. Мильчакова, 8а, г. Ростов-на-Дону, 344090, Россия, e-mail: ostrov@math.sfedu.ru

Irina V. Ostrovskaya - Candidate of Physics and Mathematics, Senior Lecturer, Department of Computational Mathematics and Mathematical Physics, Vorovich Institute of Mathematics, Mechanics and Computer Sciences, Southern Federal University, Milchakova St., 8a, Rostov-on-Don, 344090, Russia, e-mail: ostrov@math.sfedu.ru

Рассматривается задача устойчивости системы точечных вихревых зарядов, расположенных в вершинах правильного N -угольника ($N=2, \dots, 8$) вне круговой области. Потенциал взаимодействия между зарядами обратно пропорционален расстоянию между ними. Аналитически исследованы квадратичная часть гамильтониана и собственные значения матрицы линеаризации. Получены условия устойчивости по Раусу и экспоненциальной неустойчивости. Указаны области параметров, требующие дополнительного нелинейного анализа. Обнаружен эффект стабилизации стационарного вращения системы вихревых зарядов границей области для $N=6, 7, 8$. Перечислены и исследованы численно все резонансы до четвертого порядка включительно, возникающие в этой задаче. Численно обнаружена неустойчивость в двух точках, соответствующих двукратному нулевому собственному значению матрицы линеаризации при $N=3$. Результаты теоретического анализа подтверждаются численным расчетом траекторий точечных вихрей.

Ключевые слова: точечный вихрь, стационарное вращение, гамильтоновы системы, устойчивость по Раусу, резонанс.

* Работа выполнена в рамках базовой части государственного задания Министерства образования и науки РФ (№ 1.5169.2017/8.9).

The stability problem of a system of point vortex charges is considered. The charges are located in the vertices of a regular N -gon ($N=2, \dots, 8$) outside a circular area. The interaction potential between the charges is inversely proportional to the distance between them. The quadratic terms of the Hamiltonian and the eigenvalues of the linearization matrix are studied analytically. The conditions of Routh stability and exponential instability are obtained. The range of parameters that require additional non-linear analysis is indicated. The effects of stabilization of a stationary rotation of the vortex charges system by the boundary of the region is found for $N=6, 7, 8$. All the resonances arising in this problem up to fourth order has been listed and investigated numerically. Instability is found numerically in two points that correspond double zero eigenvalues of linearization matrix (diagonal case) for $N=3$. The results of the theoretical analysis are confirmed by numerical calculation of the trajectories of point vortices.

Keywords: point vortices, stationary rotation, Hamiltonian systems, Routh stability, resonance.

Уравнения движения

Рассматривается модель движения системы N точечных вихревых зарядов на плоскости вне круговой области радиусом R

$$\gamma_k \dot{z}_k = 2i \frac{\partial H}{\partial z_k}, \quad \gamma_k \dot{\bar{z}}_k = -2i \frac{\partial H}{\partial \bar{z}_k}, \quad k = 1, \dots, N, \quad (1)$$

с гамильтонианом

$$H = \frac{1}{4\pi} \sum_{1 \leq j < k \leq N} \frac{\gamma_j \gamma_k}{|z_k - z_j|} - \frac{1}{8\pi} \sum_{j,k=1}^N \left(\frac{\gamma_j \gamma_k}{|z_k - \hat{z}_j|} - \frac{\gamma_j \gamma_k}{|z_k|} \right). \quad (2)$$

Здесь $z_k = x_k + iy_k$ – комплексные переменные, $k = 1, \dots, N$; x_k, y_k – декартовы координаты k -го заряда; γ_k – его интенсивность; $\hat{z}_k = \frac{R^2}{z_k}$ – отражение k -го заряда границей круга.

Сила взаимодействия между j -м и k -м вихревыми зарядами потенциальна с потенциалом $1/r_{jk}$, где r_{jk} – расстояние между этими зарядами. Влияние границы учтено с помощью метода отражений. Предполагается бесциркулянтное обтекание границы.

Потенциал $1/r_{jk}$ ранее встречался, например, в работах [1–3], в которых рассматривались вихревые заряды в трехмерном пространстве. Дж.Дж. Томсон [1] вихревые заряды называл корпускулами. В работе [3] исследовалась устойчивость относительного равновесия трех вихревых зарядов с нулевой суммарной интенсивностью.

Задача об устойчивости стационарного вращения N -угольника из вихревых зарядов внутри круговой области ранее была исследована в работах [4, 5].

Система (1), (2) имеет два интеграла: энергию H и суммарный момент инерции $M = \sum_{k=1}^N \gamma_k |z_k|^2$.

Эта система инвариантна относительно группы G , образующие которой суть зеркальное отражение $j: z \mapsto \bar{z}$ и вращение $g^{rot}: z \mapsto e^{i\alpha} z$, $\alpha \in \mathbb{R}$.

Действие $g \mapsto L_g$ группы G на фазовом пространстве Z определяется равенством $L_g z = (gz_1, \dots, gz_N)$ для $z = (z_1, \dots, z_N) \in Z$ и $g \in G$.

Согласно [6, 7], стационарным называется движение, которое осуществляется преобразованиями некоторой однопараметрической подгруппы группы симметрии данного уравнения.

Будем считать, что все вихри имеют одинаковую интенсивность γ .

Рассмотрим решение задачи (1), (2)

$$z_k = e^{i\omega_N t} u_k, \quad (3)$$

$$u_k = R_0 e^{2\pi i(k-1)N}, \quad k = 1, \dots, N,$$

отвечающее подгруппе вращений g^{rot} ;

$$\omega_N = \omega_N(q); \quad q = \frac{R^2}{R_0^2}; \quad 0 < R < R_0 \text{ (рис. 1).}$$

Таким образом, конфигурация одинаковых точечных вихревых зарядов, расположенных вне круговой области радиусом R на окружности радиусом R_0 в вершинах правильного N -угольника, вращается с постоянной угловой скоростью $\omega = \omega_N(q)$. Далее, не нарушая общности, будем считать $R_0 = 1$.

При прохождении параметра q через точку q_{0N} угловая скорость ω_N меняет знак (табл. 1, рис. 2).

Таблица 1

Значения q_{0N} параметра q , при которых $\omega_N(q) = 0$, $N=2, \dots, 8$ / Parameter q_{0N} value under which $\omega_N(q) = 0$, $N=2, \dots, 8$

q_{0N}
$q_{02}=0,2143223673$
$q_{03}=0,3476396784$
$q_{04}=0,4279904202$
$q_{05}=0,48116016866$
$q_{06}=0,5198385317$
$q_{07}=0,5483566188$
$q_{08}=0,5703123852$

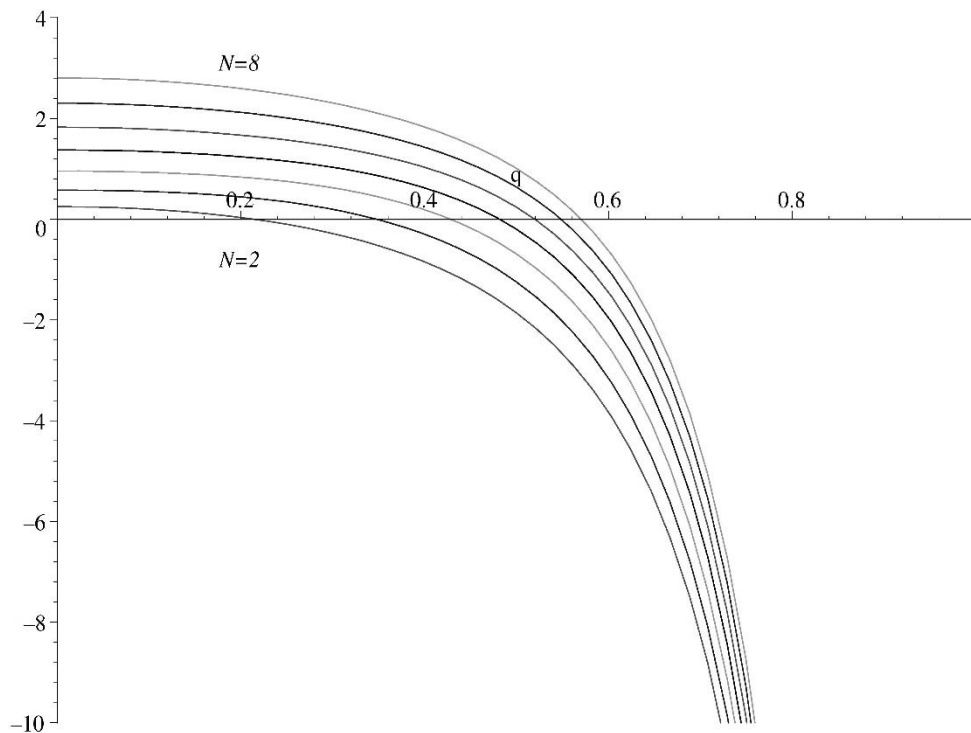


Рис. 1. Зависимость угловой скорости ω_N от параметра $q = \frac{R^2}{R_0^2}$ при $N=2, \dots, 8$. Кривые ω_N расположены снизу вверх в порядке возрастания N / Fig. 1. Dependence of angular velocity ω_N on the parameter $q = \frac{R^2}{R_0^2}$. Curves ω_N located from bottom to top in order of increasing N

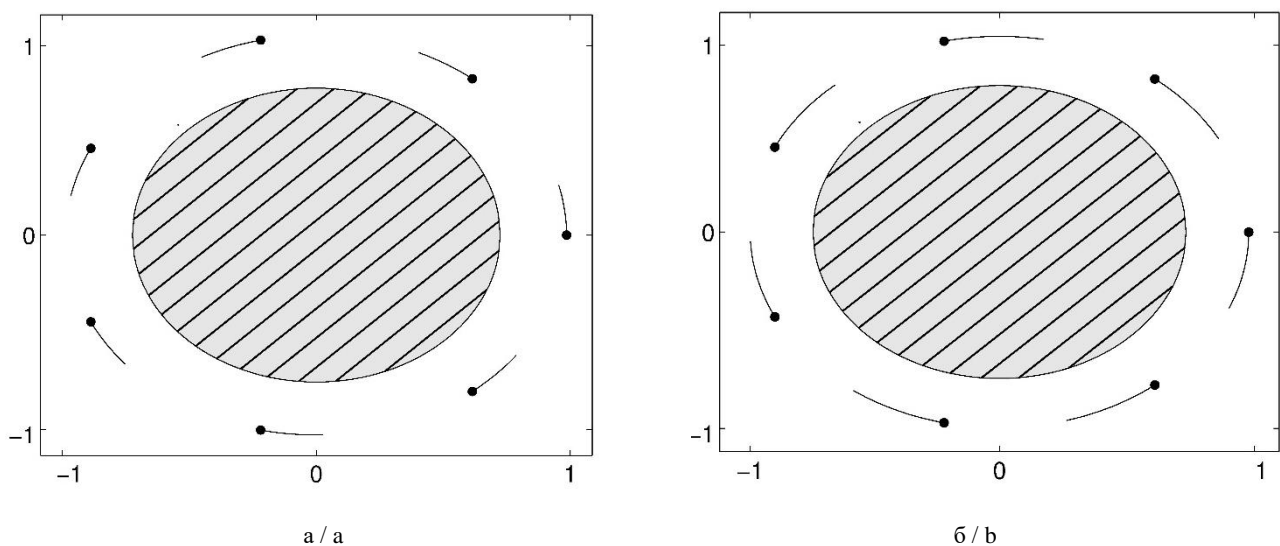


Рис. 2. Изменение направления вращения правильного семиугольника: а - $q = 0,54 < q_{07}$; б - $q = 0,56 > q_{07}$. Жирными точками обозначено начальное расположение вихревых зарядов / Fig. 2. Change the direction of rotation of the regular heptagon: а - $q = 0,54 < q_{07}$; б - $q = 0,56 > q_{07}$. Bold points indicate the initial location of the vortex charges

Устойчивость правильного N -угольника

Замена переменных $z_k(t) = e^{i\omega N t} v_k(t)$ приводит уравнения (1), (2) к системе с гамильтонианом

$$E(v) = H(v) + \frac{\omega_N}{2} M(v), \quad M = \gamma \sum_{k=1}^N |v_k|^2, \quad \text{где}$$

$$v = (v_1, \dots, v_N) \in \mathbb{C}^N.$$

На каждой плоскости переменных v_k введем новые координаты и запишем v_k в виде

$$v_k = \sqrt{1 + 2r_k} e^{i\left(\frac{2\pi}{N}(k-1) + \theta_k\right)}.$$

В переменных $r = (r_1, \dots, r_N)$, $\theta = (\theta_1, \dots, \theta_N)$ получаем уравнения

$$\dot{r}_k = \frac{\partial E}{\partial \theta_k}(v(r, \theta)), \quad \dot{\theta}_k = -\frac{\partial E}{\partial r_k}(v(r, \theta)). \quad (4)$$

Стационарному движению (3) отвечает непрерывное семейство равновесий системы (4), расположенное на прямой $\Gamma = \{(r, \theta) \in \mathbb{R}^{2N} : r = 0, \theta_1 = \dots = \theta_N\}$.

Режим стационарного вращения (3) неустойчив по Ляпунову при любых N [7]. Далее будет использоваться наиболее сильное из возможных в данной задаче определений устойчивости – устойчивость по Раусу [7].

Под устойчивостью по Раусу решения (3) будем понимать устойчивость по Ляпунову семейства равновесий Γ . Заметим, что для доказательства такого рода устойчивости достаточно найти знакоположительный интеграл, являющийся положительно-определенным по части переменных в подпространстве, ортогональном семейству равновесий Γ .

Разложение функции $E(v(\rho))$ в ряд Тейлора по переменной $\rho = (r, \theta)$ – одно и то же в окрестности любого равновесия семейства Γ : $E(v(\rho)) = E_0 + E_2(v(\rho)) + \dots$. Многоточием здесь обозначены слагаемые выше 2-й степени. Квадратичная форма E_2 представима в виде

$$E_2 = (\mathbf{S}\rho, \rho), \quad \mathbf{S} = \begin{pmatrix} \mathbf{F}_1 & \frac{1}{2}\mathbf{G}_0 \\ -\frac{1}{2}\mathbf{G}_0 & \mathbf{F}_2 \end{pmatrix}.$$

Матрица линеаризации системы (4) на нулевом

$$\text{равновесии имеет вид } \mathbf{L} = \begin{pmatrix} -\mathbf{G}_0 & 2\mathbf{F}_2 \\ -2\mathbf{F}_1 & -\mathbf{G}_0 \end{pmatrix}.$$

Матрица \mathbf{S} симметрична, и поэтому все ее собственные значения вещественны. Она имеет нулевое собственное значение, отвечающее семейству Γ . Достаточным условием устойчивости по Раусу решения (3) является то, что все остальные соб-

ственные значения матрицы \mathbf{S} имеют одинаковый знак. Экспоненциальная неустойчивость имеет место, когда у матрицы линеаризации \mathbf{L} есть собственные значения с положительной действительной частью. Если все собственные значения матрицы линеаризации \mathbf{L} лежат на мнимой оси, а матрица \mathbf{S} знакопеременна, для исследования устойчивости требуется нелинейный анализ с помощью методов КАМ-теории.

Матрицы \mathbf{F}_1 , \mathbf{F}_2 и \mathbf{G}_0 являются циркулянтами:

$$\mathbf{F}_m = \sum_{j=0}^{N-1} f_{mj} \mathbf{C}^j, \quad \mathbf{G}_0 = \sum_{j=0}^{N-1} g_{0j} \mathbf{C}^j, \quad \text{где } \mathbf{C} \text{ – циклическая матрица. Матрицы } \mathbf{F}_1 \text{ и } \mathbf{F}_2 \text{ – симметричные, а } \mathbf{G}_0 \text{ – кососимметрическая. Величины } f_{mk}, g_{0k} \text{ не выписаны здесь ввиду их громоздкости.}$$

Собственные значения λ_{1k} , λ_{2k} и $i\lambda_{0k}$, $k = 1, \dots, N$, матриц \mathbf{F}_1 , \mathbf{F}_2 и \mathbf{G}_0 заданы формулами

$$\lambda_{mk} = \sum_{j=0}^{N-1} f_{mj} e^{\frac{2\pi i j}{N}}, \quad m=1,2, \quad i\lambda_{0k} = \sum_{j=0}^{N-1} g_{0j} e^{\frac{2\pi i j}{N}}.$$

Собственные значения матрицы \mathbf{S} являются корнями полинома [8]

$$P(\Lambda, k) = \Lambda^2 - (\lambda_{1k} + \lambda_{2k})\Lambda + \lambda_{1k}\lambda_{2k} - \frac{1}{4}\lambda_{0k}^2, \quad k=1, \dots, N.$$

Собственные значения матрицы линеаризации \mathbf{L} имеют вид [9] $\sigma_k^\pm = -i\lambda_{0k} \pm 2\sqrt{-\lambda_{1k}\lambda_{2k}}$, $k=1, \dots, N$.

Используемые в следующей теореме критические значения параметра q приведены в табл. 2.

Теорема 1. Стационарное вращение (3) правильного вихревого N -угольника:

– устойчиво по Раусу в случаях:

- 1) $N=2,3,4,5$ при $q \in [0, q_{1N}^\circ) \cup (q_{2N}^\circ, 1)$;
- 2) $N=6,8$ при $q \in (q_{1N}^\circ, 1)$;
- 3) $N=7$ при $q \in (q_{1N}^\circ, 1)$;

– экспоненциально неустойчиво в случаях:

- 4) $N=2,4$ при $q \in (q_{1N}^\circ, q_{2N}^\circ)$;
- 5) $N=3,5$ при $q \in (q_{1N}^*, q_{2N}^*)$;
- 6) $N=6,8$ при $q \in [0, q_{1N}^\circ)$;
- 7) $N=7$ при $q \in [0, q_{17}^*)$;

– при выполнении условий:

- 8) $q \in [q_{1N}^\circ, q_{1N}^*) \cup [q_{2N}^*, q_{2N}^\circ]$ для $N=3,5$;
- 9) $q \in [q_{17}^*, q_{17}^\circ]$ для $N=7$;
- 10) $q = q_{1N}^\circ$ или $q = q_{2N}^\circ$ для $N=2,4$;
- 11) $q = q_{1N}^\circ$ для $N = 6,8$

требуется нелинейный анализ.

Замечание. В случае $N=6,7,8$ в отсутствие границы при $q=0$ имеет место экспоненциальная неустойчивость, а при $q > q_N^\circ$ – устойчивость (рис. 3). Таким образом, наблюдается стабилизирующее влияние границы области. В классическом случае логарифмического потенциала этот эффект отсутствует [9].

В случае выполнения условий 8–11 теоремы 1 для заключения об устойчивости необходим нели-

нейный анализ методами КАМ-теории [10], которые требуют приведения гамильтониана к нормальной форме до 4-го порядка, отыскания и исследования всех резонансных соотношений до 4-го порядка включительно. Такая работа для системы логарифмических точечных вихрей вне круга была проделана в [11–13].

Для нашей задачи найдены резонансы до 4-го порядка включительно в случаях $N=2, \dots, 8$ (табл. 2).

Таблица 2

Критические значения q_N°, q_N^* теоремы 1 и список резонансных значений параметра q : q_{00} – двукратный ноль; \hat{q} – жорданова клетка; $q_{k:m}$ – резонанс $k : m$ / The critical values q_N°, q_N^* of the theorem 1 and resonance parameter q values : q_{00} - the double zero; \hat{q} - the Jordan cell; $q_{k:m}$ - resonance $k : m$

$N = 2$	$\hat{q}_{00} = q_{12}^\circ = 0,048316, \hat{q}_{00} = q_{22}^\circ = 0,236068$
$N = 3$	$q_{00} = q_{13}^\circ = 0,125402, q_{00} = q_{23}^\circ = 0,47058, \hat{q}_{11} = q_{13}^* = 0,12607,$ $\hat{q}_{11} = q_{23}^* = 0,469994, q_{12} = 0,125994, q_{12} = 0,47006, q_{13} = 0,1259,$ $q_{13} = 0,470142$
$N = 4$	$\hat{q}_{00} = q_{14}^\circ = 0,152886, \hat{q}_{00} = q_{24}^\circ = 0,662933$
$N = 5$	$q_{00} = q_{15}^\circ = 0,157847, q_{00} = q_{25}^\circ = 0,760326, \hat{q}_{11} = q_{15}^* = 0,158059,$ $\hat{q}_{11} = q_{25}^* = 0,760306, q_{12} = 0,158036, q_{12} = 0,76031,$ $q_{13} = 0,158006, q_{13} = 0,760311$
$N = 6$	$\hat{q}_{00} = q_{16}^\circ = 0,829035$
$N = 7$	$q_{00} = q_{17}^\circ = 0,869194, q_{11} = q_{17}^* = 0,869189$
$N = 8$	$\hat{q}_{00} = q_{18}^\circ = 0,899048$

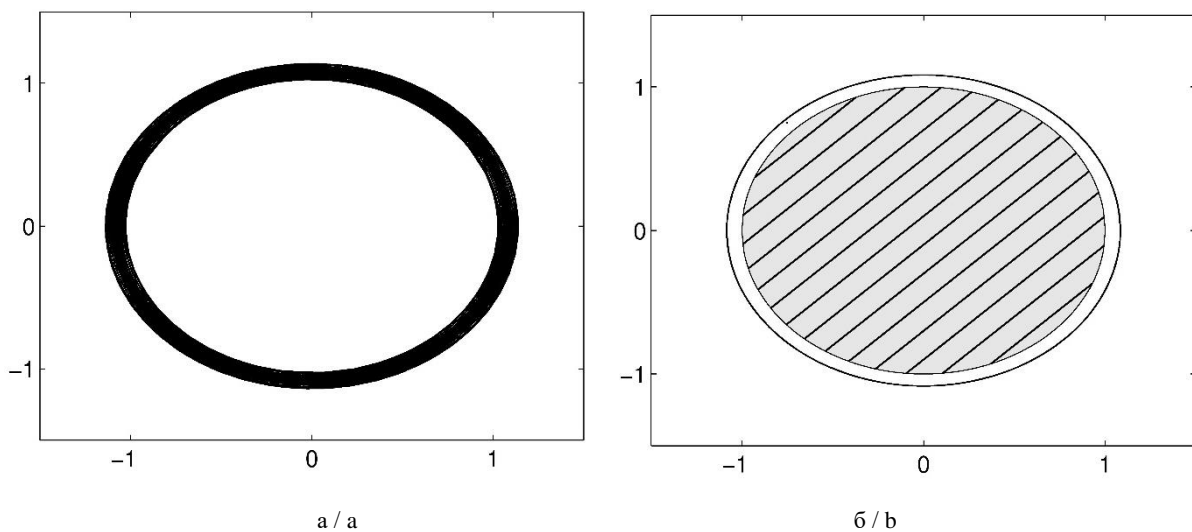


Рис. 3. Пример стабилизации вихревого шестиугольника границей области: а – $q=0$ – граница отсутствует; б – $q=0,85 > q_6^\circ$ / Fig. 3. Example of stabilization of a vortex hexagon by the boundary of domain: a - $q=0$ - border is absent; b - $q=0,85 > q_6^\circ$

Численный эксперимент в резонансных случаях

В данном разделе прямым численным счетом исследуется устойчивость режима стационарного вращения (3) для $N = 2, \dots, 8$ при всех резонансных значениях параметра q из табл. 2.

Неустойчивость была обнаружена только в случае $N = 3$ при $q = q_{13}^{\circ}$ и $q = q_{23}^{\circ}$. Траектории движения вихревых зарядов, соответствующие этим резонансам, приведены на рис. 4, 5.

На рис. 4а – в демонстрируется неустойчивость стационарного вращения правильного треугольника при $q = q_{13}^{\circ}$. В начальный момент времени он возмущается на величину порядка 10^{-4} . На рис. 4б наблюдается неустойчивость. Время счета – порядка 200 оборотов режима стационарного вращения (3). При малых отклонениях параметра q от критиче-

ского значения q_{13}° в обе стороны наблюдается устойчивость (рис. 4а, в). Здесь вихревой треугольник совершает около 37000 оборотов.

На рис. 5а – в показана неустойчивость стационарного вращения правильного треугольника при $q = q_{23}^{\circ}$. В начальный момент времени вносится возмущение на величину порядка 10^{-5} . На рис. 5б при $q = q_{23}^{\circ}$ имеет место неустойчивость. Время счета – 50 оборотов. В малой окрестности точки $q = q_{23}^{\circ}$ наблюдается устойчивость (рис. 5а, в). Здесь время счета – 4600 оборотов.

В остальных резонансных точках параметра q , приведенных в табл. 2, неустойчивость численно не обнаружена.

Численно проверены также все утверждения теоремы 1 об устойчивости и неустойчивости.

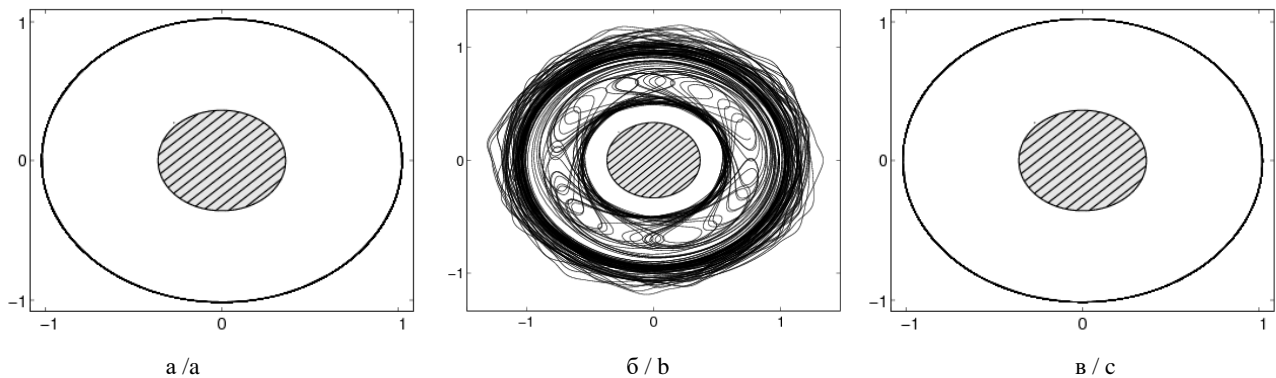


Рис. 4. Случай $N=3$. Неустойчивость при изолированном значении параметра $q = q_{13}^{\circ}$: а – $q=0,1252$; б – $q = q_{13}^{\circ} \approx 0,125402$; в – $q=0,1256$ / Fig. 4. The case of $N=3$. Instability at an isolated parameter value $q = q_{13}^{\circ}$: а – $q=0.1252$; б – $q = q_{13}^{\circ} \approx 0.125402$; в – $q=0.1256$

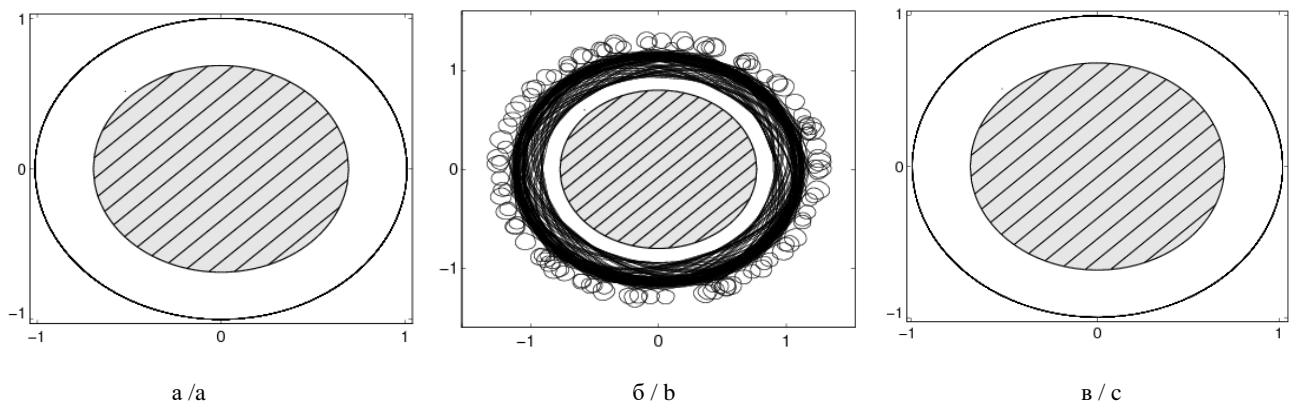


Рис. 5. Случай $N=3$. Неустойчивость при изолированном значении параметра $q = q_{23}^{\circ}$: а – $q=0,4702$; б – $q = q_{23}^{\circ} \approx 0,470579$; в – $q=0,4708$ / Fig. 5. The case of $N=3$. Instability at an isolated parameter value $q = q_{23}^{\circ}$: а – $q=0.4702$; б – $q = q_{23}^{\circ} \approx 0.470579$; в – $q=0.4708$

Литература

1. Томсон Дж.Дж. Электричество и материя. М.; Ижевск : НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2004. 264 с.
2. Гряник В.М. Динамика сингулярных геострофических вихрей в двухуровневой модели атмосферы (океана) // Изв. АН СССР. ФАО. 1983. Т. 19, № 3. С. 227–240.
3. Гудименко А.И., Захаренко А.Д. Устойчивость относительного равновесия трех вихревых зарядов с нулевой суммарной интенсивностью // Изв. РАН. МЖГ. 2012. № 4. С. 43–54.
4. Островская И.В. Об устойчивости системы частиц в вершинах квадрата внутри круговой области // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2009. Актуальные проблемы математической гидродинамики. С. 178–180.
5. Куракин Л.Г., Мелехов А.П., Островская И.В. Об устойчивости стационарного вращения системы точечных вихрей внутри круговой области // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2015. № 4 (188). С. 68–73.
6. Куракин Л.Г., Юдович В.И. О нелинейной устойчивости стационарного вращения правильного вихревого многоугольника // Докл. РАН. 2002. Т. 384, № 4. С. 476–482.
7. Kurakin L.G., Yudovich V.I. The stability of stationary rotation of a regular vortex polygon // Chaos. 2002. Vol. 12. P. 574–595.
8. Куракин Л.Г. Устойчивость, резонансы и неустойчивость правильных вихревых многоугольников внутри круговой области // Докл. РАН. 2004. Т. 399, № 1. С. 52–55.
9. Havelock T.H. The stability of motion of rectilinear vortices in ring formation // Phil. Mag. 1931. Vol. 11, No. 70. P. 617–633.
10. Маркеев А.П. Точки либрации в небесной механике и космодинамике. М. : Наука, 1978. 312 с.
11. Куракин Л.Г. Об устойчивости стационарного вращения системы трех равноудаленных вихрей вне круга // ПММ. 2011. Т. 75, № 2. С. 327–337.
12. Куракин Л.Г., Островская И.В. Об устойчивости томсоновского вихревого многоугольника с четным числом вихрей вне круговой области // СМЖ. 2010. Т. 51, № 3. С. 584–598.
13. Куракин Л.Г., Островская И.В. Критерий устойчивости правильного вихревого пятиугольника вне круга // Нелинейная динамика. 2012. Т. 8, № 2. С. 355–368.

References

1. Tomson Dzh.Dzh. *Elektrichestvo i materiya* [Electricity and matter]. M.; Izhevsk : NITs «Regulyarnaya i khaoticheskaya dinamika», 2004, 264 p.
2. Gryanik V.M. Dinamika singulyarnykh geostroficheskikh vikhrei v dvukhurovnevoi modeli atmosfery

(okeana) [Dynamics of singular geostrophic vortices in a two-level model of the atmosphere (ocean)]. *Izv. AN SSSR. FAO*. 1983, vol. 19, No. 3, pp. 227-240.

3. Gudimenko A.I., Zakharenko A.D. Ustoichivost' otnositel'nogo ravnovesiya trekh vikhrevykh zaryadov s nulevoi summarnoi intensivnost'yu [Stability of the relative equilibrium of three vortex charges with zero total intensity]. *Izv. RAN. MZhG*. 2012, No. 4, pp. 43-54.

4. Ostrovskaya I.V. Ob ustoichivosti sistemy chastits v vershinakh kvadrata vnutri krugovoi oblasti [On the stability of a system of particles at the vertices of a square inside a circular domain]. *Izv. vuzov. Sev.-Kavk. region. Estestv. nauki*. 2009. Aktual'nye problemy matematicheskoi gidrodinamiki, pp. 178-180.

5. Kurakin L.G., Melekhov A.P., Ostrovskaya I.V. Ob ustoichivosti statsionarnogo vrashcheniya sistemy tochechnykh vikhrei vnutri krugovoi oblasti [On the stability of the stationary rotation of a system of point vortices inside a circular domain]. *Izv. vuzov. Sev.-Kavk. region. Estestv. nauki*. 2015, No. 4 (188), pp. 68-73.

6. Kurakin L.G., Yudovich V.I. O nelineinoi ustoichivosti statsionarnogo vrashcheniya pravil'nogo vikhrevogo mnogougol'nika [On the nonlinear stability of the stationary rotation of a regular vortex polygon]. *Dokl. RAN*. 2002, vol. 384, No. 4, pp. 476-482.

7. Kurakin L.G., Yudovich V.I. The stability of stationary rotation of a regular vortex polygon. *Chaos*. 2002, vol. 12, pp. 574-595.

8. Kurakin L.G. Ustoichivost', rezonansy i neustoichivost' pravil'nykh vikhrevykh mnogougol'nikov vnutri krugovoi oblasti [Stability, resonances, and instability of regular vortex polygons inside a circular domain]. *Dokl. RAN*. 2004, vol. 399, No. 1, pp. 52-55.

9. Havelock T.H. The stability of motion of rectilinear vortices in ring formation. *Phil. Mag.* 1931, vol. 11, No. 70, pp. 617-633.

10. Markeev A.P. *Tochki libratsii v nebesnoi mekhanike i kosmodinamike* [The points of libration in celestial mechanics and cosmodynamics]. Moscow: Nauka, 1978, 312 p.

11. Kurakin L.G. Ob ustoichivosti statsionarnogo vrashcheniya sistemy trekh ravnoudalennykh vikhrei vne kruga [On the stability of the stationary rotation of a system of three equidistant vortices outside the circle]. *PMM*. 2011, vol. 75, No. 2, pp. 327-337.

12. Kurakin L.G., Ostrovskaya I.V. Ob ustoichivosti tomsonovskogo vikhrevogo mnogougol'nika s chetnym chislom vikhrei vne krugovoi oblasti [On the stability of a Thompson vortex polygon with an even number of vortices outside the circular domain]. *SMZh*. 2010, vol. 51, No. 3, pp. 584-598.

13. Kurakin L.G., Ostrovskaya I.V. Kriterii ustoichivosti pravil'nogo vikhrevogo pyatiugol'nika vne kruga [Criterion for the stability of a regular vortex pentagon outside the circle]. *Nelineinaya dinamika*. 2012, vol. 8, No. 2, pp. 355-368.

КОНГАРМОНИЧЕСКИЕ АНАЛОГИ ТОЖДЕСТВ ГРЕЯ ДЛЯ ПОЧТИ КОНТАКТНЫХ МЕТРИЧЕСКИХ МНОГООБРАЗИЙ КЛАССА C_{10}

© 2017 г. Т.Л. Мелехина¹, А.Р. Рустанов²

¹Финансовый университет при Правительстве РФ, Москва, Россия,

²Московский технологический университет, Москва, Россия

CONHARMONIC ANALOGUS OF GRAY IDENTITIES FOR ALMOST CONTACT METRIC MANIFOLDS OF THE CLASS C_{10}

T.L. Melekhina¹, A.R. Rustanov²

¹Financial University under the Government of the Russian Federation, Moscow, Russia,

²Moscow Technological University, Moscow, Russia

Мелехина Татьяна Леонидовна – кандидат физико-математических наук, доцент, департамент анализа данных, принятия решений и финансовых технологий, Финансовый университет при Правительстве РФ, пр. Ленинградский, 49, г. Москва, 125167, Россия, e-mail: TMelekhina@fa.ru

Tatyana L. Melekhina - Candidate of Physics and Mathematics, Associate Professor, Department of Data Analysis, Decision Making and Financial Technologies, Financial University under the Government of the Russian Federation, Leningradskii Ave., 49, Moscow, 125167, Russia, e-mail: TMelekhina@fa.ru

Рустанов Алигаджи Рабаданович – кандидат физико-математических наук, доцент, кафедра КБ-9, Институт комплексной безопасности и специального приборостроения, Московский технологический университет, пр. Вернадского, 78, г. Москва, 119454, Россия, e-mail: aligadzhi@yandex.ru

Aligadzhi R. Rustanov - Candidate of Physics and Mathematics, Associate Professor, Department of KB-9, Institute of Complex Security and Special Instrumentation, Moscow Technological University, Vernadskogo Ave., 78, Moscow, 119454, Russia, aligadzhi@yandex.ru

Рассматриваются конгармонические аналоги тождеств Грея для одного класса почти контактных метрических многообразий, обобщающего класс косимплектических многообразий. В классификации Чинья – Гонзалеса этот класс многообразий называется классом C_{10} . Тензор Риччи C_{10} -многообразий является Φ -инвариантным. На основе контактных аналогов тождеств Грея для тензора конгармонической кривизны выделены три класса C_{10} -многообразий, удовлетворяющих этим тождествам и обозначенных через GK_1, GK_2, GK_3 . Доказано, что C_{10} -многообразие является GK_3 -многообразием. Необходимым и достаточным условием для C_{10} -многообразия быть GK_2 -многообразием является равенство нулю структурного тензора. Получены локальное строение C_{10} -многообразий классов GK_1 и GK_2 ; локальное строение конгармонически плоских C_{10} -многообразий, примером которых является произведение $C^n \times R$; тождества на тензор конгармонической кривизны, при выполнении которых C_{10} -многообразия относятся к классам GK_1 и GK_2 . Доказано, что C_{10} -многообразие класса GK_1 является многообразием Эйнштейна с космологической константой $\varepsilon = -\frac{\lambda}{2(n-2)}$. C_{10} -многообразие класса GK_1 размерностью больше 3 имеет нулевую скалярную кривизну; C_{10} -многообразие размерностью больше 5 относится к классу GK_1 тогда и только тогда, когда оно является Риччи-плоским косимплектическим многообразием.

Ключевые слова: косимплектическая структура, келерово многообразие, тензор конгармонической кривизны, конгармонически плоские многообразия, тождества Грея, C_{10} -многообразие.

The conharmonic analogues of Gray identities for one of the most interesting class of almost contact metric manifolds are generalized, which generalizes the class of cosymplectic manifolds. In the Chinea-Gonzales classification this class of manifolds is called a class C_{10} . The Ricci tensor of C_{10} -manifolds is Φ -invariant. On the basis of contact analogues of Gray identities, three classes of C_{10} -manifolds are distinguished for the harmonic curvature tensor that satisfy these identities and are

denoted by GK_1, GK_2, GK_3 . In this paper it is proved that a C_{10} -manifold is a GK_3 -manifold. It is proved that the necessary and sufficient condition for a C_{10} -manifold to be a GK_2 -manifold is that the structure tensor vanishes. A local structure of C_{10} -manifolds of classes GK_1 and GK_2 is obtained. A local structure of conharmonic flat C_{10} -manifolds is obtained. An example of such a manifold is a product $C^n \times R$. Identities are obtained for the tensor of conharmonic curvature under which the C_{10} -manifolds are of class GK_1 and GK_2 . It is proved that a C_{10} -manifold of a class GK_1 is an Einstein manifold with a cosmological constant $\varepsilon = -\frac{\chi}{2(n-2)}$. A C_{10} -manifold of a class of dimension greater than 3 has zero scalar curvature. It is proved that a C_{10} -manifold of dimension greater than 5 is of class GK_1 if and only if it is a flat cosymplectic manifold.

Keywords: cosymplectic structure, Kähler manifold, conharmonic curvature tensor, conharmonically flat manifolds, Gray identities, C_{10} -manifold.

В 1957 г. Иши [1] ввел в рассмотрение специальный тип конформных преобразований, сохраняющих свойство гармоничности гладких функций. Известно [1], что такие преобразования имеют тензорный инвариант – тензор конгармонической кривизны, являющийся алгебраическим тензором кривизны.

В работе А. Грея [2] показано, что ключом к изучению геометрии келеровых многообразий являются тождества, которым удовлетворяет их тензор римановой кривизны. В соответствии с этим в данной работе продолжено изучение почти контактных метрических многообразий класса C_{10} в классификации Чинья и Гонзалеза [3], начатое в работах [4–8], являющихся естественными обобщениями косимплектических многообразий. Точнее, мы изучаем контактные аналоги тождеств Грея, которым удовлетворяет тензор конгармонической кривизны почти контактных метрических многообразий класса C_{10} , а также рассматриваем C_{10} -многообразия постоянной конгармонической кривизны.

Пусть M – гладкое многообразие размерностью $2n+1$; $X(M)$ – C^∞ -модуль гладких векторных полей на многообразии M . В дальнейшем все многообразия, тензорные поля и тому подобные объекты предполагаются гладкими класса C^∞ .

Определение 1 [3]. АС-структура, характеризующая тождеством

$$\nabla_X(\Phi)Y = \xi \nabla_Y(\eta)\Phi X + \eta(Y)\nabla_{\Phi X}\xi, \quad (1)$$

$$\forall X, Y \in X(M),$$

называется C_{10} -структурой. АС-многообразие, снабженное C_{10} -структурой, называется C_{10} -многообразием.

Тождество $(A_{b[c}^{ah} - F^{ah}F_{b[c}])F_{|h|d]} = 0$ называется первым фундаментальным тождеством C_{10} -многообразий; $F_{a[b}F_{cd]} = 0$ – вторым [6].

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

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

где R^i_{jkl} , S^i_k , g_{jl} – компоненты тензоров римановой кривизны, Риччи, метрического.

Легко показать из (2), что тензор конгармонической кривизны обладает всеми классическими свойствами симметрии тензора Римана – Кристоффеля.

Существенные ненулевые компоненты тензора Римана – Кристоффеля $\{R^i_{jkl}\}$ на пространстве присоединенной G -структуры C_{10} -многообразия имеют вид [4]:

$$1) R^b_{00a} = F_{ac}F^{cb}; \quad 2) R^a_{bcd} = A^{ad}_{bc};$$

$$3) R^a_{bcd} = -F_{ab}F_{cd}. \quad (3)$$

Компоненты тензора Риччи [4]:

$$1) S_{00} = -2F_{ab}F^{ba}; \quad 2) S_{ab} = A^{bc}_{ac} - F_{ac}F^{cb}. \quad (4)$$

Остальные компоненты нулевые. В частности, скалярная кривизна χ вычисляется по формуле [4]

$$\chi = g^{ij}S_{ij} = S_{00} + 2S_{a\hat{a}} = 2A^{ab}_{ab} - 4F_{ab}F^{ba}. \quad (5)$$

Замечание 1. Согласно [9, теорема 4.1], из (4) следует, что C_{10} -многообразие имеет Φ -инвариантный тензор Риччи.

Из (2) с учетом (3), (4) получим, что на пространстве присоединенной G -структуры тензор конгармонической кривизны C_{10} -многообразия имеет следующие ненулевые компоненты:

$$1) K^0_{a0b} = R^0_{a0b} + \frac{1}{2n-1}(S_{ab} + S_{00}\delta_a^b) =$$

$$= -F_{ac}F^{cb} + \frac{1}{2n-1}(A^{bc}_{ac} - F_{ac}F^{cb} - 2F_{cd}F^{dc}\delta_a^b);$$

$$\begin{aligned}
 2) K_{bcd}^a &= R_{bcd}^a + \frac{1}{2n-1} (S_{bd} \delta_c^a + S_{ac} \delta_b^d) = \\
 &= A_{bc}^{ad} + \frac{1}{2n-1} \left\{ \delta_c^a (A_{bh}^{dh} - F_{bh} F^{hd}) + \delta_b^d (A_{ch}^{ah} - F_{ch} F^{ha}) \right\}; \\
 3) K_{bcd}^a &= \frac{1}{2n-1} (S_{bd} \delta_c^a - S_{bc} \delta_d^a + S_{ac} \delta_d^b - S_{ad} \delta_c^b) = \\
 &= \frac{1}{2n-1} \left\{ \delta_c^a (A_{dh}^{bh} - F_{dh} F^{hb}) - \delta_d^a (A_{ch}^{bh} - F_{ch} F^{hb}) + \right. \\
 &\quad \left. + \delta_d^b (A_{ch}^{ah} - F_{ch} F^{ha}) - \delta_c^b (A_{dh}^{ah} - F_{dh} F^{ha}) \right\}; \\
 4) K_{bcd}^{\hat{a}} &= R_{bcd}^{\hat{a}} = -F_{ab} F_{cd}. \quad (6)
 \end{aligned}$$

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

Контактными аналогами тождеств А. Грея [2] R_1, R_2 и R_3 кривизны почти эрмитовых многообразий для тензора конгармонической кривизны являются тождества кривизны GK_1, GK_2 и GK_3 для почти контактных метрических многообразий [10]:
 $GK_1: \langle K(\Phi X, \Phi Y)\Phi Z, \Phi W \rangle = \langle K(\Phi^2 X, \Phi^2 Y)\Phi Z, \Phi W \rangle$;
 $GK_2: \langle K(\Phi X, \Phi Y)\Phi Z, \Phi W \rangle = \langle K(\Phi^2 X, \Phi^2 Y)\Phi Z, \Phi W \rangle + \langle K(\Phi^2 X, \Phi Y)\Phi^2 Z, \Phi W \rangle + \langle K(\Phi^2 X, \Phi Y)\Phi Z, \Phi^2 W \rangle$;
 $GK_3: \langle K(\Phi X, \Phi Y)\Phi Z, \Phi W \rangle = \langle K(\Phi^2 X, \Phi^2 Y)\Phi^2 Z, \Phi^2 W \rangle$; $X, Y, Z \in X(M)$.

Назовем C_{10} -многообразие, обладающее тождествами GK_1, GK_2 и GK_3 , соответственно GK_1 -, GK_2 - и GK_3 -многообразием [10].

Исследуем эти тождества.

Теорема 1 [10]. Пусть $S = (\xi, \eta, \Phi, g = \langle \cdot, \cdot \rangle)$ – почти контактная метрическая структура. Тогда:

1) $S = (\xi, \eta, \Phi, g = \langle \cdot, \cdot \rangle)$ – структура класса GK_1 тогда и только тогда, когда на пространстве присоединенной G -структуры $K_{abcd} = K_{\hat{a}bcd} = K_{\hat{a}bcd} = 0$;

2) $S = (\xi, \eta, \Phi, g = \langle \cdot, \cdot \rangle)$ – структура класса GK_2 тогда и только тогда, когда на пространстве присоединенной G -структуры $K_{abcd} = K_{\hat{a}bcd} = 0$;

3) $S = (\xi, \eta, \Phi, g = \langle \cdot, \cdot \rangle)$ – структура класса GK_3 тогда и только тогда, когда на пространстве присоединенной G -структуры $K_{\hat{a}bcd} = 0$.

Доказательство данной теоремы проводится аналогично доказательству соответствующей теоремы для тензора римановой кривизны, и мы опускаем его.

Замечание. Согласно теореме 1, очевидны включения $GK_1 \subset GK_2 \subset GK_3$.

Теорема 2. C_{10} -многообразие является GK_3 -многообразием.

Доказательство непосредственно следует из (4), (6) и теоремы 1.

Теорема 3. Пусть $S = (\xi, \eta, \Phi, g)$ – C_{10} -структура. Тогда S – структура класса GK_2 тогда и только тогда, когда структурный тензор тождественно равен нулю, т.е. $F_{ab} = 0$.

Доказательство. Пусть $S = (\xi, \eta, \Phi, g)$ – C_{10} -структура. Тогда, согласно теореме 1, S – структура класса GK_2 тогда и только тогда, когда $K_{abcd} = K_{\hat{a}bcd} = 0$, т.е. с учетом (6) $F_{ab} F_{cd} = 0$. Полученное равенство свернем с объектом F^{bh} , получим $F_{ab} F_{cd} F^{bh} = 0$. Свернем полученное равенство по индексам a и h , получим $F_{cd} F_{ab} F^{ab} = 0$, т.е. $F_{cd} \sum_{a,b} |F_{ab}|^2 = 0$. Отсюда следует, что $F_{ab} = 0$, структурный тензор равен нулю.

Обратно, пусть второй структурный тензор C_{10} -структуры равен нулю, $F_{ab} = 0$. Тогда $K_{bcd}^a = -F_{ab} F_{cd} = 0$. Таким образом, C_{10} -структура S является структурой класса GK_2 .

Следствие. Конгармонически плоское C_{10} -многообразие является плоским косимплектическим многообразием, а значит, оно локально эквивалентно произведению комплексного евклидова пространства C^n , снабженного стандартной эрмитовой метрикой $\langle \langle \cdot, \cdot \rangle \rangle = ds^2$, в каноническом атласе задаваемой соотношением $ds^2 = \sum_{a=1}^n dz^a \overline{dz^a}$, на вещественную прямую.

Доказательство. Согласно теореме 3, конгармонически плоское C_{10} -многообразие является косимплектическим многообразием, т.е. $F_{ab} = 0$.

Тогда формулы (6) примут вид:

$$1) K_{a\hat{0}\hat{b}}^0 = \frac{1}{2n-1} A_{ac}^{bc} = 0;$$

$$2) K_{bcd}^a = A_{bc}^{ad} + \frac{1}{2n-1} (\delta_c^a A_{bh}^{dh} + \delta_b^d A_{ch}^{ah}) = 0;$$

$$3) K_{bcd}^{\hat{a}} = \frac{1}{2n-1} (\delta_c^a A_{dh}^{bh} - \delta_d^a A_{ch}^{bh} + \delta_d^h A_{ch}^{ah} - \delta_c^b A_{dh}^{ah}) = 0;$$

$$4) K_{bcd}^{\hat{a}} = 0.$$

Отсюда следует, что $A_{bc}^{ad} = 0$, т. е. многообразие является плоским косимплектическим. Поскольку косимплектическое многообразие локально эквивалентно произведению келерова многообразия на вещественную прямую [11], а плоское келеро многообразие эквивалентно комплексному евклидову пространству C^n , снабженному стандартной эрмитовой метрикой $\langle\langle \cdot, \cdot \rangle\rangle = ds^2$, в каноническом атласе задаваемой соотношением $ds^2 = \sum_{a=1}^n dz^a \overline{dz^a}$, то получаем требуемое.

Пусть M – C_{10} -многообразие, являющееся многообразием класса GK_2 . Тогда $K_{bcd}^a = K_{bcd}^{\hat{a}} = 0$; кроме того, для C_{10} -многообразия имеем $K_{bcd}^0 = 0$, т.е. $K_{bcd}^i = 0$. Применяя процедуру восстановления тождества к последним равенствам [11, 12], получим тождество

$$\begin{aligned} & K(\Phi^2 X, \Phi^2 Y)\Phi^2 Z - K(\Phi^2 X, \Phi Y)\Phi Z - \\ & - K(\Phi X, \Phi^2 Y)\Phi Z - K(\Phi X, \Phi Y)\Phi^2 Z = 0, \quad (7) \\ & X, Y, Z \in X(M). \end{aligned}$$

Тождество (7) на пространстве присоединенной G -структуры переписывается в виде

$$\begin{aligned} & K_{jkl}^i \Phi_r^j \Phi_s^h \Phi_t^k \Phi_m^l \Phi_p^m \Phi_q^s \Phi_q^s = K_{jkl}^i \Phi_r^j \Phi_m^k \Phi_p^m \Phi_q^l + \\ & + K_{jkl}^i \Phi_r^j \Phi_p^k \Phi_s^l \Phi_q^s + K_{jkl}^i \Phi_r^j \Phi_s^h \Phi_p^k \Phi_q^l. \end{aligned}$$

С учетом (6) и вида матрицы Φ получим $K_{bcd}^a = K_{bcd}^{\hat{a}} = K_{bcd}^0 = 0$.

Таким образом, доказана

Теорема 4. C_{10} -многообразие является многообразием класса GK_2 тогда и только тогда, когда его тензор конгармонической кривизны удовлетворяет тождеству

$$\begin{aligned} & K(\Phi^2 X, \Phi^2 Y)\Phi^2 Z - K(\Phi^2 X, \Phi Y)\Phi Z - \\ & - K(\Phi X, \Phi^2 Y)\Phi Z - K(\Phi X, \Phi Y)\Phi^2 Z = 0, \\ & X, Y, Z \in X(M). \end{aligned}$$

Теорема 5. C_{10} -многообразие является многообразием класса GK_2 тогда и только тогда, когда оно локально эквивалентно произведению келерова многообразия на вещественную прямую. Если многообразие односвязно, то указанные локальные эквивалентности можно выбрать глобальными.

Доказательство. Согласно теореме 3, C_{10} -многообразие класса GK_2 является косимплектическим. Согласно [11, предложение 2.10], косимплектическое многообразие локально эквивалентно

произведению келерова многообразия на вещественную прямую.

Теорема 6. C_{10} -многообразие класса, являющееся GK_1 -многообразием, является многообразием Эйнштейна с космологической константой $\varepsilon = -\frac{\chi}{2(n-2)}$. В частности, в случае полноты и связности оно компактно и имеет конечную фундаментальную группу.

Пусть M – C_{10} -многообразие, являющееся GK_1 -многообразием. Тогда, согласно теореме 1, имеет место равенство

$$\begin{aligned} & K_{bcd}^a = \frac{1}{2n-1} (S_{bd} \delta_c^a - S_{bc} \delta_d^a + S_{ac} \delta_d^b - S_{ad} \delta_c^b) = \\ & = \frac{1}{2n-1} \{ \delta_c^a (A_{dh}^{bh} - F_{dh} F^{hb}) - \delta_d^a (A_{ch}^{bh} - F_{ch} F^{hb}) + \\ & + \delta_d^b (A_{ch}^{ah} - F_{ch} F^{ha}) - \delta_c^b (A_{dh}^{ah} - F_{dh} F^{ha}) \} = 0. \end{aligned}$$

Свернем равенство

$S_{bd} \delta_c^a - S_{bc} \delta_d^a + S_{ac} \delta_d^b - S_{ad} \delta_c^b = 0$ по индексам a и c , тогда $S_{bd}(n-2) + \delta_d^b S_{aa} = 0$, откуда следует, что

$$S_{bd} = -\frac{\chi}{2(n-2)} \delta_d^b, \text{ т.е. многообразие является многообразием Эйнштейна с космологической константой } \varepsilon = -\frac{\chi}{2(n-2)}.$$

Если $\varepsilon = -\frac{\chi}{2(n-2)} < 0$, то, согласно классической теореме Майерса [11], в случае полноты оно имеет конечную фундаментальную группу.

Теорема 7. C_{10} -многообразие размерности больше 3, являющееся GK_1 -многообразием, имеет нулевую скалярную кривизну.

Доказательство. Пусть M – C_{10} -многообразие размерности больше 3, являющееся GK_1 -многообразием. Тогда

$$\begin{aligned} & K_{bcd}^a = \frac{1}{2n-1} \{ \delta_c^a (A_{dh}^{bh} - F_{dh} F^{hb}) - \delta_d^a (A_{ch}^{bh} - F_{ch} F^{hb}) + \\ & + \delta_d^b (A_{ch}^{ah} - F_{ch} F^{ha}) - \delta_c^b (A_{dh}^{ah} - F_{dh} F^{ha}) \} = 0. \end{aligned}$$

Свернем это равенство по индексам a и c .

$$(n-2) (A_{dh}^{bh} - F_{dh} F^{hb}) + \delta_d^b (A_{ah}^{ah} - F_{ah} F^{ha}) = 0. \quad (8)$$

Полученное равенство свернем по индексам b и d

$$(n-1) (A_{ab}^{ab} - F_{ab} F^{ba}) = 0. \quad (9)$$

Из последнего равенства:

а) $n = 1$, т.е. $\dim M = 3$;

б) $A_{ab}^{ab} - F_{ab} F^{ba} = 0$.

Из второго равенства и (5) следует требуемое утверждение.

С учетом последнего равенства (9) тождество (8) примет вид $(n-2)(A_{dh}^{bh} - F_{dh}F^{hb})=0$. Таким образом, либо $n=2$, т. е. $\dim M = 5$, либо $A_{dh}^{bh} - F_{dh}F^{hb} = 0$, т. е. многообразие в размерности больше 5 является Риччи-плоским многообразием.

Обратно, если многообразие размерности больше 5 является Риччи-плоским многообразием, то $K_{\hat{a}bcd} = 0$, т. е. многообразие является GK_1 -многообразием.

Таким образом, доказана

Теорема 8. C_{10} -многообразие размерности больше 5 является GK_1 -многообразием тогда и только тогда, когда оно является Риччи-плоским косимплектическим многообразием.

Пусть M – C_{10} -многообразие, являющееся многообразием класса GK_1 . Тогда $K_{bcd}^a = K_{bcd}^{\hat{a}} = 0$; кроме того, для C_{10} -многообразия $K_{bcd}^0 = 0$, т. е. $K_{bcd}^i = 0$. Применяя процедуру восстановления тождества к последним равенствам [11, 12], получим тождество

$$+K(\Phi X, \Phi^2 Y)\Phi Z - K(\Phi X, \Phi Y)\Phi^2 Z = 0, \quad (10)$$

$X, Y, Z \in X(M)$.

Складывая (7) и (10), получим

$$K(\Phi^2 X, \Phi^2 Y)\Phi^2 Z - K(\Phi X, \Phi Y)\Phi^2 Z = 0, \quad (11)$$

$X, Y, Z \in X(M)$.

Тождество (11) на пространстве присоединенной G -структуры переписывается в виде $K_{jkl}^i \Phi_h^j \Phi_r^h \Phi_m^k \Phi_p^m \Phi_s^l \Phi_q^s = K_{jkl}^i \Phi_h^j \Phi_r^h \Phi_p^k \Phi_q^l$.

С учетом (6) и вида матрицы Φ

$$K_{bcd}^a = K_{bcd}^{\hat{a}} = K_{bcd}^0 = K_{bcd}^a = K_{bcd}^{\hat{a}} = K_{bcd}^0 = 0.$$

Таким образом, доказана

Теорема 9. C_{10} -многообразие является многообразием класса GK_1 тогда и только тогда, когда его тензор конгармонической кривизны удовлетворяет тождеству

$$K(\Phi^2 X, \Phi^2 Y)\Phi^2 Z - K(\Phi X, \Phi Y)\Phi^2 Z = 0,$$

$X, Y, Z \in X(M)$.

Обобщая вышеизложенное, сформулируем основную теорему.

Основная теорема. C_{10} -многообразия являются многообразиями класса GK_3 . C_{10} -многообразие является многообразием класса GK_2 тогда и только тогда, когда оно локально эквивалентно произведению келерова многообразия на вещественную прямую; C_{10} -многообразия являются

многообразиями класса GK_1 только тогда, когда они локально эквивалентны произведению Риччи-плоского келерова многообразия на вещественную прямую.

Литература

1. Ishii Y. On conharmonic transformations. // Tensor. 1957. Vol. 7 (2). P. 73–80.
2. Gray A. Curvature identities for Hermitian and almost Hermitian manifolds // Tohoku Math. J. 1976. Vol. 28. P. 601–612.
3. Chinea D., Gonzalez C. Classification of almost contact metric structures // Annali di Matematica pura ed applicata (IV). 1990. Vol. CLVI. P. 15–36.
4. Рустанов А.Р. Тождества кривизны почти контактных метрических многообразий класса C_{10} // Преподаватель XXI в. 2010. № 4. С. 199–207.
5. Рустанов А.Р. Свойства изотропности тензора кривизны почти контактных метрических многообразий класса C_{10} // Преподаватель XXI в. 2014. № 2. С. 207–213.
6. Рустанов А.Р., Рустанов З.А. C_{10} -многообразия класса R_4 // Slovac International Scientific J. 2017. № 6 (6). S. 79–82.
7. 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.
8. Рустанов А.Р. Свойства изотропности C_{10} -многообразий // Инновационная наука. 2017. № 5. С. 13–17.
9. Волкова Е.С. Геометрия нормальных многообразий киллингова типа : дис. ... канд. физ.-мат. наук. М. : МПГУ, 1997. 122 с.
10. Герасименко С.А., Рустанов А.Р., Щипкова Н.Н. Аналоги тождеств Грея для тензора конгармонической кривизны AC -многообразий класса C_{11} // Вестн. Оренбургского гос. ун-та. 2015. № 9 (184). С. 35–37.
11. Кириченко В.Ф. Дифференциально-геометрические структуры на многообразиях. Изд. второе, дополн. Одесса : Печатный дом, 2013. 458 с.
12. Кириченко В.Ф., Рустанов А.Р. Дифференциальная геометрия квазисасакиевых многообразий // Мат сб. 2002. № 8, т. 193. С. 71–100.

References

1. Ishii Y. On conharmonic transformations. *Tensor*. 1957, vol. 7 (2), pp. 73-80.
2. Gray A. Curvature identities for Hermitian and almost Hermitian manifolds. *Tohoku Math. J.* 1976, vol. 28, pp. 601-612.
3. Chinea D., Gonzalez C. Classification of almost contact metric structures. *Annali di Matematica pura ed applicata (IV)*. 1990, vol. CLVI, pp. 15-36.

4. Rustanov A.R. Tozhdestva krivizny pochti kontaktnykh metricheskikh mnogoobrazii klassa S10 [The curvature identities of almost contact metric manifolds of class C10]. *Prepodavatel' XXI v.* 2010, No. 4, pp. 199-207.
5. Rustanov A.R. Svoistva izotropnosti tenzora krivizny pochti kontaktnykh metricheskikh mnogoobrazii klassa S10 [Isotropy properties of the curvature tensor of almost contact metric manifolds of class C10]. *Prepodavatel' XXI v.* 2014, No. 2, pp. 207-213.
6. Rustanov A.R., Rustanov Z.A. S10-mnogoobraziiya klassa R4 [C10-manifolds of class R4]. *Slovak International Scientific J.* 2017, No. 6 (6), pp. 79-82.
7. Rustanov A.R., Rustanov Z.A. Kontaktnye analogi tozhdestv Greya dlya pochti kontaktnykh metricheskikh mnogoobrazii klassa S10 [Contact analogues of Gray identities for almost contact metric manifolds of class C10]. *Innovatsionnaya nauka.* 2017, No. 5, pp. 11-13.
8. Rustanov A.R. Svoistva izotropnosti S10-mnogoobrazii [Properties of the isotropy of C10-manifolds]. *Innovatsionnaya nauka.* 2017, No. 5, pp. 13-17.
9. Volkova E.S. *Geometriya normal'nykh mnogoobrazii killingova tipa* : dis. ... kand. fiz.-mat. nauk [Geometry of normal manifolds of Killing type]. Moscow: MPGU, 1997, 122 p.
10. Gerasimenko S.A., Rustanov A.R., Shchipkova N.N. Analogi tozhdestv Greya dlya tenzora kongarmonicheskoi krivizny AS-mnogoobrazii klassa S11 [Analogues of Gray identities for the tensor of the conharmonic curvature of AC-manifolds of class S11]. *Vestn. Orenburgskogo gos. un-ta.* 2015, No. 9 (184), pp. 35-37.
11. Kirichenko V.F. *Differentsial'no-geometricheskie struktury na mnogoobraziyakh* [Differential-geometric structures on manifolds]. Ed. second, add. Odessa: Pechatnyi dom, 2013, 458 p.
12. Kirichenko V.F., Rustanov A.R. Differentsial'naya geometriya kvazisasakievvykh mnogoobrazii [Differential geometry of quasi Sasakian manifolds]. *Mat. sb.* 2002, No. 8, vol. 193, pp. 71-100.

УДК 517.977

DOI 10.23683/0321-3005-2017-4-1-37-43

О МНОЖЕСТВЕ РАЗРЕЗА В НЕКОТОРЫХ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ ЗАДАЧАХ, СВЯЗАННЫХ С ПЕРЕМЕЩЕНИЕМ В ПОЛЕ СКОРОСТЕЙ

© 2017 г. П.В. Николенко¹

¹Ростовский государственный экономический университет, Ростов-на-Дону, Россия

ON THE SET OF CUT IN SOME EXTREMAL PROBLEMS OF MOVEMENT IN THE VELOCITY FIELD

P. V. Nikolenko¹

¹Rostov State University of Economics, Rostov-on-Don, Russia

Николенко Петр Вадимович – кандидат физико-математических наук, доцент, кафедра фундаментальной и прикладной математики, Ростовский государственный экономический университет (РИНХ), ул. Б. Садовая, 33, г. Ростов-на-Дону, 344000, Россия, e-mail: petr.v.nikolenko@gmail.com

Petr V. Nikolenko - Candidate of Physics and Mathematics, Associate Professor, Department of Fundamental and Applied Mathematics, Rostov State University of Economics, B. Sadovaya St., 69, Rostov-on-Don, 344000, Russia, e-mail: petr.v.nikolenko@gmail.com

Рассматриваются управления, переводящие объект, находящийся в поле скоростей, заданном в фазовой плоскости, из одного заданного положения в другое. Для функционала качества, взятого из заданного семейства, требуется определить управление, минимизирующее значение функционала. Экстремали Понтрягина указанных задач имеют непрерывные управления. Если из какой-либо точки фазового пространства исходят две экстремали, ведущие в финальную точку, и значение функционала на экстремальных одинаково, то такую точку называют точкой разреза. Если экстремаль проходит через точку разреза, то она не оптимальна. Совокупность точек разреза образует гладкую кривую (или несколько кривых), которая, пересекая семейство экстремалей Понтрягина, отделяет от них неоптимальную часть. Построена конструкция для вычисления множества разреза. Приводится пример задачи, в которой реализована предложенная конструкция для вычисления множества разреза.

Приведены условия, которые обеспечат сходимость встречающихся итераций, а также условия отсутствия точек разреза в заданном множестве. Если векторное поле удовлетворяет указанным условиям, то для обследования полосы потребуется конечное число шагов, количество которых обусловлено размерами полосы, константами, описанными в условиях, и требуемой точностью вычислений.

Ключевые слова: поле скоростей, принцип максимума Понтрягина, множество разреза, экстремаль.

Controls are considered that transfer an object located in a velocity field specified in the phase plane from one preset position to another. For a quality functional taken from a given family, it is required to determine the control that minimizes the value of the functional. Pontryagin's extremals of these tasks have continuous control. If two extremals emanate from a point in the phase space leading to the final point and the value of the functional on the extremals are the same, then such a point is called the cut point. If the extremal passes through a cut point, then it is not optimal. A set of points of a cut form a smooth curve (or several curves) that intersects the Pontryagin family of extremals separating the non-optimal part from them. A construction is constructed to calculate the set of the cut. An example of a problem is presented in which the proposed construction for computing the set of a cut is implemented.

The conditions that ensure the convergence of the iterations encountered, as well as the conditions for the absence of cut points in a given set are given. If the vector field satisfies the specified conditions, then a finite number of steps will be required to survey the band, the number of which is due to the strip sizes, constants described in the conditions and the required accuracy of calculations.

Keywords: velocity field, Pontryagin maximum principle, set of cut, extremal.

Множество разреза

Пусть рассматривается задача теории управления

$$Y(x, u) = \int_{t_0}^{t_1} f(x, u) dt \rightarrow \min,$$

$$\dot{x} = \varphi(x, u), u \in K,$$

$$x(t_0) = x_0, x(t_1) = 0,$$

где управление u – кусочно-непрерывная функция со значениями в компакте K ; f, φ – гладкие функции; время $t_1 - t_0$ не фиксировано; $x_0 \in R^n$ является параметром, т.е. изучается вопрос о минимуме Y для всех x_0 , которые могут быть переведены каким-нибудь управлением u в начало координат. И пусть задача такова, что экстремали (x, u) принципа максимума Понтрягина имеет непрерывные управле-

ния. Если $(\hat{\mathbf{x}}, \hat{\mathbf{u}})$ – экстремаль, определенная на отрезке $[t_0, t_1]$, экстремаль $(\tilde{\mathbf{x}}, \tilde{\mathbf{u}})$ определена на отрезке $[\tilde{t}_0, \tilde{t}_1], \tilde{t}_0 \in (t_0, t_1), \tilde{\mathbf{x}}(\tilde{t}_0) = \hat{\mathbf{x}}(\tilde{t}_0), \hat{\mathbf{u}}(\tilde{t}_0) \neq \tilde{\mathbf{u}}(\tilde{t}_0)$

и $\int_{t_0}^{t_1} f(\hat{\mathbf{x}}, \hat{\mathbf{u}}) dt = \int_{\tilde{t}_0}^{\tilde{t}_1} f(\tilde{\mathbf{x}}, \tilde{\mathbf{u}}) dt$, то процесс $(\hat{\mathbf{x}}, \hat{\mathbf{u}})$ на отрезке $[t_1, t_0]$ не оптимален. Действительно, определим на отрезке $[t_0, \tilde{t}_1]$ управление \mathbf{u}_1 , полагая

$$\mathbf{u}_1(t) = \begin{cases} \hat{\mathbf{u}}(t), t \in [t_0, \tilde{t}_0] \\ \tilde{\mathbf{u}}(t), t \in [\tilde{t}_0, \tilde{t}_1] \end{cases}. \text{ Очевидно, что } \mathbf{x}_1(\tilde{t}_1) = 0 \text{ и}$$

$Y(\hat{\mathbf{x}}, \hat{\mathbf{u}}) = Y(\mathbf{x}_1, \mathbf{u}_1)$. Но процесс $(\mathbf{x}_1, \mathbf{u}_1)$ не оптимален, поскольку \mathbf{u}_1 имеет разрыв. Следовательно, $(\hat{\mathbf{x}}, \hat{\mathbf{u}})$ также не оптимален. Таким образом, точка $\hat{\mathbf{x}}(t_0)$ отделяет неоптимальную часть траектории $\hat{\mathbf{x}}$. Саму точку $\hat{\mathbf{x}}(t_0)$ называют точкой разреза, а совокупность всех таких точек – множеством разреза.

Ниже приводится конструкция для вычисления множества разреза в семействе экстремальных задач, связанных с перемещением в поле скоростей.

Экстремали Понтрягина в задачах о перемещении в поле скоростей

Рассмотрим перемещения в фазовом пространстве R^2 , подчиняющиеся закону $\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{v}(\mathbf{x}) + \mathbf{u}$. Здесь $\mathbf{v}: R^2 \rightarrow R^2$ – векторное поле класса C^2 ; $\mathbf{v}(\mathbf{0}) = \mathbf{0}$; управление \mathbf{u} – кусочно-непрерывная, непрерывная справа, с разрывами лишь первого рода вектор-функция такая, что $\|\mathbf{u}\| \leq 1$.

Рассмотрим управления, которые объект из положения x_0 переводят в начало координат. Пусть поставлен вопрос о выборе такого управления, которое минимизирует величину $\int (1 + \alpha \|\mathbf{u}\|^2) dt$. Таким образом, рассматриваются следующие задачи:

$$Y(\mathbf{x}, \mathbf{u}) = \int_{t_0}^0 (1 + \alpha \|\mathbf{u}(t)\|^2) dt \rightarrow \min, \quad (1)$$

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{v}(\mathbf{x}) + \mathbf{u}, \|\mathbf{u}\| \leq 1, \\ \mathbf{x}(t_0) = \mathbf{x}_0, \mathbf{x}(\mathbf{0}) = \mathbf{0}, \alpha \geq 0. \end{cases}$$

Здесь $t=0$ – момент завершения процесса; момент начала процесса t_0 не фиксирован.

При $\alpha=0$ получается задача быстрого действия. Если $\alpha>0$, то экономится не только время, но и энергия, затраченная на перемещение. Изменяя значение α , можем менять значимость указанных факторов. Для того чтобы выделить экстремали задачи (1), воспользуемся принципом максимума Понтрягина [1, с. 74].

Пусть (\mathbf{x}, \mathbf{u}) – оптимальный процесс. Составим функцию Понтрягина:

$$H = \psi_0(1 + \alpha \|\mathbf{u}\|^2) + \boldsymbol{\psi}(\mathbf{v}(\mathbf{x}) + \mathbf{u}).$$

Константа ψ_0 принимает значение либо нуль, либо минус единица. Согласно принципу максимума, для некоторого решения системы $\dot{\boldsymbol{\psi}} = -\boldsymbol{\psi}\mathbf{v}'(\mathbf{x}(t))$, функция H принимает максимальное значение по параметру \mathbf{u} (\mathbf{v}' – матрица Якоби отображения \mathbf{v}).

Рассмотрим случай $\psi_0 = 0$. Поскольку вектор $(\psi_0, \boldsymbol{\psi})$ нетривиален и $\dot{\boldsymbol{\psi}} = -\boldsymbol{\psi}\mathbf{v}'(\mathbf{x})$, то $\boldsymbol{\psi}$ не обращается в нуль. Следовательно, H принимает максимальное значение при $\mathbf{u} = \frac{\boldsymbol{\psi}}{\|\boldsymbol{\psi}\|}$. Так как в финальный момент $H = 0$ и $\mathbf{v}(\mathbf{0}) = \mathbf{0}$, получаем $\mathbf{u}(\mathbf{0}) = \mathbf{0}$, что противоречит условию необращения в нуль вектора $\boldsymbol{\psi}$. Таким образом, случай $\psi_0 = 0$ экстремалей не выявляет.

Рассмотрим случай $\psi_0 = -1$. Тогда

$$H = -\alpha \|\mathbf{u}\|^2 + \boldsymbol{\psi}\mathbf{u} + \boldsymbol{\psi}\mathbf{v} - 1 = -\alpha \|\mathbf{u}\|^2 + \|\boldsymbol{\psi}\| \|\mathbf{u}\| \cos \beta + \boldsymbol{\psi}\mathbf{v} - 1,$$

где β – угол между векторами $\boldsymbol{\psi}$ и \mathbf{u} .

Ясно, что максимальное по \mathbf{u} значение величина H будет достигать при $\beta = 0$. Запишем H в виде

$$H = -\alpha \left(\|\mathbf{u}\| - \frac{\|\boldsymbol{\psi}\|}{2\alpha} \right)^2 + \frac{\|\mathbf{u}\|^2}{4\alpha} + \boldsymbol{\psi}\mathbf{v} - 1. \text{ Отсюда следует,}$$

$$\text{что } u = \begin{cases} \frac{\boldsymbol{\psi}}{2\alpha}, \|\boldsymbol{\psi}\| \leq 2\alpha \\ \frac{\boldsymbol{\psi}}{\|\boldsymbol{\psi}\|}, \|\boldsymbol{\psi}\| > 2\alpha \end{cases}.$$

Удобно записать \mathbf{u} в виде $g(\boldsymbol{\psi})\boldsymbol{\psi}$, где

$$g(\boldsymbol{\psi}) = \begin{cases} \frac{1}{2\alpha}, \|\boldsymbol{\psi}\| \leq 2\alpha \\ \frac{1}{\|\boldsymbol{\psi}\|}, \|\boldsymbol{\psi}\| > 2\alpha \end{cases}. \text{ Используем условие}$$

$H = 0$ при $t = 0$. Поскольку $\mathbf{v}(\mathbf{0}) = \mathbf{0}$, имеем

$$\boldsymbol{\psi}^2(-\alpha g^2(\boldsymbol{\psi}) + g(\boldsymbol{\psi})) = 1.$$

Если $\|\boldsymbol{\psi}_0\| \leq 2\alpha$, то $\boldsymbol{\psi}^2 = 4\alpha$, $\|\boldsymbol{\psi}(0)\| = 2\sqrt{\alpha}$ при $\alpha \geq 1$ (при $\alpha < 1$ решений нет).

Если $\|\boldsymbol{\psi}_0\| \geq 2\alpha$, то

$$\Psi^2(0)\left(-\alpha \frac{1}{\|\Psi(0)\|^2} + \frac{1}{\|\Psi(0)\|}\right) = 1. \text{ Откуда}$$

$\|\Psi(0)\| = 1 + \alpha$ при $\alpha \leq 1$ (при $\alpha > 1$ решений нет).

Таким образом, экстремали задачи (1) определяются решением следующей задачи Коши с пятью компонентами фазового пространства и моментом завершения $t = 0$:

$$\begin{cases} \dot{x}_0 = 1 + \alpha g^2(\Psi)\Psi^2 \\ \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{v}(\mathbf{x}) + g(\Psi)\Psi \\ \dot{\Psi} = -\Psi \mathbf{v}'(\mathbf{x}) \\ x_0(0) = 0, \mathbf{x}(0) = (0,0), \Psi(0) = b(\cos s, \sin s) \end{cases}, \quad (2)$$

где $b = \begin{cases} 2\sqrt{\alpha}, \alpha \geq 1 \\ 1 + \alpha, 0 \leq \alpha < 1 \end{cases}$.

Решение задачи (2) определяет экстремаль задачи (1); $\mathbf{x} = (x_1, x_2)$ – координаты кривой; $\mathbf{u} = g(\Psi)\Psi$ – управление; $|x_0|$ – значение функционала.

Итерационные формулы для вычисления параметров точки разреза. Правильность

Введя обозначение $(\psi_1, \psi_2) = (x_3, x_4)$, придадим системе (2) единообразную форму записи

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}) \\ \mathbf{x}(0) = \Phi(s) \end{cases}, \quad (3)$$

где $\mathbf{f} : R^5 \rightarrow R^5$, $\Phi(s) = (0,0,0, b \cos(s), b \sin(s))$.

Рассмотрим отображения

$$\Psi(t, s) = (x_0(t, s), s),$$

$$\Phi(t, s) = (x_1(t, s), x_2(t, s)),$$

где $\mathbf{x}(t, s) = (x_0, \dots, x_4)(t, s)$ – решение задачи (3);

$\mathbf{g} = \Phi\Psi^{-1}$ (отображение Ψ^{-1} определено, поскольку

$\dot{x}_0 > 0$). Если

$$\mathbf{g}(\hat{x}_0, \tau) = \mathbf{g}(\hat{x}_0, s) \quad (\tau \neq s + 2\pi k, k \in Z), \quad (4)$$

то $\mathbf{g}(\hat{x}_0, \tau)$ – точка разреза.

Определение 1. Тройку чисел (x_0, τ, s) назовем параметрами неоднозначности, если выполняется равенство (4).

Для решения уравнения (4) при фиксированном x_0 будем пользоваться формулами $\mathbf{x}_{i+1} = \mathbf{x}_i - \mathbf{F}'^{-1}(\mathbf{x}_i)F(\mathbf{x}_i)$ метода Ньютона, либо

$\mathbf{x}_{i+1} = \mathbf{x}_i - \mathbf{F}'^{-1}(\mathbf{x}_0)F(\mathbf{x}_1)$ модифицированного метода Ньютона, решения уравнения $F(\mathbf{x}) = 0$. В случае если $F : R^2 \rightarrow R^2$ и $F(\tau, s) = \mathbf{f}(\tau) - \mathbf{f}(s)$, где $\mathbf{f} : R \rightarrow R^2$, формулы метода Ньютона имеют вид

$$\begin{pmatrix} \tau_{i+1} \\ s_{i+1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \tau_i \\ s_i \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} f'_1(\tau_i) & -f'_1(s_i) \\ f'_2(\tau_i) & -f'_2(s_i) \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} f_1(\tau_i) - f_1(s_i) \\ f_2(\tau_i) - f_2(s_i) \end{pmatrix}. \quad (5)$$

Для того чтобы применить формулу (5) к уравнению (4), решаем систему в вариациях

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}), \dot{\mathbf{y}} = \mathbf{f}'(\mathbf{x})\mathbf{y} \\ \mathbf{x}(0) = \Phi(s), \mathbf{y}(0) = \Phi'(s) \end{cases} \quad (6)$$

системы (3) на промежутке $[\hat{t}, 0](\hat{t} = \hat{t}(\hat{x}^0, s))$ так, что $x_0(\hat{t}, s) = \hat{x}^0$. В следующих формулах для сокращения записи в величинах $x_i(\hat{t}, s)$, $y_i(\hat{t}, s)$ значения аргументов либо не указываются, либо указывается значение второго аргумента.

$$\Psi' = \begin{pmatrix} f_0 & y_0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}, (\Psi')^{-1} = \begin{pmatrix} f_0^{-1} & -y_0 f_0^{-1} \\ 0 & 1 \end{pmatrix},$$

$$\mathbf{g}' = \Phi' \Psi'^{-1} = \begin{pmatrix} f_1 & y_1 \\ f_2 & y_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} f_0^{-1} & -y_0 f_0^{-1} \\ 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f_0^{-1} f_1 & -f_1 y_0 f_0^{-1} + y_1 \\ f_0^{-1} f_2 & -f_1 y_0 f_0^{-1} + y_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} g'_{11} & g'_{12} \\ g'_{21} & g'_{22} \end{pmatrix}. \quad (7)$$

Таким образом, формулы (5) для уравнения (4) имеют вид

$$\begin{pmatrix} \tau_{i+1} \\ s_{i+1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \tau_i \\ s_i \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} g'_{12}(\tau_i) & -g'_{12}(s_i) \\ g'_{22}(\tau_i) & -g'_{22}(s_i) \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} g_1(\tau_i) - g_1(s_i) \\ g_2(\tau_i) - g_2(s_i) \end{pmatrix}, \quad (8)$$

где g'_{ij} – компоненты матрицы \mathbf{g}' ; g_i – компоненты вектора \mathbf{g} .

Если в формуле (8) в матрице \mathbf{g}^{-1} значения аргументов (τ_0, s_0) оставить неизменными, то получим формулу модифицированного метода Ньютона [2].

Определение 2. Точку разреза $\mathbf{g}(x_0, \tau)$ назовем правильной, если в окрестности x_0 параметры (x_0, τ, s) образуют гладкую функцию параметра x_0 , причем $\tau'(x_0) \neq 0, s'(x_0) \neq 0$.

Докажем утверждение.

Теорема 1. Пусть $\mathbf{g}(\hat{x}_0, \hat{\tau})$ – точка разреза с параметрами $(\hat{x}_0, \hat{\tau}, \hat{s})$. Если определитель

$\Delta = \begin{vmatrix} g'_{11}(\hat{\tau}) - g'_{11}(\hat{s}) & -g'_{12}(\hat{s}) \\ g'_{21}(\hat{\tau}) - g'_{21}(\hat{s}) & -g'_{22}(\hat{s}) \end{vmatrix}$ отличен от нуля, то в некоторой

окрестности \hat{x}_0 параметры (x_0, τ, s) являются гладкой функцией x_0 . Если, кроме того, определители

$$\Delta_1 = \begin{vmatrix} g'_{11}(\hat{\tau}) - g'_{11}(\hat{s}) & g'_{12}(\hat{s}) \\ g'_{21}(\hat{\tau}) - g'_{21}(\hat{s}) & g'_{22}(\hat{s}) \end{vmatrix},$$

$$\Delta_2 = \begin{vmatrix} g'_{11}(\hat{\tau}) - g'_{11}(\hat{s}) & g'_{12}(\hat{\tau}) \\ g'_{21}(\hat{\tau}) - g'_{21}(\hat{s}) & g'_{22}(\hat{\tau}) \end{vmatrix}$$

отличны от нуля, то точка разреза $\mathbf{g}(\hat{x}_0, \hat{\tau})$ правильная, причем $\tau'(\hat{x}_0) = \frac{\Delta_1}{\Delta}$, $s'(\hat{x}_0) = \frac{\Delta_2}{\Delta}$.

Доказательство. Рассмотрим отображение $\mathbf{F}: R^3 \rightarrow R^3$, заданное формулой

$$\mathbf{F}(x_0, \tau, s) = (x_0 - \hat{x}_0, \mathbf{g}(x_0, \tau) - \mathbf{g}(x_0, s)).$$

Оно непрерывно дифференцируемо.

$$\mathbf{F}'(\hat{x}_0, \hat{\tau}, \hat{s}) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ g'_{11}(\hat{\tau}) - g'_{11}(\hat{s}) & g'_{12}(\hat{\tau}) & g'_{12}(\hat{s}) \\ g'_{21}(\hat{\tau}) - g'_{21}(\hat{s}) & g'_{22}(\hat{\tau}) & g'_{22}(\hat{s}) \end{pmatrix}.$$

Поскольку определитель матрицы \mathbf{F}' отличен от нуля, отображение \mathbf{F} обратимо в некоторой окрестности точки $(\hat{x}_0, \hat{\tau}, \hat{s})$. Точки вида $\mathbf{F}^{-1}(t, 0, 0)$ являются параметрами точек разреза. Это доказывает первое утверждение теоремы.

Производная параметров точки разреза в точке

\hat{x}_0 есть вектор $(\mathbf{F}')^{-1} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$. Этот вектор есть решение системы $\mathbf{F}'\mathbf{X} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$. По формулам Крамера получаем $\tau'(\hat{x}_0) = \frac{\Delta_1}{\Delta}$, $s'(\hat{x}_0) = \frac{\Delta_2}{\Delta}$. Теорема доказана.

Отметим, что компонента f_0 векторного поля \mathbf{f} из формулы (3) заключена в границах $[1, 1 + \alpha]$. Рассмотрим векторное поле $\tilde{\mathbf{f}}(x) = f_0^{-1}(x)\mathbf{f}(x)$. Поскольку поля $\tilde{\mathbf{f}}$ и \mathbf{f} коллинеарны, траектории определяемых ими фазовых кривых одинаковы. Символом $\mathbf{X}(t, s)$ будем обозначать компоненты с номерами 1 и 2 вектор-функции $\tilde{\mathbf{X}}(t, s)$, являющейся

решением задачи Коши
$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = \tilde{\mathbf{f}}(\mathbf{x}) \\ \mathbf{x}(0) = \boldsymbol{\varphi}(s) \end{cases}.$$

Если

$$\mathbf{X}(t, \tau) = \mathbf{X}(t, s), \quad s \neq \tau + 2\pi k, \quad (9)$$

то $\mathbf{X}(t, \tau)$ – точка разреза. Чтобы записать формулы, аналогичные (8), для уравнения (9), решаем систему в вариациях

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = \tilde{\mathbf{f}}(\mathbf{x}), & \dot{\mathbf{y}} = \tilde{\mathbf{f}}'(\mathbf{x})\mathbf{y} \\ \mathbf{x}(0) = \boldsymbol{\varphi}(s) & \mathbf{y}(0) = \boldsymbol{\varphi}'(s) \end{cases}. \quad (10)$$

Получаем

$$\begin{pmatrix} \tau_{i+1} \\ s_{i+1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \tau_i \\ s_i \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} y_1(\tau_i) & -y_1(s_i) \\ y_2(\tau_i) & -y_2(s_i) \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} x_1(\tau_i) - x_1(s_i) \\ x_2(\tau_i) - x_2(s_i) \end{pmatrix}. \quad (11)$$

Как и в формуле (8), значение первого аргумента не указано.

Организация вычислений, сходимость итерационного процесса

Сделаем следующее замечание. Пусть по результатам вычислений для $t_1 < t$ параметры неоднозначности τ и s тройки (t, τ, s) заменяют множество A . Тогда для $t \leq t_1$ нас интересуют лишь такие решения уравнения (9), для которых τ и s не принадлежат A .

Будем предполагать поле ν таким, что известна функция $C_2(t)$, для которой $\|\mathbf{X}(t, s)\| \leq C_2(t)$ для всякого решения задачи (10).

Например, легко видеть, что для поля $\nu(x_1, x_2) = (x_2^2, 0)$ за функцию $C_2(t)$ можно принять t^2 в m -норме $\|\mathbf{x}\| = \max\{|x_1|, |x_2|\}$; для поля $\nu(x_1, x_2) = (0, x_2^2)$ такой функции не существует, так как за конечное время точка может переместиться на бесконечность. При сделанных предположениях относительно поля ν можно записать аналогичные неравенства для производных первого и второго порядка функции $\mathbf{X}(t, s)$, поскольку указанные производные являются решениями уравнения в вариациях (10) либо уравнения в вариациях, соответствующих системе (10).

Далее нам потребуется следующая

Лемма 1. Пусть X, Y – банаховы пространства, $U \subset X$, $f: U \rightarrow Y$ дважды дифференцируемо по Фреше, причем $\|f'^{-1}(\hat{x})\|^{-1} = l$, $\|f''\| \leq C$.

Если $r \leq \frac{l}{c}$, то:

а) f инъективно в шаре $B(\hat{x}, r)$, кроме того, $f'(x)$ обратим, если $x \in B(\hat{x}, r)$;

б) образ указанного шара содержит шар $B(f(\hat{x}), r(l - cr))$.

Доказательство. Пусть $x_1, x_2 \in B(\hat{x}, r)$, по теореме о среднем [1, с. 53]

$$\begin{aligned} & \|f(x_1) - f(x_2) - f'(\hat{x})(x_1 - x_2)\| = \\ & = \|(f - f'(\hat{x}))(x_1) - (f - f'(\hat{x}))(x_2)\| \leq \\ & \leq \max_{c \in [x_1, x_2]} \|f'(c) - f'(\hat{x})\| \|x_1 - x_2\| \leq cr \|x_1 - x_2\|. \end{aligned}$$

С другой стороны, $\|f'(\hat{x})(x_1 - x_2)\| \geq l \|x_1 - x_2\|$,

поэтому если $cr < l$, то $f(x_1) \neq f(x_2)$.

Если оператор A обратим и Δ такой, что $\|A^{-1}\Delta\| < 1$, то $A + \Delta$ обратим, поэтому

$f'(x) = f'(\hat{x}) + (f'(x) - f'(\hat{x}))$ обратим, если

$\|f'(\hat{x})^{-1}(f'(x) - f'(\hat{x}))\| < 1$, но

$\|f'(\hat{x})^{-1}(f'(x) - f'(\hat{x}))\| \leq \frac{1}{l} Cr$. Что доказывает а).

Докажем б). В силу неравенства $\|f'(\hat{x})x\| \geq l \|x\|$, отображение $f'(\hat{x})$ накрывает c константой l образ любого шара радиуса a содержит шар радиуса la :

$$f'(\hat{x})(B(x, a)) \supset B(f'(\hat{x})x, la).$$

В силу приведенного неравенства отображение $f(x) - f'(\hat{x})x$ - липшицево с константой Cr . По теореме Милютина [3, с. 221] отображение

$$f = f'(\hat{x}) + (f - f'(\hat{x}))$$

накрывает c константой $l - Cr$. Лемма доказана.

Далее символы D_i, D_{ik} обозначают указанные частные производные.

Лемма 2. Пусть в точке (t_1, s_1) ($s_1 \notin A$)

выполняется неравенство $\|(\mathbf{X}')^{-1}(t_1, s_1)\|^{-1} \leq l$,

$\sum_k |D_{ik} x_j| \leq C$ (для тех значений (t, s) , которые рассматриваются). Пусть $\delta = \frac{l}{C}$. Тогда δ -окрестность точки (t_1, s_1, s_1) не содержит параметров

неоднозначности.

Доказательство. Поскольку константа C служит оценкой для второй производной отображения $(t, s) \rightarrow \mathbf{x}(t, s)$ в силу леммы 2, указанное отображение инъективно в δ -окрестности точки (t_1, s_1) , т.е. δ -окрестность точки (t_1, s_1, s_1) не содержит параметров неоднозначности. Лемма доказана.

Рассмотрим отображение $\mathbf{F}(\tau, s) = \mathbf{X}(t_1, \tau) - \mathbf{X}(t_1, s)$ (первый аргумент фиксирован). Тогда

$$\mathbf{F}'(\tau, s) = \begin{pmatrix} y_1(\tau) & -y_1(s) \\ y_2(\tau) & -y_2(s) \end{pmatrix} \text{ (как и в формуле$$

(11), обозначение параметра времени опущено). Для 2-й производной выполняется оценка $\|\mathbf{F}''\| \leq 2C$ (C - константа из леммы 2).

Лемма 3. Пусть в точке (\hat{t}, \hat{s}) $\|\mathbf{F}'^{-1}\| = \frac{1}{l}$. Если

$\|\mathbf{F}(\hat{t}, \hat{s})\| < \frac{l^2}{8C}$, то при $\delta = \frac{l}{4C}$ \mathbf{F} инъективно в δ -окрестности (\hat{t}, \hat{s}) , итерации (11) сходятся (при

$(\tau_0, s_0) = (\hat{t}, \hat{s})$) к решению (τ_*, s_*) уравнения $\mathbf{F} = \mathbf{0}$, причем

$$2\|(\tau_0, s_0) - (\tau_1, s_1)\| > \|(\tau_0, s_0) - (\tau_*, s_*)\|.$$

Доказательство. Согласно лемме 1, \mathbf{F} инъективно в δ -окрестности (\hat{t}, \hat{s}) при $\delta = \frac{1}{4C} \leq \frac{1}{2C}$ и образ окрестности содержит шар

$$B(\mathbf{F}(\hat{t}, \hat{s}), \delta(l - 2C\delta)),$$

$$\delta(l - 2C\delta) = \frac{l}{4C}(l - 2C \frac{l}{4C}) = \frac{l^2}{8C}.$$

Поскольку выполняются условия

$$A_0 = \|\mathbf{F}'^{-1}\| = \frac{1}{B}, \quad \|\mathbf{F}''\| \leq 2C = C_0,$$

$$\|\mathbf{F}'^{-1}(\hat{t}, \hat{s})\mathbf{F}(\hat{t}, \hat{s})\| \leq \frac{1}{l} \frac{l^2}{8C} = \frac{l}{8C} = B_0,$$

то $A_0 B_0 C_0 \leq \frac{1}{4}$, что, согласно известной теореме [4,

с. 460], обеспечивает сходимость итераций. Лемма доказана.

Рассмотрим также отображение $\Phi(t, \tau, s) = (t - t_1, \mathbf{X}(t, \tau) - \mathbf{X}(t, s))$. Для второй производной Φ' выполняется оценка $\|\Phi''\| < 2C$.

Пусть $\hat{t}, \hat{s} \notin A, \hat{t} = t_1$ и $l_1 = \|\Phi'^{-1}(\hat{t}, \hat{t}, \hat{s})\|^{-1}$.

Теорема 2. Если $\|\Phi(\hat{t}, \hat{t}, \hat{s})\| < \frac{l_1^2}{8C}$, $\delta = \frac{l_1}{4C}$,

$\delta_1 = \frac{l_1^2}{8C}$, то для t таких, что $|t - \hat{t}| < \delta_1$, δ -окрестность точки $(\hat{t}, \hat{t}, \hat{s})$ содержит параметры неоднозначности, которые образуют гладкую кривую параметра t .

Доказательство. Согласно лемме 2, отображение Φ инъективно в δ -окрестности точки $(\hat{t}, \hat{\tau}, \hat{s})$ и образ этой δ -окрестности содержит δ_1 -окрестность точки $\Phi(\hat{t}, \hat{\tau}, \hat{s})$. По теореме об обратной функции параметры неоднозначности образуют кривую $\Phi^{-1}(t, 0, 0)$ ($|t| < \delta_1$). Теорема доказана.

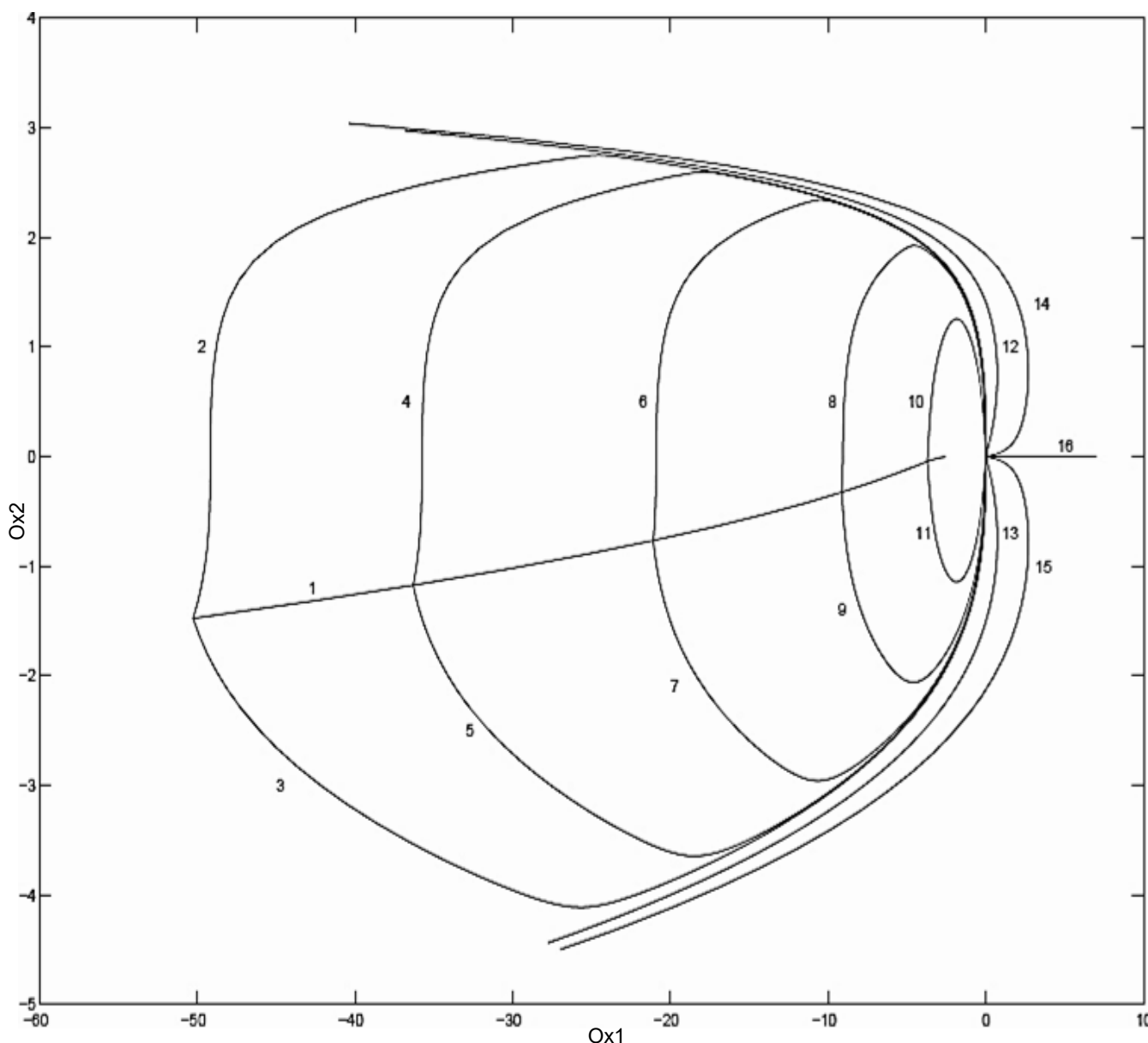
Лемма 4. Пусть константа C_1 такова, что $\|\Phi'\| < C_1$. Если $\|\Phi(\hat{t}, \hat{\tau}, \hat{s})\| = b \geq \frac{l_1^2}{8C}$, $\delta < \frac{b}{C_1}$, то δ -окрестность точки $(\hat{t}, \hat{\tau}, \hat{s})$ не содержит параметров неоднозначности.

Доказательство. Согласно теореме о среднем, $\Phi(B((\hat{t}, \hat{\tau}, \hat{s}), \frac{b}{C_1})) \subset B(\Phi(\hat{t}, \hat{\tau}, \hat{s}), b)$, но последняя окрестность не содержит начало координат. Лемма доказана.

Пример. Рассмотренная конструкция реализована в задаче о наискорейшем перемещении в начало координат в поле скоростей, заданном формулой

$$\mathbf{v}(x_1, x_2) = \begin{cases} (x_2^2, 0), & x_2 < 0 \\ (x_2^2 + 0, 1x_2^6, 0), & x_2 \geq 0 \end{cases}$$

На рисунке изображена часть множества разреза (обозначена цифрой 1).



Часть множества разреза / Part of the plurality of slit

Перемещение от точек построенной части кривой 1 в начало координат по экстремали вида 2–11 может занять время от 2,5 до 7 единиц. Вообще же, как следует из результатов работы [4], множество разреза берет своё начало в точке $(-\frac{\pi}{2}, 0)$. Экстремали вида 2–11 отвечает финальное условие $(0, 0, \cos \phi, \sin \phi)$, где $-\frac{\pi}{2} < \phi < \frac{\pi}{2}$.

Для экстремалей вида 12–16 $|\phi| > \frac{\pi}{2}$. В таблице приводятся время и значение ϕ для изображённой части экстремалей.

Время и значение функции ϕ
 / Time and the value of the function ϕ

№	Время t	Значение ϕ
1	Множество разреза	
2	[0; -7]	-1,55
3	[0; -7]	1,51
4	[0; -6,4]	-1,54
5	[0; -6,4]	1,49
6	[0; -5,5]	-1,52
7	[0; -5,5]	1,45
8	[0; -4,3]	-1,44
9	[0; -4,3]	1,34
10	[0; -3,1]	-1,05
11	[0; -3,1]	0,98
12	[0; -3,5]	–
13	[0; -5]	–
14	[0; -5,5]	–
15	[0; -7]	–
16	[0; -7]	–

Заключение

Предложенная конструкция позволяет определять параметры точек разреза. Если в исследуемых точках $(\hat{t}, \hat{\tau}, \hat{s})$ константа l_1 окажется отделенной от нуля числом $l_0 > 0$ и $l_1 > l_0$, то для исследования полосы $\left\{ (t, \tau, s) : |t - t_1| < \frac{l_0^2}{8C}, \tau, s \in A \right\}$ потребуется конечное число шагов, количество которых зависит от констант l_0, C_1, C .

Автор благодарен А.В. Дмитруку за критические замечания и ценные советы.

Литература

1. Галеев Э.М., Зеликин М.И., Конягин С.В. [и др.]. Оптимальное управление. М. : МЦНМО, 2008. 320 с.
2. Николенко П.В. О наискорейших перемещениях в поле скоростей // Диф. уравнения. 2011. Т. 47, № 5. С. 736–743.
3. Николенко П.В. Множество неоднозначности и задача о наискорейших перемещениях в поле скоростей // Диф. уравнения. 2014. Т. 50, № 3. С. 376–384.
4. Демидович Б.П., Марон И.А. Основы вычислительной математики. М. : Наука, 1967. 659 с.

References

1. Galeev E.M., Zelikin M.I., Konyagin S.V. [i dr.]. *Optimal'noe upravlenie* [Optimal control]. Moscow: MTsNMO, 2008, 320 p.
2. Nikolenko P.V. O naiskoreishikh peremeshcheniyakh v pole skorostei [On the steepest displacements in the velocity field]. *Dif. uravneniya*. 2011, vol. 47, No. 5, pp. 736-743.
3. Nikolenko P.V. Mnozhestvo neodnoznachnosti i zadacha o naiskoreishikh peremeshcheniyakh v pole skorostei [The set of ambiguities and the problem of steepest displacements in the velocity field]. *Dif. uravneniya*. 2014, vol. 50, No. 3, pp. 376-384.
4. Demidovich B.P., Maron I.A. *Osnovy vychislitel'noi matematiki* [Fundamentals of computational mathematics]. Moscow: Nauka, 1967, 659 p.

О ВЫЧИСЛЕНИИ КОЭФФИЦИЕНТА ТУРБУЛЕНТНОГО ПЕРЕНОСА В ЗАДАЧЕ О СЕДИМЕНТАЦИИ ПРИМЕСИ*

© 2017 г. Н.М. Полякова¹, Е.В. Ширяева¹

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

ON THE CALCULATION OF THE COEFFICIENT OF TURBULENT TRANSFER IN THE PROBLEM OF IMPURITIES SEDIMENTATION

N.M. Polyakova¹, E.V. Shiryayeva¹

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

Полякова Наталья Михайловна – ассистент, кафедра вычислительной математики и математической физики, Институт математики, механики и компьютерных наук им. И.И. Воровича, Южный федеральный университет, ул. Мильчакова, 8а, г. Ростов-на-Дону, 344090, Россия, e-mail: zhuk_nata@mail.ru

Natalya M. Polyakova - Assistant, Department of Computational Mathematics and Mathematical Physics, Vorovich Institute of Mathematics, Mechanics and Computer Sciences, Southern Federal University, Milchakova St., 8a, Rostov-on-Don, 344090, Russia, e-mail: zhuk_nata@mail.ru

Ширяева Елена Владимировна – кандидат физико-математических наук, доцент, кафедра вычислительной математики и математической физики, Институт математики, механики и компьютерных наук им. И.И. Воровича, Южный федеральный университет, ул. Мильчакова, 8а, г. Ростов-на-Дону, 344090, Россия, e-mail: shir@math.sfedu.ru

Elena V. Shiryayeva - Candidate of Physics and Mathematics, Associate Professor, Department of Computational Mathematics and Mathematical Physics, Vorovich Institute of Mathematics, Mechanics and Computer Sciences, Southern Federal University, Milchakova St., 8a, Rostov-on-Don, 344090, Russia, e-mail: shir@math.sfedu.ru

Рассмотрена задача о седиментации примеси в сплошной среде, состоящей из двух слоев. Верхний заполнен жидкостью и взвешенной примесью. Нижний представляет собой многофазную среду, состоящую из жидкости и осадочной примеси. В исходной трехмерной модели считается, что течение в верхнем слое носит турбулентный характер. При помощи процедуры осреднения по толщине верхнего слоя указанная модель редуцируется в задачу для двухмерных уравнений. В исходной модели зависимости коэффициентов турбулентной вязкости и диффузии от вертикальной координаты выбраны в виде параболы и обращаются в нуль на свободной границе верхнего слоя и на нижней границе нижнего слоя. В этом случае равновесный вертикальный профиль скорости течения жидкости является логарифмическим, а равновесный вертикальный профиль концентрации представляет собой хорошо известный в гидравлике профиль Роуза – некоторую степень от дробно-линейной функции вертикальной координаты. При осреднении возникают коэффициенты турбулентного переноса, которые сохраняют информацию о трехмерной модели и зависят от параметров задачи. При использовании численных алгоритмов, например, конечно-разностных методов, на каждом временном шаге эволюционной задачи приходится проводить трудоемкие вычисления коэффициентов турбулентного переноса. Для уменьшения объема вычислений и, как следствие, ускорения расчетов предлагаются аналитические и асимптотические формулы, варианты аппроксимационных соотношений, справедливые в широком интервале изменения параметров. Вычислительный эксперимент показал, что использование аппроксимационных формул позволяет значительно ускорить проведение расчетов практически без существенной потери точности.

Ключевые слова: седиментация, уравнения переноса, турбулентная вязкость, турбулентная диффузия, равновесные профили скорости и концентрации, профиль Роуза.

The problem of sedimentation of impurity in a continuous medium consisting of two layers is considered. The top layer is filled with liquid and the suspended impurity. The bottom layer is a multiphase medium consisting of fluid and sediment impurity. It is considered that in the original three-dimensional model the flow in the upper layer is turbulent in nature. Using a procedure of averaging over the thickness of the upper layer the model is reduced to the problem for two-dimensional equations. In the original model the dependences of the coefficients of turbulent viscosity and diffusion of the vertical coordinates are chosen as a parabola and vanish on the free boundary of the upper layer and the lower boundary of the lower layer. In this case the equilibrium of the vertical velocity profile of the fluid flow is logarithmic, and the equilibrium of the vertical concentration profile is a well-known hydraulic

* Работа поддержана базовой частью проекта № 1.5169.2017/8.9 Министерства образования и науки Российской Федерации, Южный федеральный университет.

Rose profile - some degree from the fractional-linear functions of the vertical coordinate. While averaging the coefficients of turbulent transfer occur, which store information about the three-dimensional model and depend on the parameters of the problem. When using numerical algorithms, e.g., finite-difference methods, at each time step of the evolutionary tasks it is necessary to carry out time-consuming calculation of the coefficients of turbulent transfer. To reduce the amount of calculations and, consequently, speed up calculations, analytic formulas, asymptotic formulas, and approximation ratios of the options, fair in a wide range of parameter changes, are proposed. The numerical experiment showed that the use of approximation formulas can significantly speed up calculations almost without significant loss of accuracy.

Keywords: *sedimentation, transport equations, turbulent viscosity, turbulent diffusion, equilibrium profiles of velocity and concentration, Rouse profile.*

Введение

В гидрологии важное значение имеет задача о распределении взвешенной примеси в потоках жидкости, например, в русловых потоках рек, внутренних течениях в морях и океанах. Достаточно часто для решения такой проблемы используют процедуру осреднения по толщине слоя жидкости уравнений переноса примеси. При этом возникает незамкнутое уравнение, для замыкания которого требуется вычисление коэффициента γ_v , связывающего между собой среднее от произведения вертикальных профилей скорости и концентрации с произведением их средних. В качестве вертикальных профилей достаточно часто выбираются некоторые «равновесные» решения исходных уравнений, описывающих перенос примеси и движение жидкости, которые сильно связаны с выбором зависимости коэффициентов турбулентной вязкости и диффузии от вертикальной координаты. В указанной постановке задача довольно хорошо известна в гидрологии и рассмотрена в большом количестве работ, см., например, [1–4] и цитируемую там литературу, где также предлагаются различные способы (асимптотические, аппроксимационные, полуэмпирические и т. п.) для определения или вычисления коэффициента γ_v , иногда называемого F-фактором.

В настоящей работе для сплошной среды, состоящей из двух слоев, верхний из которых заполнен жидкостью и взвешенной примесью, а нижний представляет собой многофазную среду, состоящую из жидкости и осадочной примеси, зависимости коэффициентов турбулентной вязкости и диффузии от вертикальной координаты выбраны в виде параболы и считаются обращающимися в нуль на верхней (свободной) границе верхнего слоя и на нижней границе нижнего слоя. В этом случае равновесный вертикальный профиль скорости течения жидкости является логарифмическим, а равновесный вертикальный профиль концентрации представляет собой хорошо известный в гидравлике профиль Роуза – некоторую степень от дробно-линейной функции вертикальной координаты.

В случае указанных вертикальных профилей построены аналитические формулы для коэффициента γ_v и приведены аппроксимационные формулы, достаточно хорошо приближающие коэффициент γ_v в широком интервале параметров задачи. Помимо этого, в работе частично исправлены неточности и опечатки работ [3, 5].

Гидростатическое приближение

Для описания переноса взвешенной примеси в турбулентном потоке жидкости используем уравнения переноса примеси, неразрывности и движения жидкости в одном из вариантов гидростатического приближения [4, 6] в безразмерных переменных.

Уравнение неразрывности

$$\operatorname{div} \mathbf{V} = 0. \quad (1)$$

Уравнение движения (в горизонтальном направлении)

$$\mathbf{V}_t + \mathbf{V} \cdot \nabla \mathbf{V} = -\frac{1}{\rho} \nabla P + (K_m \mathbf{V}_z)_z. \quad (2)$$

Уравнение гидростатики

$$P_z = -\rho g. \quad (3)$$

Уравнение переноса примеси

$$C_t + \mathbf{V} \cdot \nabla C = -Q_z, \quad (4)$$

$$Q = -K_s C_z - w_s C. \quad (5)$$

Здесь $\mathbf{V}=(U,W)$ – скорость сплошной среды в целом; $\mathbf{U}=(U,V)$ – горизонтальная скорость; W – вертикальная скорость; P – давление; ρ – плотность сплошной среды (постоянная); C – массовая концентрация взвешенной примеси; Q – плотность локального (относительно среды в целом) потока концентрации взвешенной примеси (в направлении z); w_s – скорость седиментации взвешенной примеси; K_m – коэффициент кинематической турбулентной вязкости; K_s – коэффициент турбулентной диффузии; g – ускорение силы тяжести, действующей в направлении, противоположном оси z .

Предполагаем, что область состоит из слоев Λ^k , Λ^{k-1} . Верхний слой считаем заполненным жидкостью и взвешенной примесью, нижний – жидкостью и осадочной примесью (рис. 1).

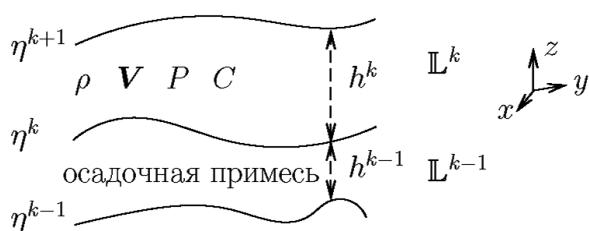


Рис. 1. Расположение слоев сплошной среды / Fig. 1. The arrangement of the layers of a continuous medium

Слои Λ^k и Λ^{k-1} имеют границы $\eta^{k+1}(\mathbf{x}, t)$,

$$\eta^k(\mathbf{x}, t), \eta^{k-1}(\mathbf{x}, t),$$

$$\Lambda^k = \{(\mathbf{x}, z) : \eta^k \leq z \leq \eta^{k+1}\},$$

$$\Lambda^{k-1} = \{(\mathbf{x}, z) : \eta^{k-1} \leq z \leq \eta^k\},$$

$$h^k = \eta^{k+1} - \eta^k, \quad h^{k-1} = \eta^k - \eta^{k-1}.$$

Здесь $h^k(x, t)$, $h^{k-1}(x, t)$ – толщина слоев сплошной среды, $\mathbf{x} = (x, y)$.

Хотя уравнения записаны в безразмерных переменных, выбранный способ перехода к безразмерным величинам позволяет при желании считать все величины размерными. В частности, в безразмерных уравнениях можно было бы полагать $\rho=1$, сокращая тем самым количество параметров, однако в уравнениях (2), (3) плотность ρ сохранена.

Уравнения, описывающие поведение многофазной сплошной среды в слое Λ^{k-1} , отличаются от уравнений (1)–(5) и не приведены отчасти по причине их неиспользования в данной работе, а отчасти ввиду того, что потребовались бы достаточно громоздкие, хотя и хорошо известные, пояснения их структуры.

Равновесные вертикальные профили

Зависимость коэффициента турбулентной вязкости от вертикальной координаты z возьмем в виде (см., например, [4, 7])

$$K_m^k = \kappa u_* \frac{(z - \eta^{k+1})(\eta^{k-1} - z)}{h^{k-1} + h^k}, \quad \eta^k \leq z \leq \eta^{k+1}, \quad (6)$$

где u_* – динамическая скорость потока жидкости; κ – постоянная Кармана, обычно $\kappa = 0,41$.

Используя аналогию Рейнольдса, которая означает совпадение, по крайней мере подобие, коэффициентов турбулентной вязкости и диффузии, потребуем, чтобы $K_C(z) = K_m^k(z)$.

Здесь и далее указание аргументов функций не означает, что такие функции зависят лишь от этих аргументов. Например, в действительности

$K_m^k = K_m^k(x, z, t)$ ввиду того, что η^{k-1} , η^k , η^{k+1} зависят от (x, t) , но для сокращения записи указано лишь $K_m^k(z)$.

Обратим также внимание на то, что коэффициенты турбулентной вязкости и диффузии заданы на интервале $[\eta^k, \eta^{k+1}]$, т.е. в области, занятой взвешенной примесью, хотя в формулах присутствует величина η^{k-1} , являющаяся характеристикой слоя Λ^{k-1} , в котором содержится осадочная примесь. Причины такого кажущегося несоответствия объяснены ниже.

Равновесный вертикальный профиль скорости

Для определения равновесного профиля скорости рассмотрим уравнение (2), полагая $\mathbf{U} = \mathbf{U}(z)$,

$W = 0$, т.е. уравнение $-\frac{1}{\rho} \nabla_x P + (K_m \mathbf{U}_z)_z = 0$, где

$$\nabla_x = (\partial_x, \partial_y).$$

Потребуем постоянства градиента давления в горизонтальном направлении и отсутствия касательных напряжений на границе $z = \eta^{k+1}(x, t)$

$$\nabla_x P = \text{const}, \quad (K_m \mathbf{U}_z)|_{z=\eta^{k+1}} = 0.$$

В этом случае вертикальный профиль горизонтальной скорости \mathbf{U} определяется соотношением

$$\mathbf{U} \approx \psi(z) = \frac{\ln(q\theta)}{h^{k-1}(1 - \ln q - p + p \ln(pq))}, \quad (7)$$

где

$$z = \eta^{k-1} + h^{k-1}\theta, \quad p = \frac{h^{k-1} + h^k}{h^{k-1}}, \quad (8)$$

$$q = \frac{h^{k-1}}{z_0}, \quad 1 < p < \infty, \quad pq > 1.$$

Здесь z_0 – параметр шероховатости.

Формула (7) соответствует обычному логарифмическому профилю течения жидкости при турбулентном потоке. Параметр шероховатости z_0 задает поверхность, на которой скорость обращается в нуль $z = \eta^{k-1}(x, t) + z_0$, $z_0 \leq h^{k-1}$, $\psi(z)|_{z=\eta^{k-1}+z_0} = 0$.

Введение в рассмотрение параметра z_0 обычно для теории турбулентных потоков и связано с тем, что, например, в случае турбулентной вязкости, выбранной в виде (6), на поверхности $z = \eta^{k-1}(x, t)$ вертикальный профиль скорости (7) обращается в бесконечность. Для устранения сингулярности скорости и вводится параметр z_0 . По этой же причине рассматривается и двухслойная модель – слой Λ^{k-1}

имитирует шероховатость, и, в принципе, можно было бы считать, что $z_0 = h^{k-1}$. Заметим, что если вместо коэффициента турбулентной диффузии (6) выбрать коэффициент, обращающийся в нуль при $z = \eta^k(x, t)$, скорость имела бы сингулярность на поверхности $z = \eta^k(x, t)$, и вновь потребовалось бы вводить параметр шероховатости.

Равновесный вертикальный профиль концентрации

Для определения равновесного профиля концентрации рассмотрим уравнения (4), (5), полагая $\mathbf{U} = \mathbf{U}(z)$, $W = 0$, $C = C(z)$.

Потребуем отсутствия локального потока примеси на свободной границе слоя $z = \eta^k(x, t)$
 $Q|_{z=\eta^k} \equiv (-K_s C_z - w_s C)|_{z=\eta^k} = 0$.

Интегрирование уравнений (4), (5) с учетом краевого условия и сделанных предположений приводит к уравнению $K_s C_z + w_s C = 0$, решение которого с точностью до постоянной записывается в виде

$$C(z) \approx \phi(x, z, t) = \frac{\phi_0(x, z, t)}{\eta^{k+1}}, \quad (9)$$

$$\int_{\eta^k}^{\eta^{k+1}} \phi_0(x, z', t) dz'$$

$$\phi_0(x, z, t) = \left(\frac{\eta^{k+1} - z}{z - \eta^{k-1}} \right)^Z, \quad Z = \frac{w_s}{\kappa u_*},$$

где Z – параметр взвешивания.

Решение приведено для случая $Z = \text{const}$ (или $w_c = \text{const}$) и соответствует известному профилю Роуза. На рис. 2 показана функция $\phi_0(z)$ при различных значениях параметра Z .

Осреднение уравнений переноса примеси

Для осреднения уравнений (4) введем средние по толщине слоя величины

$$(\mathbf{u}, c)(\mathbf{x}, t) = \frac{1}{h^k} \int_{\eta^k}^{\eta^{k+1}} (\mathbf{U}, C)(\mathbf{x}, z, t) dz. \quad (10)$$

Интегрируя уравнение (4) по толщине слоя, с учетом уравнения неразрывности (1) и условий материальности границ (границы движутся вместе со сплошной средой)

$$\eta_t^{k+1} + \mathbf{U} \cdot \nabla_x \eta^{k+1} = W, \quad z = \eta^{k+1},$$

$$\eta_t^k + \mathbf{U} \cdot \nabla_x \eta^k = W, \quad z = \eta^{k+1},$$

после несложных преобразований получим

$$(h^k c)_t + \text{div}_x \int_{\eta^k}^{\eta^{k+1}} C \mathbf{U} dz = Q|_{z=\eta^k}. \quad (11)$$

Уравнения являются незамкнутыми, и для их замыкания используем соотношения

$$\mathbf{U} = \mathbf{u} h^k \psi(z), \quad C = h^k c \phi(z), \quad (12)$$

считая выполненными условия нормировки

$$\int_{\eta^k(x, t)}^{\eta^{k+1}(x, t)} \phi(x, z, t) dz = 1, \quad (13)$$

$$\int_{\eta^k(x, t)}^{\eta^{k+1}(x, t)} \psi(x, z, t) dz = 1.$$

Обратим внимание на то, что нормировка требуется для согласования между собой формул (10), (12).

Подстановка (12), (13) в (11) приводит к замкнутым уравнениям

$$(h^k c)_t + \text{div}_x (\gamma_v h^k c \mathbf{u}) = Q|_{z=\eta^k}, \quad (14)$$

где

$$\gamma_v = h^k \int_{\eta^k}^{\eta^{k+1}} \psi(z) \phi(z) dz. \quad (15)$$

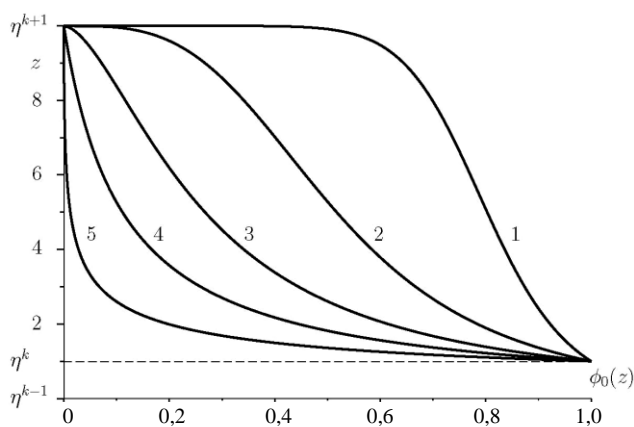


Рис. 2. Вертикальный профиль плотности взвешенной примеси. Функция $\phi_0(z)$ для различных Z : 1 – $Z=0,1$; 2 – $Z=0,3$; 3 – $Z=0,6$; 4 – $Z=1,0$; 5 – $Z=2,0$; $\eta^{k-1} = 0$, $\eta^k = 1$, $\eta^{k+1} = 10$, $h^{k-1} = 1$, $h^k = 9$ / Fig. 2. Vertical density profile of suspended impurities. A function $\phi_0(z)$ for different Z : 1 – $Z=0.1$; 2 – $Z=0.3$; 3 – $Z=0.6$; 4 – $Z=1.0$; 5 – $Z=2.0$;

$$\eta^{k-1} = 0, \quad \eta^k = 1, \quad \eta^{k+1} = 10, \quad h^{k-1} = 1, \quad h^k = 9$$

В соотношениях (12), выбранных для замыкания осредненного уравнения, в качестве функций $\psi(z)$, $\phi(z)$ в принципе можно выбирать любые функции, удовлетворяющие условиям нормировки (13), а не только функции, заданные формулами (7), (9).

Например, можно выбрать линейные функции, что соответствует методу «смазки», который часто применяется в процедуре замыкания в случае тонких слоев жидкости (см., в частности, [8]).

Выбор функций $\psi(z)$, $\phi(z)$, определенных соотношениями (7), (9), объясняется тем, что в случае, когда $\eta^{k+1} = \text{const}$, $\eta^k = \text{const}$, такие функции являются точными решениями исходных уравнений, и в гидрологии принято считать, что зависимость ψ и ϕ от (x,t) достаточно слабая и функции мало отклоняются от постоянных значений.

Подставляя $\psi(z)$, $\phi(z)$ в (15) и используя замены (8), получим

$$\gamma_v = \frac{(p-1) \left(\ln q + \frac{I_3(p,Z)}{I_2(p)} \right)}{1 - \ln q - p + p \ln(pq)}, \quad (16)$$

$$I_3(p,Z) = \int_1^p \ln \theta \left(\frac{p-\theta}{\theta} \right)^Z d\theta,$$

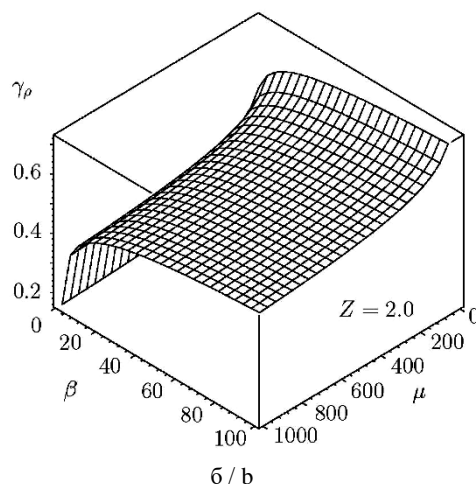
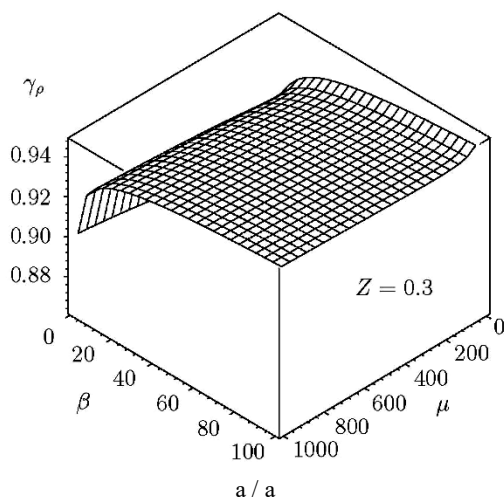


Рис. 3. Зависимость γ_v от p, g при $q \in (1,100]$, $p \in (1,1000]$: а - $Z=0,3$; б - $Z=2,0$
 / Fig. 3. Dependence γ_v on p, g at $q \in (1,100]$, $p \in (1,1000]$: а - $Z=0,3$; б - $Z=2,0$

Аппроксимация γ_v

Интегралы $I_3(p,Z)$, $I_2(p,Z)$, входящие в формулы (16) и известные как интегралы Эйнштейна [9], в принципе могут быть вычислены при помощи гипергеометрических функций или бесконечных рядов (см., в частности, [10, 11], а также [5])

$$I_3 = -\frac{pZ\pi}{\sin \pi(Z+1)} + \frac{p^Z}{Z-1} {}_2F_1(p_{00}, q_{00}, p^{-1}), \quad (17)$$

$$I_2 - I_3 \ln p = \frac{p^Z (1 + (1-Z) \ln p)}{(Z-1)^2} B_1 -$$

$$-\frac{Zp^{Z-1} \ln p}{(Z-2)^2} B_2 - \frac{p}{(Z-1)^2} B_3,$$

$$B_1 = {}_3F_2(p_{11}, q_{11}, p^{-1}),$$

$$B_2 = {}_3F_2(p_{22}, q_{22}, p^{-1}), \quad B_3 = {}_3F_2(p_{11}, q_{11}, 1),$$

$$p_{00} = [-Z, -Z+1], \quad q_{00} = [2-Z],$$

$$p_{11} = [-Z, -Z+1, -Z+1], \quad q_{11} = [2-Z, 2-Z],$$

$$p_{22} = [-Z+1, 2-Z, 2-Z], \quad q_{22} = [-Z+3, -Z+3].$$

Здесь ${}_pF_q$ – гипергеометрическая функция.

При решении уравнений (14) численными методами, например, при помощи метода конечных объемов, коэффициент γ_v придется вычислять на каждом шаге по времени и в каждой точке x на пространственно двумерной сетке. Это означает, что требуются эффективные способы вычисления интегралов I_2, I_3 . Использование для этих целей непосредственно соотношений (17) малоэффективно ввиду того, что формулы содержат гипергеометрические функции, точное вычисление которых по трудоемкости превосходит вычисление интегралов по каким-либо квадратурным формулам.

На практике величины p, Z , как правило, удовлетворяют условиям $0 \leq Z \leq 5, p \gg 1$.

Для вычисления γ_v можно использовать асимптотические формулы, которые легко получить, используя асимптотики гипергеометрических функций, в частности, сохраняя конечное число членов ряда в формулах для гипергеометрических функций. Вычислительный эксперимент показал, что в области $Z \in [0,02, 4,98], p \in [1,01, 1000]$ при сохранении двух членов ряда относительная погрешность вычислений I_2, I_3 не превышает 4%, а сохранение семи членов ряда позволяет добиться точности 1,5%.

Асимптотические формулы весьма громоздки. Приведем лишь одну из них для интеграла I_3 при $n = 3$

$$I_3^3 = \frac{(p^{Z-2} - p)(Z-1)Z}{2(Z-3)} - \frac{(p^{Z-1} - p)Z}{Z-2} + \frac{(p^Z - p)}{Z-1}. \quad (18)$$

Эта формула наглядно демонстрирует причину, по которой невозможно построение равномерной по Z асимптотики – при целых значениях Z формула (18) содержит сингулярности.

«Дефект» асимптотических формул типа (18), конечно, легко исправляется на практике – достаточно продолжить значения асимптотических функций по непрерывности, используя точные значения интегралов, вычисленных при целых Z .

В реальной ситуации вместо громоздких точных формул (17) или асимптотических (18), или вычисления интегралов I_2, I_3 при помощи квадратурных формул, удобнее использовать полиномиальные интерполяционные соотношения. Это тем более оправданно, потому что, как показывает рис. 3, изменение коэффициента γ_v сравнительно плавное, особенно если ограничиваться небольшими интервалами изменения величин p, Z .

Укажем один из вариантов интерполяции для интегралов $I_2(p, Z), I_3(p, Z)$. Пусть область изменения p, Z задана неравенствами $p_{\min} \leq p \leq p_{\max},$

$Z_{\min} \leq Z \leq Z_{\max}$. Выберем в качестве узлов интерполяции $p_i = p_{\min} + \frac{i-1}{n-1}(p_{\max} - p_{\min}),$

$$Z_j = Z_{\min} + \frac{j-1}{m-1}(Z_{\max} - Z_{\min}), \quad i = 1, \dots, n, \quad j = 1, \dots, m.$$

Аналог интерполяционного многочлена Лагранжа имеет вид

$$I(p, Z) \approx \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m I(p_i, Z_j) \varphi_{ij}(p, Z), \quad (19)$$

$$\varphi_{ij}(p, Z) = \prod_{k \neq i} \frac{p - p_k}{p_i - p_k} \cdot \prod_{k \neq j} \frac{Z - Z_k}{Z_j - Z_k}, \quad (20)$$

где I – один из интегралов I_2, I_3 .

Приведем пример интерполяционных формул, задавая параметры

$$p_{\min} = 100, \quad p_{\max} = 300, \\ Z_{\min} = 0, \quad Z_{\max} = 0,5, \quad n = m = 3. \quad (21)$$

$$I_2(p, Z) \approx -85,30 + 4,21p + 0,26 \cdot 10^{-2} p^2 + \\ + (10,62 - 1,56p - 0,42 \cdot 10^{-3} p^2)Z + \\ + (-144,11 + 4,91p + 0,60 \cdot 10^{-2} p^2)Z^2, \quad (22)$$

$$I_3(p, Z) \approx p - 1 + (0,29 - 0,13p - 0,88 \cdot 10^{-4} p^2)Z + \\ + (-35,54 + 2,09p + 0,56 \cdot 10^{-3} p^2)Z^2. \quad (23)$$

Относительная погрешность вычислений для I_2, I_3 не превышает 0,8%.

Точность интерполяционных формул можно повысить либо за счет сужения интервалов изменения величин p, Z , либо путём увеличения количества точек интерполяции n . Например, при выборе $n = m = 5$ точность вычисления интегралов I_2, I_3 в случае интервалов (21) не превышает 0,02%. При этом следует помнить, что увеличение n приводит к увеличению степеней полиномов и, как следствие, к возможным вычислительным погрешностям. Во всяком случае при проведении расчетов лучше сохранять формулы (19), (20), не приводя их к развернутому виду (22), (23).

Литература

1. Van Rijn L.C. Principles of sediment transport in rivers, estuaries and coastal seas. Part I. Amsterdam : Aqua Publications-I11, 1993. 690 p.
2. Van Rijn L.C. Mathematical modelling of morphological processes in the case of suspended sediment transport // Delft Hydra. Commun. 1987. № 382. 260 p.
3. Сеин Д.В. Численное моделирование гидро- и литодинамических процессов морского приливного бассейна : автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. СПб., 1992. 24 с.

4. Гришанин К.В. Динамика русловых потоков. Л. : Гидрометеиздат, 1979. 312 с.

5. Жуков М.Ю., Ширяева Е.В. Математическое моделирование процесса седиментации примеси в потоке жидкости. Ростов н/Д. : Изд-во ЮФУ, 2016. 208 с.

6. Гилл А. Динамика атмосферы и океана : в 2 т. М. : Мир, 1986. Т. 2. 415 с.

7. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. М. : Наука, 1974. 712 с.

8. Жуков М.Ю., Ширяева Е.В., Полякова Н.М. Моделирование испарения капли жидкости. Ростов н/Д. : Изд-во ЮФУ, 2015. 208 с.

9. Einstein H.A. The bed-load function for sediment transportation in open channel flows // *Soil Conserv. Serv.* 1950. № 1026. P. 1–31.

10. Guo J. Hunter Rouse and Shields diagram. Advances in hydraulics and water engineering // *Proc. 13th Iahr-Appd. World Scientific Congress.* Singapore, 2002. Vol. 2. P. 1096–1098.

11. Guo J., Julien P.Y. Efficient algorithm for computing Einstein integrals // *J. Hydraul. Eng.* 2004. Vol. 130, № 12. P. 1198–1201.

References

1. Van Rijn L.C. *Principles of sediment transport in rivers, estuaries and coastal seas.* Part I. Amsterdam: Aqua Publications-II 1, 1993, 690 p.

2. Van Rijn L.C. Mathematical modelling of morphological processes in the case of suspended sediment transport. *Delft Hydra. Commun.* 1987, No. 382, 260 p.

3. Sein D.V. *Chislennoe modelirovanie gidro- i lito-*

dinamicheskikh protsessov morskogo prilivnogo basseina : avtoref. dis. ... kand. fiz.-mat. nauk [Numerical simulation of hydro- and lithodynamic processes in the marine tidal basin]. Saint Petersburg, 1992, 24 p.

4. Grishanin K.V. *Dinamika ruslovykh potokov* [Dynamics of channel flows]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1979, 312 p.

5. Zhukov M.Yu., Shiryaeva E.V. *Matematicheskoe modelirovanie protsessa sedimentatsii primesi v potoke zhidkosti* [Mathematical modeling of the process of sedimentation of an impurity in a liquid flow]. Rostov-on-Don: Izd-vo YuFU, 2016, 208 p.

6. Gill A. *Dinamika atmosfery i okeana* [Dynamics of the atmosphere and the ocean]: in 2 vol. Moscow: Mir, 1986, vol. 2, 415 p.

7. Shlikhting G. *Teoriya pogrannichnogo sloya* [The theory of the boundary layer]. Moscow: Nauka, 1974, 712 p.

8. Zhukov M.Yu., Shiryaeva E.V., Polyakova N.M. *Modelirovanie ispareniya kapli zhidkosti* [Modeling the evaporation of a drop of liquid]. Rostov-on-Don: Izd-vo YuFU, 2015, 208 p.

9. Einstein H.A. The bed-load function for sediment transportation in open channel flows. *Soil Conserv. Serv.* 1950, No. 1026, pp. 1-31.

10. Guo J. Hunter Rouse and Shields diagram. Advances in hydraulics and water engineering. *Proc. 13th Iahr-Appd. World Scientific Congress.* Singapore, 2002, vol. 2, pp. 1096-1098.

11. Guo J., Julien P.Y. Efficient algorithm for computing Einstein integrals. *J. Hydraul. Eng.* 2004, vol. 130, No. 12, pp. 1198-1201.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗНОСА НА КОНТАКТЕ ДВУХ УПРУГИХ ТЕЛ С УЧЕТОМ ТЕПЛОТЫДЕЛЕНИЯ ОТ ТРЕНИЯ*

© 2017 г. М.И. Чебаков¹, С.А. Данильченко¹, А.А. Ляпин¹

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

MODELLING OF WEAR ON CONTACT OF TWO ELASTIC BODIES TAKING INTO ACCOUNT THERMAL EMISSION FROM FRICTION

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

Процесс контактного взаимодействия в технических узлах всевозможных агрегатов сопровождается нагревом конструкции и изнашиванием трущихся поверхностей. Исследования процессов прогрева и влияния температуры на степень износа являются важной задачей машиностроения. В рамках линейной теории упругости изучена задача термоупругого контактного взаимодействия тормозного диска и колодки для случая вращения с постоянной скоростью и постоянной прижимной силой. В контактной зоне реализован процесс генерации тепла за счет дополнительных тепловых потоков, пропорциональных работе сил трения. Коэффициент трения взят в виде функции от температуры, аппроксимирующей экспериментальные данные по измерению величины коэффициента трения при различных температурах на контакте. Дополнительно к выделению тепла в зоне контакта смоделирован процесс износа материала.

Величина износа контактной поверхности определена на основе модели Аркарда с учетом зависимости параметров модели от температуры, а также с возможностью деформирования геометрии контактных поверхностей в соответствии с величиной износа. Проведен ряд вычислительных экспериментов для различных композиционных материалов тормозной колодки.

Ключевые слова: термоупругость, тепловыделение от трения, контактная задача, тормозная система, износ.

The process of contact interaction within technical joints of various devices includes construction heating and wear of contacting surfaces. The study of heating processes and corresponding influence of temperature fields on the wear rate is important problem of mechanical engineering. The problem on thermoelastic contact interaction of braking disc and pad in

* Работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ (проект № БЧ 9.4726.2017/8.9) и Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 16-08-00852а).

terms of linear elasticity theory is studied in case of constant rotating speed and pressing force. In the contact zone there realized process for heat generation based on additional heat fluxes proportional to friction forces work. The friction coefficient is function of temperature which approximates real data measured from real experiments on the friction coefficient for different temperatures. In addition to the heat generation, in the contact zone there realized a wear process for contact surfaces. The wear amount is calculated on the basis of Archard model taking into account the dependency of model parameters on temperature. The nodes of contact surfaces deform while rotation. The group of calculation experiments is performed for various materials of braking pad.

Keywords: thermoelasticity, frictional heating, contact problem, braking system, wear.

В процессе работы разнообразных технологических узлов и движущихся элементов машин и механизмов происходит неизбежный износ трущихся поверхностей. Результатом является изменение форм и размеров механических компонентов, что приводит к нарушению работы устройств и приближает момент выхода из строя. Существует множество методов уменьшения износа деталей на основе применения смазок и антифрикционных покрытий, однако изучение механики взаимодействия упругих тел с учетом износа все равно является важной задачей.

Износ представляет собой некоторую непрерывную потерю материала с поверхности упругого тела за счет контактирования с другими телами и связан со сложными явлениями, включающими как механическое взаимодействие [1, 2], так и физические и химические явления в зоне контакта [3, 4]. Явление износа контактирующих поверхностей привлекает внимание исследователей достаточно давно. Наиболее зарекомендовавшей себя математической моделью механического износа поверхностей упругих тел является модель Аркарда [5], характеризующая величину износа как функцию контактного давления, скорости скольжения и некоторого коэффициента износа. Данная модель используется при исследовании контактного взаимодействия в рамках линейной теории упругости и хорошо коррелируется с экспериментальными данными [6–9].

В таких технологических узлах, как системы торможения, износ проявляет себя наиболее явно по причине большой величины работы сил трения. Кроме того, наличие высоких скоростей скольжения контактных поверхностей приводит к значительному прогреву контактной зоны. В таких случаях возникает необходимость исследования величины износа контактирующих тел с учетом зависимости от температурного поля. Известно, что коэффициент трения изменяется с ростом или уменьшением температуры [10, 11], следовательно, и величина износа будет варьироваться в различных температурных условиях.

В представляемой работе проведено исследование контактного взаимодействия упругих тел при скольжении, выделении тепла от трения и с учетом

износа трущихся поверхностей. Параметры модели износа взяты с учетом реальных зависимостей от температуры.

Постановка задачи

В цилиндрической системе координат $O\rho\varphi z$ упругий диск ($R_d^i \leq \rho \leq R_d^o$; $0 \leq \varphi \leq 2\pi$; $0 \leq z \leq h_d$) совершает вращательное движение против часовой стрелки вокруг оси Oz с постоянной угловой скоростью вращения ω_z . На поверхности диска ($R_d^i \leq \rho \leq R_d^o$; $0 \leq \varphi \leq 2\pi$; $z = h_d$) расположена тормозная колодка в форме сектора диска ($R_k^i \leq \rho \leq R_k^o$; $0 \leq \varphi \leq \pi/3$; $h_d \leq z \leq h_d + h_k$), нагруженная нормальным равномерно распределенным усилием P (рис. 1).

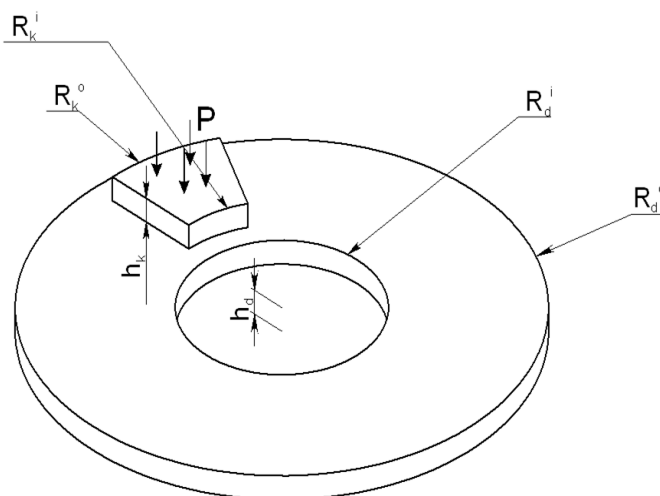


Рис. 1. Геометрия задачи / Fig. 1. Geometry of the problem

Внутренняя ($\rho = R_d^i$; $0 \leq \varphi \leq 2\pi$; $0 \leq z \leq h_d$) и внешняя ($\rho = R_d^o$; $0 \leq \varphi \leq 2\pi$; $0 \leq z \leq h_d$) боковые поверхности диска, не взаимодействующие с колодкой, свободны от напряжений; нижняя граница ($R_d^i \leq \rho \leq R_d^o$; $0 \leq \varphi \leq 2\pi$; $z = 0$) закреплена по оси Oz . Между диском и колодкой задано кулоновское трение с коэффициентом k .

Исследование включает в себя решение двух задач: нестационарной термоупругой контактной задачи о прижатии тормозной колодки к вращающемуся тормозному диску и задачи об износе трущихся поверхностей исследуемых тел с учетом предварительно полученных полей температур. В результате работы сил трения в зоне контакта тела начинают разогреваться, что одновременно учитывается в виде корректировки коэффициента трения на основе экспериментальных данных о его зависимости от температуры.

Для решения задач использовались метод конечных элементов и специальный программный комплекс ANSYS. Для каждой из них решение осуществлялось в два этапа. На первом решалась статическая контактная задача теории упругости о вдавлении упругой колодки в упругий диск, на втором для задачи 1 – нестационарная задача о вдавлении тормозной колодки во вращающийся диск с учетом трения и тепловыделения; для задачи 2 – нестационарная задача о вдавлении тормозной колодки во вращающийся диск с учетом трения и износа. Принято, что интенсивность изнашивания диска мала по сравнению с интенсивностью изнашивания тормозной колодки. Поэтому для уменьшения времени расчетов износ диска не учитывался.

Модель Аркарда, моделирующая процесс износа трущихся поверхностей, представлена уравнением

$$w = \frac{K}{H} P^m v_{rel}^n, \quad (1)$$

где w – смещение точек контактной поверхности по направлению износа; K – коэффициент износа; H – твердость материала; P – контактное давление; v_{rel} – относительная скорость скольжения контактирующих поверхностей; m, n – некоторые параметры, характеризующие степенную зависимость величины износа от контактного давления или относительной скорости.

Результаты расчетов

Вычисления производились для стального диска и трех различных материалов колодки. В обеих задачах использовались одинаковые геометрические параметры (табл. 1), физико-механические и теплофизические свойства материалов (табл. 2), скорость вращения диска и нагрузка.

Угловая скорость вращения $\omega_z = 10$ об/с; усилие $P = 0,1$ МН. Время вращения $t = 5$ с.

В табл. 3 приведены значения коэффициента трения для выбранных материалов в зависимости от температуры. Для задачи 1 использовалось значение при 20 °С. После расчета определялась за-

висимость температуры нагрева колодки от времени. Эти результаты сопоставлялись с данными из табл. 3, после чего строилась зависимость коэффициента трения от времени. Эта зависимость использовалась при расчете в задаче 2.

Таблица 1

Геометрические параметры задачи / The geometric parameters of the problem

Параметр, м	Диск	Колодка
Внутренний радиус	$R_d^i = 0,12$	$R_k^i = 0,14$
Внешний радиус	$R_d^o = 0,22$	$R_k^o = 0,2$
Толщина	$h_d = 0,02$	$h_k = 0,02$

Таблица 2

Свойства материалов диска и колодки / Material properties of disc and pad

Параметр	Сталь	Чугун	Фенилон	ТИИР-300
Плотность ρ , кг/м ³	7826	7100	1350	2100
Модуль упругости E , ГПа	200	100	3,2	5
Коэффициент Пуассона	0,3	0,3	0,3	0,36
Теплопроводность λ , Вт/(м·К)	48	54	0,3	1,4
Коэффициент теплового расширения α , К ⁻¹	$1,19 \cdot 10^{-5}$	$0,95 \cdot 10^{-5}$	$3,9 \cdot 10^{-5}$	$3,9 \cdot 10^{-5}$
Теплоемкость C , Дж/(кг·К)	473	480	1860	1480

Значения коэффициентов износостойкости для выбранных материалов представлены в табл. 4. Показатели m и n формуле (1) брались равными 1.

Таблица 3

Зависимость коэффициентов трения материалов от температуры / The dependence of the friction material from temperature

Материал колодки	Температура, °С			
	20	50	100	150
Чугун	0,4	0,4	0,39	–
Фенилон	0,38	0,38	0,39	0,4
ТИИР-300	0,41	0,43	0,46	0,47

Таблица 4

Коэффициент износостойкости / Coefficient of wear resistance

Материал	Коэффициент износостойкости l
Чугун	$4 \cdot 10^{-13}$
Фенилон	$3,9 \cdot 10^{-13}$
ТИИР-300	$4,1 \cdot 10^{-13}$

Из графика (рис. 2) видно, что максимальные температуры нагрева подошвы колодки из чугуна и ТИИР-300 практически одинаковые. Стоит отметить, что у колодки из чугуна нагрев происходит более равномерно, у колодки из ТИИР-300 происходит резкий скачок температуры после $t = 4,5$ с. У колодки из фенилона на начальном этапе (до $t = 3$ с) температура и характер нагрева такие же, как у колодки из ТИИР-300. Однако при дальнейшем увеличении времени вращения у нее не происходит такого резкого роста температуры и максимальное значение оказывается значительно ниже, чем у колодок из чугуна и ТИИР-300.

Из полученных результатов следует, что на подошве колодки по направлению движения диска (вдоль линии $\rho = (R_k^o - R_k^i)/2$, $0 \leq \varphi \leq \pi/3$, $z = h_d$) контактные давления и износ значительно снижаются, в то время как вдоль линии

$R_k^i \leq \rho \leq R_k^o$, $\varphi = \pi/6$, $z = h_d$ изменения незначительны (рис. 3).

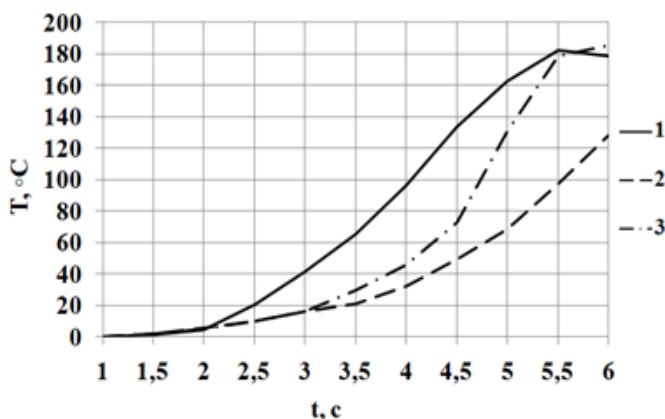


Рис. 2. Графики нагрева подошвы тормозной колодки из чугуна (1), фенилона (2) и ТИИР-300 (3)
 / Fig. 2. Charts of heating the brake pads sole made of cast iron (1), fenelon (2) and TIIR-300 (3)

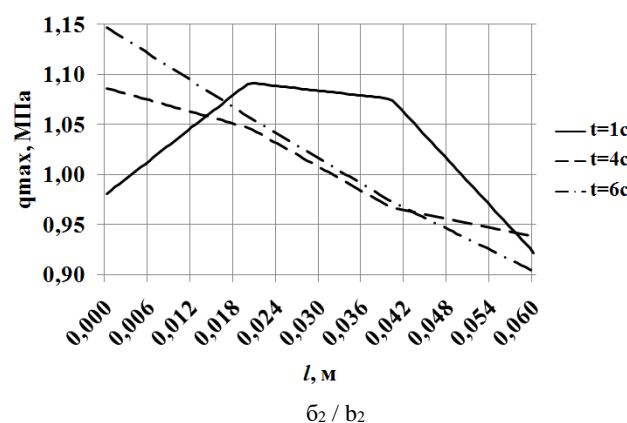
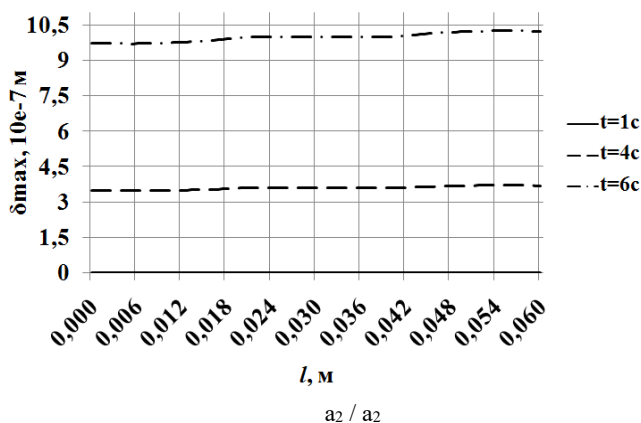
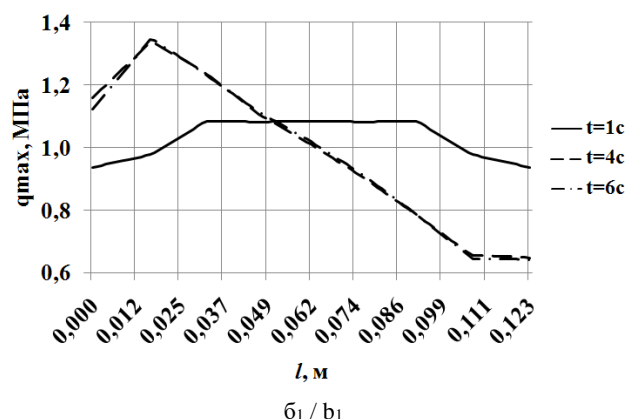
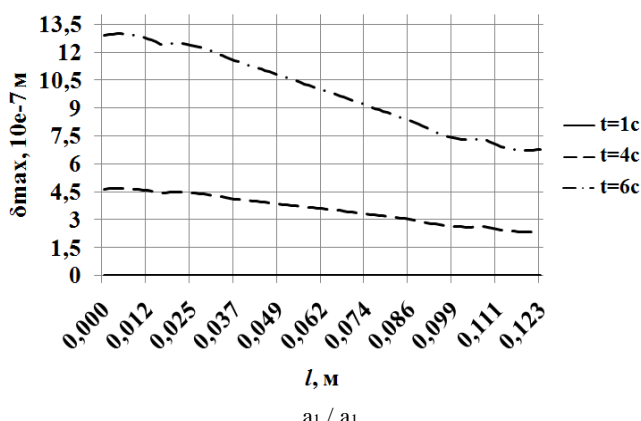


Рис. 3. Износ (а₁) и контактное давление (б₁), $i=1, 2$, вдоль линий $\rho = (R_k^o - R_k^i)/2$, $0 \leq \varphi \leq \pi/3$, $z = h_d$ ($i=1$);

$R_k^i \leq \rho \leq R_k^o$; $\varphi = \pi/6$; $z = h_d$ ($i=2$) в различные моменты времени для чугунной колодки

/ Fig. 3. Wear (a₁) and contact pressure (b₁) $i=1, 2$, along the lines of $\rho = (R_k^o - R_k^i)/2$, $0 \leq \varphi \leq \pi/3$, $z = h_d$ ($i=1$);

$R_k^i \leq \rho \leq R_k^o$; $\varphi = \pi/6$; $z = h_d$ ($i=2$) at different points in time for a cast iron block

Таким образом, износ от внутреннего радиуса колодки до внешнего происходит практически равномерно. Аналогичные изменения характерны и для колодок из фенилона и ТИИР-300 (рис. 4, 5).

С увеличением времени вращения для колодки из чугуна наблюдается следующая картина: контактные давления на границе $\varphi=0$ и $\rho=R_k^o$ снижаются, а на границе $\varphi=\pi/3$ и $\rho=R_k^i$ – возрастают.

Для колодок из фенилона и ТИИР-300 изменения контактных давлений на границах имеют несколько иной характер. Отличие заключается в том, что контактные давления на границе $\rho=R_k^o$ со временем возрастают.

Из рис. 4, 5 видно, что графики изменения износа и контактных давлений для колодок из фенилона и ТИИР-300 имеют похожий вид, но отличаются по значениям. У колодки ТИИР-300 максимальные значения износа оказываются выше.

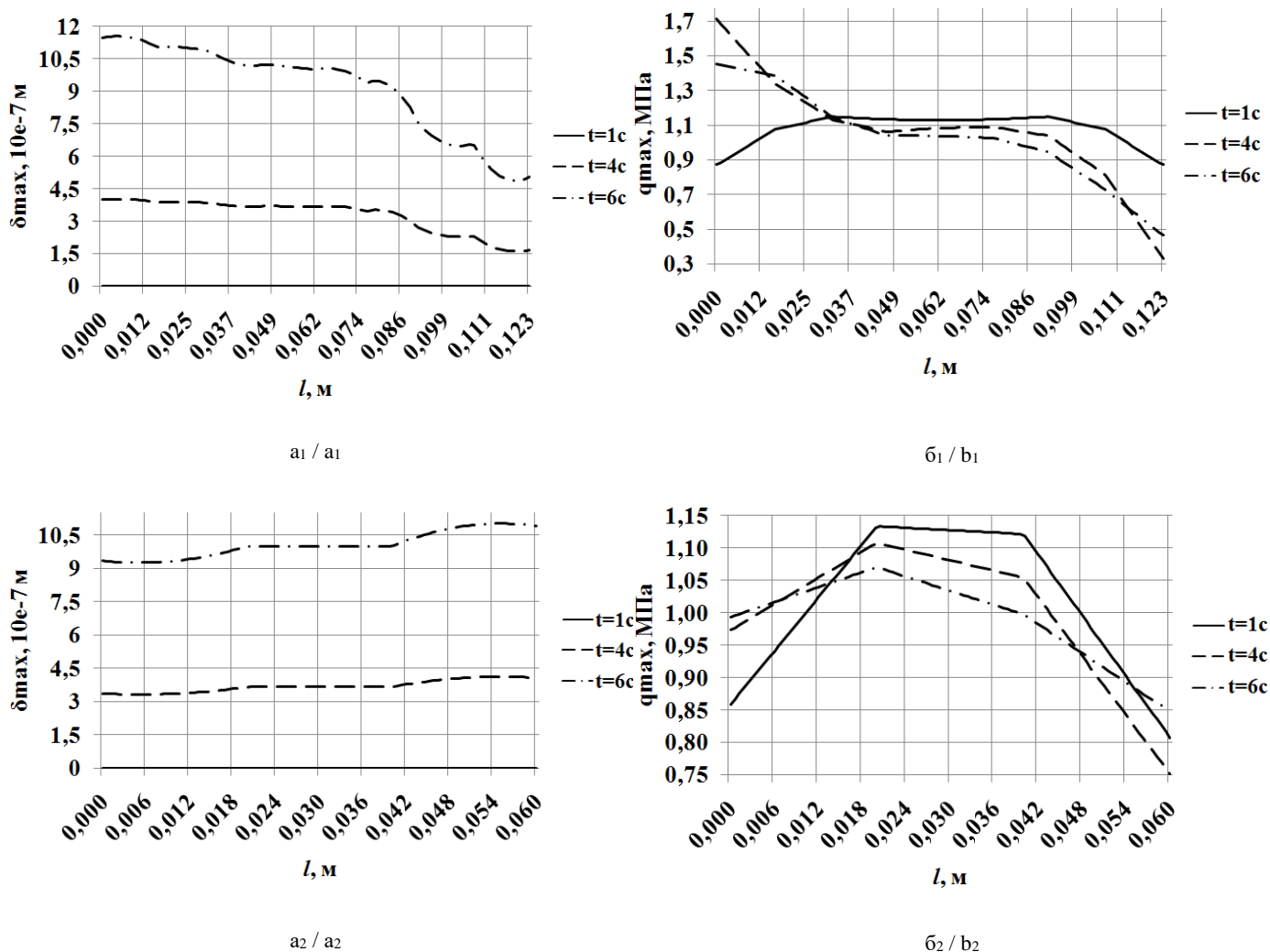


Рис. 4. Износ (а₁) и контактное давление (б₁), $i=1, 2$, вдоль линий $\rho=(R_k^o - R_k^i)/2$, $0 \leq \varphi \leq \pi/3$, $z = h_d$ ($i=1$);

$R_k^i \leq \rho \leq R_k^o$; $\varphi = \pi/6$; $z = h_d$ ($i=2$) в различные моменты времени для колодки из фенилона

/ Fig. 4. Wear (a₁) and contact pressure (b₁), $i=1, 2$, along the lines of $\rho=(R_k^o - R_k^i)/2$, $0 \leq \varphi \leq \pi/3$, $z = h_d$ ($i=1$);

$R_k^i \leq \rho \leq R_k^o$; $\varphi = \pi/6$; $z = h_d$ ($i=2$) at different points in time for the pads of fenelon

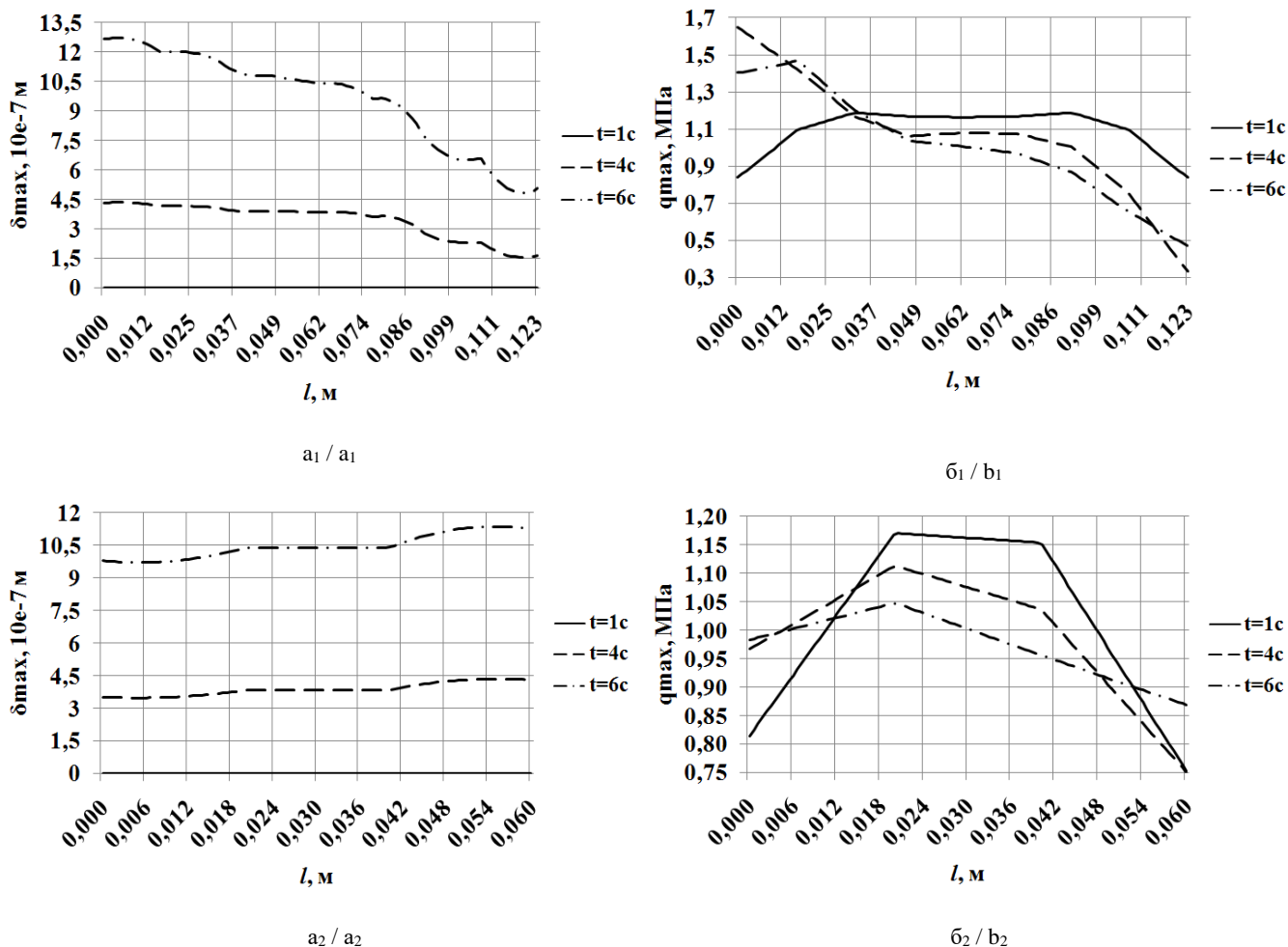


Рис. 5. Износ (a_i) и контактное давление (b_i), $i=1, 2$, вдоль линий $\rho = (R_k^o - R_k^i)/2$, $0 \leq \varphi \leq \pi/3$, $z = h_d$ ($i=1$); $R_k^i \leq \rho \leq R_k^o$; $\varphi = \pi/6$; $z = h_d$ ($i=2$) в различные моменты времени для колодки из ТИИР-300 / Fig. 5. Wear (a_i) and contact pressure (b_i), $i=1, 2$, along the lines of $\rho = (R_k^o - R_k^i)/2$, $0 \leq \varphi \leq \pi/3$, $z = h_d$ ($i=1$); $R_k^i \leq \rho \leq R_k^o$; $\varphi = \pi/6$; $z = h_d$ ($i=2$) at different points in time for the TIIR-300 pads

Заключение

Вычислительные эксперименты продемонстрировали, что в зависимости от применяемого материала распределения контактных напряжений температуры на контактных поверхностях могут значительно отличаться. Данный факт приводит к неравномерному износу и требует анализа в каждом конкретном случае. Сложность геометрии элементов тормозных систем требует дополнительного анализа степени и величины прогресса, а также прогноза износоустойчивости конструкции.

Литература

1. Gee M., Nunn J. Real time measurement of wear and surface damage in the sliding wear of alumina // Wear. 2017. Vol. 376–377, part B. P. 1866 – 1876.
2. Dyck T., Ober-Wörder P., Bund A. Calculation of the wear surface and the coefficient of friction for various coated contact geometries // Wear. 2016. Vol. 368–369, suppl. C. P. 390–399.
3. Sethuramiah A., Kumar R. Chapter 7 - detailed methodology for chemical wear modeling // Modeling of Chemical Wear / ed. by A. Sethuramiah, Rajesh Kumar. Oxford : Elsevier, 2016. P. 161–183.

4. Lin Wang, Ping Zhou, Ying Yan [et al.]. Chemical-mechanical wear of monocrystalline silicon by a single pad asperity // Intern. J. of Machine Tools and Manufacture. 2017. Vol. 120, suppl. C. P. 61–71.

5. Archard J. Contact and rubbing of flat surfaces // J. of Applied Physics. 1953. Vol. 24, № 8. P. 981–988.

6. Telliskivi T. Simulation of wear in a rolling-sliding contact by a semi-winkler model and the archard's wear law // Wear. 2004. Vol. 256, № 7. P. 817–831.

7. Marzia A. Cremona, Binbin Liu, Yang Hu [et al.]. Predicting railway wheel wear under uncertainty of wear coefficient, using universal kriging // Reliability Engineering and System Safety. 2016. Vol. 154, suppl. C. P. 49–59.

8. A'vila da Silva C.R., Pintaude G. Uncertainty analysis on the wear coefficient of archard model // Tribology International. 2008. Vol. 41, № 6. P. 473–481.

9. Чебаков М.И., Данильченко С.А., Ляпин А.А. Контактная задача для упругого параллелепипеда при наличии трения и износа // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2017. № 2. С. 32–37.

10. Kolesnikov I.V., Danilchenko S.A., Kolosova E.M., Chebakov M.I., Lyapin A.A. Modelling of thermoelastic transient contact interaction for binary bearing taking into account convection // Transport Problems. 2016. Vol. 11, № 3. P. 73–81.

11. Kolesnikov V.I., Chebakov M.I., Kolesnikov I.V., Lyapin A.A. Thermo-physical processes in boundary layers of metal-polymeric systems // Advanced Materials: Manufacturing, Physics, Mechanics and Applications. Springer Proceedings in Physics. 2016. Vol. 175. P. 527–538.

References

1. Gee M., Nunn J. Real time measurement of wear and surface damage in the sliding wear of alumina. *Wear*. 2017, vol. 376-377, part B, pp. 1866-1876.

2. Dyck T., Ober-Wörder P., Bund A. Calculation of the wear surface and the coefficient of friction for various coated contact geometries. *Wear*. 2016, vol. 368-369, suppl. C, pp. 390-399.

3. Sethuramiah A., Kumar R. Chapter 7 - detailed methodology for chemical wear modeling. *Modeling of Chemical Wear*. Ed. by A. Sethuramiah, Rajesh Kumar. Oxford: Elsevier, 2016, pp. 161-183.

4. Lin Wang, Ping Zhou, Ying Yan [et al.] Chemical-mechanical wear of monocrystalline silicon by a single pad asperity. *Intern. J. of Machine Tools and Manufacture*. 2017, vol. 120, suppl. C, pp. 61-71.

5. Archard J. Contact and rubbing of flat surfaces. *J. of Applied Physics*. 1953, vol. 24, No. 8, pp. 981-988.

6. Telliskivi T. Simulation of wear in a rolling-sliding contact by a semi-winkler model and the archard's wear law. *Wear*. 2004, vol. 256, No. 7, pp. 817-831.

7. Marzia A. Cremona, Binbin Liu, Yang Hu [et al.]. Predicting railway wheel wear under uncertainty of wear coefficient, using universal kriging. *Reliability Engineering and System Safety*. 2016, vol. 154, suppl. C, pp. 49-59.

8. A'vila da Silva C.R., Pintaude G. Uncertainty analysis on the wear coefficient of archard model. *Tribology International*. 2008, vol. 41, No. 6, pp. 473-481.

9. Chebakov M.I., Danil'chenko S.A., Lyapin A.A. Kontaktnaya zadacha dlya uprugogo paralelepipedu pri nalichii treniya i iznosa [A contact problem for an elastic parallelepiped in the presence of friction and wear]. *Izv. vuzov. Sev.-Kavk. region. Estestv. nauki*. 2017, No. 2, pp. 32-37.

10. Kolesnikov I.V., Danilchenko S.A., Kolosova E.M., Chebakov M.I., Lyapin A.A. Modelling of thermoelastic transient contact interaction for binary bearing taking into account convection. *Transport Problems*. 2016, vol. 11, No. 3, pp. 73-81.

11. Kolesnikov V.I., Chebakov M.I., Kolesnikov I.V., Lyapin A.A. Thermo-physical processes in boundary layers of metal-polymeric systems. *Advanced Materials: Manufacturing, Physics, Mechanics and Applications. Springer Proceedings in Physics*. 2016, vol. 175, pp. 527-538.

УДК 517.983

DOI 10.23683/0321-3005-2017-4-1-58-62

ОТРИЦАТЕЛЬНЫЕ КОМПЛЕКСНЫЕ СТЕПЕНИ КЛАССИЧЕСКОГО ДВУМЕРНОГО ТЕЛЕГРАФНОГО ОПЕРАТОРА В ПРОСТРАНСТВАХ $L_p(\mathbb{R}^2)$

© 2017 г. А.П. Чеголин¹

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

THE NEGATIVE COMPLEX POWERS OF CLASSICAL TWO-DIMENSIONAL TELEGRAPH OPERATOR IN $L_p(\mathbb{R}^2)$ -SPACES

A.P. Chegolin¹

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

Чеголин Андрей Петрович – кандидат физико-математических наук, доцент, кафедра дифференциальных и интегральных уравнений, Институт математики, механики и компьютерных наук им. И.И. Воровича, Южный федеральный университет, ул. Мильчакова, 8а, г. Ростов-на-Дону, 344090, Россия, e-mail: archegolin@mail.ru

Andrei P. Chegolin - Candidate of Physics and Mathematics, Associate Professor, Department of Differential and Integral Equation, Vorovich Institute of Mathematics, Mechanics and Computer Sciences, Southern Federal University, Milchakova St., 8a, Rostov-on-Don, 344090, Russia, e-mail: archegolin@mail.ru

Исследования данной работы относятся к теории комплексных степеней классических операторов математической физики и пространств дробной гладкости, связанных с такими операторами. По классическому двумерному телеграфному уравнению, которому удовлетворяют напряжение и сила тока в точке провода с заданными значениями емкости, активного сопротивления, самоиндукции и утечки для телеграфного оператора, построены комплексные степени с отрицательной действительной частью порядка. В частности – оператор типа потенциала, обратный к телеграфному. Построение такого оператора дает возможность находить решения телеграфного уравнения в пространствах $L_p(\mathbb{R}^2)$. Отрицательные степени телеграфного оператора получены в виде операторов типа потенциала с обобщенной лоренцевой метрикой в ядрах, вырождающихся вне плоского сектора. Справедливость такого построения доказана в образах Фурье на «достаточно хороших» функциях из класса Лизоркина. На основании полученного явно представления для ядер таких операторов и равномерных по индексу оценок для модифицированных функций Бесселя доказана теорема о действии исследуемых операторов в L_p -пространствах. Кроме того, это закладывает основу для решения следующей естественно возникающей здесь задачи – построение положительных комплексных степеней телеграфного оператора как операторов, обратных к рассматриваемым в этой работе.

Ключевые слова: телеграфный оператор, отрицательные комплексные степени оператора, оператор типа потенциала.

The study of this work belongs to the theory of complex powers of classical operators of mathematical physics and fractional smoothness spaces associated with such operators. The complex powers of telegraph operator with negative real part of the order were constructed according to the classical two-dimensional telegraph equation, which satisfy the voltage and current at the point of wire with desired values of capacitance, resistance, self-induction and leakage. In particular, the potential-type operators which inverse the telegraph operator were obtained. The construction of such operator gives the possibility to find solutions of the telegraph equation in the spaces $L_p(\mathbb{R}^2)$. Negative powers of the telegraph operator is obtained in the form of potential-type operators with a generalized Lorentzian metric in degenerating outside of the plane-parallel one sector kernels. The justice of this construction is proved in the Fourier images on the "good enough" functions from a Lizorkin-space. Based on the explicit representations for kernels of such operators and uniform index estimates for modified Bessel functions, the resulting theorem about the action of the studied operators in L_p -spaces. In addition, it lays the foundation for the solution of the following naturally occurring here the task of building of "positive" powers of telegraph operator, as the operators inverse to considered in this work.

Keywords: telegraph operator, negative powers of the operator, the potential-type operator.

Введение

Исследования данной работы относятся к теории комплексных степеней классических операторов математической физики и пространств дробной гладкости, связанных с такими операторами ([1–4] и обзорная статья [5]). Обратимся к классическому двумерному телеграфному уравнению

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} = LC \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} + (RC + GL) \frac{\partial \varphi}{\partial t} + GR \varphi,$$

которому удовлетворяют напряжение и сила тока в точке провода с координатой x в момент времени t , где C – ёмкость; R – активное сопротивление; L – самоиндукция; G – утечка. Такое уравнение может быть переписано в виде

$$\varphi = \frac{1}{CR} \left(\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} - LC \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} - (RC + GL) \frac{\partial \varphi}{\partial t} \right).$$

В соответствии с этим определим телеграфный оператор

$$T\varphi = \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} - LC \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} - (RC + GL) \frac{\partial \varphi}{\partial t}. \quad (1)$$

В работе в рамках пространств

$$L_p = L_p(R^2) = \left\{ f(x) : \iint_{R^2} |f(x)|^p dx < \infty \right\}$$

построены комплексные степени этого оператора с отрицательной действительной частью порядка. В частности, построен оператор типа потенциала, обратный к телеграфному оператору (1). Построение такого оператора дает возможность описывать решения телеграфного уравнения в пространствах L_p .

На «достаточно хороших» функциях можно в образах Фурье просчитать символ телеграфного оператора (1):

$$m(\xi) = m(\xi_1, \xi_2) = LC \xi_1^2 - \xi_2^2 + (RC + GL) i \xi_1. \quad (2)$$

Отрицательные степени телеграфного оператора определим для таких функций естественным образом, как операторы T^α с символами $\frac{1}{m^\alpha(\xi)}$, $\alpha \in \mathbb{C}$, $\operatorname{Re} \alpha > 0$. На функциях из пространства $L_p(R^2)$ T^α представимы в виде операторов типа потенциала с обобщенной лоренцевой метрикой в ядрах, вырождающихся вне плоского сектора. В работе явно найдены ядра таких операторов. На основании этого и равномерных по индексу оценок для модифицированных функций Бесселя получена теорема о действии операторов T^α в L_p -пространствах. На функциях из класса Φ Лизоркина показано, что оператор T^α действительно имеет

своим символом функцию $\frac{1}{m^\alpha(\xi)}$, $\alpha \in \mathbb{C}$, $\operatorname{Re} \alpha > 0$.

Для этого сначала доказывается соответствующая формула преобразования Фурье в слабом смысле, а затем основной результат достигается на основании критерия мультипликатора в соответствующем пространстве образов Фурье.

Получение явного вида для операторов T^α закладывает основу для решения следующей естественно возникающей здесь задачи – построение «положительных» комплексных степеней телеграфного оператора как операторов, обратных к операторам T^α . Решение этой задачи представляет определенные трудности, связанные с тем, что функция $m^\alpha(\xi)$ имеет, вообще говоря, плохое поведение на бесконечности; кроме того, особенности на множестве нулей символа $m(\xi)$ (2) локально несуммируемы. Реализация такого обращения планируется в рамках метода аппроксимативных обратных операторов в следующей работе.

Формальное восстановление отрицательных степеней телеграфного оператора

Для восстановления явного вида отрицательных степеней телеграфного оператора представим функцию $\frac{1}{m^\alpha(\xi)}$, $\alpha \in \mathbb{C}$, $\operatorname{Re} \alpha > 0$, в виде

$$\frac{1}{m^\alpha(\xi)} = \left(\frac{-1}{\mu_1(\xi_1) + \mu_2(\xi_2)} \right)^\alpha, \text{ где}$$

$$\mu_1(\xi_1) = \left(-\sqrt{LC} i \xi_1 + \frac{RC + GL}{2\sqrt{LC}} \right)^2,$$

$$\mu_2(\xi_2) = -\frac{(RC + GL)^2}{4LC} + \xi_2^2.$$

Дальнейшая работа с функциями $\mu_1(\xi_1)$ и $\mu_2(\xi_2)$ в терминах функции Бесселя

$$J_\nu(x) = \sum_{m=0}^{\infty} \frac{(-1)^m}{m! \Gamma(m + \nu + 1)} \left(\frac{x}{2} \right)^{2m + \nu}$$

приводит к следующему результату:

$$\frac{1}{m^\alpha(\xi)} = \frac{(-1)^{-\alpha}}{2(LC)^{\alpha/2} \Gamma(\alpha)} \left(\frac{RC + GL}{\sqrt{LC}} \right)^{1-\alpha} \times \\ \times \iint_D \rho^{\alpha-1}(y) e^{-\frac{RC+GL}{2LC} y_1} J_{\alpha-1} \left(\frac{i(RC + GL)\rho(y)}{2\sqrt{LC}} \right) e^{i\delta y} dy,$$

где $\rho(y) = \sqrt{y_1^2 - LC y_2^2}$ – обобщенная лоренцева метрика. Интегрирование ведется по плоскому

симметричному относительно оси Oy_1 сектору

$$D = \left\{ (y_1, y_2) \in R^2 : -\frac{y_1}{\sqrt{LC}} < y_2 < \frac{y_1}{\sqrt{LC}} \right\}.$$

Самостоятельный интерес представляет собой случай $LC=1$. Тогда в представлении степени символа оператора возникает хорошо известное лоренцево расстояние $r(y_1, y_2) = \sqrt{y_1^2 - y_2^2}$. В этой ситуации интегрирование будет вестись по четверти плоскости: $D = \{(y_1, y_2) \in R^2 : -y_1 < y_2 < y_1\}$. Имеет место равенство

$$\frac{1}{m^\alpha(\xi)} = \frac{(-1)^{-\alpha}}{2\Gamma(\alpha)} (RC + GL)^{1-\alpha} \times \\ \times \iint_D r^{\alpha-1}(y) e^{-\frac{RC+GL}{2LC}y_1} J_{\alpha-1}\left(\frac{i(RC+GL)r(y)}{2}\right) e^{i\xi y} dy.$$

В соответствии с представлением символа $\frac{1}{m^\alpha(\xi)}$, $\alpha \in C$, $\text{Re } \alpha > 0$, определим операторы T^α следующим образом:

$$(T^\alpha \varphi)(x) = \frac{(-1)^{-\alpha}}{2(LC)^{\alpha/2} \Gamma(\alpha)} \left(\frac{RC+GL}{\sqrt{LC}}\right)^{1-\alpha} \times \\ \times \iint_D \rho^{\alpha-1}(y) e^{-\frac{RC+GL}{2LC}y_1} J_{\alpha-1}\left(\frac{i(RC+GL)\rho(y)}{2\sqrt{LC}}\right) \varphi(x-y) dy. \quad (3)$$

Подчеркнем, что на данном этапе можно лишь ожидать, что операторы T^α будут иметь своим символом функцию $\frac{1}{m^\alpha(\xi)}$. В дальнейшем нам придется решить главную задачу – доказать соответствующую формулу преобразования Фурье для построенных таким образом операторов.

Действие операторов T^α в пространствах $L_p(R^2)$

Воспользуемся утверждением, которое дает равномерные оценки по индексу функций Бесселя.

Лемма 1 [5]. Пусть $|\text{Re } \nu| < M$, $|\text{Im } \nu| < N$, где M и N – произвольные положительные числа. Тогда справедлива оценка

$$|J_\nu(y)| \leq C(M, N) \cdot \begin{cases} e^{\frac{\pi\nu}{2}i} \cdot y^{\text{Re } \nu}, & 0 < y \leq 1, \\ e^y / \sqrt{y}, & y > 1, \end{cases}$$

где постоянная $C(M, N)$ не зависит от ν .

Кроме того, будем использовать известное утверждение о действии в L_p -пространствах гиперболических риссовых потенциалов [6]. В рассматриваемом нами двумерном случае световой конус будущего превращается в множество

$K_+^+ = \{(y_1, y_2) : y_1 \geq 0, |y_2| \leq y_1\}$, являющееся четвертью координатной плоскости, а сам гиперболический потенциал Рисса определяется по формулам

$$(I_h^\alpha \varphi)(x) = \frac{2^{1-\alpha}}{\Gamma\left(\frac{\alpha}{2}\right)} \int_0^{+\infty} dy_1 \int_{-y_1}^{y_1} \frac{\varphi(x-y)}{r^{2-\alpha}(y)} dy_2, \text{Re } \alpha > 0.$$

Утверждение о действии операторов I_h^α в L_p -пространствах сформулируем применительно к нашему случаю.

Лемма 2. Пусть $0 < \text{Re } \alpha < 2$, $1 < p < \frac{2}{4 + \text{Re } \alpha}$,

$\frac{1}{q} = \frac{1}{p} - \frac{\text{Re } \alpha}{2}$, функция φ из L_p такова, что $(I_h^\alpha \varphi)(x) < \infty$ для почти всех $x \in R^2$. Тогда для гиперболических риссовых потенциалов справедлива оценка $\|I_h^\alpha \varphi\|_q \leq A \|\varphi\|_p$, где постоянная A не зависит от функции φ .

На основании лемм 1, 2 можно доказать теорему о действии операторов T^α (3), $0 < \text{Re } \alpha < 3$, в пространствах $L_p(R^2)$.

Теорема 1: а) пусть $1 \leq \text{Re } \alpha < 3$, $1 < p < \frac{4}{1 + \text{Re } \alpha}$, $\frac{1}{q} = \frac{1}{p} - \frac{\text{Re } \alpha + 1}{4}$. Тогда для тех

$\varphi \in L_p$, для которых в R^2 выполняется условие $(T^\alpha |\varphi|)(x) < \infty$, справедливо неравенство $\|T^\alpha \varphi\|_q \leq c \|\varphi\|_p$;

б) пусть $0 < \text{Re } \alpha < 1$, $1 < p < \frac{4}{1 + \text{Re } \alpha}$, $\frac{1}{q_1} = \frac{1}{p} - \frac{\text{Re } \alpha}{4}$, $\frac{1}{q_2} = \frac{1}{p} - \frac{\text{Re } \alpha + 1}{4}$. Тогда для тех

$\varphi \in L_p$, для которых почти всюду в R^2 выполняется условие $(I_h^{\text{Re } \alpha} |\varphi|)(x) < \infty$ и $\left(I_h^{\frac{1+\text{Re } \alpha}{2}} |\varphi|\right)(x) < \infty$, справедливы неравенства $\|T^\alpha \varphi\|_{L_{q_1+L_{q_2}}} \leq c \|\varphi\|_p$;

$\|T^\alpha \varphi\|_{L_{p,\gamma}} \leq c \|\varphi\|_p$, где

$$L_{p,\gamma} = \left\{ f(x) : (1 + |x|^2)^{\frac{\gamma}{p}} \cdot f(x) \in L_p \right\}.$$

Утверждение этой теоремы сначала доказывается на простых функциях. Последовательность таких функций, сходящаяся к функции $\varphi \in L_p$, стро-

ится за счет характеристических функций шара с центром в начале координат и радиусом, совпадающим с индексом функции [3].

Отметим, что действие операторов T^α (3) из L_p в алгебраическую сумму L_q -пространств или в ве-совое пространство нас также устраивает, так как важен сам факт ограниченности рассматриваемых операторов в пространствах $L_p(R^2)$. Кроме того, теорема 1 позволяет говорить о разрешимости телеграфного уравнения в таких пространствах.

Обоснование перехода к символу потенциала

Докажем, что введенные операторы T^α (3) реализуют отрицательные комплексные степени телеграфного оператора, т.е. на «достаточно хороших» функциях имеют своим символом функцию

$\frac{1}{m^\alpha(\xi)}$. Для этого в качестве классов основных функций будем рассматривать пространства типа Лизоркина – Самко. Пусть V – произвольное замкнутое множество в R^2 . Через Ψ_V обозначим пространство тех функций из класса Л. Шварца $S = S(R^2)$ быстроубывающих гладких функций, которые исчезают вместе со всеми своими производными на множестве V :

$$\Psi_V = \{ \varphi(x) \in S : D^k \varphi(x) = 0 \quad \forall x \in V, |k| = 0, 1, 2, \dots \}.$$

Обозначим через Φ_V пространство преобразов Фурье функций из Ψ_V : $\Phi_V = F^{-1}(\Psi_V)$. Пространства $\Psi = \Psi_0$ и $\Phi = \Phi_0$ были введены и изучены П.И. Лизоркиным [7]. В дальнейшем в работах С.Г. Самко они были распространены на общий случай замкнутых множеств V [8, гл. 1]. В настоящее время эти пространства широко используются в различных задачах теории дробного интегрирования. Докажем основное утверждение, которое, по сути, описывает комплексные степени с отрицательной действительной частью телеграфного оператора.

Теорема 2. Пусть $\varphi \in \Phi, \operatorname{Re} \alpha > 0$. Тогда справедлива формула преобразования Фурье

$$(FT^\alpha \varphi)(\xi) = \frac{(F\varphi)(\xi)}{(LC\xi_1^2 - \xi_2^2 + (RC + GL)i\xi_1)^\alpha}.$$

Доказательство. Докажем вначале для функций $\varphi \in \Phi$ формулу преобразования Фурье в слабом

смысле: $(T^\alpha \varphi)(x) = \frac{1}{4\pi^2} \int_{R^2} \frac{(F\varphi)(\xi) e^{-ix\xi} d\xi}{(LC\xi_1^2 - \xi_2^2 + (RC + GL)i\xi_1)^\alpha}.$

Это представление для оператора T^α нетрудно получить [9, формула 6.598], если $\varphi \in \Phi_V$, где V – прямая $\xi_2 = 0$. Пусть теперь $\varphi \in \Phi$. Из результатов работы [10] следует, что для любой функции $\varphi \in \Phi$ существует последовательность функций $\varphi_k \in \Phi_V$, сходящаяся к φ по норме пространства L_p , $1 < p < \infty$, такая что $|(F\varphi_k)(\xi)| \leq |(F\varphi)(\xi)|$, $(F\varphi_k)(\xi) \rightarrow (F\varphi)(\xi), k \rightarrow \infty$. Для функций $\varphi_k \in \Phi_V$ формула преобразования Фурье в слабом смысле выполнена. Для перехода к функции $\varphi \in \Phi$ воспользуемся равенством

$$\lim_{k \rightarrow \infty} (T^\alpha \varphi_k)(x) = \frac{1}{4\pi^2} \int_{R^2} m^{-\alpha}(\xi) (F\varphi)(\xi) e^{-ix\xi} d\xi,$$

которое выполняется в силу свойств аппроксимирующей последовательности функций $\varphi_k(x)$.

С другой стороны, в силу пункта а) теоремы 1 получаем, что $\|T^\alpha \varphi - T^\alpha \varphi_k\|_q \leq c \|\varphi - \varphi_k\|_p \rightarrow 0, k \rightarrow \infty$,

если $1 \leq \operatorname{Re} \alpha < 3, 1 < p < \frac{4}{1 + \operatorname{Re} \alpha}, \frac{1}{q} = \frac{1}{p} - \frac{\operatorname{Re} \alpha + 1}{4}$.

Следовательно, равенство

$$(T^\alpha \varphi)(x) = \frac{1}{4\pi^2} \int_{R^2} m^{-\alpha}(\xi) (F\varphi)(\xi) e^{-ix\xi} d\xi$$

выполнено для функций $\varphi \in \Phi$ при $1 \leq \operatorname{Re} \alpha < 3$. Чтобы доказать эту формулу для всех $\operatorname{Re} \alpha > 0$, достаточно показать аналитичность левой и правой частей этого равенства в указанной полуплоскости. Последнее вытекает из следующей леммы об аналитичности интеграла по параметру.

Лемма 3 [8]. Пусть функция $f(x, z)$ аналитична по z в некоторой области $D \subset C$ для почти всех $x \in R^n$ и имеет суммируемую мажоранту $|f(x, z)| \leq F(x) \in L_1$. Тогда интеграл $\int_{R^n} f(x, z)$ аналитичен по z в области D .

На основании критерия мультипликатора в пространстве Ψ_V [10] нетрудно показать, что функция $m^{-\alpha}(\xi)$ является мультипликатором в пространстве Ψ . Соответственно, можно говорить о том, что $m^{-\alpha}(\xi)(F\varphi)(\xi) \in \Psi$ для функций $\varphi \in \Phi$. Тогда, применяя преобразование Фурье к формуле преобразования Фурье в слабом смысле, получаем требуемое равенство. Теорема доказана.

Тот факт, что функция $m^{-\alpha}(\xi)$ является мультипликатором в пространстве Ψ , говорит о том, что пространство Ψ является инвариантным относительно отрицательных комплексных степеней телеграфного оператора.

Отдельно отметим случай $\alpha = 1$. Согласно теореме 2, оператор

$$(T^{-1}\varphi)(x) = \frac{-1}{2\sqrt{LC}} \iint_D e^{-\frac{RC+GL}{2LC}y_1} \times \\ \times J_0\left(\frac{i(RC+GL)\sqrt{y_1^2-LCy_2^2}}{2\sqrt{LC}}\right) \varphi(x-y) dy$$

реализует оператор, обратный к телеграфному. Справедлива

Теорема 3. Пусть $\varphi \in \Phi, \operatorname{Re} \alpha > 0$. Тогда для телеграфного оператора справедлива формула обращения $(T^{-1}T\varphi)(x) = \varphi(x)$.

Литература

1. *Chegolin A.P., Nogin V.A.* Multidimensional potential integral transforms and description of L-characteristic of multiplier operators // *Integral Transforms & Special Functions*. 2002. Vol. 13. P. 193–197.

2. *Чеголин А.П.* Классы $L_{p,r}^\alpha$ типа Лизоркина–Самко, связанные с комплексными степенями телеграфного оператора // *Известия вузов. Математика*. № 7. 2002. С. 58–64.

3. *Ногин В.А., Чеголин А.П.* Комплексные степени телеграфного и близких к нему операторов в L_p -пространствах // *Диф. уравнения*. 2003. Т. 39, № 3. С. 402–409.

4. *Чеголин А.П.* Интегралы и производные дробного порядка в классах Гёльдера на прямоугольнике // *Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки*. 2015. № 1. С. 61–64.

5. *Nogin V.A., Samko S.G.* Method of approximating inverse operators and its applications to the inversion of potential type integral transforms // *Integral Transforms and Special Functions*. 1999. Vol. 8, № 1-2. P. 205–228.

6. *Самко С.Г., Килбас А.А., Маричев О.И.* Интегралы и производные дробного порядка и их приложения. Минск : Наука и техника, 1987. 688 с.

7. *Лизоркин П.И.* Обобщенное лиувилевское дифференцирование и метод мультипликаторов в теории вложений классов дифференцируемых функций // *Тр. МИАН СССР*. 1969. Т. 105. С. 89–167.

8. *Samko S.G.* *Hypersingular Integrals and Their Applications*. London ; New York : Taylor&Francis, 2002. 378 p.

9. *Градштейн И.С., Рыжик И.М.* Таблицы интегралов, сумм, рядов и произведений. М. : Наука, 1971. 1100 с.

10. *Самко С.Г.* О плотности в $L_p(\mathbb{R}^n)$ пространств Φ_V типа Лизоркина // *Мат. заметки*. 1982. Т. 31, № 6. С. 855–865.

References

1. *Chegolin A.P., Nogin V.A.* Multidimensional potential integral transforms and description of L-characteristic of multiplier operators. *Integral Transforms & Special Functions*. 2002, vol. 13, pp. 193-197.

2. *Chegolin A.P.* Klassy $L_{p,r}^\alpha$ tipa Lizorkina - Samko, svyazannye s kompleksnymi stepeniami telegrafnogo operatora [Classes $L_{p,r}^\alpha$ Lizorkin-Samko associated with the complex degrees of Telegraph operator]. *Izvestiia vuzov. Matematika*. 2002. No. 7, pp. 58-64.

3. *Nogin V.A., Chegolin A.P.* Kompleksnye stepeni telegrafnogo i blizkikh k nemu operatorov v L_p -prostranstvakh [Complex powers of the Telegraph and adjacent operators in L_p -spaces]. *Dif. uravneniya*. 2003, vol. 39, No. 3, pp. 402-409.

4. *Chegolin A.P.* Integraly i proizvodnye drobnogo poryadka v klassakh Gel'dera na pryamougol'nike [Integrals and derivatives of fractional order in Hölder classes on a rectangle]. *Izv. vuzov. Sev.-Kavk. region. Estestv. nauki*. 2015, No. 1, pp. 61-64.

5. *Nogin V.A., Samko S.G.* Method of approximating inverse operators and its applications to the inversion of potential type integral transforms. *Integral Transforms and Special Functions*. 1999, vol. 8, no. 1-2, pp. 205-228.

6. *Samko S.G., Kilbas A.A., Marichev O.I.* *Integraly i proizvodnye drobnogo poryadka i ikh prilozheniya* [Integrals and derivatives of fractional order and their applications]. Minsk: Nauka i tekhnika, 1987, 688 p.

7. *Lizorkin P.I.* Obobshchennoe liuvillevskoe differentsirovanie i metod mul'tiplikatorov v teorii vlozhenii klassov differentsiruemykh funktsii [Generalized Liouville differentiation and the multiplier method in the embedding theory of classes of differentiable functions]. *Tr. MIAN SSSR*. 1969, vol. 105, pp. 89-167.

8. *Samko S.G.* *Hypersingular integrals and their applications*. London; New York: Taylor&Francis, 2002, 378 p.

9. *Gradshtein I.S., Ryzhik I.M.* *Tablitsy integralov, summ, ryadov i proizvedenii* [Tables of integrals, sums, series and products]. Moscow: Nauka, 1971, 1100 p.

10. *Samko S.G.* O plotnosti v $L_p(\mathbb{R}^n)$ prostranstv Φ_V tipa Lizorkina [On the density in $L_p(\mathbb{R}^n)$ spaces Φ_V of Lizorkin type]. *Mat. zametki*. 1982, vol. 31, No. 6, pp. 855-865.

БИОЛОГИЧЕСКИЕ НАУКИ

BIOLOGICAL SCIENCES

УДК 577.323

DOI 10.23683/0321-3005-2017-4-1-63-69

РАСПОЗНАВАНИЕ СТРУКТУР СТЕБЕЛЬ – ПЕТЛЯ ТРАНСПОЗОНОВ ЧЕЛОВЕКА И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ИХ ФУНКЦИИ ПРИ ПОМОЩИ МОДЕЛИ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

© 2017 г. Д.А. Грецишникова¹, М.С. Попова^{1,2}

¹Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия,

²Высшая школа экономики, Москва, Россия

IDENTIFYING STEM-LOOP STRUCTURES IN HUMAN TRANSPOSONS AND PREDICTING THEIR FUNCTION BY MACHINE LEARNING MODEL

D.A. Grechishnikova¹, M.S. Poptsova^{1,2}

¹Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia,

²Higher School of Economics, Moscow, Russia

Грецишникова Дарья Александровна – аспирант, кафедра биофизики, физический факультет, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Ленинские Горы, 1, стр. 2, г. Москва, 119991, Россия, e-mail: daria.grechishnikova@gmail.com

Daria A. Grechishnikova - Postgraduate, Department of Biophysics, Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University, Leninskie Gory, 1, Bld. 2, Moscow, 119991, Russia, e-mail: daria.grechishnikova@gmail.com

Попова Мария Сергеевна – кандидат физико-математических наук, доцент, факультет компьютерных наук, Высшая школа экономики, ул. Мясницкая, 20, г. Москва, 101000, Россия; старший научный сотрудник, кафедра биофизики, физический факультет, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Ленинские Горы, 1, стр. 2, г. Москва, 119991, Россия, e-mail: maria.poptsova@gmail.com

Maria S. Poptsova - Candidate of Physics and Mathematics, Associate Professor, Department of Computer Science, Higher School of Economics, Myasnitskaya St., 20, Moscow, 101000, Russia; Senior Researcher, Department of Biophysics, Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University, Leninskie Gory, 1, Bld. 2, Moscow, 119991, Russia, e-mail: maria.poptsova@gmail.com

Во многих процессах, происходящих в клетке, важную роль играют вторичные структуры РНК/ДНК. Часто такие структуры служат опознавательным знаком для белков. Ранее нами было установлено, что транспозоны человека имеют на 3'-хвосте консервативную вторичную структуру типа стебель – петля. Мы предположили, что она может быть необходима для связи с белком, осуществляющим транспозицию. Аргументом в пользу этой гипотезы могло бы стать значимое отличие физических характеристик структур из транспозонов и из других областей генома. В данной работе мы определяем физические и геометрические свойства структур стебель – петля на 3'-конце транспозонов человека и сравниваем их со свойствами структур из других областей генома. Каждой структуре стебель – петля сопоставлялся набор из 10 характеристик: свободной энергии Гиббса, энтальпии, энтропии, гидрофильности, Shift, Slide, Rise, Tilt, Roll и Twist. С помощью многомерного дисперсионного анализа мы отвергли гипотезу о неразличимости физических характеристик структур из транспозонов и из других областей генома. Построена модель логистической регрессии, способная распознавать структуры из транспозонов по физическим свойствам с точностью 89 %. Наибольшим весом в модели обладают гидрофильность, параметры Rise и Twist. Предполагается, что именно эти свойства в первую очередь влияют на распознавание белком структуры.

Ключевые слова: транспозоны, структуры стебель – петля, динуклеотидные характеристики, энтропия, свободная энергия Гиббса, машинное обучение, логистическая регрессия.

Many cellular processes are governed by the secondary RNA/DNA structures. These structures often play a role of a marker sign for the proteins. Earlier we found that human transposons have a conservative stem-loop structure at the 3'-end. We made a conjecture that this structure is important for the binding with the protein, which performs transposition. Statistically significant differences in physical properties of transposon stem-loop structures from other genomic regions may support our proposal. In the present work we identify physical and geometrical properties of the stem-loop structures at the 3'-end of human transposons and compare their properties with the properties of structures from other genomic regions. The set of 10 characteristics (Gibbs free energy, enthalpy, entropy, hydrophilic property, Shift, Slide, Rise, Tilt, Roll and Twist) is assigned to every stem-loop structure. With the help of multivariate analysis of variance (MANOVA) method we rejected an equality hypothesis for the physical characteristics of transposons and other genomic regions. We have built a logistic regression model, which is able to recognise transposon structures by their physical properties with 89 % accuracy. Hydrophilic property, Rise and Twist have the greatest weights in the model. We suppose that these properties are of the first importance for the structure recognition by a protein.

Keywords: transposons, stem-loop structures, dinucleotide properties, entropy, Gibbs free energy, machine learning, logistic regression.

Введение

Транспозоны – это участки ДНК, способные перемещаться по геному и увеличивать число своих копий. Транспозоны есть в геноме каждого эукариота. Например, они занимают 46 % генома человека [1, 2]. В настоящее время транспозоны активно исследуются, выявляются все новые и новые примеры их участия в различных биологических процессах. Зафиксировано 96 заболеваний, причиной которых являлся скачок транспозона. Прослеживается связь между активностью мобильных элементов и онкологическими заболеваниями. Активно разрабатываются диагностические методы с участием транспозонов. Так, например, транспозон LINE-1 может быть использован в качестве онкомаркера [1, 3]. Было обнаружено повышенное число копий LINE-1 в клетках мозга людей, страдающих шизофренией [4]. Скачки транспозонов способны вызывать перестройки генома, делеции, дупликации, инверсии [5]. Существует предположение, что транспозоны являются своего рода «скульпторами» генома, помогая организму приспособиться к окружающей среде в ходе эволюции [6]. Кроме того, известно, что транспозоны способны регулировать свою экспрессию и экспрессию близлежащих генов [7].

Выделяют два типа мобильных элементов. Первый перемещается методом «вырезать и вставить», а 2-й – методом «копировать и вставить». В последнем методе на матрице РНК синтезируется последовательность ДНК, которая затем при помощи обратной транскриптазы вставляется в новое место генома. Такие транспозоны называют ретротранспозонами. В геноме человека наиболее распространены LINE- и SINE-ретротранспозоны (далее транспозоны). LINE занимают 17 % генома (500 000 копий), SINE – 11 (> 1 000 000 копий).

LINE кодируют собственный молекулярный аппарат, который осуществляет копирование и вставку последовательности в геном. У SINE такого аппарата нет, они «заимствуют» его у LINE, подставляя свой

РНК-транскрипт вместо РНК-транскрипта LINE. До сих пор остается неясным, как именно белки LINE узнают собственную РНК и РНК SINE [7]. Для нескольких организмов экспериментально было показано, что белок распознает вторичную структуру типа стебель – петля на 3'-конце РНК транспозона. Кроме того, выявлено, что некоторые организмы имеют одинаковые последовательности на 3'-конце LINE- и SINE-транспозонов, а значит, и одинаковые вторичные структуры, которые, по предположению, и распознаются белком [8–10]. Принято считать, что в случаях, когда последовательности на 3'-концах разные, распознается поли-А-хвост, имеющийся и у LINE-, и у SINE-транспозонов. Однако такие хвосты есть у всех мРНК, за небольшим исключением, а это ставит под сомнение возможность избирательного распознавания белком РНК-транскрипта. Механизм ретротранспозиции пока недостаточно изучен. Остается открытым вопрос о способе распознавания белком своего РНК-транскрипта и РНК-транскрипта SINE. Ранее нами было установлено, что LINE- и SINE-транспозоны человека имеют на 3'-хвосте консервативную вторичную структуру типа стебель – петля [11]. Мы предположили, что эта структура может быть необходима для распознавания РНК-транскрипта белком. В таком случае очень вероятно, что характер взаимодействия белка с вторичной структурой типа стебель – петля будет определяться в том числе и физическими свойствами структуры. Логично предположить, что физические свойства вторичной структуры, узнаваемой белком, должны отличаться от свойств других вторичных структур РНК. Такие структуры, скорее всего, находятся под действием эволюционного отбора.

Большинство белков взаимодействует с небольшим участком последовательности. Длина такого участка, как правило, составляет 15–20 нуклеотидов [12]. Его локальные физические свойства играют важнейшую роль во взаимодействии с белком. В последнее время появляется все больше работ, использующих физические характеристики динуклеотидов

для предсказания вовлеченности последовательности в тот или иной клеточный процесс. В частности, такой подход позволяет предугадать с некоторой степенью точности, возможно ли взаимодействие данной структуры с белком [13, 14]. В работе [14] авторы построили модель машинного обучения, способную автоматически определять сайты редактирования РНК. Редактирование осуществляет специальный белок ADAR (РНК-зависимая аденозин-дезаминаза), который связывается с молекулой РНК и заменяет аденозин на инозин. Кроме того, было показано, что модели машинного обучения с использованием физических динуклеотидных характеристик способны эффективно определять горячие точки рекомбинации [15], сплайс-сайты [16], регуляторные малые РНК, произошедшие из транспозонных последовательностей [17].

В данной работе проведено сравнение по физическим характеристикам вторичных структур из транспозонов со вторичными структурами из других мест генома и со структурами, сгенерированными случайным образом. Построена модель машинного обучения, способная распознавать структуры транспозонов по физическим свойствам с 89%-й степенью точности.

Методы

Аннотация генома вторичными структурами. Аннотация генома вторичными структурами была проведена при помощи программного комплекса DNA Punctuation (www.dnapunctuation.org). Процедура поиска консервативных вторичных структур подробно описана в [11].

Составление выборок структур стебель – петля. Сформировано 3 набора данных – консервативные вторичные структуры из 6622 L1-транспозонов человека, вторичные структуры, взятые из случайных мест генома, и сгенерированные случайным образом.

Физические характеристики структур стебель – петля. Динуклеотидные физические характеристики были взяты из базы данных DiProDB [18]. Рассмотрены 10 характеристик: свободная энергия Гиббса, энтальпия, энтропия, гидрофильность, Shift, Slide, Rise, Tilt, Roll и Twist. Последние 6 – это геометрические параметры, характеризующие относительное пространственное расположение нуклеотидов. Смысл этих параметров разъясняется на рис. 1.

Нуклеотидная последовательность структуры типа стебель – петля разбивалась на динуклеотиды. Затем каждому динуклеотиду сопоставлялось значение одной из характеристик, взятое из базы DiProDB.

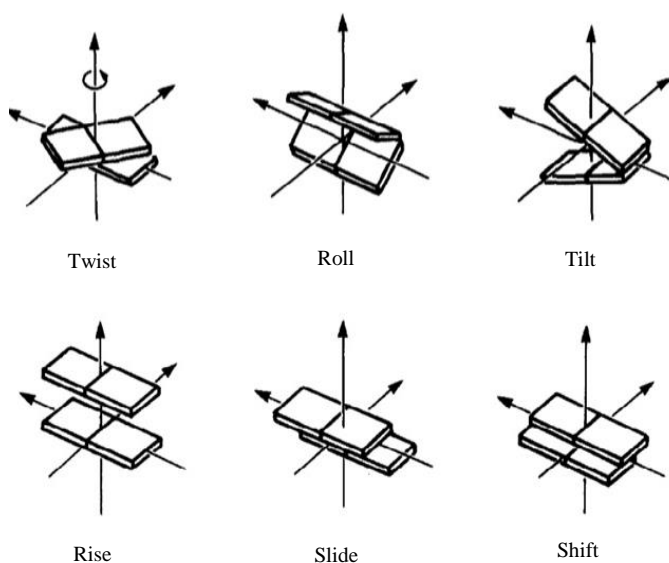


Рис. 1. Геометрические параметры, характеризующие пространственное расположение нуклеотидов относительно друг друга / Fig. 1. Geometric parameters characterizing special relationships between nucleotides

Посчитана медиана всех полученных для данной последовательности значений характеристики. Описанная процедура проведена для каждой последовательности и каждой характеристики.

Для анализа использовались 3 набора данных – последовательности структур типа стебель – петля из 6622 транспозонов человека, из случайных областей генома, а также случайно сгенерированные последовательности, образующие структуру стебель – петля.

Статистический анализ значимости различий. Проверка гипотез о неразличимости структур транспозонов и структур из других мест генома, а также структур, сгенерированных случайным образом, проводилась методом многомерного дисперсионного анализа. Расчеты произведены в среде R.

Построение модели машинного обучения. Применялась модель логистической регрессии для классификации последовательностей. В качестве зависимой переменной использовалась переменная, принимающая значение 0 в случае, если структура принадлежит транспозону, и 1, если не принадлежит. 10 физических характеристик представлены в качестве независимых переменных (предикторов), на основе значений которых требуется сделать вывод о принадлежности структуры транспозону. Расчеты проведены в среде R с использованием функции glm, а также функции train из пакета caret.

Для оценки модели применён метод кросс-валидации, а именно Leave Group Out Cross-validation (LGOCV). Из набора данных отбирается случайным образом группа образцов и используется для проверки эффективности модели, остальные данные – для обучения.

Для оценки эффективности модели были использованы следующие характеристики: точность (ACC), чувствительность (SN), специфичность (SP), ROC-кривая и площадь под ней (AUC).

Результаты

Проведен многомерный дисперсионный анализ данных, в ходе которого отвергнуты две гипотезы: 1) о равенстве средних значений физических характеристик структур из транспозонов и из случайных мест генома; 2) о равенстве средних значений физических характеристик структур из транспозонов и структур, сгенерированных случайным образом. Чтобы выяснить, какие именно характеристики статистически значимо отличаются, проведены тесты Стьюдента. Полученные p-value скорректированы методом Бонферони, так как сразу несколько гипотез проверено на одних и тех же данных. Результаты представлены в табл. 1а, б. По всем характеристикам наблюдаются значимые различия.

Для определения, является ли структура стебель – петля транспозонной или нет, мы предложили модель логистической регрессии с динуклеотидными физическими характеристиками в качестве предикторов. Построенная модель оказалась очень эффективной. Ее точность составила 89 % при сравнении структур из транспозонов и случайных мест генома и 93 % при сравнении структур из транспозонов и структур, сгенерированных случайным образом. В табл. 2 приведены другие параметры модели, на рис. 2 – ROC-кривые. Полученная модель с высокой точностью определяет вторичные структуры, принадлежащие 3'-концу транспозонов в геноме человека. Стоит отметить, что модель способна распознавать такие вторичные структуры в любой заданной последовательности РНК.

Таблица 1а

Физические характеристики (геометрические параметры и гидрофильность) структур стебель – петля / Stem-loop structure physical properties (geometric characteristics and hydrophilicity)

Свойство / датасет	Shift, 1 нм	Slide, 1 нм	Rise, 1 нм	Tilt, °	Roll, °	Twist, °	Hydrophilicity
Структуры из транспозонов	0,059	-1,456	3,212	0,553	8,133	31,752	0,232
Структуры из случайных мест генома	0,016	-1,458	3,237	0,380	8,330	31,681	0,243
Структуры, сгенерированные случайным образом	0,036	-1,480	3,243	0,395	8,310	31,487	0,251

Таблица 1б

Физические характеристики (термодинамические параметры) структур стебель – петля / Stem-loop structure thermodynamic properties

Свойство / датасет	Энтропия, Дж×К ⁻¹ × моль ⁻¹	Энтальпия, кДж/моль	Свободная энергия, кДж/моль
Структуры из транспозонов	-113,7	-43,5	-8,3
Структуры из случайных мест генома	-109,4	-41,5	-7,5
Структуры, сгенерированные случайным образом	-111,2	-42,4	-7,9

Таблица 2

Параметры модели / Predictor importance

	Точность	Специфичность	Чувствительность	AUC
Структуры из транспозонов vs структуры из случайных мест генома	0,89	0,89	0,89	0,95
Структуры из транспозонов vs структуры, сгенерированные случайным образом	0,93	0,93	0,93	0,98

Модель логистической регрессии позволяет выявить характеристики, по которым наблюдается наибольшее различие между структурами. Для каждого предиктора рассчитываются веса. Чем больше вес, тем больше вклад предиктора в разделяющую способность модели. Наибольший вклад при разделении транспозонных структур и структур из случайных мест генома внесли гидрофильность, параметры Rise и Twist, а при разделении транспозонных структур и структур, сгенерированных случайным образом, – Rise, Tilt и гидрофильность (табл. 3).

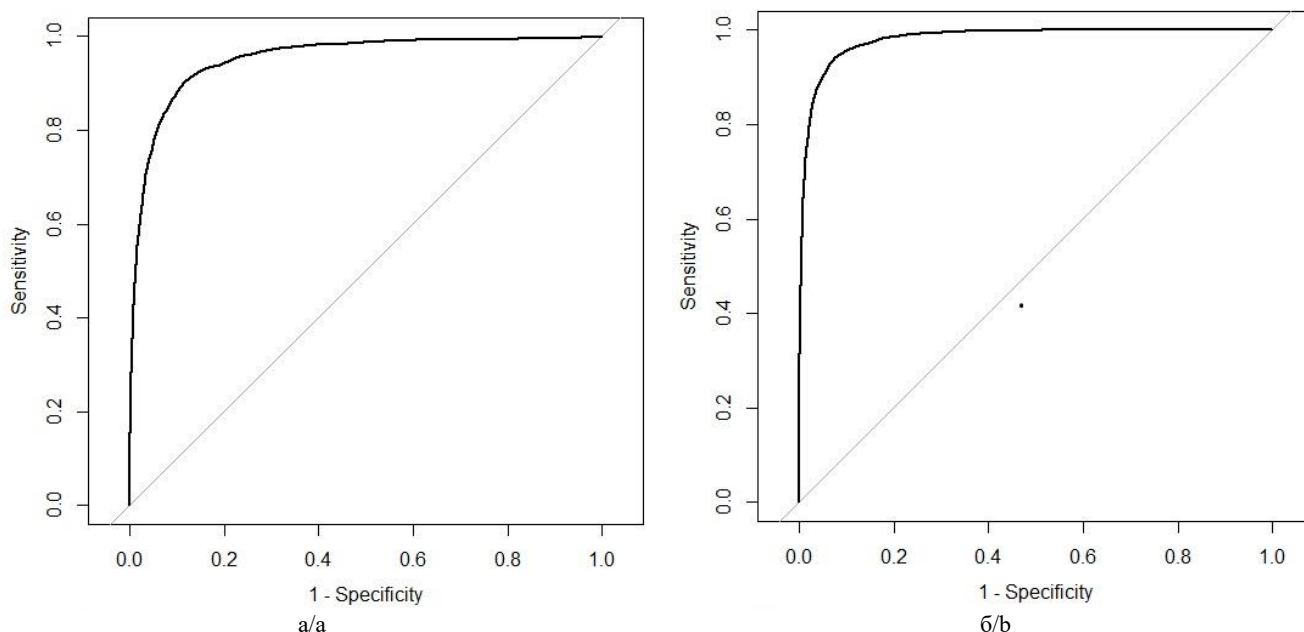


Рис. 2. ROC-кривые: а – структуры из транспозонов vs структуры из случайных мест генома; б – структуры из транспозонов vs структуры, сгенерированные случайным образом / Fig. 2. ROC curve: a - transposon structure vs structures from other genome regions; b - transposon structure vs randomly generated structures

Таблица 3

Разделяющая способность характеристик / Predictor importance

Структуры из транспозонов vs структуры из случайных мест генома		Структуры из транспозонов vs структуры, сгенерированные случайным образом	
Характеристика	Разделяющая способность, %	Характеристика	Разделяющая способность, %
Rise	100,0	Rise	100,0
Hydrophilicity	45,3	Tilt	97,5
Twist	30,0	Hydrophilicity	77,7
Tilt	28,2	Shift	72,8
Slide	19,8	Enthalpy	66,1
Shift	8,9	Entropy	65,1
Roll	6,7	Twist	2,2

Обсуждение

Если некоторые характеристики последовательности отличаются от характеристик случайно сгенерированных последовательностей, можно предположить, что первые несут некую функциональную нагрузку. В таком случае это отличие поддерживается действием эволюционного отбора, сохраняющего последовательность от накопления случайных мутаций, влияющих на ключевые характеристики. Для многих белков экспериментально показана важная роль физических характеристик структуры во взаимодействии с белком. Поскольку это взаимодействие, как правило, специфично, структура должна обладать особым выделенным набором

свойств. Полученный нами результат как раз показывает, что вторичные структуры из транспозонов обладают таким набором. Это является косвенным доказательством выдвинутой нами ранее гипотезы о роли вторичной структуры на конце транспозона в распознавании белком.

Построенная в данной работе модель может быть применима для решения важных задач биоинженерии. Она способна находить структуры, подобные транспозонным, в любой заданной последовательности РНК. Интересно было бы проверить экспериментально, может ли белок LINE, осуществляющий транспозицию, распознать любую последовательность, имеющую на 3'-конце вторичную структуру с выявленными в данной работе свойствами. Если

наша гипотеза верна, то разработанная модель может иметь огромное значение для решения задач встраивания любых заданных последовательностей в геном.

Показано, что характеристики гидрофильность, Rise и Twist обладают наибольшей разделяющей способностью. Эта информация важна, так как, очень вероятно, именно наиболее отличающиеся характеристики играют определяющую роль при взаимодействии с белком. Зная эти характеристики, можно управлять процессом связывания. Кроме того, подобная информация может оказаться полезной для задач молекулярного моделирования, например для оценки вероятности взаимодействия с белком.

Заключение

Показано, что транспозонные структуры статистически значимо отличаются от структур из других мест генома и структур, сгенерированных случайным образом. Построена модель машинного обучения, способная находить транспозонные структуры или им подобные в любой заданной последовательности РНК. Найдены характеристики вторичной структуры РНК, которые наиболее вероятно являются определяющими при связывании с белком. Полученные результаты, а также процедура их получения могут иметь важное практическое применение в биоинженерии (для встраивания заданных последовательностей в геном) и в задачах молекулярного моделирования.

Литература

1. Huang C.R., Burns K.H., Boeke J.D. Active transposition in genomes // *Ann. Rev. Genet.* 2012. Vol. 46. P. 651–675.
2. Lander E.S., Linton L.M., Birren B. [et al.]. International Human Genome Sequencing C. Initial sequencing and analysis of the human genome // *Nature.* 2001. Vol. 409, № 6822. P. 860–921.
3. Hancks D.C., Kazazian H.H. Active human retrotransposons: variation and disease // *Current Opinion in Genetics & Development.* 2012. Vol. 22, № 3. P. 191–203.
4. Bundo M., Toyoshima M., Okada Y., Akamatsu W., Ueda J., Nemoto-Miyauchi T., Sunaga F., Toritsuka M., Ikawa D., Kakita A., Kato M., Kasai K., Kishimoto T., Nawa H., Okano H., Yoshikawa T., Kato T., Iwamoto K. Increased L1 retrotransposition in the neuronal genome in schizophrenia // *Neuron.* 2014. Vol. 81, № 2. P. 306–313.
5. Kazazian H.H. Mobile elements: drivers of genome evolution // *Science.* 2004. Vol. 303, № 5664. P. 1626–1632.
6. Beck C.R., Garcia-Perez J.L., Badge R.M., Moran J.V. LINE-1 elements in structural variation and disease // *Ann. Rev. Genomics Hum. Genet.* 2011. Vol. 12. P. 187–215.

7. Richardson S.R., Doucet A.J., Kopera H.C., Moldovan J.B., Garcia-Perez J.L., Moran J.V. The Influence of LINE-1 and SINE Retrotransposons on Mammalian Genomes // *Microbiol Spectr.* 2015. Vol. 3, № 2. P. MDNA3-0061-2014.

8. Hayashi Y., Kajikawa M., Matsumoto T., Okada N. Mechanism by which a LINE protein recognizes its 3' tail RNA // *Nucleic Acids Research.* 2014. Vol. 42, № 16. P. 10605–10617.

9. Kajikawa M., Okada N. LINEs Mobilize SINEs in the Eel through a Shared 3' Sequence // *Cell.* 2002. Vol. 111, № 3. P. 433–444.

10. Osanai M., Takahashi H., Kojima K.K., Hamada M., Fujiwara H. Essential motifs in the 3' untranslated region required for retrotransposition and the precise start of reverse transcription in non-long-terminal-repeat retrotransposon SART1 // *Mol. Cell Biol.* 2004. Vol. 24, № 18. P. 7902–7913.

11. Grechishnikova D., Poptsova M. Conserved 3' UTR stem-loop structure in L1 and Alu transposons in human genome: possible role in retrotransposition // *BMC Genomics.* 2016. Vol. 17, № 1. P. 992.

12. Luscombe N.M., Austin S.E., Berman H.M., Thornton J.M. An overview of the structures of protein-DNA complexes // *Genome Biol.* 2000. Vol. 1, № 1. P. REVIEWS001.

13. Barraud P., Allain F.H. ADAR proteins: double-stranded RNA and Z-DNA binding domains // *Curr. Top Microbiol. Immunol.* 2012. Vol. 353. P. 35–60.

14. Chen W., Feng P., Ding H., Lin H. PAI: Predicting adenosine to inosine editing sites by using pseudo nucleotide compositions // *Sci. Rep.* 2016. Vol. 6. P. 35123.

15. Chen W., Feng P.M., Lin H., Chou K.C. iRSpot-PseDNC: identify recombination spots with pseudo dinucleotide composition // *Nucleic Acids Res.* 2013. Vol. 41, № 6. P. e68.

16. Chen W., Feng P.M., Lin H., Chou K.C. iSS-PseDNC: identifying splicing sites using pseudo dinucleotide composition // *Biomed. Res. Int.* 2014. Vol. 2014. P. 623149.

17. Liu B., Yang F., Chou K.C. 2L-piRNA: A Two-Layer Ensemble Classifier for Identifying Piwi-Interacting RNAs and Their Function // *Mol. Ther. Nucleic Acids.* 2017. Vol. 7. P. 267–277.

18. Friedel M., Nikolajewa S., Suhnel J., Wilhelm T. Di-ProDB: a database for dinucleotide properties // *Nucleic Acids Res.* 2009. Vol. 37. C. D37–40.

References

1. Huang C.R., Burns K.H., Boeke J.D. Active transposition in genomes. *Ann. Rev. Genet.* 2012, vol. 46, pp. 651-675.
2. Lander E.S., Linton L.M., Birren B. et al. International Human Genome Sequencing C. Initial sequencing and analysis of the human genome. *Nature.* 2001, vol. 409, No. 6822, pp. 860-921.

3. Hancks D.C., Kazazian H.H. Active human retrotransposons: variation and disease. *Current Opinion in Genetics & Development*. 2012, vol. 22, No. 3, pp. 191-203.
4. Bundo M., Toyoshima M., Okada Y., Akamatsu W., Ueda J., Nemoto-Miyauchi T., Sunaga F., Toritsuka M., Ikawa D., Kakita A., Kato M., Kasai K., Kishimoto T., Nawa H., Okano H., Yoshikawa T., Kato T., Iwamoto K. Increased L1 retrotransposition in the neuronal genome in schizophrenia. *Neuron*. 2014, vol. 81, No. 2, pp. 306-313.
5. Kazazian H.H. Mobile elements: drivers of genome evolution. *Science, Science*. 2004, vol. 303, No. 5664, pp. 1626-1632.
6. Beck C.R., Garcia-Perez J.L., Badge R.M., Moran J.V. LINE-1 elements in structural variation and disease. *Ann. Rev. Genomics Hum. Genet.* 2011, vol. 12, pp. 187-215.
7. Richardson S.R., Doucet A.J., Kopera H.C., Moldovan J.B., Garcia-Perez J.L., Moran J.V. The Influence of LINE-1 and SINE Retrotransposons on Mammalian Genomes. *Microbiol. Spectr.* 2015, vol. 3, No. 2, pp. MDNA3-0061-2014.
8. Hayashi Y., Kajikawa M., Matsumoto T., Okada N. Mechanism by which a LINE protein recognizes its 3' tail RNA. *Nucleic Acids Research*. 2014, vol. 42, No. 16, pp. 10605-10617.
9. Kajikawa M., Okada N. LINEs Mobilize SINEs in the Eel through a Shared 3' Sequence. *Cell*. 2002, vol. 111, No. 3, pp. 433-444.
10. Osanai M., Takahashi H., Kojima K.K., Hamada M., Fujiwara H. Essential motifs in the 3' untranslated region required for retrotransposition and the precise start of reverse transcription in non-long-terminal-repeat retrotransposon SART1. *Mol. Cell Biol.* 2004, vol. 24, No. 18, pp. 7902-7913.
11. Grechishnikova D., Poptsova M. Conserved 3' UTR stem-loop structure in L1 and Alu transposons in human genome: possible role in retrotransposition. *BMC Genomics*. 2016, vol. 17, No. 1, p. 992.
12. Luscombe N.M., Austin S.E., Berman H.M., Thornton J.M. An overview of the structures of protein-DNA complexes. *Genome Biol.* 2000, vol. 1, No. 1, p. REVIEWS001.
13. Barraud P., Allain F.H. ADAR proteins: double-stranded RNA and Z-DNA binding domains. *Curr. Top Microbiol. Immunol.* 2012, vol. 353, pp. 35-60.
14. Chen W., Feng P., Ding H., Lin H. PAI: Predicting adenosine to inosine editing sites by using pseudo nucleotide compositions. *Sci. Rep.* 2016, vol. 6, p. 35123.
15. Chen W., Feng P.M., Lin H., Chou K.C. iRSpot-PseDNC: identify recombination spots with pseudo dinucleotide composition. *Nucleic Acids Res.* 2013, vol. 41, No. 6, p. e68.
16. Chen W., Feng P.M., Lin H., Chou K.C. iSS-PseDNC: identifying splicing sites using pseudo dinucleotide composition. *Biomed Res. Int.* 2014, vol. 2014, p. 623149.
17. Liu B., Yang F., Chou K.C. 2L-piRNA: A Two-Layer Ensemble Classifier for Identifying Piwi-Interacting RNAs and Their Function. *Mol. Ther. Nucleic Acids*. 2017, vol. 7, pp. 267-277.
18. Friedel M., Nikolajewa S., Suhnel J., Wilhelm T. Di-ProDB: a database for dinucleotide properties. *Nucleic Acids Res.* 2009, vol. 37, pp. D37-40.

УДК 663/635.631.53.04.001

DOI 10.23683/0321-3005-2017-4-1-70-74

О СОВЕРШЕНСТВОВАНИИ ТЕХНОЛОГИИ ПОДГОТОВКИ СЕМЯН ЗЕРНОВЫХ ПЕРЕД ПОСЕВОМ В УСЛОВИЯХ АРИДИЗАЦИИ КЛИМАТА

© 2017 г. А.В. Касьяненко¹, И.Н. Краснов², И.А. Кравченко², Т.Н. Толстоухова²

¹ЗАО «СКВО», Ростов-на-Дону, Россия,

²Азово-Черноморский инженерный институт,

филиал Донского государственного аграрного университета в г. Зернограде, Зерноград, Россия

ON IMPROVING THE TECHNOLOGY OF PREPARATION OF GRAIN SEEDS BEFORE SOWING IN CONDITIONS OF CLIMATE ARIDIZATION

A.V. Kasyanenko¹, I.N. Krasnov², I.A. Kravchenko², T.N. Tolstoukhova²

¹JSC "SKVO", Rostov-on-Don, Russia,

²Azov-Black Sea Engineering Institute, Branch of the Don State Agrarian University of Zernograd, Zernograd, Russia

Касьяненко Анна Владимировна – экономист, генеральный директор, ЗАО «СКВО», ул. Малыгиной, 214/4, г. Ростов-на-Дону, 344000, Россия, e-mail: Kasyanenko.anna@gmail.com

Anna V. Kasyanenko - Economist, General Director of JSC "SKVO", Maluyuginoy St., 214/4, Rostov-on-Don, 344000, Russia, e-mail: Kasyanenko.Anna@gmail.com

Краснов Иван Николаевич – доктор технических наук, профессор, кафедра технологии и средства механизации агропромышленного комплекса, Азово-Черноморский инженерный институт, филиал Донского государственного аграрного университета в г. Зернограде, ул. Ленина, 19, г. Зерноград, Ростовская обл., 347740, Россия, e-mail: krasnov1310@rambler.ru

Ivan N. Krasnov - Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Technology and Mechanization of Agriculture, Azov-Black Sea Engineering Institute, Branch of the Don State Agrarian University of Zernograd, Lenina St., 19, Zernograd, Rostov Region, 347740, Russia, e-mail: krasnov1310@rambler.ru

Кравченко Иван Андреевич – кандидат технических наук, доцент, кафедра технологии и средства механизации агропромышленного комплекса, Азово-Черноморский инженерный институт, филиал Донского государственного аграрного университета в г. Зернограде, ул. Ленина, 19, г. Зерноград, Ростовская обл., 347740, Россия, e-mail: ivan.kravchenko@mail.ru

Ivan A. Kravchenko - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Technology and Mechanization of Agriculture, Azov-Black Sea Engineering Institute, Branch of the Don State Agrarian University of Zernograd, Lenina St., 19, Zernograd, Rostov Region, 347740, Russia, e-mail: ivan.kravchenko@mail.ru

Толстоухова Татьяна Николаевна – кандидат технических наук, доцент, кафедра технологии и средства механизации агропромышленного комплекса, Азово-Черноморский инженерный институт, филиал Донского государственного аграрного университета в г. Зернограде, ул. Ленина, 19, г. Зерноград, Ростовская обл., 347740, Россия, e-mail: ttn67@rambler.ru

Tatiana N. Tolstoukhova - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Technology and Mechanization of agriculture, Azov-Black Sea Engineering Institute Branch of the Don State Agrarian University of Zernograd, Lenina St., 19, Zernograd, Rostov Region, 347740, Russia, e-mail: ttn67@rambler.ru

Рассматривается проблема сохранения посевов и повышения урожайности озимых зерновых культур в условиях изменения климата. В последние годы указанная проблема приобрела особую актуальность в связи с резким иссушением почвы в осенний период. Один из путей её решения – это совершенствование технологии подготовки семян зерновых с возможностью осеннего посева их в оптимальные сроки независимо от влажности почвы. Предложен способ насыщения семян водой или растворами протравливающих и стимулирующих препаратов с последующим покрытием их до посева тонкой влагозащитной плёнкой. Дан анализ процесса нанесения на семена микроплёнки во встречном потоке паров материала покрытия. Опытными посевами определена возможность посева их в установленные агротехнические сроки и увеличения урожайности.

Ключевые слова: семена зерновых, осенний сев, сухая почва, насыщение влагой, влагозащитное покрытие.

The problem of preservation of crops and increase of productivity of winter grain crops in the conditions of climate in the article. This problem has become particularly relevant in connection with the sharp dryness of the soil in the autumn. Improvement of technology of preparation of grain seeds, with the possibility of autumn sowing them at the optimum time regardless of soil moisture is one of the ways of its solution. The proposed method of saturation with water or aqueous etching and stimulating drugs, followed by coating them before planting a thin waterproof film. The analysis of the process of seed coating, microfilm in the counter flow of vapor of the coating material. Experienced crops the possibility of planting them in agronomic terms and increasing yields.

Keywords: grain seeds, autumn sowing, dry soil, saturated with moisture, a moisture-resistant coating.

Общепринята практика подготовки семян к посеву путём их отбора при сортировке и протравливания до посева с установленной нормой на глубину заделки [1, 2]. Посев семян предусмотрен в увлажнённую почву, однако осенью из-за засушливых условий, вызванных аридизацией климата в последние годы, он вынужденно производится в иссушенную почву с нарушением оптимальных сроков посева в надежде на скорое появление атмосферных осадков. При их отсутствии долго не всходившие семена формируются разреженными и ослабленными, посевы в зиму нередко погибают. Весной пересеваются, что значительно понижает урожайность.

Известен способ обработки зерна перед осенним посевом путём замачивания его в воде из расчёта 25÷35 л воды на 100 кг зерна (в зависимости от вида и сорта сельскохозяйственной культуры) в течение 5–14 дней [3]. В настоящее время этот способ распространён во многих странах мира и назван праймингом семян [4]. Его недостаток – в условиях иссушенной почвы большая часть впитавшейся в зерно влаги теряется на увлажнение окружающей его почвы. Всходы ослабляются и при длительном отсутствии атмосферных осадков нередко погибают.

В Ростовской области засеваются ежегодно свыше 2 млн га озимых, при этом из-за посева в иссушенную почву полностью погибает не менее 200 тыс. га посевов, которые пересеваются весной яровыми культурами. От лишних затрат на семена, оплату труда, затрат на амортизацию и ремонт техники, дополнительную обработку земли и от потерь урожайности (урожайность яровых на 35–40 % ниже озимых) ущерб составляет более 2 млрд р. В целом по стране ущерб по этим причинам может быть оценен в десятки миллиардов рублей. Особенно значителен он в Краснодарском и Ставропольском краях, Волгоградской, Ростовской и других областях России.

Мы предлагаем решение возникшей проблемы путем включения в процесс подготовки семян к посеву операцию покрытия их влагозащитной плёнкой [5–7]. Предварительно семена обильно увлажняют растворами протравливающих и стимулирующих препаратов с добавлением микроэлементов в качестве удобрений.

Актуальность настоящей работы обусловлена снижением эффективности возделывания озимых культур во многих зерносеющих регионах России из-за аридизации климата в последние годы, изменений степени увлажнения почвы и погоды в установленные агротехнические сроки их посева. Озимый посев зерновых в настоящее время, а по прогнозам и в ближайшей перспективе, сопровождается нередко жаркой, сухой погодой и потерей почвенной влаги. Современные же влагосберегающие ме-

тоды подготовки почвы к посеву и технологии посева зерновых в условиях засухи не гарантируют их хорошей всхожести и достаточного развития растений к наступлению заморозков.

Цель исследования – обеспечение защиты увлажнённых семян зерновых перед осенним посевом от потери воды после посева в иссушенную почву изоляцией их наружным плёночным покрытием из легкоплавких материалов, например воска или парафина.

В *задачи исследования* входили вопросы разработки усовершенствованного способа и устройства для нанесения на семена влагозащитного покрытия, определение основных закономерностей работы такого устройства, изучение процессов теплообмена между материалом покрытия и семенами, а также обоснование параметров исследуемого оборудования.

Влагозащитными плёнками в настоящее время покрывают фрукты, овощи, некоторые виды ягод, в редких случаях семена различных огородных культур. Классификацию способов нанесения плёночных покрытий можно представить по следующим методам взаимодействия продукта с материалом защитного покрытия: путём погружения в жидкий материал, разбрызгивания материала покрытия, обработки в парах материала покрытия.

Можно классифицировать такие покрытия и по толщине плёнки материала, наносимого на продукт: толстые покрытия порядка нескольких миллиметров, микропокрытия и нанопокрытия. Наибольшее распространение получили микропокрытия, организация нанопокрытий сложна и весьма дорога в исполнении. Кратко представим суть указанных способов обработки продуктов:

1. Погружение. Фрукты и овощи опускаются в горячий парафин или воск. Иногда добавляется специальная смола. Основным недостатком данного метода является большой расход материала покрытия.

2. Распыление. Процесс осуществляется путём нагрева материала покрытия до температуры плавления с последующим его нанесением при помощи разбрызгивающих насадок.

3. Обработка в парах. Продукты транспортируют через зоны ёмкости, находящейся под давлением насыщенных паров материала защитного покрытия. На выходе слой покрытия охлаждается потоком продуваемого воздуха.

Значительный вклад в решение проблемы сохранения пищевой продукции наряду с известными и широко используемыми приемами вносит такой нетрадиционный способ упаковки, как создание защитных покрытий на продуктах питания. Они, формируясь непосредственно на поверхности пищевых продуктов, обеспечивают более надежную их защиту (по сравнению с упаковкой в полимерную

пленку) от окислительной и микробиальной порчи за счет отсутствия прослойки воздуха между продуктом и пленкой, делают технологию упаковки и хранения более современной и рациональной. Преимуществами такого способа защиты пищевой продукции являются возможность использования экологически безопасных водных систем, сравнительная простота технических решений, связанных с нанесением на поверхность продукта полифункциональных покрытий без применения высоких температур, негативно влияющих на свойства продукта, обеспечение плотного и повсеместного облегания поверхности продукта, за счет чего гарантируется отсутствие микрополостей – областей потенциального развития нежелательной микрофлоры.

Погружение продуктов в расплав материала покрытия обычно осуществляется в контейнерах, схема этих устройств проста и не требует особых пояснений. Этот способ наиболее трудоёмок и малопроизводителен, в связи с чем не может использоваться для обработки семенного материала в больших объёмах.

Устройства для нанесения на фрукты и овощи защитного слоя путём распыления материала покрытия имеют сложную конструкцию [8], их также практически невозможно использовать для обработки семенного материала, что вызывает необходимость разработки нового устройства для нанесения защитных покрытий именно на увлажнённые семена пшеницы перед их осенним посевом.

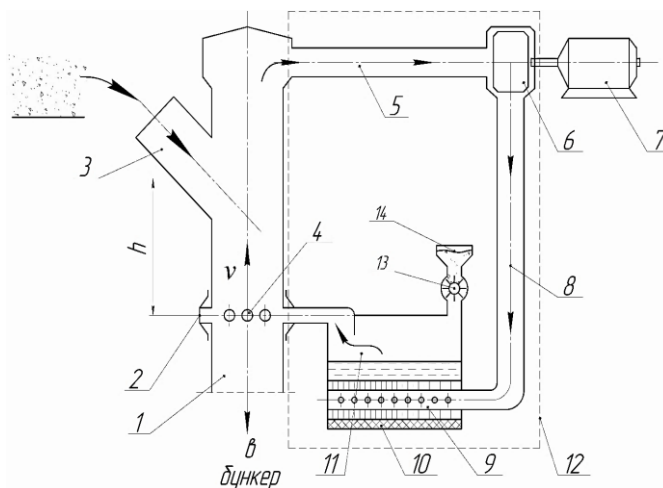
Предлагаемое нами устройство для этих целей представлено в виде схемы на рис. 1. Работает оно следующим образом. Перед обработкой семян в бачок 11 дозатором 13 из бункера 14 загружается определённая порция материала влагозащитного покрытия, включается подогреватель 10, а после расплавления влагозащитного покрытия включается вентилятор 6 для подачи в барботер 9 бачка 11 воздуха, который на выходе из бачка насыщается парами материала покрытия. В качестве такого материала предварительно принят легкоплавкий парафин.

Далее открывают подачу в патрубок 3 семян пшеницы. Поток семян в корпусе течки движется, падая навстречу потоку паров парафина, и покрывается влагозащитной плёнкой, а воздух с остатками паров материала покрытия вентилятором 6 по трубопроводу 8 возвращается в барботер 9 для последующего насыщения парами парафина.

Подаваемое в течку зерно приобретает в результате свободного падения к месту установки распылителя паров (месту ввода паров в корпус течки) следующую скорость (рис. 2): $v_3 = gT_1$, где g – ускорение земного притяжения, m/c^2 ; T_1 , с – длительность падения зерна с высоты h .

Известно, что $T_1 = \sqrt{\frac{2h}{g}}$, где h – высота падения

зерна до ввода паров влагозащитного покрытия, м. Длительность падения семени ограничена временем воздействия на него температуры нагрева паров влагозащитного покрытия: в этот период нагрев зародыша семени не должен превышать $55^\circ C$ – температуру, при которой возможна его гибель из-за перегрева [9].



1 – корпус течки для зерна; 2 – блок распылителей паров; 3 – раструб для ввода семян; 4 – отверстия распылителей; 5 и 8 – трубопроводы; 6 – осевой вентилятор; 7 – электродвигатель; 9 – барботер; 10 – нагреватель; 11 – бачок; 12 – утеплитель; 13 – дозатор; 14 – бункер

Рис. 1. Схема устройства для нанесения влагозащитной плёнки на семена в технологии подготовки их к осеннему посеву / Fig. 1. Diagram of the device for applying a moisture-resistant film on the seeds in technology to prepare them for autumn planting

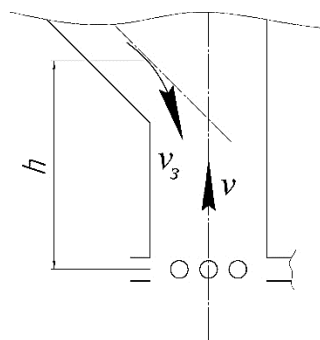


Рис. 2. Схема потоков семян и паров материала влагозащитного покрытия / Fig. 2. Flow pattern of seeds and material vapor moisture barrier coating

Встречная скорость паров в корпусе течки (рис. 2) зависит от производительности вентилятора и площади поперечного сечения корпуса:

$v = \frac{Q}{3600 \cdot ab}$, м/с, где Q – производительность вентилятора, м³/ч; a, b – длина и ширина сторон поперечного сечения течки прямоугольной формы, м.

Введём далее следующие допущения:

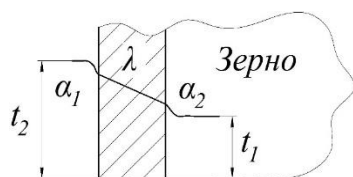
– пренебрегаем некоторым снижением скорости полёта зерна под действием встречного потока паров покрытия, что несколько сокращает реальную длительность воздействия на семена температуры паров;

– считаем, что режим работы установки должен быть таким, чтобы пары материала влагозащитного покрытия при циркуляции не могли охладиться до температуры конденсации, т.е. процесс должен проходить в пределах тепла парообразования и перегрева паров;

– потери тепла в окружающую среду считаем незначительными (в пределах 5%) и ими пренебрегаем;

– в системе циркулирует не просто пар материала покрытия, а его смесь с воздухом, имеющая температуру нагрева, соответствующую температуре плавления материала покрытия.

Теплопередача от пара к семени зерна проходит через стенку оболочки (рис. 3).



α_1, α_2 – коэффициенты теплопередачи от пара к оболочке зерна и от оболочки к ядру; λ – теплопроводность материала оболочки; δ – толщина оболочки зерна

Рис. 3. Схема теплопередачи к зерну в корпусе течки / Fig. 3. Scheme of heat transfer to the grain

Температура пара $t_2 = \Delta t_n + t_{nl}$, где Δt_n и t_{nl} – повышение температуры пара материала покрытия после плавления и температура плавления этого материала, °С. Количество передаваемого в зерновку тепла Q [10]

$$Q \leq Gc(t_2 - t_1), \quad (1)$$

где G – масса зерновки, кг; c – теплоёмкость её, ккал/кг град; t_1 – допустимая температура нагрева семени, °С.

Это же количество тепла передаётся через оболочку в зерновку за время T :

$$Q = Fk \cdot \Delta t_{cp} \cdot T, \quad (2)$$

где F – площадь поверхности зерновки; T – длительность её нагрева в зерновой течке; k – общий коэффициент теплопередачи к зерновке,

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}, \quad \Delta t_{cp} = \frac{\tau_{нач} - \tau_{кон}}{\ln \frac{\tau_{нач}}{\tau_{кон}}}; \quad \tau_{нач} \text{ и } \tau_{кон} -$$

начальная и конечная разности температур, $\tau_{нач} = t_n - t$, $\tau_{кон} = t_{nl} - t_1$.

Приравнивая (1) к (2), получим время нагрева зерновки до допустимой температуры при нанесении на её поверхность влагозащитного покрытия:

$$T = \frac{Gc(t_1 - t_2)}{Fk \cdot \Delta t_{cp}}.$$

По расчётам допустимая длительность выдержки увлажнённой зерновки с условным диаметром $d_y = 4$ мм в парах парафина составляет не более 0,306 с.

Таким образом, расстояние h до ввода паров материала влагозащитного покрытия в течку для зерна должно быть не более

$$h = \frac{T_1^2 \cdot g}{2} = \frac{0,306 \cdot 9,81}{2} = 0,46 \text{ м.}$$

Скорость зерна в этом сечении составит 3 м/с. Скорость встречного потока паров покрытия должна быть не менее скорости зерна в рассматриваемом сечении течки и определяет производительность вентилятора.

По экспериментальным данным расход парафина для влагозащитного покрытия одной тонны семян на предлагаемой установке составляет $q_{уд} = 20 \dots 25$ г. При вместимости бункера для зерна $Q_1 = 30$ т общий расход парафина составит не более 1 кг.

Опыты на производственных делянках (рис. 4) показали дружные всходы к началу атмосферных осадков и хорошую перезимовку всходов. Урожайность с них оказалась выше на 21% в сравнении с традиционным посевом без увлажнения семян по предложенной технологии.



Рис. 4. Экспериментальные озимые посевы пшеницы в засушливых условиях / Fig. 4. Experimental crops of wheat in dry conditions

Выводы

В засушливых условиях озимых посевов зерновых культур целесообразно увлажнение семян перед посевом до достаточной для их всходов влажности с последующим нанесением на их поверхность влагозащитной пленки.

Нанесение влагозащитной плёнки рекомендовано осуществлять во встречном потоке паров материала покрытия с потоком семян.

Длительность обработки семян в потоке паров материала покрытия не должна превышать времени нагрева зародыша зерна до температуры его повреждения и гибели, определяемых по предложенным в статье зависимостям.

Обработка семян перед посевом по предложенной технологии обеспечивает их хорошую всхожесть в засушливых условиях, стойкость к заморозкам и повышение урожайности на 20 и более процентов.

Литература

1. Кривошеев Г.Я., Игнатъев А.С. Признаки для отбора исходного материала, адаптированного к условиям недостаточного и неустойчивого увлажнения // *Зерновое хозяйство России*. 2013. № 4 (28). С. 29–33.
2. Бельтюков Л.П. *Сорт, технология, урожай*. Ростов н/Д. : Terra Принт, 2007. 160 с.
3. *Справочная книга директора совхоза*. Ч. 1 / под общ. ред. С.В. Кальченко, Ф.М. Мартыянова, С.В. Перова. М., 1956. С. 529–530.
4. McDonald. Seed priming // *Seed technology and its biological basis* / eds. M. Black and J.D. Bewley. Sheffield, UK, 2000. P. 287–325.
5. Краснов И.Н., Кравченко И.А., Бондарева М.А., Семочкина Е.М. Подготовка зерна к озимому посеву в засушливых условиях // *Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки*. 2014, № 4. С. 58–61.
6. Пат. № 2464759 РФ. МПК А01С 1/06. Способ обработки зерна перед посевом / И.Н. Краснов, М.А. Таранов, И.А. Кравченко, И.В. Назаров, Ф.О. Перекрест. Оpubл. 27.10.2012. Бюл. № 30.
7. Пат. 2471557 РФ, МПК В02В. Увлажнительная машина для зерна / И.Н. Краснов, А.И. Удовкин, И.А. Кравченко, Ф.О. Перекрест. Оpubл. 10.01.2013. Бюл. № 1.
8. А. с. № 1620095 СССР, МКИ А 23 В 7/16. Устройство для покрытия фруктов и овощей защитным слоем / А.В. Скотников, Ю.В. Чигарёв, В.А. Агейчик, Г.Г. Валюшкевич. Заяв. Белорусский институт механизации сельского хозяйства. 1988. Бюл. № 2.

9. Егоров Г.А. *Управление технологическими свойствами зерна*. Воронеж : Изд-во ВГУ, 2000.

10. Кук Г.А. *Теория и расчёт основного оборудования предприятий молочной промышленности*. М., 1934. 471 с.

References

1. Krivosheev G.Ya., Ignat'ev A.S. *Priznaki dlya otbora iskhodnogo materiala, adaptirovannogo k usloviyam nedostatochnogo i neustoichivogo uvlazhneniya* [Signs for the selection of source material adapted to the conditions of insufficient and unstable hydration]. *Zernovoe khozyaistvo Rossii*. 2013, No. 4 (28), pp. 29-33.
2. Bel'tyukov L.P. *Sort, tekhnologiya, urozhai* [Variety, technology, harvest]. Rostov-on-Don: Terra Print, 2007, 160 p.
3. *Spravochnaya kniga direktora sovkhoha* [Reference book of the director of the state farm]. Ch. 1. Eds. S.V. Kal'chenko, F.M. Mart'yanov, S.V. Perov. Moscow, 1956, pp. 529-530.
4. McDonald. Seed priming. *Seed technology and its biological basis*. Eds. M. Black and J.D. Bewley. Sheffield, UK, 2000, pp. 287-325.
5. Krasnov I.N., Kravchenko I.A., Bondareva M.A., Semochkina E.M. *Podgotovka zerna k ozimomu posevu v zasushlivykh usloviyakh* [Preparation of grain for winter sowing in arid conditions]. *Izv. vuzov. Sev.-Kavk. region. Estestv. nauki*. 2014, No. 4, pp. 58-61.
6. Krasnov I.N., Taranov M.A., Kravchenko I.A., Nazarov I.V., Perekrest F.O. *Sposob obrabotki zerna pered posevom* [Method of processing grain before sowing]. Certificate, No. 2464759 RF. MPK A01S 1/06. 27.10.2012.
7. Krasnov I.N., Udovkin A.I., Kravchenko I.A., Perekrest F.O. *Uvlazhnitel'naya mashina dlya zerna* [Humidifying machine for grain]. Certificate, No. 2471557 RF, MPK V02V. 10.01.2013.
8. Skotnikov A.V., Chigarev Yu.V., Ageichik V.A., Valyushkevich G.G. *Ustroistvo dlya pokrytiya fruktov i ovoshchei zashchitnym sloem* [Device for coating fruits and vegetables with protective layer]. Certificate, No. 1620095 SSSR, MKI A 23 V 7/16. 1988.
9. Egorov G.A. *Upravlenie tekhnologicheskimi svoistvami zerna* [Management of technological properties of grain]. Voronezh : Izd-vo. VGU, 2000.
10. Kuk G.A. *Teoriya i raschet osnovnogo oborudovaniya predpriyatii molochnoi promyshlennosti* [Theory and calculation of the basic equipment of the enterprises of the dairy industry]. Moscow, 1934, 471 p.

УДК 616-006.6-099:612.015

DOI 10.23683/0321-3005-2017-4-1-75-81

ПОКАЗАТЕЛИ ЭНДОГЕННОЙ ИНТОКСИКАЦИИ У БОЛЬНЫХ МНОЖЕСТВЕННОЙ МИЕЛОМОЙ В ДИНАМИКЕ КОМПЛЕКСНОГО ЛЕЧЕНИЯ

© 2017 г. **О.И. Кит¹, И.А. Горошинская¹, Н.Е. Зудерман¹, Н.Д. Ушакова¹, И.Б. Лысенко¹,
Л.А. Немашкалова¹, И.В. Нескубина¹, Н.В. Николаева¹, Е.А. Капуза¹, О.Н. Шатохина¹**

¹Ростовский научно-исследовательский онкологический институт, Ростов-на-Дону, Россия

INDICATORS OF ENDOGENOUS INTOXICATION IN PATIENTS WITH MULTIPLE MYELOMA IN THE DYNAMICS OF INTEGRATED TREATMENT

**O.I. Kit¹, I.A. Goroshinskaya¹, N.E. Zuderman¹, N.D. Ushakova¹, I.B. Lysenko¹,
L.A. Nemashkalova¹, I.V. Neskubina¹, N.V. Nikolaeva¹, E.A. Kapuza¹, O.N. Shatohina¹**

¹Rostov Research Institute of Oncology, Rostov-on-Don, Russia

Кит Олег Иванович – доктор медицинских наук, профессор, член-корреспондент РАН, заслуженный врач РФ, генеральный директор, Ростовский научно-исследовательский онкологический институт, ул. 14-я линия, 63, г. Ростов-на-Дону, 344037, Россия, e-mail: rnoi@list.ru

Oleg I. Kit - Doctor of Medicine, Professor, Corresponding Member, RAS, Honored Doctor of the Russian Federation, General Director, Rostov Research Institute of Oncology, 14-ya Liniya St., 63, Rostov-on-Don, 344037, Russia, e-mail: rnoi@list.ru

Горошинская Ирина Александровна – доктор биологических наук, профессор, главный научный сотрудник, лаборатория изучения патогенеза злокачественных опухолей, Ростовский научно-исследовательский онкологический институт, ул. 14-я линия, 63, г. Ростов-на-Дону, 344037, Россия, e-mail: iagor17@mail.ru

Irina A. Goroshinskaya - Doctor of Biological Sciences, Professor, Main Researcher, Laboratory of Malignant Tumor Pathogenesis Study, Rostov Research Institute of Oncology, 14-ya Liniya St., 63, Rostov-on-Don, 344037, Russia, e-mail: iagor17@mail.ru

Зудерман Наталья Евгеньевна – младший научный сотрудник, отдел анестезиологии-реанимации, Ростовский научно-исследовательский онкологический институт, ул. 14-я линия, 63, г. Ростов-на-Дону, 344037, Россия, e-mail: natalka8n@yandex.ru

Natal'ya E. Zuderman - Junior Researcher, Department of Anesthesiology-Intensive Care, Rostov Research Institute of Oncology, 14-ya Liniya St., 63, Rostov-on-Don, 344037, Russia, e-mail: natalka8n@yandex.ru

Ушакова Наталья Дмитриевна – доктор медицинских наук, профессор, врач-анестезиолог-реаниматолог, Ростовский научно-исследовательский онкологический институт, ул. 14-я линия, 63, г. Ростов-на-Дону, 344037, Россия, e-mail: ndu2000@rambler.ru

Natalia D. Ushakova - Doctor of Medicine, Professor, Anesthetist-Resuscitator, Rostov Research Institute of Oncology, 14-ya Liniya St., 63, Rostov-on-Don, 344037, Russia, e-mail: ndu2000@rambler.ru

Лысенко Ирина Борисовна – доктор медицинских наук, профессор, заведующая отделением онкогематологии, Ростовский научно-исследовательский онкологический институт, ул. 14-я линия, 63, г. Ростов-на-Дону, 344037, Россия, e-mail: iralyss@rambler.ru

Irina B. Lysenko - Doctor of Medicine, Professor, Head of Department of Oncohematology, Rostov Research Institute of Oncology, 14-ya Liniya St., 63, Rostov-on-Don, 344037, Russia, e-mail: iralyss@rambler.ru

Немашкалова Людмила Анатольевна – научный сотрудник, лаборатория изучения патогенеза злокачественных опухолей, Ростовский научно-исследовательский онкологический институт, ул. 14-я линия, 63, г. Ростов-на-Дону, 344037, Россия, e-mail: rnoi.biochem@gmail.com

Ljudmila A. Nemashkalova - Researcher, Laboratory of Malignant Tumor Pathogenesis Study, Rostov Research Institute of Oncology, 14-ya Liniya St., 63, Rostov-on-Don, 344037, Russia, e-mail: rnoi.biochem@gmail.com

Нескубина Ирина Валерьевна – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, лаборатория изучения патогенеза злокачественных опухолей, Ростовский научно-исследовательский онкологический институт, ул. 14-я линия, г. Ростов-на-Дону, 344037, Россия, e-mail: neskubina.irina@mail.ru

Irina V. Neskubina - Candidate of Biological Sciences, Senior Researcher, Laboratory of Malignant Tumor Pathogenesis Study, Rostov Research Institute of Oncology, 14-ya Liniya St., 63, Rostov-on-Don, 344037, Russia, e-mail: neskubina.irina@mail.ru

Николаева Надежда Владимировна – доктор медицинских наук, врач-гематолог, отделение онкогематологии, Ростовский научно-исследовательский онкологический институт, ул. 14-я линия, 63, г. Ростов-на-Дону, 344037, Россия, e-mail: k.denees@yandex.ru.

Nadezhda V. Nikolaeva - Doctor of Medicine, Hematologist, Department of Oncohematology, Rostov Research Institute of Oncology, 14-ya Liniya St., 63, Rostov-on-Don, 344037, Russia, e-mail: k.denees@yandex.ru

Капуза Елена Анатольевна – врач-онколог, отделение онкогематологии, Ростовский научно-исследовательский онкологический институт, ул. 14-я линия, 63, г. Ростов-на-Дону, 344037, Россия, e-mail: rnioi@list.ru

Elena A. Kapuza - Oncologist, Department of Oncohematology, Rostov Research Institute of Oncology, 14-ya Liniya St., 63, Rostov-on-Don, 344037, Russia, e-mail: rnioi@list.ru

Шатохина Ольга Николаевна – врач-онколог, отделение онкогематологии, Ростовский научно-исследовательский онкологический институт, ул. 14-я линия, 63, г. Ростов-на-Дону, 344037, Россия, e-mail: rnioi@list.ru

Ol'ga N. Shatohina - Oncologist, Department of Oncohematology, Rostov Research Institute of Oncology, 14-ya Liniya St., 63, Rostov-on-Don, 344037, Russia, e-mail: rnioi@list.ru

Успех лечения множественной миеломы в значительной степени зависит от эффективности борьбы с многочисленными осложнениями, в том числе с характерным для больных синдромом эндогенной интоксикации, которая может усугубляться вследствие проводимой противоопухолевой терапии. Предполагается, что применение селективного плазмообмена может уменьшить степень выраженности токсических проявлений, что требует клинического и лабораторного подтверждения.

Цель работы – анализ показателей, отражающих выраженность синдрома эндотоксикоза, у больных первично выявленной множественной миеломой в процессе комплексного лечения, включавшего химиотерапию с предшествующим селективным плазмообменом. Установлено, что у большинства обследованных больных при проведении им многокурсовой химиотерапии на фоне селективного плазмообмена наблюдался более низкий уровень показателей эндогенной интоксикации относительно значений, характерных для множественной миеломы до начала лечения. Тенденция к повышению изначально сниженных у больных множественной миеломой эффективной концентрации и связывающей способности альбумина выявлена уже после 1-го курса химиотерапии, которому предшествовал сеанс селективного плазмообмена. Статистически значимое увеличение всех показателей, характеризующих способность альбумина связывать эндотоксины, и снижение коэффициента интоксикации более чем вдвое относительно исходного уровня наблюдались после 2-го курса химиотерапии и существенно не изменялись при проведении последующих курсов. Положительная динамика наблюдалась и у больных с тяжелой формой хронической почечной недостаточности. Данные, полученные у больных множественной миеломой, подтверждают функциональную значимость состояния молекулы альбумина и способности этого белка препятствовать развитию эндотоксикоза.

Ключевые слова: множественная миелома, селективный плазмообмен, эндогенная интоксикация, связывающая способность альбумина.

The success of the treatment of multiple myeloma largely depends on the effectiveness of combating numerous complications, including the endogenous intoxication syndrome, characteristic for patients with myeloma, which can be exacerbated by the ongoing antitumor therapy. It is assumed that the use of selective plasma exchange can reduce the severity of toxic manifestations, which requires clinical and laboratory confirmation.

The aim of the work was the analysis of indicators reflecting the severity of endotoxemic syndrome in patients with primary multiple myeloma in the course of complex treatment, including chemotherapy with previous selective plasma exchange. It was established that in multicurrent chemotherapy on the background of selective plasma exchange, the majority of the patients examined had a lower level of indices of endogenous intoxication relative to the values characteristic for multiple myeloma before treatment. The tendency toward an increase in the effective concentration and binding capacity of albumin initially lowered in patients with multiple myeloma was revealed after the first course of chemotherapy, which was preceded by a selective plasma exchange session. A statistically significant increase in all indices characterizing the ability of albumin to bind endotoxins and a decrease in the toxicity factor more than twice the original level were observed after the 2nd course of chemotherapy and did not change significantly with subsequent courses. Positive dynamics was also observed in patients with severe form of chronic renal failure. The data obtained in patients with multiple myeloma confirm the functional significance of the state of the albumin molecule and the ability of this protein to inhibit the development of endotoxemic syndrome.

Keywords: multiple myeloma, selective plasma exchange, endogenous intoxication, binding ability of albumin.

Множественная миелома (ММ) – злокачественное лимфопролиферативное заболевание, характеризующееся неконтролируемой пролиферацией клональных плазматических клеток. Она обусловлена хромосомными нарушениями и патологиче-

скими изменениями стромального микроокружения, инфильтрацией костного мозга плазматическими клетками, наличием моноклонального иммуноглобулина в сыворотке крови и/или в моче, остеолитическими поражениями костей. Среди гематологических опухолей ММ составляет 10–13 %, и на ее

долю приходится 2 % летальных исходов при всех злокачественных опухолях [1]. Эффективность лечения ММ зависит не только от выбора оптимального метода противоопухолевой терапии, но и от результативности борьбы с многочисленными осложнениями [2]. Почечная недостаточность развивается у 20–50 % больных ММ уже к моменту установления диагноза и среди причин смерти занимает 2-е место после инфекций [3]. Наряду с хронической почечной недостаточностью (ХПН) у некоторых больных ММ отмечается развитие острого некронефроза. Острое почечное повреждение в таких случаях возникает как самостоятельный острый процесс или в результате резкой декомпенсации уже имеющейся почечной дисфункции, сопутствующей ММ. Это позволяет надеяться на эффективность применения в комплексе сопроводительного лечения методов экстракорпоральной детоксикации, способствующих оптимизации состояния общей реактивности организма, обеспечивающих компенсацию эндогенной интоксикации и стабильность гомеостаза. Так, применение лечебного плазмафереза перед неоадьювантной полихимиотерапией (ПХТ) в условиях развития опухолевой интоксикации у больных распространенным раком яичников III–IV стадии способствовало предупреждению развития органной и системной дисфункции, коррекции эндогенной интоксикации и проведению адекватного противоопухолевого лечения у соматически тяжелых больных [4–6]. В течение последних лет некоторые исследователи применяют плазмаферез и при лечении ММ. Как правило, выполняют 3–5 сеансов плазмафереза с экстракцией одного расчетного объема циркулирующей плазмы, составляющей 5 % массы тела. Проведение плазмообмена с использованием современных плазмодифильтров позволяет удалить до 65 % внутрисосудистого нефротоксичного белка при объеме плазмозамещения 1 объем циркулирующей плазмы (ОЦП). Однако следует отметить, что свободные легкие цепи (СЛЦ) иммуноглобулинов являются мелкими молекулами (от 25 до 50 кДа), что способствует их легкому перераспределению во внесосудистой жидкости. Таким образом, СЛЦ в циркулирующей плазме находится лишь 15–20 % от общей их концентрации в организме. Это в совокупности с интенсивностью их продукции ставит под сомнение адекватность прогнозируемой эффективности детоксикации. Кроме того, проведение плазмообмена требует обязательного замещения удаляемой плазменной части крови свежезамороженной плазмой, что сопровождается риском развития аутоиммунных реакций, инфицирования гепатитом, ВИЧ, а также развитием иммуносупрессии при увеличении кратности проведения процедур.

В последние годы в нашей стране в целях детоксикации при различных заболеваниях применяется

новая технология плазмообмена с использованием плазмосепараторов Evaclio™ (Kawasumi Laboratories, Inc., Япония), которая получила название селективный плазмообмен (СПО). Размер пор мембраны этих фильтров-плазмосепараторов в 3–6 раз больше диаметра пор гемофильтров, что повышает эффективность удаления токсических субстанций, и приблизительно в 10 раз меньше размера пор плазмодифильтров, что значительно снижает потерю белка по сравнению с плазмаферезом [7]. Основная особенность процедуры СПО заключается в возможности удалять часть плазмы крови, содержащую компоненты с низкой молекулярной массой и так называемые средние молекулы. Компоненты плазмы с молекулярной массой выше альбумина остаются в кровотоке. Это позволяет увеличить объем плазмообмена до 10 л при замещении удаляемого плазмодифильтрата 7–10%-ми альбуминсодержащими кристаллоидными плазмозамещающими растворами, что обеспечивает минимизацию нежелательных эффектов проведения экстракорпоральной процедуры.

Вышеизложенное позволило предположить, что включение метода СПО в комплекс лекарственного противоопухолевого лечения больных ММ позволит уменьшить степень выраженности токсических проявлений. Однако это требует клинического и лабораторного подтверждения.

Цель работы – анализ показателей, отражающих выраженность синдрома эндотоксикоза у больных с первично выявленной ММ в процессе комплексного лечения, включающего химиотерапию (ХТ) с предшествующим СПО.

Материалы и методы

В исследование включено 10 больных первично выявленной ММ (6 мужчин и 4 женщины), проходивших лечение в ФГБУ «РНИОИ» в 2016–2017 гг. Средний возраст пациентов составил 58,9±2,1 года (от 48 до 69 лет). До начала лекарственного противоопухолевого лечения всем больным был проведен СПО с использованием технологии плазмосепарации Evaclio™. Проводили СПО на аппарате «Мультифильтрат» фирмы Fresenius с использованием систем магистралей и фильтра-плазмосепаратора Evaclio EC-2A/2C. Объем плазмодифильтрации – 10 л. Замещение осуществляли 7%-м плазмозамещающим раствором (Multiplus – 10 л+20%-й альбумин – 600 мл). Начинали ХТ на следующие сутки после проведения экстракорпоральной процедуры. Всем больным, как правило, проводили 4 курса стандартной ХТ по схеме VCD (бортезомид в 1, 4, 8, 11-й дни цикла; циклофосфамид в 1-й, 8-й дни цикла; дексаметазон в 1, 2, 4, 5, 8, 9, 11, 12-й дни каждого цикла) с интервалом между началом курсов 3–4 недели.

Один больной получил 3 курса ХТ и продолжил лечение по месту жительства, еще один больной умер через 10 дней после окончания 2-го курса химиотерапии. Во всех случаях проводили оценку биохимических показателей эндогенной интоксикации перед проведением СПО, через 30 мин после завершения процедуры и через 6–7 дней после завершения каждого курса ХТ. Параллельно было обследовано 12 относительно здоровых мужчин и женщин без онкологических заболеваний, средний возраст которых был сопоставим с возрастом обследованных больных (группа здоровых людей).

Для оценки уровня эндогенной интоксикации исследовали содержание молекул средней массы (МСМ) и функциональные свойства альбумина. Содержание МСМ в плазме крови определяли по модифицированному методу Н.И. Габриэлян и В.И. Липатовой при двух длинах волн – 254 и 280 нм [8]. Общую концентрацию альбумина (ОКА) определяли унифицированным колориметрическим методом с использованием набора реагентов «Ольвекс Диагностикум», Санкт-Петербург. Эффективную концентрацию альбумина (ЭКА), т. е. его транспортную функцию, определяли модифицированным методом с использованием конго красного. Степень сорбции токсических лигандов (резервную связывающую способность альбумина (ССА)), соответствующую отношению величин свободных связей пула молекул альбумина к общему количеству его связей, оцени-

вали по отношению ЭКА/ОКА·100 %. Рассчитывали индекс токсичности (ИТ) по формуле $ИТ = ОКА/ЭКА - 1$. Баланс между накоплением в плазме крови и связыванием токсических лигандов оценивали с помощью коэффициента интоксикации (КИ), который рассчитывали по формуле $КИ = (МСМ_{254}/ЭКА) \cdot 1000$ [9].

Статистическую обработку результатов проводили с использованием пакета программ STATISTICA 6.0 по t-критерию Стьюдента для двух независимых выборок. Различия считали статистически значимыми при $p < 0,05$ – $p = 0,000000$, а при $0,1 > p > 0,05$ – на уровне статистической тенденции к значимости.

Результаты и обсуждение

Динамика исследуемых лабораторных показателей эндогенной интоксикации в процессе проведения комплексного лечения больных ММ, включающего ХТ и СПО, представлена в таблице.

Для всех обследованных больных с первично выявленной ММ было характерно снижение ОКА, ЭКА и ССА. Перед проведением СПО в плазме крови больных уровень ОКА был снижен на 24,1 %, ЭКА – 57,2, ССА – 44,5 ($0,000001 < p < 0,0002$) относительно соответствующих значений в группе лиц без онкологических заболеваний. Статистически значимого увеличения содержания МСМ не выявлено. Увеличен ИТ в 7,2 раза ($p < 0,001$), коэффициент интоксикации – в 3,5 ($p < 0,01$).

Функциональное состояние молекулы альбумина и содержание МСМ в крови больных ММ в процессе ХТ и предшествующим СПО / The functional state of the albumin molecule and the content of medium-mass molecules in the blood of patients with multiple myeloma during chemotherapy with a prior selective plasma exchange

Группа	ОКА, г/л	ЭКА, г/л	ССА, %	МСМ 254 нм, у.е.	МСМ 280 нм, у.е.	ИТ	КИ
Здоровые люди (n=12)	44,67±1,16	36,49±1,26	81,92±1,95	0,250±0,007	0,235±0,008	0,229±0,032	6,83±0,18
Больные ММ до СПО (n=9)	33,9±2,26 p=0,000164	15,62±2,96 p=0,000001	45,47±6,97 p=0,000017	0,295±0,052	0,286±0,036	1,652±0,404 p=0,000644	23,8±5,53 p=0,002044
Больные ММ через 30 мин после СПО (n=9)	33,66±1,46 p=0,000008	18,67±3,21 p=0,000017	54,89±8,69 p=0,002581	0,285±0,020 p=0,084781	0,266±0,025	1,288±0,394 p=0,005784	19,14±3,47 p=0,000577
После 1-го курса ХТ (n=9)	34,7±2,18 p=0,000286	23,93±3,31 p=0,000716 p ₁ =0,080288	66,04±7,33 p=0,022679 p ₁ =0,060186	0,287±0,047	0,249±0,029	0,637±0,161 p=0,007501 p ₁ =0,041801	13,66±4,06 p=0,051551
После 2-го курса ХТ (n=8)	39,58±1,41 p=0,012313 p ₁ =0,051060	27,03±2,07 p=0,000615 p ₁ =0,007690	68,53±5,36 p=0,014321 p ₁ =0,021268	0,274±0,032	0,267±0,025	0,524±0,123 p=0,012453 p ₁ =0,023080	10,58±1,45 p=0,005527 p ₁ =0,044953
После 4-го курса ХТ (n=8)	38,15±2,33 p=0,011632	21,84±2,51 p=0,000019	57,66±6,40 p=0,000470	0,256±0,018	0,238±0,013	0,902±0,221 p=0,001684	12,52±1,33 p=0,000061 p ₁ =0,080615

Примечание. Статистическая значимость различий: p – по сравнению с донорами; p₁ – по сравнению со значениями до начала лечения. Указаны p только для статистически значимых различий или имеющих статистическую тенденцию к значимости.

После проведения СПО статистически значимых изменений относительно фоновых значений не наблюдалось, однако значения расчётных КИ были несколько ниже, чем до плазмообмена, – ИТ превышал норму в 5,6 раза ($p < 0,01$), КИ – в 2,8 ($p < 0,001$).

После 1-го курса ХТ наблюдали тенденцию к повышению относительно исходных значений изначально сниженных показателей ЭКА и ССА – на 53,2 и 45,2 % соответственно ($0,05 < p < 0,1$), и данные показатели были ниже, чем в группе здоровых людей, лишь на 34,4 ($p < 0,001$) и 19,4 % ($p < 0,05$). При этом ИТ снизился на 61,4 % ($p < 0,05$) по сравнению с его величиной до начала лечения. Такая направленность изменений сохранилась у большинства больных и после 2-го курса ХТ. Отмечали статистически значимое относительно исходных значений увеличение ЭКА и ССА – на 73 % ($p < 0,01$) и 50,7 ($p < 0,05$) соответственно. Увеличилась также и ОКА на 17,1 % ($p = 0,05$), ИТ и КИ снизились на 68,3 % и 55,5 соответственно ($p < 0,05$).

После 4-го курса ХТ значимых отличий ни по одному из оцениваемых показателей относительно их величин после 2-го курса ХТ выявлено не было. При этом по сравнению с группой здоровых наблюдали более низкие показатели: ОКА – на 14,6 % ($p < 0,02$), ЭКА – на 40,1 ($p < 0,0001$), ССА – на 29,6 ($p < 0,001$). Уровень обеих фракций МСМ полностью соответствовал норме ($p > 0,1$), ИТ и КИ были выше в 3,9 и в 1,8 раза ($0,00005 < p < 0,01$), что косвенно характеризовало сохранение эндогенной интоксикации у исследуемой группы больных ММ и могло быть связано как с токсическим воздействием химиопрепаратов, так и с дальнейшим развитием онкологического процесса.

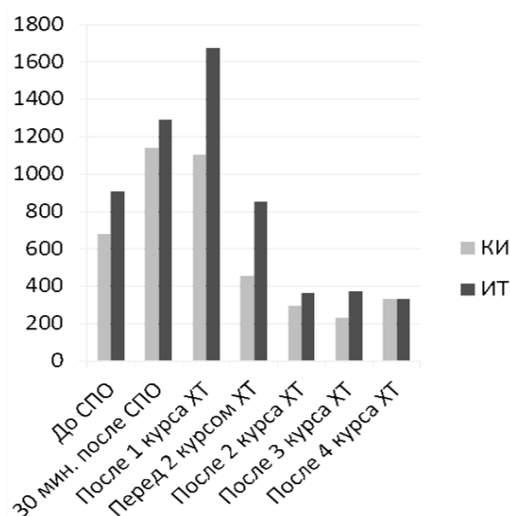
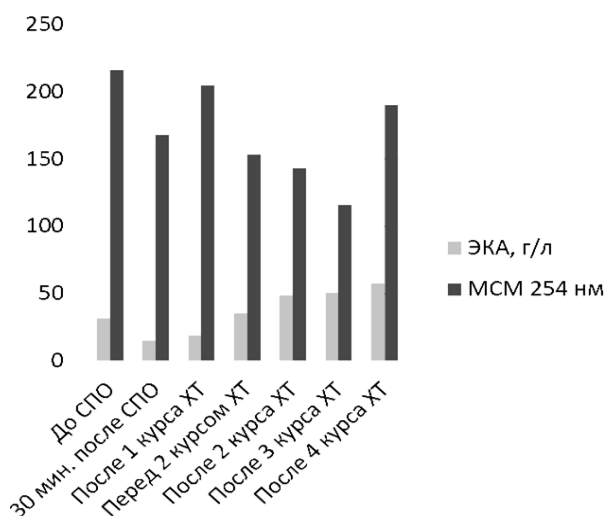
Таким образом, полученные нами данные свидетельствуют о том, что наибольшая эффективность детоксикационного воздействия проводимого лече-

ния наблюдалась на первых этапах комплексного лечения больных ММ при включении в комплекс сопроводительного лечения СПО.

Исключением явился больной Ш., умерший через 10 дней после завершения 2-го курса ХТ. У этого больного после 1-го курса ХТ наблюдали снижение относительно исходных показателей значений ЭКА и ССА – на 31 % и 40,2, что, соответственно, определило увеличение ИТ и КИ в 2,6 и 2,3 раза. При анализе клинического течения заболевания установлено, что впервые диагноз ММ у этого больного был поставлен на фоне развившейся ХПН IV стадии, требующей программного гемодиализа. На фоне проводимого противоопухолевого лечения отмечено прогрессирование заболевания, что закономерно сопровождалось ростом выраженности эндогенной интоксикации, летальным исходом заболевания.

Отдельно следует описать динамику изученных показателей у больного П., развитие онкологического заболевания у которого осложнилось ХПН III стадии. Диализное лечение больному не проводили. Динамика некоторых из изученных показателей эндогенной интоксикации у больного П. представлена на рисунке.

После СПО и после 1-го курса ХТ уровень ЭКА у больного П. был крайне низким (в 3,5 раза ниже среднего для остальных больных, $p < 0,05$). При характерных для него (с учетом ХПН) высоких значений МСМ (выше нормы в 2 раза, $p = 0,000000$) наблюдали более значительное увеличение относительно показателей в группе здоровых людей по сравнению с другими больными исследуемой группы КИ (более чем в 11 раз, $p = 0,000000$) и ИТ (почти в 17 раз, $p = 0,000000$). Это согласуется с данными литературы, свидетельствующими, что развитие ХПН сопровождается снижением ССА и накоплением токсических метаболитов [10].



Динамика показателей эндогенной интоксикации у больного П., % к значениям в группе здоровых людей (принятых за 100 %) / Dynamics of indices of endogenous intoxication in the patient P., percent to values in the group of healthy people (taken as 100 %)

В динамике исследования у этого больного также был отмечен регресс степени выраженности эндогенной интоксикации. Уровень МСМ₂₅₄ хоть и превышал на 43–105 % среднее значение у здоровых людей на всех этапах наблюдения, но после проведения СПО снизился на 22 % в сравнении с исходными значениями. После 1-го курса ХТ вслед за кратковременным подъемом отмечали его плавное снижение и нормализацию этого показателя после завершения 3-го курса ХТ. После 4-го курса концентрация МСМ₂₅₄ в сыворотке крови несколько увеличилась, но при этом в сравнении с исходными значениями была ниже на 12 %. Сходная динамика наблюдалась и со стороны МСМ₂₈₀. Плавное улучшение показателей, характеризовавших функциональные свойства альбумина, начавшись перед 2-м курсом, отмечалось после всех последующих курсов ХТ. После 2-го курса ХТ ЭКА увеличилась почти в 3 раза по сравнению с крайне низкими значениями после 1-го курса ХТ с включением СПО, но при этом значения данного показателя были ниже, чем у здоровых людей (на 51,5 %, $p=0,0017$). Параллельно уменьшились уровни ИТ и КИ в 4,6 и 3,7 раза, их превышение значений в группе здоровых снизилось до 3,7 и 3,0 раза соответственно ($p<0,001$). После 4-го курса ХТ ЭКА и ССА повысились до значений ниже нормы лишь на 38,6 и 30,9 % соответственно ($p<0,01$). Однако КИ был увеличен в 3,3 раза ($p=0,000000$) из-за увеличенного в 1,9 раза уровня МСМ₂₅₄ ($p=0,000004$), что, вероятно, было связано с нарушением детоксикационных функций почек на фоне ХПН.

Таким образом, у обследованных нами больных при проведении им многокурсовой ХТ с включением в комплекс сопроводительного лечения СПО отмечался более низкий уровень показателей эндогенной интоксикации относительно значений, полученных до начала лечения.

Ранее нами было показано, что у онкогинекологических больных изменения в системе эндотоксикоза коррелируют с тяжестью состояния больных и эффективностью проводимого лечения. При этом установлено, что в формировании состояния эндогенной интоксикации у онкогинекологических больных больший вклад вносят изменения, происходящие с молекулой альбумина, чем накопление МСМ [11]. Было высказано предположение об обусловленности нарушения функциональной активности альбумина у онкологических больных модификацией молекулы этого белка в результате окисления активными формами кислорода и азота. Изменение структурно-функциональных свойств альбумина при его окислительной модификации показано при разных патологиях, в том числе и при злокачественном процессе [12–14].

Данные, полученные у больных ММ, подтверждают функциональную значимость состояния мо-

лекулы альбумина и способности этого белка препятствовать развитию эндотоксического синдрома у больных со злокачественным процессом, а также информативность использования простых методов оценки ЭКА и ССА в клинической практике, в частности для оценки состояния больных в процессе комплексного лечения.

Литература

1. Бессмельцев С.С., Абдулкадыров К.М. Множественная миелома. Современный взгляд на проблему. Алматы, 2007. 480 с.
2. Kumar S.K., Rajkumar S.V., Dispenzieri A., Lacy M.Q., Hayman S.R., Buadi F.K., Zeldenrust S.R., Dingli D., Russell S.J., Lust J.A., Greipp P.R., Kyle R.A., Gertz M.A. Improved survival in multiple myeloma and the impact of novel therapies // *Blood*. 2008. Vol. 111(5). P. 2516–2520.
3. Karin M., Cao Y., Greten F.R., Li Z.W. NF-kappa B in cancer: from innocent bystander to major culprit // *Nat. Rev. Cancer*. 2002. Vol. 2. P. 301–310.
4. Неродо Г.А., Ушакова Н.Д., Горошинская И.А., Мкртчян Э.Т., Меньшенина А.П. Применение плазмафереза в комплексном лечении распространенного рака яичников III–IV стадии // *Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки*. 2014. № 1. С. 98–102.
5. Ушакова Н.Д., Неродо Г.А., Горошинская И.А., Златник Е.Ю., Мкртчян Э.Т., Меньшенина А.П. Оценка эффективности плазмафереза в лечении больных раком яичников // *Рос. мед. журн.* 2014. № 3. С. 21–26.
6. Неродо Г.А., Горошинская И.А., Нескубина И.В., Немашкалова Л.А., Шалашина Е.В., Ушакова Н.Д., Никитина В.П., Меньшенина А.П. Возможности коррекции эндогенной интоксикации в процессе химиотерапии у онкогинекологических больных // *Рос. онкол. журн.* 2017. № 22 (1). С. 25–31.
7. Технология селективного плазмообмена EVACLIO зарегистрирована в России в 2011 году (№ ФЗС 2001/09675; КРД № 3318 от 03.02.20011; приказ Росздравнадзора от 06 мая 2011 года № 2519-Пр/11).
8. Габриэлян Н.И., Лунатова В.И. Опыт использования показателей средних молекул в крови для диагностики нефрологических заболеваний у детей // *Лаб. дело*. 1984. № 3. С. 138–140.
9. Матвеев С.Б., Спиридонова Т.Г., Клычникова Е.В., Николаева Н.Ю., Смирнова С.В., Голиков П.П. Критерии оценки эндогенной интоксикации при ожоговой травме // *Клин. лаб. диагностика*. 2003. № 10. С. 52–53.
10. Klammt S., Wojak H.J., Mitzner A., Koball S., Rychly J., Reisinger E.C., Mitzner S. Albumin-binding capacity (ABiC) is reduced in patients with chronic kidney disease along with an accumulation of protein-bound uraemic toxins // *Nephrology Dialysis Transplantation*. 2012. Vol. 27 (6). P. 2377–2383. DOI 10.1093/ndt/gfr616.
11. Горошинская И.А., Нескубина И.В., Неродо Г.А., Меньшенина А.П., Гуськова Е.А., Качесова П.С., Немашкалова Л.А., Сурикова Е.И., Шалашина Е.В. Уровень эндогенной интоксикации у онкогинекологических больных // *Клин. лаб. диагностика*. 2016. № 61(5). С. 279–282.

12. Смолякова Р.М., Маиевский А.А., Моисеев П.И., Жарков В.В. Клинико-диагностическое значение исследования структурно-функциональных характеристик сывороточного альбумина у больных мелкоклеточным раком легкого // Сиб. онкол. журн. 2003. № 2 (4). С. 12–16.

13. Горошинская И.А., Сурикова Е.И., Айрапетов К.Г., Нескубина И.В., Шалашная Е.В., Немашкалова Л.А., Качесова П.С. Содержание производных оксида азота в крови онкологических больных с церебральными метастазами с различной степенью эндогенной интоксикации // Сиб. онкол. журн. 2009. № 8 (6). С. 44–47.

14. Копытова Т.В., Коткова Е.В., Добротина Н.А. Окислительная модификация альбумина сыворотки крови человека при воспалительном заболевании кожи // Вестн. Нижегородского ун-та им. Н.И. Лобачевского. 2014. № 3 (1). С. 65–69.

References

1. Bessmel'tsev S.S., Abdulkadyrov K.M. Mnozhestvennaya mieloma. Sovremenniy vzglyad na problemu [Multiple myeloma. A modern view of the problem]. Almaty, 2007, 480 p.

2. Kumar S.K., Rajkumar S.V., Dispenzieri A., Lacy M.Q., Hayman S.R., Buadi F.K., Zeldenrust S.R., Dingli D., Russell S.J., Lust J.A., Greipp P.R., Kyle R.A., Gertz M.A. Improved survival in multiple myeloma and the impact of novel therapies. *Blood*. 2008, vol. 111 (5), pp. 2516-2520.

3. Karin M., Cao Y., Greten F.R., Li Z.W. NF-kappa B in cancer: from innocent bystander to major culprit. *Nat. Rev. Cancer*. 2002, vol. 2, pp. 301-310.

4. Nerodo G.A., Ushakova N.D., Goroshinskaya I.A., Mkrtychyan E.T., Men'shenina A.P. Primenenie plazmafereza v kompleksnom lechenii rasprostranennogo raka yaichnikov III–IV stadii [The use of plasmapheresis in the complex treatment of advanced ovarian cancer III-IV stage. News of higher educational institutions]. *Izv. vuzov. Sev.-Kavk. region. Estestv. nauki*. 2014, No. 1 (179), pp. 98-102.

5. Ushakova N.D., Nerodo G.A., Goroshinskaya I.A., Zlatnik E.Yu., Mkrtychyan E.T., Men'shenina A.P. Otsenka effektivnosti plazmafereza v lechenii bol'nykh rakom yaichnikov [Evaluation of the effectiveness of plasmapheresis in the treatment of patients with ovarian cancer]. *Ros. med. zhurn*. 2014, No. 3, pp. 21-26.

6. Nerodo G.A., Goroshinskaya I.A., Neskubina I.V., Nemashkalova L.A., Shalashnaya E.V., Ushakova N.D., Nikitina V.P., Men'shenina A.P. Vozmozhnosti korrektsii endogennoi intoksikatsii v protsesse khimioterapii u onkoginekologicheskikh bol'nykh [Possibilities of correction of endogenous intoxication during chemotherapy in oncogynecologic patients]. *Ros. onkol. zhurn*. 2017, No. 22(1), pp. 25-31.

7. *Tekhnologiya selektivnogo plazmoobmena EVACLIO zaregistrirrovana v Rossii v 2011 godu* (№ FZS 2001/09675; KRД № 3318 ot 03.02.20011; prikaz Roszdravnadzora ot 06 maya 2011 goda № 2519-Pr/11) [The technology of selective plasma exchange "EVACLIO" was registered in Russia in 2011 (No. 2001/09675; No. 3318 from 03.02.20011; order of Roszdravnadzor from May 6, 2011 No. 2519-Pr / 11)].

8. Gabrielyan N.I., Lipatova V.I. Opyt ispol'zovaniya pokazatelei srednikh molekul v krovi dlya diagnostiki nefrologicheskikh zabolevaniy u detei [Experience in using indicators of average molecules in the blood for the diagnosis of nephrologic diseases in children]. *Lab. delo*. 1984, No. 3, pp. 138-140.

9. Matveev S.B., Spiridonova T.G., Klychnikova E.V., Nikolaeva N.Yu., Smirnova S.V., Golikov P.P. Kriterii otsenki endogennoi intoksikatsii pri ozhogovoi travme [Criteria for assessing endogenous intoxication with burn trauma]. *Klin. lab. diagnostika*. 2003, No. 10, pp. 52-53.

10. Klammt S., Wojak H.J., Mitzner A., Koball S., Rychly J., Reisinger E.C., Mitzner S. Albumin-binding capacity (ABiC) is reduced in patients with chronic kidney disease along with an accumulation of protein-bound uraemic toxins. *Nephrology Dialysis Transplantation*. 2011, vol. 27 (6), pp. 1-7. DOI 10.1093/ndt/gfr616.

11. Goroshinskaya I.A., Neskubina I.V., Nerodo G.A., Men'shenina A.P., Gus'kova E.A., Kachesova P.S., Nemashkalova L.A., Surikova E.I., Shalashnaya E.V. Uroven' endogennoi intoksikatsii u onkoginekologicheskikh bol'nykh [The level of endogenous intoxication in oncogynecologic patients]. *Klin. lab. diagnostika*. 2016, No. 61 (5), pp. 279-282.

12. Smolyakova R.M., Mashevskii A.A., Moiseev P.I., Zharkov V.V. Kliniko-diagnosticheskoe znachenie issledovaniya strukturno-funktsional'nykh kharakteristik sывороточного альбумина у больных мелкоклеточным раком легкого [Clinical and diagnostic significance of the study of the structural and functional characteristics of serum albumin in patients with small cell lung cancer]. *Sib. onkol. zhurn*. 2003, No. 2 (4), pp. 12-16.

13. Goroshinskaya I.A., Surikova E.I., Airapetov K.G., Neskubina I.V., Shalashnaya E.V., Nemashkalova L.A., Kachesova P.S. Soderzhanie proizvodnykh oksida azota v krovi onkogicheskikh bol'nykh s tserebral'nymi metastazami s razlichnoi stepen'yu endogennoi intoksikatsii [The content of nitric oxide derivatives in the blood of cancer patients with cerebral metastases with varying degrees of endogenous intoxication]. *Sib. onkol. zhurn*. 2009, No. 8(6), pp. 44-47.

14. Kopytova T.V., Kotkova E.V., Dobrotina N.A. Okislitel'naya modifikatsiya al'bumina sыворотки krovi cheloveka pri vospalitel'nom zabolevanii kozhi [Oxidative modification of human serum albumin in inflammatory skin disease]. *Vestn. Nizhegorodskogo un-ta im. N.I. Lobachevskogo*. 2014, No. 3 (1), pp. 65-69.

УДК 581: 633.2.032.3 (235.223)

DOI 10.23683/0321-3005-2017-4-1-82-86

ИЗУЧЕНИЕ СОДОМИНИРУЮЩИХ И СОПУТСТВУЮЩИХ ВИДОВ В ЗАПАСЕ НАДЗЕМНОЙ ФИТОМАССЫ СООБЩЕСТВ ГУМИДНЫХ ВЫСОКОГОРИЙ АЛТАЕ-САЯНСКОЙ ГОРНОЙ ОБЛАСТИ

© 2017 г. Ч.Н. Самбыла¹

¹Тувинский государственный университет, Кызыл, Россия

STUDY OF CO-DOMINATING AND ASSOCIATED SPECIES IN THE VOLUME OF ABOVE-GROUND PHYTOMASS OF HUMID ALPINE COMMUNITIES (A CASE STUDY OF THE ALTAI-SAYAN MOUNTAIN REGION)

Ch.N. Sambyla¹

¹Tuva State University, Kyzyl, Russia

Самбыла Чойган Николаевна – кандидат биологических наук, доцент, кафедра педагогики и методики дошкольного и начального образования, Тувинский государственный университет, ул. Ленина, 36, г. Кызыл, Республика Тыва, 667000, Россия, e-mail: choigansam@mail.ru

Choygan N. Sambyla - Candidate of Biological Sciences, Associate Professor, Department of Pedagogics and Methods of Preschool and Primary Education, Tuva State University, Lenina St., 36, Kyzyl, Tyva Republic, Russia, e-mail: choigansam@mail.ru

Представлены результаты исследований запасов надземной фитомассы (НФМ) сообществ гумидных высокогорий Алтае-Саянской горной области. Учет НФМ проводился методом укосов с площадок 0,25 м² в десятикратной повторности. Анализируются запасы НФМ 900 учетных площадок, соответствующие 90 различным сообществам, 34 формациям и 7 группам формаций, относящиеся к 2 классам формаций – высокогорным тундрам и лугам. Установлено, что типы сообществ характеризуются высокой изменчивостью НФМ (218÷4718 г/м²), а живая их масса в среднем варьирует в широких пределах 160÷3695 г/м² (или 61÷83 % от НФМ). В структуре живой НФМ процентное содержание массы содоминантов и сопутствующих видов составляет 4÷77 и 3÷44 соответственно, а доминантов – 14÷92. В ряду сообществ от подгольцовых кустарников до альпийских лугов наблюдаются увеличение доли участия содоминантов и сопутствующих видов растений и снижение процентного содержания массы доминантов. Выявлено, что участие доминирующих растений в живой массе подгольцовых кустарников, кустарниковых и лишайниковых тундр значительно (67–80 %), а в травяных сообществах не превышает 43–49 %.

Ключевые слова: содоминирующие и сопутствующие виды, запасы надземной фитомассы, растительные сообщества, гумидные высокогорья, Алтае-Саянская горная область.

The work presents results of studies of the above-ground phytomass volume of humid alpine communities of the Altai-Sayan mountain region. The above-ground phytomass was measured by cutting from areas of 0,25 m² repeated ten times. We analyze the volume of the above-ground phytomass from 900 measuring areas corresponding to 90 different communities, 34 formations and 7 groups of formations (or community types), related to 2 classes of formations – alpine tundra and meadows. The community types are characterized by high variability of the above-ground phytomass (4718÷218 g/m²). In the structure of the live above-ground phytomass, the composition of co-dominating and associated species is 4÷77 and 3÷44 % correspondingly, and dominating species – 14÷92 %. In the row of communities from subgoltsy of bushes to alpine meadows reveals a increasing role of sodominant and associated species of plants and a decrease of dominants. Participation of dominating plants in live mass of subgoltsy of bushes, shrub and lichen тундр is considerable (67–80 %), and does not exceed 43–49 % in graminoid communities.

Keywords: co-dominating and associated species, volume of above-ground phytomass, plant communities, humid highlands, Altai-Sayan Mountain Region.

Общеизвестно, что высокогорные сообщества имеют крайне низкую видовую насыщенность: на 1 м² встречается не более 8÷25 видов растений [1, 2]. Число доминантов не превышает двух-трех. При этом им свойственно захватывать ресурсы и влиять на другие виды благодаря изменению воздушных, почвенных и биотических условий [3]. Их вклад составляет 90–99 % от общей надземной фитомассы

(НФМ) [1, 4]. Наряду с доминантами устойчиво сосуществуют содоминирующие и сопутствующие, или минорные, виды [5]. Определению их вклада в НФМ высокогорных сообществ уделяется недостаточное внимание. Поэтому целью настоящей работы явилось изучение содоминирующих и сопутствующих видов в запасе НФМ сообществ гумидных высокогорий Алтае-Саянской горной области (АСГО).

АСГО занимает обширную территорию в центре евразийского материка, находится на границе двух природных зон Северного полушария – гумидной бореальной и аридной степной [6]. В среднегорном и высокогорном ярусах рельефа области выделяются альпинотипный и гольцовый типы рельефа, влияющие на формирование и распространение разных типов высокогорной растительности [6, 7]. Гольцовый рельеф с древними поверхностями выравнивания и пологими водораздельными вершинами характерен для большинства горных систем области. Гумидным климатом характеризуется северо-западная часть области (Северо-Западный Алтай, Кузнецкий Алатау, северная часть Западного Саяна и западная часть Восточного Саяна) [6]. Здесь выпадает 1800–2000 мм осадков в год [8]; в Катунском, Северо-Чуйском хребтах – до 2500 мм. Значительное количество осадков обуславливает мощный снеговой покров до 1 м и выше. В этой же части области средняя температура января – минус 15–17 °С, июля – 12–13 °С. Основная гидрографическая сеть АСГО принадлежит бассейнам р. Обь и Енисей. Для высокогорий типичны горнолуговые и горно-тундровые почвы [9]. В гумидных высокогорьях растительность контактирует с темнохвойнотаежным лесом, верхняя граница которого образована *Abies sibirica* и *Pinus sibirica*, формирующими редколесья, которые в совокупности с субальпинотипными лугами образуют хорошо выраженный лесолуговой комплекс. В растительном покрове нижней части субальпинотипного пояса выделяются фитоценозы с доминированием *Athyrium distentifolium*, *Saussurea latifolia*, *Stemmacantha carthamoides*, *Deschampsia caespitosa*, *Euphorbia pilosa*, верхней части – фитоценозы с господством *Bistorta major*, *Veratrum lobelianum* и др. При избыточном увлажнении формируются фитоценозы из подгольцовых (или субальпийских) кустарников *Betula rotundifolia* и *Salix glauca*. Горно-тундровый пояс занимает верхние уровни гор. Его нижняя граница представлена фрагментами альпийского пояса. На хорошо дренированных местобитаниях формируются фитоценозы с доминированием *Aquilegia glandulosa*, в избыточно увлажненных местах – *Carex aterrima*, *Doronicum altaicum*, *Vaccinium myrtillus* с *Cetraria islandica*. Распространение сообществ с *Empetrum nigrum*, *Rhododendron aureum* и *Vaccinium uliginosum* связано с гумидными высокогорьями области. Как правило, эти ценозы встречаются на увлажненных пологих и средней крутизны склонах среди ерниковых и лишайниковых тундр. Для растительности высокогорного пояса наиболее характерен гумидный горно-тундрово-субальпинотипно-темнохвойнотаежный тип поясности [6, 10].

Материалы и методы

Материалами для исследований послужили запасы НФМ 8 эталонных полигонов растительности, собранные автором в 2007–2010 гг. в гумидных высокогорьях области (Кузнецкий Алатау, хребты Ивановский, Семинский, Крыжина, Ойский, Кулумыс, Ергаки, Куртушибинский). Учет НФМ проводился методом укусов с площадок 0,25 м² в 10-кратной повторности [11]. В анализ включены запасы НФМ с 900 учетных площадок, соответствующие 90 различным сообществам, 34 формациям и 7 группам формаций (типам сообществ), относящиеся к 2 классам формаций – высокогорным тундрам и лугам. Типы сообществ, согласно эколого-морфологической [12] и эколого-исторической классификации [6], соответствуют группам формаций, в составе которых нами рассматриваются подгольцовые кустарники (3 %), кустарничковые (20 %), кустарниковые (19 %), лишайниковые (13 %), травяные тундры (4 %), субальпийские (27 %) и альпийские луга (14 %). Все образцы НФМ высушивали до абсолютно сухого состояния. Полученные данные обработали статистически общепринятыми методами [13], а также при помощи программ SNEDECOR [14], STATISTICA 6.0 for Windows. Для определения взаимосвязей признаков использован коэффициент корреляции Браве – Пирсона (r), для пространственной вариабельности значений фитомассы были определены среднее арифметическое и стандартная ошибка. Под НФМ мы понимаем часть растений, которая доходит до уровня почв, а в случае развития мохово-лишайникового яруса – та часть, которая возвышается над моховой дерниной и находится в живом зеленом слое мха, а также сам мох. В НФМ выделяются 2 компонента: живая фитомасса и мортмасса, последняя в представленной работе не обсуждается. Живая фитомасса (живая НФМ) представляет собой массу живых надземных органов однолетних и многолетних растений, которая находится на единице площади в момент измерения [15]. В ее структуре выделяются группы растений: доминирующие (доминанты), содоминирующие (содоминанты) и сопутствующие виды. К доминантам отнесены виды с участием в запасе живой НФМ в среднем от 10 % и выше, содоминирующим и сопутствующим – 9÷6 и 5÷1 % соответственно [15]. Названия растений приведены по [16].

Результаты и их обсуждение

Различные типы сообществ гумидных высокогорий АСГО в среднем характеризуются высокой изменчивостью НФМ: от 218 (альпийские луга) до 4718 г/м² (подгольцовые кустарники). При этом живая НФМ в среднем составляет 160÷3695 г/м², а её

доля – 61÷83 % от НФМ (таблица). Установлено, что между запасами НФМ сообществ и живой составляющей при уровне значимости $p < 0,05$ выявлены достоверные связи ($r = 0,97 - 1,0$).

В ряду сообществ от подгольцовых кустарников до альпийских лугов в структуре живой НФМ наблюдаются увеличение доли участия содоминантов (16÷25 %) и сопутствующих видов растений (4÷31) и снижение процентного содержания массы доминирующих растений в живой массе подгольцовых кустарников, кустарниковых и лишайниковых тундр значительно (67–80), а в травяных сообществах (травяных тундрах и лугах) этот показатель не превышает 43–49 %.

На основе детального анализа выделенных 34 формаций выявлено, что участие доминантов составляет 14÷92 %, содоминантов – 4÷77 и сопутствующих видов растений – 3÷44. В частности, наибольшее участие содоминантов (52÷77 %) характерно для сообществ с доминированием *Euphorbia pilosa*, *Geranium albiflorum*, *Veratrum lobelianum* и *Trollius asiaticus*. Их наименьшее участие (не более 10–20 %) соответствует субальпийским высокотравным (54–58) и низкотравным (73–74), альпийским (81–87) лугам, а также тундровым с *Betula rotundifolia*, *Juniperus sibirica*, *Dryas oxyodonta*, *Hierochloe alpina* *Alectoria ochroleuca* ценозам. В остальных формациях участие содоминантов составляет 22÷43 % от живой НФМ (рис. 1).

Содержание массы сопутствующих видов растений не превышает 10 % в высокотравных (№ 54–66) и низкотравных субальпийских лугах (68–69, 75–77), а также кустарниковых (7–17, 4) и лишайниковых тундрах (39–40), подгольцовых кустарниках (3). Участие сопутствующих видов составляет менее 20 % в тундровых с доминированием *Empetrum nigrum*, *Vaccinium uliginosum*, *V. myrtillus*, *V. vitis-*

idaea (18–31), видов рода *Cladonia* (41–50) и луговых с *Hedysarum theinum* (67), *Viola altaica* и др. (90) сообществах.

Интересно, что участие сопутствующих видов достигает 21÷44 % в травяных (51–53), кустарниковых (32–38) тундрах, а также в субальпийских (70, 73–74) и альпийских лугах (78–87, 89–90).

Наибольшее участие доминантов (70÷92 %) прослеживается в подгольцовых кустарниках, тундровых сообществах (*Betula rotundifolia*, *Juniperus sibirica*, *Cetraria islandica*, *Alectoria ochroleuca*), а также субальпийских (*Athyrium distentifolium*, *Saussurea latifolia*) и альпийских лугах (*Viola altaica* и др.), наименьшее (не более 20 %) – в субальпийских (*Geranium albiflorum*, *Euphorbia pilosa*) и альпийских лугах (*Ranunculus altaicus*). Наименьшая доля участия доминантов в этих сообществах тесно связано с оводненностью их надземных побегов (от сырого веса доминантов остается всего 12 и 15 % абсолютно сухого вещества). Но у значительного большинства сообществ содержание массы доминантов находится в диапазоне 27–66 % от живой НФМ.

В результате анализа показателей массы анализируемых групп растений установлено наличие тесной взаимосвязи между массой содоминантов ($r = 0,49 \div 0,98$), сопутствующих видов ($r = 0,32 \div 0,89$) и массой доминантов, а также между содоминантами и сопутствующими видами ($r = 0,42 \div 0,94$) в сообществах разных уровней организации при уровне значимости $p < 0,05$ (рис. 2).

Аналогичная взаимообусловленность в сообществах (при $n = 90$) имеет место и между массой доминантов и кустарников ($r = 0,94$), содоминантов и мхов ($r = 0,67$). Вместе с тем между массой сопутствующих растений и массой разнотравья, кустарников, мхов и лишайников выявлены достоверные, но слабые связи ($r = - 0,28 \div 0,37$).

Запасы живой НФМ в типах сообществ гумидных высокогорий АСГО
/ Volume of the above-ground phytomass of humid highlands of the Altai-Sayan Mountain Region

Тип сообществ	Число площадок	Живая НФМ, г/м ² абс. сух. массы		
		Минимальная	Максимальная	Средняя (%)
Подгольцовые кустарники	30	3015	4374	3695 (78)
Кустарниковые тундры	140	1131	4824	1961 (77)
Кустарничковые тундры	210	214	1361	657 (76)
Лишайниковые тундры	120	148	1947	865 (83)
Травяные тундры	30	175	296	222 (67)
Субальпийские луга	240	142	810	465 (61)
Альпийские луга	130	27	366	160 (73)

Примечание. % – от НФМ.

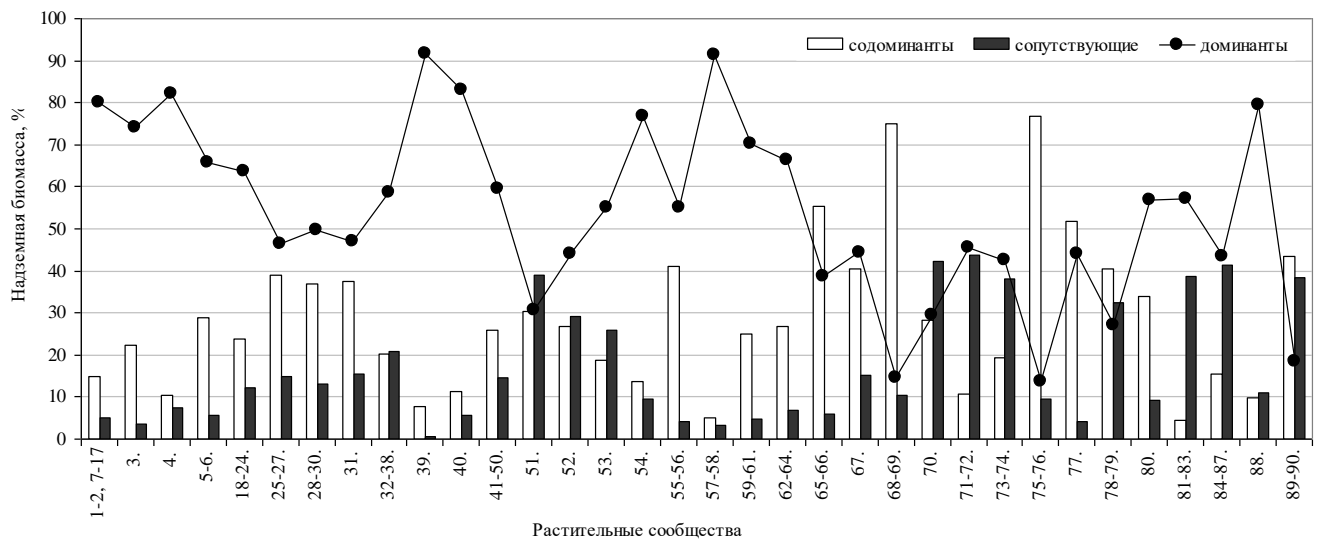
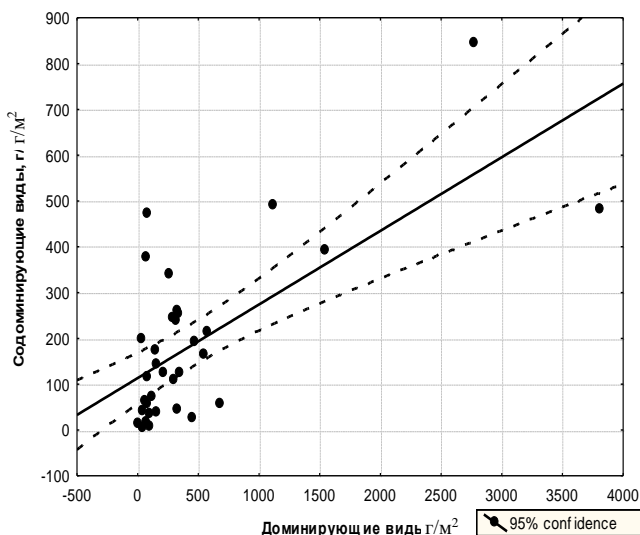


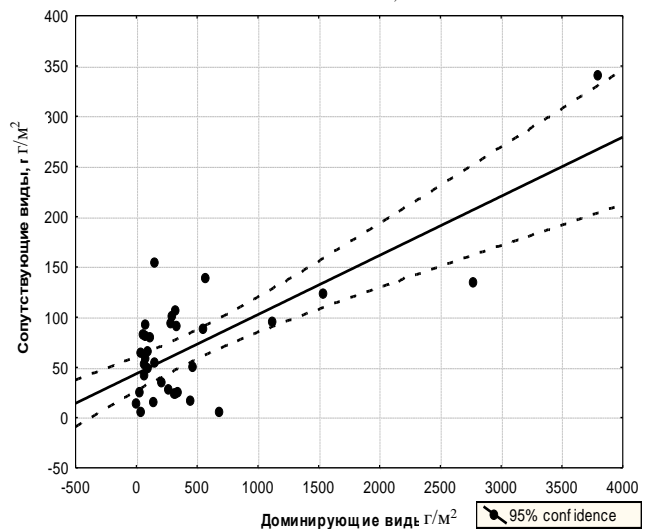
Рис. 1. Распределение групп растений в живой НФМ формаций гумидных высокогорий АСГО, %. Группы формаций: 1–3 – подгольцовые кустарники, тундры: 4–17 – кустарниковые, 18–38 – кустарничковые, 39–50 – лишайниковые, 51–53 – травяные; луга: 54–77 – субальпийские, 78–90 – альпийские. Растительные сообщества или формации при n=34: доминанты: 1–2, 7–17 – *Betula rotundifolia*, 3 – *Pentaphylloides fruticosa*, 4 – *Juniperus sibirica*, 5–6 – *Rhododendron aureum*, 18–24 – *Empetrum nigrum*, 25–27 – *Vaccinium myrtillus*, 28–30 – *Vaccinium uliginosum*, 31 – *Vaccinium vitis-idaea*, 32–38 – *Dryas oxyodonta*, 39 – *Alectoria ochroleuca*, 40 – *Cetraria islandica*, 41–50 – виды рода *Cladonia*, 51 – *Festuca kryloviana*, 52 – *F. sphagnicola*, 53 – *Hierochloe alpina*, 54 – *Aconitum sajanense*, 55–56 – *A. septentrionale*, 57–58 – *Athyrium distentifolium*, 59–61 – *Saussurea latifolia*, 62–64 – *Stemmacantha carthamoides*, 65–66 – *Veratrum lobelianum*, 67 – *Hedysarum theinum*, 68–69 – *Geranium albiflorum*, 70 – *Anthoxanthum alpinum*, 71–72 – *Bistorta major*, 73–74 – *Deschampsia caespitosa*, 75–76 – *Euphorbia pilosa*, 77 – *Trollius asiaticus*, 78–79 – *Aquilegia glandulosa*, 80 – *Doronicum altaicum*, 81–83 – *Schultzia crinita*, 84–87 – *Sibbaldia procumbens*, 88 – *Viola altaica* и др., 89–90 – *Ranunculus altaicus* / Fig. 1. Distribution of plant groups in the live above-ground phytomass of formations of humid highlands of the Altai-Sayan Mountain Region, %. Groups of formations: 1-3 - subgoltsy of bushes, tundra: 4-17 - shrub, 18-38 - bush, 39-50 - lichens, 51-53 - graminoid; meadows: 54-77-, 78-90 - alpine. Plant communities or formations at n=34: dominants: 1-2, 7-17 - *Betula rotundifolia*, 3 - *Pentaphylloides fruticosa*, 4 - *Juniperus sibirica*, 5-6 - *Rhododendron aureum*, 18-24 - *Empetrum nigrum*, 25-27 - *Vaccinium myrtillus*, 28-30 - *Vaccinium uliginosum*, 31 - *Vaccinium vitis-idaea*, 32-38 - *Dryas oxyodonta*, 39 - *Alectoria ochroleuca*, 40 - *Cetraria islandica*, 41-50 - types of genus *Cladonia*, 51 - *Festuca kryloviana*, 52 - *F. sphagnicola*, 53 - *Hierochloe alpina*, 54 - *Aconitum sajanense*, 55-56 - *A. septentrionale*, 57-58 - *Athyrium distentifolium*, 59-61 - *Saussurea latifolia*, 62-64 - *Stemmacantha carthamoides*, 65-66 - *Veratrum lobelianum*, 67 - *Hedysarum theinum*, 68-69 - *Geranium albiflorum*, 70 - *Anthoxanthum alpinum*, 71-72 - *Bistorta major*, 73-74 - *Deschampsia caespitosa*, 75-76 - *Euphorbia pilosa*, 77 - *Trollius asiaticus*, 78-79 - *Aquilegia glandulosa*, 80 - *Doronicum altaicum*, 81-83 - *Schultzia crinita*, 84-87 - *Sibbaldia procumbens*, 88 - *Viola altaica* etc., 89-90 - *Ranunculus altaicus*

Содоминирующие виды $\text{г/м}^2=113,27+1,6076 \cdot \text{Доминирующие виды, г/м}^2$
 Correlation $r=,68908$



а / а

Сопутствующие виды $\text{г/м}^2=43,686+0,05887 \cdot \text{Доминирующие виды, г/м}^2$
 Correlation $r=,75028$



б / б

Рис. 2. Взаимосвязи между массой содоминантов и доминантов (а), а также между массой сопутствующих видов растений и доминантов (б) в структуре живой НФМ растительных формаций гумидных высокогорий АСГО, г/м^2 абс. сух. массы / Fig. 2. Ratio of co-dominants and dominants (a) mass, associated species (b) mass in the structure of the live above-ground phytomass in the formations of humid highlands of the Altai-Sayan Mountain Region, g/m^2 abs. dry mass

В целом в запасе живой НФМ сообществ гумидных высокогорий АСГО содержание массы содоминантов и сопутствующих видов составляет 4÷77 и 3÷44 % соответственно, а доминантов – 14÷92 %. В структуре живой НФМ групп формаций прослеживаются следующие общие закономерности. С увеличением доли участия содоминантов (16÷25 %) и сопутствующих видов растений (4÷31 %) снижается процентное содержание массы доминантов 80÷44. Выявлено, что вклад содоминантов и сопутствующих видов в живую массу травяных сообществ наибольший (луга и травяные тундры), а доминантов – тундровых ценозов, в которых масса кустарников и мхов наибольшая.

Литература

1. Злотин Р.И. Жизнь в высокогорьях. М. : Мысль, 1975. 239 с.
2. Седельников В.П. Флора и растительность высокогорий Кузнецкого Алатау. Новосибирск : Наука, 1979. 167 с.
3. Grime J.P. *Plant Strategies and Vegetation Processes*. Chichester, UK: John Wiley and Sons, 1979. P. 222.
4. Самбыла Ч.Н. Структура фитомассы дриадовых тундр высокогорий Тувы // Изв. Самарского науч. центра РАН. 2015. Т. 17, № 4 (5). С. 880–891.
5. Титлянова А.А., Косых Н.П., Миронычева-Токарева Н.П., Романова И.П. Подземные органы растений в травяных экосистемах. Новосибирск : Наука, 1996. 128 с.
6. Седельников В.П. Высокогорная растительность Алтае-Саянской горной области. Новосибирск : Наука, 1988. 223 с.
7. Толмачев А.И. Основные пути формирования высокогорных ландшафтов Северного полушария // Бот. журн. 1948. Т. 33, № 2. С. 161–180.
8. Горбачев В.Н. Почвы Восточного Саяна. М. : Наука, 1978. 198 с.
9. Ильиных Н.И. Почвы Кузнецкого Алатау. Красноярск, 1970. 165 с.
10. Зибзеев Е.Г., Басаргин Е.А. Классификация и ценотическая характеристика некоторых высокотравных сообществ гумидных высокогорий Западного Саяна // Вестн. НГУ. Биология, клиническая медицина. 2012. № 2. С. 41–47.
11. Методы изучения биологического круговорота в различных природных зонах. М. : Мысль, 1978. 182 с.
12. Куминова А.В. Растительный покров Алтая. Новосибирск : СО АН СССР, 1960. 456 с.
13. Лакин Г.Ф. Биометрия. М. : Высшая школа, 1973. 343 с.
14. Сорокин О.Д. Прикладная статистика на компьютере. Краснообск : ГУП РПО СО РАСХН, 2004. 162 с.
15. Титлянова А.А., Миронычева-Токарева Н.П., Романова И.П. [и др.]. Продуктивность степей // Степи Центральной Азии. Новосибирск : СО РАН, 2002. С. 95–165.
16. Черепанов С.К. Сосудистые растения России и сопредельных государств. СПб. : Мир и семья, 1995. 992 с.

References

1. Zlotin R.I. *Zhizn' v vysokogor'yakh* [Life in high mountains]. Moscow: Mysl', 1975, 239 p.
2. Sedel'nikov V.P. *Flora i rastitel'nost' vysokogorii Kuznetskogo Alatau* [Flora and vegetation of high mountains of Kuznetsk Alatau]. Novosibirsk : Nauka, 1979, 167 p.
3. Grime J.P. *Plant Strategies and Vegetation Processes*. Chichester, UK: John Wiley and Sons, 1979, p. 222.
4. Sambyla Ch.N. *Struktura fitomassy driadovykh tundr vysokogorii Tuvy* [Structure of phytomass of dryad tundra in Tuva highlands]. *Izv. Samarskogo nauch. tsentra RAN*. 2015, vol. 17, No. 4 (5), pp. 880-891.
5. Titlyanova A.A., Kosykh N.P., Mironycheva-Tokareva N.P., Romanova I.P. *Podzemnye organy rastenii v travyanykh ekosistemakh* [Underground organs of plants in grass ecosystems]. Novosibirsk : Nauka, 1996, 128 p.
6. Sedel'nikov V.P. *Vysokogornaya rastitel'nost' Altae-Sayanskoi gornoj oblasti* [High mountain vegetation of the Altai-Sayan mountain region]. Novosibirsk : Nauka, 1988, 223 p.
7. Tolmachev A.I. *Osnovnye puti formirovaniya vysokogornyykh landshaftov Severnogo polushariya* [The main ways of forming high-mountain landscapes of the Northern Hemisphere]. *Bot. zhurn.* 1948, vol. 33, No. 2, pp. 161-180.
8. Gorbachev V.N. *Pochvy Vostochnogo Sayana* [Soils of the Eastern Sayan]. Moscow: Nauka, 1978, 198 p.
9. Il'inykh N.I. *Pochvy Kuznetskogo Alatau* [Soil of the Kuznetsk Alatau]. Krasnoyarsk, 1970, 165 p.
10. Zibzeev E.G., Basargin E.A. *Klassifikatsiya i tsenoticheskaya kharakteristika nekotorykh vysokotravnykh soobshchestv gumidnykh vysokogorii Zapadnogo Sayana* [Classification and cenotic characteristics of some high-grass communities of humid highlands of the Western Sayan]. *Vestn. NGU. Biologiya, klinicheskaya meditsina*. 2012, No. 2, pp. 41-47.
11. *Metody izucheniya biologicheskogo krugovorota v razlichnykh prirodnykh zonakh* [Methods of studying the biological cycle in various natural zones]. Moscow: Mysl', 1978, 182 p.
12. Kuminova A.V. *Rastitel'nyi pokrov Altaya* [Vegetation cover of Altai]. Novosibirsk : SO AN SSSR, 1960, 456 p.
13. Lakin G.F. *Biometriya* [Biometrics]. Moscow: Vysshaya shkola, 1973, 343 p.
14. Sorokin O.D. *Prikladnaya statistika na komp'yutere* [Applied statistics on the computer]. Krasnoobsk : GUP RPO SO RASKhN, 2004, 162 p.
15. Titlyanova A.A., Mironycheva-Tokareva N.P., Romanova I.P. [et al.]. [Productivity of the steppes]. *Stepi Tsentral'noi Azii* [Steppes of Central Asia]. Novosibirsk : SO RAN, 2002, pp. 95-165.
16. Cherepanov S.K. *Sosudistye rasteniya Rossii i sopredel'nykh gosudarstv* [Vascular plants of Russia and neighboring countries]. Saint Petersburg: Mir i sem'ya, 1995, 992 p.

УДК 577.344.2

DOI 10.23683/0321-3005-2017-4-1-87-92

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ЖЕЛТО-КРАСНОГО СВЕТА И БЕТА-КАРОТИНА НА ПОКАЗАТЕЛИ СЕРДЕЧНО-СОСУДИСТОЙ СИСТЕМЫ

© 2017 г. Б.М. Суншева¹, М.Т. Шаов¹, О.В. Пшикова¹, А.Ю. Паритов¹,
Д.А. Хашихожева¹, Ф.А. Маршенкулова¹, И.А. Башиева¹, А.Р. Хотова¹

¹Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова, Нальчик, Россия

COMPARATIVE ASSESSMENT OF YELLOW-RED LIGHT AND BETA-CAROTENE INDICATORS FOR CARDIOVASCULAR SYSTEM

2017 B.M. Sunsheva¹, M.T. Shaov¹, O.V. Pshikova¹, A.Yu. Paritov¹,
D.A. Khashkhozheva¹, F.A. Marshenkulova¹, I.A. Bashieva¹, A.R. Khotova¹

¹Berbekov Kabardino-Balkarian State University, Nalchik, Russia

Суншева Бэла Мухамедовна – кандидат биологических наук, старший преподаватель, кафедра физиологии, генетики и молекулярной биологии, Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова, ул. Чернышевского, 173, г. Нальчик, КБР, 360004, Россия, e-mail: belasunsh@mail.ru

Bela M. Sunsheva - Candidate of Biological Sciences, Senior Lecturer, Department of Physiology, Genetics and Molecular Biology, Berbekov Kabardino-Balkarian State University, Chernyshevskogo St., 173, Nalchik, KBR, 360004, Russia, e-mail: belasunsh@mail.ru

Шаов Мухамед Талибович – доктор биологических наук, профессор, кафедра физиологии, генетики и молекулярной биологии, Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова, ул. Чернышевского, 173, г. Нальчик, КБР, 360004, Россия, e-mail: shaov_mt@mail.ru

Muhamed T. Shaov - Doctor of Biological Sciences, Professor, Department of Physiology, Genetics and Molecular Biology, Berbekov Kabardino-Balkarian State University, Chernyshevskogo St., 173, Nalchik, KBR, 360004, Russia, e-mail: shaov_mt@mail.ru

Пшикова Ольга Владимировна – доктор биологических наук, профессор, кафедра физиологии, генетики и молекулярной биологии, Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова, ул. Чернышевского, 173, г. Нальчик, КБР, 360004, Россия, e-mail: olgarshikova@mail.ru

Olga V. Pshikova - Doctor of Biological Sciences, Professor, Department of Physiology, Genetics and Molecular Biology, Berbekov Kabardino-Balkarian State University, Chernyshevskogo St., 173, Nalchik, KBR, 360004, Russia, e-mail: olgarshikova@mail.ru

Паритов Анзор Юрьевич – кандидат биологических наук, доцент, заведующий кафедрой физиологии, генетики и молекулярной биологии, Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова, ул. Чернышевского, 173, г. Нальчик, КБР, 360004, Россия, e-mail: paritov@mail.ru

Anzor Yu. Paritov - Candidate of Biological Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Physiology, Genetics and Molecular Biology, Berbekov Kabardino-Balkarian State University, Chernyshevskogo St., 173, Nalchik, KBR, 360004, Russia, e-mail: paritov@mail.ru

Хашихожева Диана Адамовна – кандидат биологических наук, доцент, кафедра физиологии, генетики и молекулярной биологии, Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова, ул. Чернышевского, 173, г. Нальчик, КБР, 360004, Россия, e-mail: dianaadamovna@mail.ru

Diana A. Khashkhozheva - Candidate of Biological Sciences, Associate Professor, Department of Physiology, Genetics and Molecular Biology, Berbekov Kabardino-Balkarian State University, Chernyshevskogo St., 173, Nalchik, KBR, 360004, Russia, e-mail: dianaadamovna@mail.ru

Маршенкулова Фатима Ахмедовна – магистрант, Институт химии и биологии, Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова, ул. Чернышевского, 173, г. Нальчик, КБР, 360004, Россия, e-mail: fatima.marshenkulova@bk.ru

Fatima A. Marshenkulova – Master Student, Institute of Chemistry and Biology, Berbekov Kabardino-Balkarian State University, Chernyshevskogo St., 173, Nalchik, KBR, 360004, Russia, e-mail: fatima.marshenkulova@bk.ru

Башиева Индира Алиевна – магистрант, Институт химии и биологии, Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова, ул. Чернышевского, 173, г. Нальчик, КБР, 360004, Россия, e-mail: edemo3782@gmail.com

Indira A. Bashieva - Master Student, Institute of Chemistry and Biology, Berbekov Kabardino-Balkarian State University, Chernyshevskogo St., 173, Nalchik, KBR, 360004, Russia, e-mail: edemo3782@gmail.com

Хотова Амина Руслановна – магистрант, Институт химии и биологии, Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова, ул. Чернышевского, 173, г. Нальчик, КБР, 360004, Россия, e-mail: aminahotova@yandex.ru

Amina R. Khotova - Master Student, Institute of Chemistry and Biology, Berbekov Kabardino-Balkarian State University, Chernyshevskogo St., 173, Nalchik, KBR, 360004, Russia, e-mail: aminahotova@yandex.ru

Изучалась динамика показателей сердечно-сосудистой системы (ССС) (частота сердечных сокращений (ЧСС), артериальное давление (АД), вегетативный статус) под воздействием кибернетического фотонейроробота и природного антиоксиданта бета-каротина на функциональные показатели адаптации организма добровольцев обоего пола (20–21 год). Известно, что СССР составляет основу природных механизмов регуляции. Частотные параметры этой системы чувствительны к действию внешних факторов. В фоне выявлены значительные флуктуации ЧСС и АД. Показано, что 10-дневное воздействие нейроробота способствует восстановлению вегетативного равновесия, нормализации функциональных показателей СССР. Снижение ЧСС и АД, а также флуктуаций вегетативного индекса Кердо (ВИК), происходящих в результате действия испытуемого способа, говорит о стабилизации уровня основного обмена и установлении оптимального соотношения между энергопотреблением и энергопродукцией, что лежит в основе адаптации.

Ключевые слова: артериальное давление, вегетативный статус, частота сердечных сокращений, бета-каротин, фотонейроробот.

The dynamics of the parameters of the cardiovascular system (heart rate, arterial pressure, vegetative status) was studied under the influence of cybernetic photoneurobot and natural antioxidant beta-carotene on the functional indices of the integrity of volunteers of both sexes (20-21 years). It is known that the cardiovascular system is the basis of natural regulation mechanisms. Frequency system parameters are sensitive to external factors. It is shown that the ten-day exposure of the neuro-robot contributes to the restoration of vegetative equilibrium, the normalization of the functional parameters of the cardiovascular system. Reduction of heart rate and blood pressure, as well as fluctuations VIC, speaks about the stabilization of the main exchange and the establishment of a balance between power consumption and energy products, which is at the basis of adaptation.

Keywords: blood pressure, vegetative status, heart rate, beta-carotene, photoneurobot.

Известно, что биоэлектрическая активность головного мозга, дыхательная и сердечно-сосудистая системы (ССС) составляют основу природных механизмов регуляции. Эти системы тесно взаимосвязаны и имеют близкие частотные параметры, а также характеризуются высокой чувствительностью к действию внешних факторов. Благодаря этому даже низкоинтенсивные, но ритмически организованные воздействия могут сопровождаться выраженными физиологическими эффектами, обусловленными резонансными механизмами смены нелинейных биологических состояний. Такие частоты внешних воздействий относятся к разряду биоэффективных, а их использование является перспективным путем оптимизации разнообразных терапевтических процедур. Известно, что резонансный характер даже нелинейных волновых взаимодействий приводит к резкому повышению нелинейных восприимчивостей, что позволяет наблюдать высокие эффективности преобразования частоты при умеренных и слабых интенсивностях возбуждающих волн [1]. Это направление – немедикаментозные натуропатические методы коррекции стрессовых состояний организма – в физиологии и медицине интенсивно развивается в наше время.

Регуляция частоты сердечных сокращений (ЧСС) находится под контролем вегетативной нервной системы (ВНС) и гуморальных факторов. Поэтому на сердечный ритм сильно влияет состояние всего орга-

низма – при любых нарушениях ритм сердца изменяется, нарушается его структура, появляются сдвиги в параметрах. Кроме того, любые внешние воздействия отражаются в первую очередь на СССР.

Исходя из этого, в качестве объекта исследования нами были выбраны параметры СССР. В качестве фактора воздействия использовали природный антиоксидант бета-каротин и новый кибернетический фотонейроробот. Присущие роботам «органы чувств» – специализированные датчики, «электронный мозг» (устройство для принятия решений и выдачи команд), «исполнительные органы» в кибернетическом фотонейророботе размещались в светодинамической установке «РИТМ» («Электроника СДУ-3», 1989). «Исполнительными органами» фотонейроробота были электромагнитные импульсы желто-красного оптического диапазона, соответствующие частоте импульсных электрических разрядов нейрона, адаптированного к гипоксии с помощью биоантиоксидантов облепихи крушиновидной [2, 3]. Ранее было установлено, что содержимое облепихи крушиновидной, особенно бета-каротин, оказывает существенное влияние на генераторно-электрические процессы в нейронах коры головного мозга – снижает импульсную электрическую активность с 10 до 5 имп/с, а скорость потребления кислорода нейронами замедляется почти в 2 раза [4]. Кроме того, известно, что оптический диапазон в желто-красном спектре (575÷760 нм) оказывает существенное влия-

яние на метаболические процессы в клетках организма [5–8]. Установлено также, что информационный феномен адаптации потенцируется и закрепляется в частотах акустоэлектромагнитного континуума (АЭМК) нейронов коры головного мозга, которые с помощью модулированных сеансами адаптации (например, к гипоксии) частот АЭМК управляют становлением нового уровня функционирования и увеличением амплитуды приспособительной реакции ССС. Тем самым предопределяется повышенная резистентность к гипоксии [9]. С учетом этих положений разработана конструкция кибернетического фотонейроробота.

В исследовании приняли участие на добровольной основе молодые люди 20–22 лет (юноши, n=60), которые были разделены на 3 группы: контрольную (n=20) и 2 (n=40) опытные. Участники контрольной группы не подвергались никаким воздействиям, они вели привычный для них образ жизни. Участники 1-й опытной группы подвергались воздействию света. Использовался оптический диапазон в желто-красном спектре (575–760 нм). Длительность экспозиции составила 5 мин в день, расстояние от источника до реципиента – 1 м. Участники 2-й опытной группы принимали бета-каротин в дозе, соответствующей рекомендуемой минимальной суточной (5 мг) (в одной капле – 1 мг). Исследование продолжалось 20 дней: 10 – воздействия, 10 – последействия. ЧСС регистрировалась с помощью прибора «ЭЛОКС-01М2»; артериальное давление (АД) измерялось механическим тонометром Microlife BP AG1-20 («Микролайф АГ», Швейцария). В качестве количественной характеристики тонуса ВНС человека применялся индекс Кердо, вычисляемый по формуле $V.I. = \left(1 - \frac{d}{p}\right) \cdot 100$, где V – вегетативный

индекс Кердо (ВИК); d – диастолическое давление (ДАД), мм рт. ст.; p – ЧСС, уд/мин.

Значение V=0 является показателем устойчивого равновесия системы. Значения индекса Кердо, превышающие значение устойчивого равновесия системы, интерпретируются как преобладание симпатического тонуса ВНС; ниже показателя устойчивого равновесия – как преобладание парасимпатического тонуса ВНС [10].

Исследование проводилось с соблюдением принципов биоэтики. Регистрировались фоновые параметры ССС на 5-й и 10-й дни воздействия, а также через 10 дней периода последействия для определения пролонгированности эффекта исследуемого фактора. Обработка экспериментального материала и статистический анализ по t-критерию Стьюдента проведены с помощью программы «Биостати-

стика». Статистически значимыми считали различия с уровнем значимости $p < 0,05$. Исследования проводились в условиях обычного учебного дня.

Результаты и их обсуждение

Средние значения ЧСС в фоне в контрольной и в опытной группах приближались к $82,0 \pm 2,5$ уд/мин, что соответствует физиологической норме (рис. 1). В период воздействия, на 5-й день опыта, среднее значение составило $73,0 \pm 2,7$ уд/мин (11 %), на 10-й ЧСС снизилась на 12,2 % и составила в среднем $71,3 \pm 2,1$ уд/мин. В дальнейшем в период последействия данный показатель претерпевал незначительные колебания и оставался на таком же уровне. В контрольной группе среднее значение ЧСС менялось в фазово-колебательном режиме, что не противоречит флуктуационно-диссипативной теории. При этом достоверных отличий от фона в динамике ЧСС установлено не было.

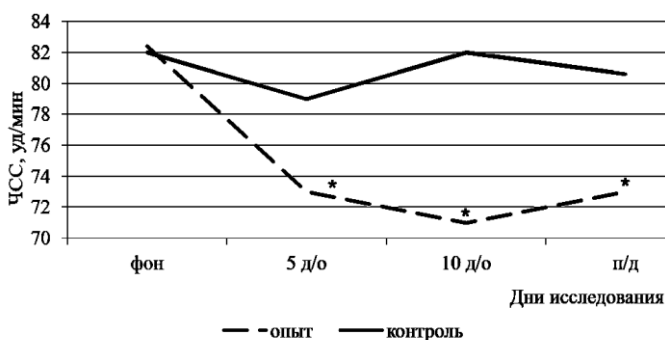


Рис. 1. Динамика средних значений ЧСС у студентов в период исследования при воздействии светом (* – $p < 0,05$) / Fig. 1. Dynamics of mean heart rate in students during the study period under exposure to light (* – $p < 0,05$)

При приеме бета-каротина произошло снижение ЧСС на 5-й день исследования на 5,5 % (рис. 2).

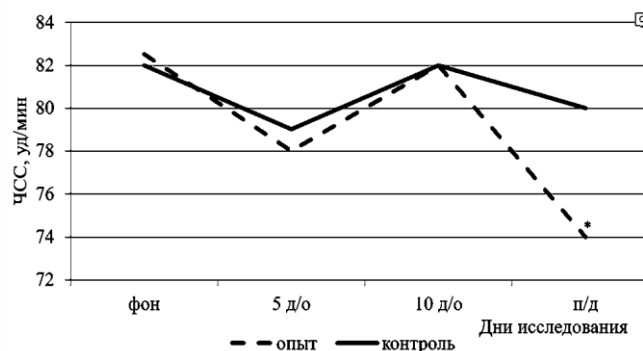


Рис. 2. Динамика средних значений ЧСС у студентов в период исследования при воздействии бета-каротином (* – $p < 0,05$) / Fig. 2. Dynamics of mean heart rate in students during the study with beta-carotene (* – $p < 0,05$)

На 10-й день его значение немного возросло до фонового и составило в среднем $82,6 \pm 2,7$ уд/мин. В период последствия произошло достоверное снижение ЧСС на 9,7 % относительно фона и составило $74,5 \pm 2,5$ уд/мин. В группе контроля и в этой серии исследований достоверные изменения не произошли.

Средние значения систолического и диастолического артериального давления (САД) и (ДАД) также имели тенденцию к снижению относительно фона (таблица).

В опытной и в контрольной группах колебания АД находились в пределах физиологической нормы. Снижение ЧСС и АД в период исследования свидетельствует о снижении напряжения и тревожности у студентов под влиянием сочетанного красного и желтого света. Подобный результат был получен при действии бета-каротина.

При его курсовом приеме достоверные изменения функциональных показателей ССС произошли на 5-й день опыта, САД снизилось в среднем на 14 % по сравнению с фоном (таблица), ДАД – на 11 %. На 10-й день опыта САД оставалось ниже фоновых показателей на 5 %, ДАД соответствовало фоновому значению. В период последствия значение всех показателей приблизилось к фоновым.

Динамика АД происходит в фазово-колебательном режиме. Несколько снижается в опыте, повышается в период последствия на 16 % по сравнению с контролем и на 12 – с фоном. Принимая во внимание, что пульсовое давление является показателем гемодинамики (на него влияют ударный объем сердца и растяжимость артериальной системы), можно говорить, что его небольшое повышение в пределах нормы свидетельствует о повышении эластичности сосудов. Таким образом, действие бета-каротина может иметь важное значение для предупреждения атеросклероза и поддержания нормальной сопротивляемости сосудов. Учи-

таявая выраженное антиоксидантное действие бета-каротина, можно предположить, что этот процесс сопровождается снижением уровня свободнорадикальных процессов, усиливающихся в процессе атерогенеза.

ВИК позволяет оценить состояние вегетативного тонуса по параметрам, характеризующим ССС. При исследовании вегетативного тонуса нервной системы у 40 % наших студентов была выявлена симпатикотония, у 30 – ваготония и еще у 30 – нормотония (рис. 3). После воздействия светом на 10-й день исследования симпатикотония отмечалась у 20 % участников, у 80 – нормотония, что свидетельствует об усилении физиологических процессов внутрен-

Динамика средних значений ($M \pm m$) САД и ДАД у студентов в период воздействия света (опыт 1) и под влиянием курсового приема β -каротина (опыт 2) / Dynamics of average values ($M \pm m$) systolic and diastolic blood pressure among the students during the period of exposure to light (experiment 1) and under the influence of the course receiving β -carotene (experiment 2)

День исследования	Контроль		Опыт 2		Опыт 1	
	АД, мм рт.ст.					
	САД	ДАД	САД	ДАД	САД	ДАД
Фон	$115,0 \pm 2,4$	$75 \pm 1,8$	$119 \pm 2,1$	$78,5 \pm 1,8$	$110 \pm 0,76$	$70 \pm 0,01$
5-й	$120 \pm 4,01$	$80 \pm 2,1$	$109,5 \pm 2,7^*$	$70 \pm 2,12$	$95 \pm 0,09^*$	$62,5 \pm 0,09^*$
10-й	$110 \pm 2,6$	$70 \pm 1,8$	$105 \pm 2,5^*$	$68,3 \pm 1,7^*$	$105 \pm 0,42^*$	$70 \pm 0,01^*$
Последствие	$115,5 \pm 2,5$	$80 \pm 2,1$	$116 \pm 3,9$	$73,3 \pm 1,8$	$110 \pm 0,01^*$	$65 \pm 0,42^*$

Примечание. * – $p < 0,05$.

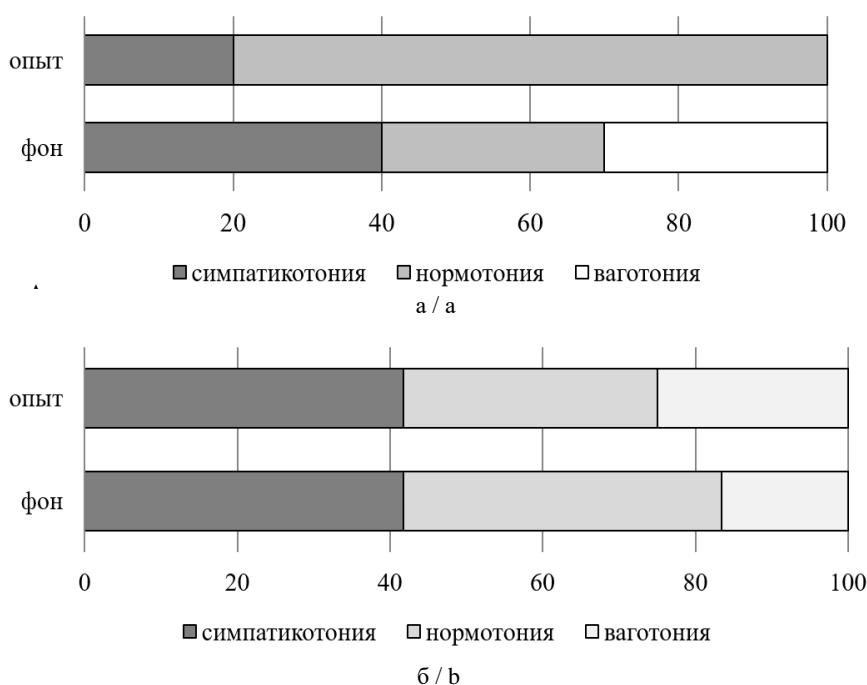


Рис. 3 Вегетативный статус студентов (% по индексу Кердо) при воздействии светом (А) и при приеме бета-каротина (Б) / **Fig. 3.** The vegetative status of students (% according to the Kerdo index) when exposed to light (A) and when taking beta-carotene (B)

него восстановления [10]. Этот процесс является основным для обеспечения возможности оптимального ответа организма на изменившиеся условия окружающей среды.

В период последствия симпатический тонус обнаружился у 40 % участников, у 60 – нормотония. Состояние симпатикотонии характеризуется эрготропией (повышением уровня основного обмена) и выражается в увеличении ЧСС и минутного объема сердца, ваготония может быть охарактеризована через возрастание ассимиляции, т.е. трофотропией [11, 12].

После курсового приема бета-каротина мы наблюдали уменьшение числа нормотоников на 8,4 % (в фоне – 41,7, в опыте – 33,3) и увеличение числа ваготоников до 25 % (в фоне – 16,6, в опыте – 25). Количество симпатикотоников осталось без изменений (41,7 в фоне и опыте).

Итак, бета-каротин оказывает выраженное адаптогенное действие. Причем изменения происходят за короткий промежуток времени. Это можно утверждать исходя из анализа наших результатов. Возрастание парасимпатического тонуса под воздействием бета-каротина свидетельствует об усилении физиологических процессов внутреннего восстановления [10]. Этот процесс является основным для обеспечения возможности оптимального ответа организма на изменившиеся условия окружающей среды.

На графике (рис. 4) хорошо заметно, что средние значения ВИК в контрольной группе распределены в области как положительных, так и отрицательных значений. В опытной группе, подвергавшейся воздействию света, флуктуации значительно снижены и сгруппированы в области положительных значений.

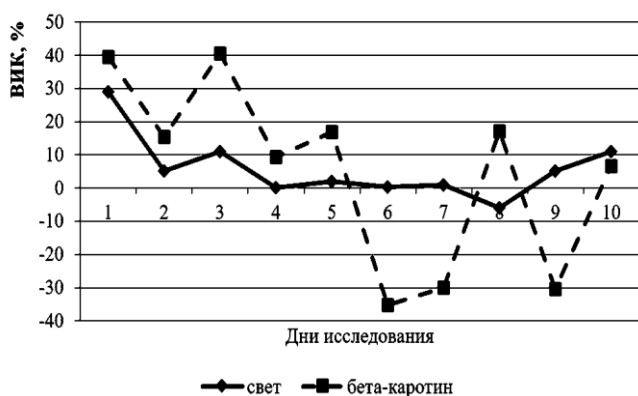


Рис. 4. Динамика средних значений ВИК, %, в период исследования у студентов / Fig.4. Dynamics of mean values of VIC, %, during the study period among students

Таким образом, можно сделать предположение о том, что желто-красный свет способствует восста-

новлению вегетативного равновесия, тем самым ведёт к нормализации функциональных показателей ССС. Снижение ЧСС и АД, а также флуктуаций ВИК говорит о стабилизации уровня основного обмена и установлении оптимального соотношения между энергопотреблением и энергопродукцией, что лежит в основе адаптации.

Литература

1. Корниенко Н.Е. О развитии нелинейно-квантовой макрофизики и нелинейно-волновой модели «энергетических каналов» живых организмов (о природе китайских меридианов) // Физика живого. 2008. Т. 16, № 1. С. 5–22.
2. Хаишхожева Д.А., Пишкова О.В., Шаов М.Т. Влияние физической модели высокочастотных нейроакустических импульсов на ССС человека // Вестн. КБГУ. 2008. Вып. 9. С. 30–32.
3. Хаишхожева Д.А., Шаов М.Т., Пишкова О.В. Управление физиологическими функциями организма человека в условиях горной экологии с помощью «голоса нейрона» – электроакустических импульсов нервной клетки // Проблемы региональной экологии. 2008. № 4. С. 205–210.
4. Пишкова О.В. Ускоренная адаптация к гипоксии и ее функциональные механизмы : автореф. дис. ... д-ра биол. наук. Ростов н/Д., 1999. 233 с.
5. Захаров С.Д., Еремеев Б.В., Петров С.Н., Панасенко Н.А. Индуцированные лазером биоэффекты в эритроцитах, осуществляемые через молекулярный кислород // Действие электромагнитного излучения на биологические объекты и лазерная медицина. Владивосток : ДВО АН СССР, 1989. С. 52–69.
6. Иванов А.В., Кулин В.И., Еремеев Б.В. [и др.]. Обратимые повреждения плазматических мембран форменных элементов крови – начальное звено стимуляции, вызываемой лазерным излучением // Действие низкоэнергетического лазерного излучения на кровь : сб. науч. тр. Киев, 1989. С. 185–187.
7. Karu T. Photobiology of lowpower laser effects // Health Physics. 1989. Vol. 56. P. 691–704.
8. Marcus R.A., Sutin N. Electron Transfers in chemistry and biology // Bioch. Biophys. Acta. 1985. Vol. 811. P. 265–322.
9. Шаов М.Т., Пишкова О.В., Шарипова А.З. Динамика ЧСС и индекса Кердо при действии импринтинг-технологии «сфигмотон» и высокогорной кратковременной гипоксии // Вестн. Адыг. гос. ун-та. Естеств.-мат. и техн. науки. 2016. № 2. С. 103–107.
10. Демин А.В., Иванов А.И., Малый А.В., Орлов О.И. Методическое пособие по математической физиологии. Количественная оценка вегетативных энергозатрат и восстановления человека / под ред. А.М. Носовского. М. : НОВО, 2012. С. 18.
11. Агаджанян Н.А., Марачев А.Г., Бобков Г.А. Экологическая физиология человека. М. : КРУК, 1998. 416 с.

12. Покровский В.М., Коротко Г.Ф. Физиология человека / под ред. В.М. Покровского, Г.Ф. Коротко. М. : Медицина, 1997. Т. 1. 448 с.

References

1. Kornienko N.E. O razvitií nelineino-kvantovoi makrofiziki i nelineino-volnovoi modeli «energeticheskikh kanalov» zhivyykh organizmov (o prirode kitaiskikh meridianov) [On the development of nonlinear quantum macrophysics and the nonlinear wave model of the "energy channels" of living organisms (on the nature of Chinese meridians)]. *Fizika zhivogo*. 2008, vol. 16, No. 1, pp. 5-22.
2. Khashkhozheva D.A., Pshikova O.V., Shaov M.T. Vliyaniye fizicheskoi modeli vysokochastotnykh neuroakusticheskikh impul'sov na SSS cheloveka [Influence of the physical model of high-frequency neuroacoustic impulses on human SSS]. *Vestn. KBGU*. 2008, iss. 9, pp. 30-32.
3. Khashkhozheva D.A., Shaov M.T., Pshikova O.V. Upravleniye fiziologicheskimi funktsiyami organizma cheloveka v usloviyakh gornoï ekologii s pomoshch'yu «golosá neirona» – elektroakusticheskikh impul'sov nervnoi kletki [Management of physiological functions of the human body in mountain ecology with the help of "voice of the neuron" - electroacoustic impulses of the nerve cell]. *Problemy regional'noi ekologii*. 2008, No. 4, pp. 205-210.
4. Pshikova O.V. *Uskorennaya adaptatsiya k gipoksii i ee funktsional'nye mekhanizmy* : avtoref. dis. ... d-ra biol. nauk [Accelerated adaptation to hypoxia and its functional mechanisms]. Rostov-on-Don, 1999, 233 p.
5. Zakharov S.D., Ereemeev B.V., Petrov S.N., Panasenko N.A. [Laser-induced bioeffects in erythrocytes, carried out through molecular oxygen]. *Deistvie elektro-*
6. *magnitnogo izlucheniya na biologicheskie ob"ekty i lazernaya meditsina* [Effects of electromagnetic radiation on biological objects and laser medicine]. Vladivostok : DVO AN SSSR, 1989, pp. 52-69.
7. Karu T. Photobiology of lowpower laser effects. *Health Physics*. 1989, vol. 56, pp. 691-704.
8. Marcus R.A., Sutin N. Electron Transfers in chemistry and biology. *Bioch. Biophys. Acta*. 1985, vol. 811, pp. 265-322.
9. Shaov M.T., Pshikova O.V., Sharibova A.Z. Dinamika ChSS i indeksa Kerdo pri deistvii imprinting-tekhologii «sfigmoton» i vysokogornoï kratkovremennoi gipoksii [Dynamics of heart rate and the Kerdo index under the effect of imprinting technology "sphygmoton" and high-altitude short-term hypoxia]. *Vestn. Adyg. gos. un-ta. Estestv.-mat. i tekhn. nauki*. 2016, No. 2, pp. 103-107.
10. Demin A.V., Ivanov A.I., Malyi A.V., Orlov O.I. *Metodicheskoe posobie po matematicheskoi fiziologii. Kolichestvennaya otsenka vegetativnykh energotrat i vostanovleniya cheloveka* [Methodical manual on mathematical physiology. Quantitative assessment of vegetative energy expenditure and human recovery]. Ed. A.M. Novoskii. Moscow : NOVO, 2012, p. 18.
11. Agadzhanyan N.A., Marachev A.G., Bobkov G.A. *Ekologicheskaya fiziologiya cheloveka* [Ecological physiology of man]. Moscow: KRUK, 1998, 416 p.
12. Pokrovskii V.M., Korot'ko G.F. *Fiziologiya cheloveka* [Human physiology]. Ed. V.M. Pokrovskii, G.F. Korot'ko. Moscow: Meditsina, 1997, vol. 1, 448 p.

НАУКИ О ЗЕМЛЕ SCIENCE OF EARTH

УДК 556.36:553.98

DOI 10.23683/0321-3005-2017-4-1-93-103

ГЕОХИМИЯ ПЛАСТОВЫХ ВОД МЕСТОРОЖДЕНИЙ УГЛЕВОДОРОДОВ СЕВЕРНОГО И СРЕДНЕГО КАСПИЯ

© 2017 г. Л.А. Абукова¹, О.П. Абрамова¹, Л.А. Анисимов²,
Э.С. Сианисян³, И.В. Воронцова², Г.Ю. Исаева¹

¹Институт проблем нефти и газа Российской академии наук, Москва, Россия,

²Филиал ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг» «ВолгоградНИПИморнефть», Волгоград, Россия,

³Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, Россия

FORMATION WATERS GEOCHEMISTRY OF THE HYDROCARBONS FIELDS OF THE NORTH AND CENTRAL CASPIAN

L.A. Abukova¹, O.P. Abramova¹, L.A. Anisimov²,
E.S. Sianisyan³, I.V. Vorontsova², G.U. Isaeva¹

¹Oil and Gas Research Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia,

²JSC "LUKOIL-Engineering", Branch "VolgogradNIPImorneft", Volgograd, Russia,

³Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia

Абукова Лейла Азретовна – доктор геолого-минералогических наук, профессор, директор, Институт проблем нефти и газа РАН, ул. Губкина, 3, г. Москва, 119333, Россия, e-mail: abukovaa@ipng.ru

Leila A. Abukova - Doctor of Geology and Mineralogy, Professor, Director, Oil and Gas Research Institute, Russian Academy of Sciences, Gubkina St., 3, Moscow, 119333, Russia, e-mail: abukovaa@ipng.ru

Абрамова Ольга Петровна – кандидат геолого-минералогических наук, заведующая сектором нефтегазовой гидрогеологии, Институт проблем нефти и газа РАН, ул. Губкина, 3, г. Москва, 119333, Россия, e-mail: abramova_olga@bk.ru

Olga P. Abramova - Candidate of Geology and Mineralogy, Head of the Sector of Oil and Gas Hydrogeology, Oil and Gas Research Institute, Russian Academy of Sciences, Gubkina St., 3, Moscow, 119333, Russia, e-mail: abramova_olga@bk.ru

Анисимов Леонид Алексеевич – доктор геолого-минералогических наук, профессор, ведущий научный сотрудник, лаборатория интерпретации индикаторных исследований, Филиал ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг» «ВолгоградНИПИморнефть», ул. Советская, 10, г. Волгоград, 400131, Россия, e-mail: lanisimov@lukoilymn.ru

Leonid A. Anisimov - Doctor of Geology and Mineralogy, Researcher, Laboratory of Interpretation of Indicator Researches, Branch "VolgogradNIPImorneft" in Volgograd, JSC "LUKOIL-Engineering", Sovetskaya St., 10, Volgograd, 400131, Russia, e-mail: lanisimov@lukoilymn.ru

Сианисян Эдуард Саркисович – доктор геолого-минералогических наук, профессор, кафедра геологии нефти и газа, Институт наук о Земле, Южный федеральный университет, ул. Зорге, 40, г. Ростов-на-Дону, 344090, Россия, e-mail: edward@sfedu.ru

Eduard S. Sianisyan - Doctor of Geology and Mineralogy, Professor, Department of Oil and Gas Geology, Institute of Earth Sciences, Southern Federal University, Zorge St., 40, Rostov-on-Don, 344090, Russia, e-mail: edward@sfedu.ru

Воронцова Ирина Владимировна – кандидат геолого-минералогических наук, заведующая лабораторией интерпретации индикаторных исследований, Филиал ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг» «ВолгоградНИПИморнефть», ул. Советская, 10, г. Волгоград, 400131, Россия

Irina V. Vorontsova - Candidate of Geology and Mineralogy, Head of the Laboratory of Interpretation of Indicator Researches, Branch "VolgogradNIPImorneft" in Volgograd, JSC "LUKOIL-Engineering", Sovetskaya St., 10, Volgograd, 400131, Russia

Исаева Гюльнара Юсуповна – кандидат технических наук, научный сотрудник, Институт проблем нефти и газа РАН, ул. Губкина, 3, г. Москва, 119333, Россия, e-mail: gelia08@yandex.ru

Gujlnara U. Isaeva - Candidate of Technical Sciences, Researcher, Oil and Gas Research Institute, Russian Academy of Sciences, Gubkina St., 3, Moscow, 119333, Russia, e-mail: gelia08@yandex.ru

Развитие поисково-разведочных работ на нефть и газ в акватории Каспия предполагает детальное изучение всех пластовых характеристик разреза, включая и гидрогеологические. В статье на основе анализа полученных данных уточняются гидрохимические условия месторождений Северного и Среднего Каспия, оценивается степень техногенного воздействия нефтедобычи на подземную гидросферу по стадиям нарушения геохимического равновесия в пластовой системе. Для этих целей предложен комплекс гидрохимических показателей, позволяющих дать количественную оценку сдвига геохимического равновесия в системе «вода – порода», в том числе по насыщенности пластовых вод малорастворимыми минеральными солями, проявлению агрессивности конденсационных вод, выпадению солей в процессе смешения вод разного генезиса. На конкретных примерах показана возможность диагностики генетического профиля попутных вод, добываемых совместно с углеводородами, идентификация долевого участия пластовых, конденсационных и технических вод в смесях жидкостей, поступающих в скважины. Определены характерные значения гидрохимических критериев для водонапорных комплексов рассматриваемых месторождений. Установлено, что пластовые воды Хвалынского-Сарматской зоны поднятий и средней части акватории Каспия отличаются от Ракушечно-Широтной зоны более высокой минерализацией и метаморфизацией, повышенным содержанием микроэлементов, но в целом по всем выделенным водонапорным комплексам наблюдается нормальная вертикальная гидрохимическая зональность.

Ключевые слова: химический состав пластовых вод, карбонатное равновесие, гидрохимические показатели, генезис вод.

Oil-and-gas prospecting and exploration operations development in the Caspian aquatory is intend to study in detail all reservoir-type characteristics of cross-section including the hydrogeological characteristics. Based on the analysis of the obtained data in this article the hydrochemical conditions of the North and Central Caspian fields are redetermined, the human impact of oil production to the undersurface hydrosphere are estimated under geochemical unbalance stages in the strata system. For these purposes, the suite of hydrochemical metrics is recommended. These metrics allow quantifying of geochemical equal balance change in the “water-rock” system, as of formation waters saturation of low-solubility mineral salts, as a demonstration of condensate waters aggressivity, as a salting-up in the process of different genesis waters mixture. The possibility of genetic profile diagnostic of the associated waters which produced combined with hydrocarbons and the identification of participating stake of the formation, condensate and technical waters in the liquids mixture entering into the wells are showed on the particular cases. The representative values of the hydrochemical criteria for the water-drive systems of considered fields are determined. It was determined that the formation waters of Hvalinsko-Sarmatskoy uplift zone and formation waters of the middle part of Caspian aquatory are differ than formation waters of Rakushechnaya-Shirotnaya zone by the higher mineralization and metamorphization, high concentration of trace elements. But in general, the normal geochemical vertical zonation is observed for all allocated water-drive complexes.

Keywords: chemical composition of the formation waters, carbonaceous equal balance, hydrochemical metrics, water genesis.

Введение

Разворот геолого-поисковых и разведочных работ на Северном и Среднем Каспии требует полного учета всех составляющих геологического анализа нефтегазоносности недр, в том числе детального изучения гидрогеологических условий месторождений и перспективных площадей. Район Северного Каспия интересен тем, что на близлежащих структурах одновременно ведутся как поисково-разведочные, так и геолого-промысловые работы. Это позволяет по гидрогеологическим данным оценивать не только перспективность локальных поисковых объектов, но и влияние техногенного фактора на гидрогеологические условия месторождений углеводородов (УВ).

В статье детализируются представления о гидрохимических условиях основных водонапорных комплексов (ВК), оцениваются изменения, происходящие в пластовой системе при бурении и эксплуатации добывающих скважин (выщелачивание пород, выпадение малорастворимых солей, смешение вод различного состава и генезиса и др.).

Теоретические основы и методы исследований

В последние десятилетия достаточно активно развиваются гидрогеохимические методы решения различных научно-практических задач в области геологического картирования, экологии, прогноза размещения полезных ископаемых, оценки техногенных воздействий на геологическую среду [1, 2].

Развитие гидрогеохимических методов прогноза нефтегазоносности заложено в трудах В.А. Сулина [3], А.А. Карцева [4], В.М. Матусевича [5], С.Л. Шварцева [6], Ю.П. Гаттенбергера [7], А.М. Никанорова [8] и др. Практика показала высокую информативность таких гидрогеологических критериев, как хлор-бромный, натрий-хлорный, сульфат-хлорный, кальций-натриевый и другие коэффициенты [9–11]. Ведущим направлением в изучении механизмов физико-химического взаимодействия природных и техногенных вод с вмещающей средой в последнее десятилетие стало термодинамическое моделирование в системе «вода – порода» [11–13]. В нефтегазопромысловых и промысловых практиках этот метод эффективно применяется для оценки насыщенности вод малорастворимыми карбонатными и сульфатными солями кальция, бария, стронция и др. Теоретические основы методов заложены в трудах Р.М. Гаррелса и Ч.Л. Крайста [14], Дж. Дривера [15], J.E. Oddo и M.V. Tompson [16], В.Е. Кашавцева [17]. Результаты сводятся к расчету индекса насыщения вод кальцитом, гипсом, целестином и др. для прогноза солеотложений на забое и в стволах нагнетательных, добывающих скважин, нефтепромысловом оборудовании [17–19].

В связи с тем, что процесс выпадения минеральных солей обусловлен влиянием техногенных факторов (изменение термобарических условий, внедрение технических растворов и др.) этот критерий был использован для оценки степени нарушения геохимического равновесия в водах нефтегазовых месторождений Северного и Среднего Каспия.

Расчеты выполнены в соответствии с методикой Дебая – Хюккеля [20–22]. По коэффициенту насыщенности вод карбонатом кальция (Sk) выделены (применительно к месторождениям рассматриваемой территории и с учетом особенностей смещения вод различного генезиса – пластовых, конденсационных, технических) следующие стадии нарушения геохимического равновесия в системе «вода – порода».

I стадия – равновесная: $Sk = (0,0) \div (+0,5)$ или $Sk = (0,0) \div (-0,5)$. Пластовая вода находится в геохимическом равновесии с вмещающими породами, возможны незначительные примеси вод иного генезиса (менее 0,5 %), не оказывающие влияния на исходный состав пластовых вод.

II стадия – начальная: $Sk = (+0,5) \div (+1,0)$ или $Sk = (-0,5) \div (-1,0)$. Пластовые воды образуют смеси с техногенными, конденсационными (солюционными), долевого участия которых в новообразованных смесях варьирует от 0,5 до 30 %.

III стадия – переходная: $Sk = (+1,0) \div (+1,5)$ или $Sk = (-1,0) \div (-1,5)$. В новообразованных смесях вод

доля техногенных, конденсационных (солюционных) вод возрастает от 30 до 70 % с соответствующим снижением доли пластовых вод.

IV стадия – конечная: $Sk = > (+1,5)$ или $Sk < (-1,5)$. Технические жидкости, конденсационные (солюционные) воды замещают пластовые воды на 70 % и более.

Для детализации выделенных стадий, уточнения генезиса и долевого участия пластовых вод и других жидкостей в составе смесей, поступающих в скважину, были привлечены общеизвестные гидрохимические параметры и некоторые другие: коэффициент щелочности – Alk/H , где $Alk = r(\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-})$, $H = r(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})$, а также коэффициенты $r\text{Ca}^{2+}/r\text{Na}^+$ и $r\text{Ca}^{2+}/r\text{Mg}^{2+}$; они показали хорошую информативность присутствия технических растворов щелочного и кислого характера.

Предложенная система ранжирования позволила подробно охарактеризовать гидрохимические условия поисковых и промысловых объектов в пределах Северного и Среднего Каспия (Ракушечно-Широтный вал, Хвалыинско-Сарматская зона поднятий, Средне-Каспийский свод).

Гидрогеологические условия нефтегазоносных объектов акватории Северного и Среднего Каспия

Средне-Каспийский нефтегазоносный бассейн в гидрогеологическом отношении представляет самостоятельную водонапорную систему, по периферии которой расположены зоны создания инфильтрационного напора (со стороны Кавказского и Кубадаг-Большебалханского горных сооружений, раннемезозойских поднятий Южного Мангышлака и позднепалеозойских образований кряжа Карпинского).

Палеоген-верхнемеловой ВК ($P_{1\text{эоцен}}-K_2$) представлен однородными пластами известняков с прослоями мергелей толщиной 500–600 м. Воды верхнемеловых отложений не опробованы, но испытания, проведенные на структуре Широкая, показали наличие хорошо проницаемого резервуара в верхнемеловых отложениях Ракушечно-Широтного вала [23].

В составе ВК выделяют эоценовый водоносный горизонт, представляющий основной интерес с точки зрения нефтегазоносности. Горизонт опробован скв. G-1 на месторождении им. Ю. Корчагина (структура Широкая). Скважина бурилась с использованием бурового раствора на высокоминерализованной щелочной основе, что повлекло нарушение геохимического равновесия в системе «вода – порода»: полученные пробы воды имели разную минерализацию (47,7–65,34 г/дм³) и химический состав (табл. 1, скв. G-1). Анализ распределения ос-

новых гидрохимических параметров позволил выделить две группы вод. В первую вошли воды, отобранные с глубины 765 м, с минерализацией 64,9–65,3 г/дм³. Коэффициент насыщенности карбонатными солями кальция (Sk) имеет высокое значение (+5,08), соответствующее конечной, IV стадии сдвига геохимического равновесия с угрозой выпадения солей. Воды характеризуются высокой щелочной реакцией, отсутствием микроэлементов; все

остальные гидрохимические параметры, в том числе хлоридно-магниевый тип (по В.А. Сулину), свидетельствуют об их техногенном генезисе. Доля технических вод достигает 75 %. Вторая группа вод (глубина отбора 769 м) хлоридно-кальциевого типа (по В.А. Сулину) с минерализацией 47,6–47,7 г/дм³ по сравнению с первой группой характеризуется почти по всем гидрохимическим показателям более высокой степенью метаморфизации.

Таблица 1

Характеристика показателей химического состава вод, полученных при опробовании палеогенового (эоценового) и нижнемелового водоносных комплексов в пределах Ракушечно-Широтного вала / The characteristics of the waters chemical composition indicators which obtained from the Paleogene (Eocene) and Lower Cretaceous water-drive complexes testing within the Rakushechno-Shirotniy bar

Гидрохимические параметры	Месторождение, площадь, № скважины, глубина, м (интервал отбора), геологический возраст						
	им. Ю. Корчагина		Широтная		Ракушечное		
	G-1		2-III		1-P	4-P	6-P
	765 P ₂ (эоцен)	769 P ₂ (эоцен)	в-1588–1610 н-1546–1562 K ₁	г-1501–1536 K ₁	1414–1423 K _{1br}	1215–1264 K ₁	1485–1486 K ₁
Минерализация, г/дм ³	64,9	47,7	76,0	63,8	96,7	73,3	107,0
pH	9,9	8,5	6,6	7,9	6,8	6,8	6,3
Br	3,33	85,9	199,9	0,0	253,0	80,0	279,0
J	0,0	13,9	4,3	0,0	6,9	0,0	9,9
rNa ⁺ /rCl ⁻	0,96	0,83	0,81	1,03	0,82	0,74	0,82
Cl/Br	>1000	338	231	>1000	253	552	242
(rSO ₄ ²⁻ /rCl ⁻)·100	2,07	0,29	1,94	3,95	0,53	1,30	0,57
rCa ²⁺ /rNa ⁺	0,08	0,13	0,21	0,02	0,18	0,32	0,20
rCa ²⁺ /rMg ²⁺	1,94	1,34	3,39	1,19	2,99	5,71	3,44
rAlk/H	0,49	0,04	0,01	0,49	0,01	0,03	0,01
Sk	+5,08	+2,45	-0,46;	+0,60	0,0	+0,70	-0,12
Тип воды	ХМ	ХК	ХК	СН	ХК	ХК	ХК
Доля вод различного генезиса, %	T(75)+П	T(70)+П	П(100)	К(70)+Т	П (100)	П+ К(30)	П(100)

Примечание. П – пластовые воды; Т – технические воды; К – конденсационные воды. Типы вод по В.А. Сулину: СН – сульфатно-натриевый; ХМ – хлоридно-магниевый; ХК – хлоридно-кальциевый. В таблице приведены сведения по результатам химических анализов наиболее характерных проб воды.

Но величина Sk в этих водах, хотя и меньше, чем в вышеописанных смесях, все же имеет повышенное значение, характеризующее не равновесие, а IV, конечную стадию геохимической трансформации системы «вода – порода» с долей технических вод до 70 %. Влияние последних проявляется также повышенной величиной pH и коэффициентом щелочности, превышающим средние значения в пластовых водах рассматриваемого региона. Кальций-натриевый и кальций-магниевый коэффициенты указывают на незначительное содержание ионов кальция, что нехарактерно для седиментогенных вод и связано с воздействием калиевого технического раствора. Но, учитывая повышенное содержание микроэлементов (йода и брома), допустимо отнести эти воды с большой долей условности к пластовым.

Нижнемеловой ВК содержит нижнеальбский, апт-готерив-барремский водоносные горизонты;

сложен терригенными песчано-глинистыми породами. Толщина комплекса изменяется по площади: в пределах Ракушечно-Широтной зоны – 250 м; к востоку (Тюб-Караган) и югу (Хвалынско-Сарматская зона) его толщина увеличивается до 500–600 м. Нефтегазонасность комплекса связана с коллекторами неокома, апта и частично нижнего альба [23–25].

На месторождении им. Ю. Корчагина (Широтная) нижнемеловой ВК охарактеризован по результатам химических анализов вод, полученных при опробовании нефтеносной, газонасной и водоносной зон продуктивного пласта (табл. 1, скв. 2-III). Из водоносной (в-1588–1610 м) и нефтеносной (н-1546,0–1562,5 м) зон получено несколько проб воды идентичного состава с минерализацией 73,7–76,9 г/дм³ хлоридно-кальциевого типа (по В.А. Су-

лину). По степени насыщенности карбонатными солями воды соответствуют I стадии равновесного состояния с вмещающими породами. Коэффициент Sk характеризуется близкими к нулю отрицательными значениями, что, возможно, связано с опресняющим влиянием конденсационных (солюционных) вод вблизи водонефтяного контакта. Признаки вмещаательства техногенного воздействия отсутствуют. По всем гидрохимическим показателям, кроме коэффициента сульфатности (1,92–1,94), эти воды относятся к седиментогенным пластовым водам высокой метаморфизации. Повышенная сульфатность могла возникнуть за счет окисления серосодержащих компонентов в процессе отбора проб на водонефтяном контакте.

При испытании газоносной части пласта (г-1501–1536 м) в скважине получен интенсивный фонтанный приток газа и конденсата с незначительным количеством воды. Отобранные в этом интервале пробы воды, несмотря на разную минерализацию (39,6–63,8 г/дм³), весьма схожи по химическому составу, характеризуются сульфатно-натриевым типом (по В.А. Сулину) и по величине Sk воды соответствуют II стадии сдвига геохимического равновесия, созданного преимущественно конденсационными водами в смесях с техническими (до 30 %). Об этом свидетельствуют повышенный коэффициент щелочности, полное отсутствие йода, брома и все другие рассчитанные гидрохимические показатели. На месторождении Ракушечное нижнемеловой ВК опробован при открытии крупного многопластового месторождения нефти и газа в коллекторах неокома, апта и нижнего альба [23]. Это месторождение так же, как и месторождение им. Ю. Корчагина, входит в блок Ракушечно-Широтной зоны поднятий северной части российского шельфа Каспия; приурочено к складчатому поднятию субширотного простирания площадью 35×40 м, высотой 20 м (по кровле альба), осложненному разрывными нарушениями. Воды нижнемеловой ВК охарактеризованы по результатам опробования водоносных горизонтов в ряде скважин, из которых были получены воды с минерализацией от 73,3 до 107,0 г/дм³ хлоридно-кальциевого типа (по В.А. Сулину). Диагностика генетического статуса пластовых вод определялась в соответствии с выделенными количественными гидрохимическими критериями (табл. 1, скв. 1-Р, 4-Р, 6-Р). Так, из скв. 4-Р (1215–1264 м) получена вода с минерализацией 73,3 г/дм³. Коэффициент насыщенности вод карбонатом кальция указывает на II степень сдвига геохимического равновесия, что связано с влиянием технических вод. Это подтверждается и другими показателями: хлор-бромный коэффициент намного превышает 300, повышены сульфатность и щелочность вод, понижено содержание

микроэлементов. Вода представляет собой смесь пластовых вод с конденсационными, рассчитанная доля которых составляет около 30 %. Совершенно иначе гидрохимические показатели характеризуют воды из скв. 6-Р в интервале опробования 1485–1486, с минерализацией от 92,0 до 107,0 г/дм³. Величина Sk свидетельствует о равновесном состоянии с окружающими породами, седиментогенный характер вод подтверждается повышенным содержанием микроэлементов, пониженной щелочностью и всеми соответствующими критериями, характерными для высокой степени метаморфизации, что позволяет отнести эти воды к пластовым. Надо отметить, что в большинстве проб, отобранных из нижнемеловой ВК, минерализация вод составляла 95–100 г/дм³, например, при опробовании баремского горизонта в скв. 1-Р (1414–1423 м) тоже была получена пластовая вода с минерализацией 96,7 г/дм³ и аналогичным химическим составом. В некоторых пробах более высокая минерализация (107,5 г/дм³) дает основание предположить поступление пластовых вод из нижележащего верхнеюрского ВК, так как глинистые алевролиты готеривских отложений с резким несогласием залегают на карбонатных высокопроницаемых коллекторах верхней юры, воды которых могут служить источником восполнения пластовой энергии нефтяных залежей неокома.

В пределах Хвалынского-Сарматской зоны поднятий разрез отложений нижнемеловой ВК представлен терригенными песчано-глинистыми породами. На месторождении Хвалынское при испытании альбских коллекторов получен приток воды с большой долей технических жидкостей, отмечалось повышение плотности вод от 1,107 в альбском горизонте до 1,132 г/см³ в водах нижезалегающего неокомского комплекса.

В средней части акватории Каспия воды нижнемеловых отложений опробованы на структурах Центральная и Ялама-Самур. Эти структуры приурочены к зоне южного замыкания Терско-Каспийского краевого прогиба. Нефтегазоносность на площади Центральная связана с нижнемеловыми и верхнеюрскими отложениями; на структуре Ялама-Самур – пока не выявлена. Воды нижнемеловых отложений, полученные из скв. 1-Ц и 1-Я, имеют заметные отличия (табл. 2, скв. 1-Ц, 1-Я).

На месторождении Центральная (скв. 1-Ц, 1985 м) из аптских отложений получена проба воды, характеризующаяся высоким значением Sk , что указывает на IV, конечную стадию сдвига геохимического равновесия, обусловленную внедрением технических вод, доля которых здесь составляет 75 %. О преимущественно техногенной природе отобранной жидкости говорят нетипичные для пластовых

нижнемеловых вод повышенные значения хлор-бромного коэффициента и сульфатности, а также почти 10-кратное снижение (по сравнению с пластовыми водами) коэффициента rCa^{2+}/rNa^{+} .

Вода из скв. 1 Ялама-Самур (1822–1950, K_{1a}) характеризуется показателями равновесного состояния с вмещающими породами: коэффициент Sk имеет близкое к нулю отрицательное значение, а значит, отсутствие влияния техногенных факторов. Высокое содержание микроэлементов, низкая сульфатность и щелочность, натрий-хлорный и хлор-бромный коэффициенты – все показатели соответствуют высокой метаморфизации и дают основание отнести эту воду к седиментогенной пластовой.

Верхнеюрский ВК опробован в скважинах, вскрывших волжский, кимериджский и оксфордский ярусы; представлен терригенно-карбонатными породами, доломитизированными известняками толщиной от 120 м в пределах Ракушечно-Широтного вала до 500 м на Хвалынско-Сарматском поднятии. На территории Ракушечно-Широтной зоны верхнеюрский ВК (волжский регионарус) опробован на месторождении им. Ю. Корчагина и Ракушечное (табл. 2, скв. ВП-2, 1-Р).

Воды имеют минерализацию от 87,0 до 99,0 г/дм³, хлоридно-кальциевый тип (по В.А. Сулину), но по гидрохимическим параметрам отличаются. Так, в водах из скв. ВП-2 с глубины 1575 м индекс насыщен-

ности карбонатом кальция (Sk) имеет высокое положительное значение, соответствует IV стадии сдвига геохимического равновесия, свидетельствует о замещении пластовых вод техническими растворами более чем на 70 % и повышении риска выпадения солей. Техногенный характер этой смеси вод подтверждается хлор-бромным коэффициентом, превышающим 300, и повышенной щелочностью.

В скв. 1-Р из интервала 1470–1471 (J_{3v}) получены воды с минерализацией 98,4–99,0 г/дм³. Почти все рассчитанные гидрохимические параметры позволяют отнести эти воды к пластовым: величина Sk указывает на геохимическое равновесие в системе, генетические коэффициенты свидетельствуют о высокой степени метаморфизации, присущей седиментогенным водам.

В пределах Средне-Каспийского свода верхнеюрский ВК опробован на месторождении Центральная (табл. 2, скв. 1-Ц). Воды характеризуются более высокой минерализацией и метаморфизацией по сравнению с пластовыми водами Ракушечно-Широтной зоны поднятий. Все гидрохимические показатели свидетельствуют о седиментогенном характере вод, хотя определенная доля технических жидкостей здесь имеется (до 10 %), так как Sk несколько превышает значение геохимического равновесия и подтверждается повышением щелочности и снижением кальций-натриевого коэффициента.

Таблица 2

Характеристика показателей химического состава вод, полученных при опробовании нижнемелового, верхнеюрского водоносных комплексов в пределах Средне-Каспийского свода и верхнеюрского водоносного комплекса Ракушечно-Широтного вала / The characteristics of the waters chemical composition indicators which obtained from the Lower Cretaceous Upper Jurassic water-drive complexes testing within the Middle Caspian arch and the Upper Jurassic water-drive complex of the Rakushechno-Shirotniy bar

Гидрохимические параметры	Средне-Каспийский свод			Ракушечно-Широтный вал	
	Месторождение, площадь, № скважины, глубина, м (интервал отбора), геологический возраст				
	Центральная		Ялама-Самур	Широтная	Ракушечное
	1-Ц		1-Я	ВП-2	1-Р
	1985 K _{1a}	2162–2171 J ₃	1822–1950 K _{1a}	1575 J _{3v}	1470–1471 J _{3v}
Минерализация, г/дм ³	131,5	101,1	125,9	87,0	99,0
pH	6,60	6,94	6,76	7,86	6,60
Br	163,9	253,4	370,0	157,3	255,0
J	15,9	6,30	2,5	2,54	7,0
rNa^{+}/rCl^{-}	0,87	0,87	0,81	0,83	0,81
Cl/Br	486	241	209	329	236
$(rSO_4^{2-}/rCl^{-}) \cdot 100$	0,92	0,51	0,04	1,73	0,60
rCa^{2+}/rNa^{+}	0,09	0,09	0,19	0,17	0,18
rCa^{2+}/rMg^{2+}	1,29	1,33	0,30	3,06	3,13
$rAlk/H$	0,01	0,06	0,00	0,03	0,01
Sk	+1,55	+0,55	-0,12	+1,52	+0,07
Тип воды	ХК	ХК	ХК	ХК	ХК
Доля вод различного генезиса, %	T(75)+П	П+T(10)	П	T(73)+П	П(100)

Примечание. См. табл. 1.

В пределах Хвалынского-Сарматской зоны поднятий нефтегазоносность верхнеюрских отложений связана с кимериджским и оксфордским ярусами общей толщиной около 500 м; они сложены кавернозно-пористыми битуминозными доломитами с прослоями, включениями ангидрита и низзалегаящими известково-мергелистыми осадками. Эвапоритовые отложения приурочены к титонскому ярусу в виде локальных покрышек залежей. Присутствие

сульфатных пород создает своеобразные геохимические условия, способствующие при высоких пластовых температурах образованию сероводорода. Его появление от 0,8 до 2,0 % об. отмечено в составе газа. На месторождении Хвалынского воды верхнеюрских (кимеридж-титонских) отложений опробованы рядом скважин, из которых в скв. 4-Хв получены воды хлоридно-кальциевого типа (по В.А. Сулину) с минерализацией 146,4–148,2 г/дм³ (табл. 3, скв. 4-Хв).

Таблица 3

Характеристика показателей химического состава вод, полученных при опробовании верхне- и среднеюрского водонапорных комплексов в пределах Хвалынского-Сарматской зоны поднятий / The characteristics of the waters chemical composition indicators which obtained from Upper and Middle Jurassic water-drive complexes testing within the Hvalynsko-Sarmatskaya uplift zone

Гидрохимические параметры	Месторождение, площадь, № скважины, глубина, м (интервал отбора), геологический возраст				
	Хвалынское			Сарматское	
	4-Хв	4-Хв	1-Хв	2-С	1-С
	3035–3053 J ₃ tt 3109–3128 J ₃ tt+km	3706–3715 J ₂ bt+b	3644–3683 J ₂ bt+b	3205–3217 J ₃	3673 J ₂
Минерализация, г/дм ³	146,4–148,2	175,2	202,2	99,7	194,7
pH	6,10–6,20	6,20	5,60	6,5	5,3
Br	439–474,0	574,0	742,0	119,9	608,0
J	5,9–6,0	5,0	9,1	0,00	5,0
rNa ⁺ /rCl ⁻	0,74–0,84	0,73	0,75	0,88	0,71
Cl/Br	192–203	186	167	479	197
(rSO ₄ ²⁻ /rCl ⁻)·100	0,42–0,70	0,13	0,02	3,64	0,02
rCa ²⁺ /rNa ⁺	0,17–0,26	0,34	0,29	0,17	0,37
rCa ²⁺ /rMg ²⁺	4,37–5,67	7,40	7,75	3,64	7,61
rAlk/H	0,01	0,02	0,00	0,076	0,002
Sk	-0,03; -0,04	+1,07	-0,35	+0,776	-0,720
Тип воды	ХК	ХК	ХК	ХК	ХК
Доля вод различного генезиса, %	П(100)	П+Т(25)	П(100)	П+Т(32)	П+К(10)

Примечание. См. табл. 1.

Расчетные значения Sk имеют отрицательные величины, приближенные к нулю, что показывает равновесное состояние с вмещающими породами, не затронутое техногенным воздействием.

Воды обогащены микроэлементами, все гидрохимические коэффициенты соответствуют представлению о высокой степени их метаморфизации и несомненно являются пластовыми. На Сарматской площади воды верхнеюрских отложений опробованы в интервалах 3171–3192 м и 3205–3217 м. В первом интервале получены маломинерализованные жидкости (20,2 г/дм³), которые несли явные следы воздействия технического раствора кислого характера и здесь не рассматриваются. Во втором интервале (табл. 3, скв. 2-С) получены воды с минерализацией 99,7 г/дм³. Индекс насыщенности карбонатом кальция (Sk) составляет +0,776, т.е. вода находится

во II начальной стадии сдвига геохимического равновесия, что подтверждается высоким хлор-бромным коэффициентом, повышенной сульфатностью и другими показателями инфильтрационного влияния. По выполненным расчетам в этой воде доля технического раствора составляет 28–32 %.

Среднеюрский ВК представлен терригенными преимущественно глинистыми отложениями батского и байосского ярусов. Наименьшая толщина отмечается в Ракушечно-Широтной зоне – 80 м. К югу, в Хвалынского-Сарматской зоне, толщина комплекса увеличивается до 500–600 м. Породы неогласно перекрывают отложения триаса.

В пределах Ракушечно-Широтного вала среднеюрский ВК опробован на месторождении им. Ю. Корчагина скв. 2-Широтная, где в интервале 1861–1871 м выявлена газоконденсатная залежь высокой промышленной продуктивности. С притоком

газа и конденсата поступило незначительное количество жидкости, представляющей собой смесь конденсационной воды с фильтратом бурового раствора (минерализация 11,3 г/дм³, полное отсутствие микроэлементов). На месторождении Ракушечное среднеюрский водонапорный комплекс охарактеризован только по результатам гидродинамического каротажа в скв. 4-Р (1485–1503 м, J_{2k}) и 2-Р (1581–1704 м, J_{2b}), где была установлена минерализация вод 145–150 г/дм³. На Хвалынско-Сарматском поднятии в пластовых водах среднеюрского водонапорного горизонта заметно увеличивается минерализация, а значения всех гидрохимических параметров указывают на возрастание процессов метаморфизма (табл. 3, скв. 1-Хв, 1-С). Величина минерализации составляет 194,7–202,2 г/дм³, воды содержат высокие концентрации микроэлементов; все гидрохимические коэффициенты указывают на их седиментогенный генезис, не затронутый процессами растворения и солеобразования.

Некоторое исключение представляет вода, полученная из скв. 4-Хв, которая несет отпечаток разбавления менее минерализованными водами: снизилась минерализация, повысилась сульфатность и щелочность, коэффициент насыщенности вод карбонатом кальция (Sk) имеет положительное значение, превышающее равновесное состояние в пластовой системе, но, учитывая сохранение высокого содержания микроэлементов, эту воду условно можно отнести к пластовой (доля технического раствора не более 25 %).

Подводя итог выполненным исследованиям, можно отметить, что гидрохимические условия в пределах Ракушечно-Широтного вала по сравнению с Хвалынско-Сарматской зоной поднятий и Средне-Каспийскими валом заметно отличаются (табл. 4). С севера в южном направлении происходит повышение минерализации и метаморфизации пластовых вод.

Таблица 4

Сравнительная характеристика основных гидрохимических показателей водонапорных комплексов в пределах Ракушечно-Широтного вала, Хвалынско-Сарматской зоны поднятий и Средне-Каспийского свода / The comparative characteristics of the main hydrochemical indicators of the water-drive complexes within the Rakushechno-Shirotniy bar, the Hvalynsko-Sarmatskaya uplift zone and the Middle Caspian arch

Водонапорные комплексы	Ракушечно-Широтный вал				
	М, г/дм ³	Br, мг/дм ³	Cl/Br	rNa ⁺ /rCl	r(SO ₄ ²⁻ /Cl)·100
Палеогеновый (P ₂ -эоцен)	45,0–50,0	80,0–90,0	334–338	0,81–0,83	0,9–2,0
Нижнемеловой (K ₁)	75,0–80,0	199,0–280,0	227–231	0,80–0,81	1,92–1,94
Верхнеюрский (J _{3v})	85,0–90,0	215–230,0	233–239	0,81–0,83	1,73–1,78
Среднеюрский (J ₂)	145,0–150,0	н.д.	н.д.	н.д.	н.д.
	Хвалынско-Сарматская зона поднятий и Средне-Каспийский свод				
Нижнемеловой (K ₁)	125,9	370,0	209	0,81	0,041
Верхнеюрский (J _{3v})	146,4–148,2	439,0–474,0	192–203	0,84–0,87	0,42–0,70
Среднеюрский (J ₂)	195,0–202,2	608,0–742,0	186–197	0,71–0,73	0,00–0,02

Примечание. Н.д. – нет данных.

Так, в водонапорных комплексах Ракушечно-Широтного вала минерализация изменяется от 45,0–50,0 г/дм³ в палеогене и 75,0–80,0 г/дм³ в нижнемеловых отложениях до 145–150 г/дм³ в среднеюрских водах. На площадях Хвалынско-Сарматской зоны поднятий и Средне-Каспийского вала минерализация вод возрастает от 126,0 г/дм³ в нижнем мелу до 200,0 и более г/дм³ в среднеюрских отложениях. Изменяются и все основные гидрохимические показатели, что видно из табл. 4.

Рассмотренные гидрохимические критерии позволяют охарактеризовать выделенные ВК в региональном плане.

Для детализации воздействия техногенных растворов на изменение химического состава пластовых вод, идентификации жидкостей разного генезиса, поступающих в скважины, дополнительно определены параметры следующих гидрохимических показателей: коэффициент $\frac{rCa^{2+}}{rNa^+} = 0,18–0,30$;

$$\frac{rCa^{2+}}{rMg^{2+}} = 3,30–7,50; \text{ Alk/H} = 0,010–0,00;$$

коэффициент $Sk = (+0,5) \div (-0,5)$, при этом левые крайние значения характерны для пластовых вод Ракушечно-Широтной зоны, крайние правые значения – для Хвалынско-Сарматской и Средне-Каспийской зон.

В смесях с конденсационными и техническими водами количественные значения этих показателей варьируют в зависимости от состава жидкостей и термобарических условий, поэтому при интерпретации гидрохимического материала требуется учет этих сведений.

Заключение

1. Обоснованы количественные значения стадий нарушения геохимического равновесия в пластовой системе с оценкой долевого участия пластовых, технических и конденсационных вод в составе новообразованных смесей, поступающих в скважины при проведении геолого-промысловых работ.

2. Определены количественные значения гидрохимических параметров для общей идентификации генетического статуса пластовых вод в выделенных ВК Ракушечно-Широтной, Хвалынско-Сарматской и средней части акватории Каспия (минерализация, содержание микроэлементов, натрий-хлорный, хлор-бромный, сульфат-хлорный коэффициенты), а также для конкретизации характера воздействия техногенных растворов на изменение исходного состава пластовых вод (индекс насыщенности вод карбонатом кальция, щелочной, кальций-натриевый и кальций-магниевый коэффициенты).

3. В разрезе выделенных ВК в пределах Ракушечно-Широтной, Хвалынско-Сарматской и средней части акватории Каспия наблюдается закономерное увеличение с глубиной минерализации и метаморфизации пластовых вод, т.е. нормальная вертикальная гидрохимическая зональность.

4. Показано, что замещение пластовых вод конденсационными и техническими приводит к усилению геохимической агрессии на породы, может вызывать нежелательные последствия в виде кольматации порового пространства продуктами вторичного минералообразования (выщелачивания), а также повысить флюидодинамическую неоднородность продуктивных комплексов, как следствие, риск обводнения продуктивных горизонтов.

Литература

1. *Абрамова О.П., Абукова Л.А., Попов С.Н.* Проблемы повышения достоверности компьютерных моделей природного и техногенного солеотложения в геологической среде // Современные проблемы науки и образования. 2011. № 4. С. 68.

2. *Закруткин В.Е., Гибков Е.В., Сляренко Г.Ю., Решетняк О.С.* Сравнительная оценка качества поверхностных и подземных вод Восточного Донбасса по гидрохимическим показателям // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2016. № 2. С. 91–99.

3. *Сулин В.А.* Гидрогеология нефтяных месторождений. Л. : Гостоптехиздат, 1948. 480 с.

4. *Карцев А.А.* Гидрогеология нефтяных и газовых месторождений. М. : Недра, 1972. 280 с.

5. *Матусевич В.М.* Геохимия подземных вод Западно-Сибирского нефтегазоносного бассейна. М. : Недра, 1976. 149 с.

6. *Шварцев С.Л.* Общая гидрогеология. М. : Недра, 1996. 423 с.

7. *Гаттенбергер Ю.П.* Гидрогеология и гидродинамика подземных вод. М. : Недра, 1971. 184 с.

8. *Никаноров А.М.* Гидрохимия. СПб.: Гидрометеоздат, 2001. 444 с.

9. *White D.E.* Saline waters of sedimentary rocks // Fluids in Subsurface Environments / eds. A. Young and J. Galley. Tulsa, Oklahoma : American Association of Petroleum Geologists, 1965. 414 p.

10. *Абукова Л.А., Абрамова О.П., Исаева Г.Ю.* Факторы контроля качества прогноза солеотложения в нефтепромысловой практике // Георесурсы, геоэнергетика, геополитика. 2012. № 1 (5). С. 9. URL: <http://oilgasjournal.ru> (дата обращения: 20.07.2017).

11. *Абукова Л.А., Абрамова О.П., Кошелев А.В., Ставицкий В.А., Лу Г.С., Катаева М.А.* Исходный состав пластовых вод как основа гидрохимического контроля за разработкой ачимовских отложений Уренгойского НГКМ // Приоритетные направления развития Уренгойского комплекса. М. : Недра, 2013. С. 171–180.

12. *Collins A.G.* Geochemistry of oilfield waters. Amsterdam; Oxford; New York : Elsevier Scientific Publishing Company, 1975. 496 p.

13. *Абукова Л.А., Иванова А.В., Исаева Г.Ю.* Технология автоматизированного выбора метода изучения минерального солеотложения в пластовых и скважинных условиях // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. 2002. № 5. С. 90–94.

14. *Гаррелс Р.М., Крайст Ч.Л.* Растворы, минералы, равновесия. М. : МИР, 1968. 368 с.

15. *Драйвер Дж.* Геохимия природных вод. М. : МИР, 1985. 440 с.

16. *Oddo J.E., Tomson M.B.* Method predicts well bore scale, corrosion // Oil & Gas Journal. 1998. Vol. 96, № 23. P. 107–113.

17. *Кацавцев В.Е., Мищенко И.Т.* Солеобразование при добыче нефти. М. : Орбита, 2004. 432 с.

18. *Birklea P., Jendenb P.D., Al-Dubaisib J.M.* Origin of formation water from the Unayzah and Khuff petroleum reservoirs, Saudi Arabia // Procedia Earth and Planetary Science. 2013. № 7. P. 77–80.

19. *Zhang Ye, Gable C.W., Zvoloski G.A., Walter L.M.* Hydrogeochemistry and gas compositions of the Uinta Basin: A regional-scale overview // AAPG Bulletin. 2009. Vol. 93, № 8. P. 1087–1118.

20. *Робинсон Р., Стокс Р.* Растворы электролитов. М. : ИЛ, 1963. 647 с.

21. Делия С.В., Абукова Л.А., Абрамова О.П., Анисимов Л.А., Попов С.Н., Воронцова И.В. Экспериментальное и численное моделирование взаимодействия пластовых и технических вод при разработке месторождения им. Ю. Корчагина // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. 2012. № 10. С. 34–41.

22. Делия С.В., Абукова Л.А., Абрамова О.П., Попов С.Н., Воронцова И.В., Анисимов Л.А. Особенности взаимодействия коллекторов, пластовых и технических вод при разработке нефтегазоконденсатного месторождения им. Ю. Корчагина // Нефтяное хозяйство. 2013. № 3. С. 18–22.

23. Анисимов Л.А., Самойленко А.Ю., Шарашикина М.В., Шумаева Л.В., Абукова Л.А., Абрамова О.П. Совместимость морской и пластовой воды при поддержании пластового давления на месторождении Северного Каспия // Прогноз и разработки нефтегазоносных структур нижнего Поволжья и Северного Каспия. Волгоград, 2012. Вып. 71. С. 229–234.

24. Куранов Ю.В., Шарафутдинов В.Ф., Калабин В.В., Сианисян Э.С., Шлыгин Д.А. Особенности формирования залежей углеводородов и перспективы нефтегазоносности мезозойского комплекса вала Карпинского и Восточно-Маньчжского прогиба в Республике Калмыкия // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2017. № 2. С. 128–135.

25. Манцурова В.Н., Кривonos В.Н., Смирнов В.Е., Здобнова Е.Н., Кудинова В.Е., Бубликова Л.В. Стратиграфия мезозоя и кайнозоя Широкой площади Северного Каспия (месторождение им. Ю. Корчагина) // Перспективы нефтеносности Нижнего Поволжья и Азово-Каспийского региона. Волгоград : Лукойл-НИПИморнефть, 2005. Вып. 64. С. 119–142.

References

1. Abramova O.P., Abukova L.A., Popov S.N. Problemy povysheniya dostovernosti komp'yuternykh modelei prirodnogo i tekhnogenogo soleotlozheniya v geologicheskoi srede [Problems of increasing the reliability of computer models of natural and technogenic salt deposition in the geological environment]. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya*. 2011, No. 4, p. 68.

2. Zakrutkin V.E., Gibkov E.V., Sklyarenko G.Yu., Reshetnyak O.S. Sravnitel'naya otsenka kachestva poverkhnostnykh i podzemnykh vod Vostochnogo Donbassa po gidrokhimicheskim pokazatelyam [Comparative assessment of the quality of surface and groundwater in the Eastern Donbass in hydrochemical indicators]. *Izv. vuzov. Sev.-Kavk. region. Estestv. nauki*. 2016, No. 2, pp. 91-99.

3. Sulin V.A. *Gidrogeologiya neftyanykh mestorozhdenii* [Hydrogeology of oil fields]. Leningrad: Gostoptekhizdat, 1948, 480 p.

4. Kartsev A.A. *Gidrogeologiya neftyanykh i gazovykh mestorozhdenii* [Hydrogeology of oil and gas fields]. Moscow: Nedra, 1972, 280 p.

5. Matusевич V.M. *Geokhimiya podzemnykh vod Zapadno-Sibirskogo neftegazonosnogo basseina* [Geochemistry of groundwater in the West Siberian oil and gas basin]. Moscow: Nedra, 1976, 149 p.

6. Shvartsev S.L. *Obshchaya gidrogeologiya* [General hydrogeology]. Moscow: Nedra, 1996, 423 p.

7. Gattenberger Yu.P. *Gidrogeologiya i gidrodinamika podzemnykh vod* [Hydrogeology and hydrodynamics of groundwater]. Moscow: Nedra, 1971, 184 p.

8. Nikanorov A.M. *Gidrokhimiya* [Hydrochemistry]. Saint Petersburg: Gidrometeoizdat, 2001, 444 p.

9. White D.E. Saline waters of sedimentary rocks. *Fluids in Subsurface Environments*. Eds. A. Young and J. Galley. Tulsa, Oklahoma : American Association of Petroleum Geologists, 1965, 414 p.

10. Abukova L.A., Abramova O.P., Isaeva G.Yu. Faktory kontrolya kachestva prognoza soleotlozheniya v neftepromyslovoi praktike [Factors controlling the quality of the scaling forecast in oilfield practice]. *Georesursy, geoenergetika, geopolitika*. 2012, No. 1 (5), p. 9. Available at: <http://oilgasjournal.ru> (accessed 20.07.2017).

11. Abukova L.A., Abramova O.P., Koshelev A.V., Stavitskii V.A., Li G.S., Kataeva M.A. [Initial composition of formation water as a basis for hydrochemical control over the development of Achimov deposits of Urengoy oil and gas condensate field]. *Prioritetnye napravleniya razvitiya Urengoisnogo kompleksa* [Priority directions of Urengoy complex development]. Moscow: Nedra, 2013, pp. 171-180.

12. Collins A.G. *Geochemistry of oilfield waters*. Amsterdam; Oxford; New York : Elsevier Scientific Publishing Company, 1975, 496 p.

13. Abukova L.A., Ivanova A.V., Isaeva G.Yu. Tekhnologiya avtomatizirovannogo vybora metoda izucheniya mineral'nogo soleotlozheniya v plastovykh i skvazhinnykh usloviyakh [The technology of automated choice of the method of studying mineral scaling in reservoir and borehole conditions]. *Geologiya, geofizika i razrabotka neftyanykh i gazovykh mestorozhdenii*. 2002, No. 5, pp. 90-94.

14. Garrels R.M., Kraist Ch.L. *Rastvory, mineraly, ravnovesiya* [Solutions, minerals, equilibria]. Moscow: Mir, 1968, 368 p.

15. Driver Dzh. *Geokhimiya prirodnnykh vod* [Geochemistry of natural waters]. Moscow: Mir, 1985, 440 p.

16. Oddo J.E., Tomson M.B. Method predicts well bore scale, corrosion. *Oil & Gas Journal*. 1998, vol. 96, No. 23, pp. 107-113.

17. Kashchavtsev V.E., Mishchenko I.T. *Soleobrazovanie pri dobyche nefi* [Salt formation during oil production]. Moscow: Orbita, 2004, 432 p.

18. Birklea P., Jendenb P.D., Al-Dubaisib J.M. Origin of formation water from the Unayzah and Khuff petroleum reservoirs, Saudi Arabia. *Procedia Earth and Planetary Science*. 2013, No. 7, pp. 77-80.

19. Zhang Ye, Gable C.W., Zvoloski G.A., Walter L.M. Hydrogeochemistry and gas compositions of the

Uinta Basin: A regional-scale overview. *AAPG Bulletin*. 2009, vol. 93, No. 8, pp. 1087-1118.

20. Robinson R., Stokc R. *Rastvory elektrolitov* [Solutions of electrolytes]. Moscow: IL, 1963, 647 p.

21. Deliya S.V., Abukova L.A., Abramova O.P., Anisimov L.A., Popov S.N., Vorontsova I.V. Eksperimental'noe i chislennoe modelirovanie vzaimodeistviya plastovykh i tekhnicheskikh vod pri razrabotke mestorozhdeniya im. Yu. Korchagina [Experimental and numerical simulation of the interaction of reservoir and technical waters in the development of the Korchagin deposit]. *Geologiya, geofizika i razrabotka neftyanykh i gazovykh mestorozhdenii*. 2012, No. 10, pp. 34-41.

22. Deliya S.V., Abukova L.A., Abramova O.P., Popov S.N., Vorontsova I.V., Anisimov L.A. Osobennosti vzaimodeistviya kollektorov, plastovykh i tekhnicheskikh vod pri razrabotke neftegazokondensatnogo mestorozhdeniya im. Yu. Korchagina [Features of the interaction of reservoirs, reservoir and technical waters in the development of the Korchagin oil and gas condensate field]. *Neftyanoe khozyaistvo*. 2013, No. 3, pp. 18-22.

23. Anisimov L.A., Samoilenko A.Yu., Sharashkina M.V., Shumaeva L.V., Abukova L.A., Abramova O.P.

[Compatibility of sea and formation water while maintaining reservoir pressure in the North Caspian field]. *Prognoz i razrabotka neftegazonosnykh struktur nizhnego Povolzh'ya i Severnogo Kaspiya* [Forecast and development of oil and gas bearing structures in the lower Volga and the Northern Caspian]. Volgograd, 2012, iss. 71, pp. 229-234.

24. Kuranov Yu.V., Sharafutdinov V.F., Kalabin V.V., Sianisyan E.S., Shlygin D.A. Osobennosti formirovaniya zalezhei uglevodorodov i perspektivy neftegazonosnosti mezozoiskogo kompleksa vala Karpinskogo i Vostochno-Manychskogo progiba v Respublike Kalmykiya [Features of formation of hydrocarbon deposits and the prospects of oil and gas content of the Mesozoic complex of the Karpinsky and East-Manych trough in the Republic of Kalmykia]. *Izv. vuzov. Sev.-Kavk. region. Estestv. nauki*. 2017, No. 2, pp. 128-135.

25. Mantsurova V.N., Krivonos V.N., Smirnov V.E., Zdobnova E.N., Kudinova V.E., Bublikova L.V. [Stratigraphy of the Mesozoic and Cenozoic of the Latitudinal Area of the Northern Caspian (the Korchagin deposit)]. *Perspektivy neftenosnosti Nizhnego Povolzh'ya i Azovo-Kaspiiskogo regiona* [Prospects of the oil bearing in the Lower Volga and the Azov-Caspian region]. Volgograd: LukoilNIPImorneft', 2005, iss. 64, pp. 119-142.

УДК 631.432

DOI 10.23683/0321-3005-2017-4-1-104-109

СОЛЕВОЙ РЕЖИМ ОРОШАЕМЫХ ЗЕМЕЛЬ НА ФОНЕ СИФОННО-ВАКУУМНОГО ДРЕНАЖА В УСЛОВИЯХ МАЛОУКЛОННОЙ МЕСТНОСТИ

© 2017 г. М.Ф. Гурбанов¹

¹Азербайджанское научно-производственное объединение гидротехники и мелиорации, Баку, Азербайджан

SALINE REGIME OF IRRIGATED LANDS WITH APPLICATION OF THE SIPHON-VACUUM DRAINAGE UNDER THE CONDITION OF THE LOW-GRADE TERRAIN

M.F. Gurbanov¹

¹Azerbaijan Scientific-Production Association of Hydrotechnics and Melioration, Baku, Azerbaijan

Гурбанов Мирза Фирудин-оглы – кандидат сельскохозяйственных наук, ведущий научный сотрудник, лаборатория мелиорации, Азербайджанское научно-производственное объединение гидротехники и мелиорации, ул. И. Дадашова, 324, г. Баку, 1130, Азербайджан, e-mail: qurbanov1958@list.ru

Mirza F. Gurbanov - Candidate of Agricultural Sciences, Leading Researcher, Laboratory of Melioration, Azerbaijan Scientific-Production Association of Hydrotechnics and Melioration, I. Dadasov St., 324, Baku, 1130, Azerbaijan, e-mail: qurbanov1958@list.ru

Цель исследований – изучение солевого режима орошаемых земель на фоне сифонно-вакуумного дренажа в производственных условиях. В ходе проведенных исследований на опытном участке изучена динамика засоления почвогрунтов. Оценены изменение минерализации дренажных и грунтовых вод и урожайность культур в процессе сельскохозяйственного освоения земель. Полученные данные подтверждают, что наряду с рациональным агротехническим и многополивным режимом орошения значительная роль в развитии рассоления почвогрунтов и опреснения грунтовых вод принадлежит дренажу сифонно-вакуумного действия. Поэтому в малоуклонной местности Кура-Араксинской низменности при строительстве новых гидромелиоративных систем и реконструкции существующих рекомендуется применять системы дренажа сифонно-вакуумного действия.

Ключевые слова: дренаж, сифон, уровень грунтовых вод, засоление, минерализация дренажных вод, урожайность сельскохозяйственных культур, грунтовые воды.

The purpose of this research is to check the saline regime of the irrigated lands under exploration conditions with application of the siphon-vacuum drainage. The dynamics of soil salinization, changes in the salinity of drainage water and groundwater and the yield of agricultural crops in the process of agricultural land development are studied. The obtained data confirms that along with a rational agrotechnical and multi-watering irrigation regime, a significant role in soil and groundwater desalination plays siphon-vacuum action drainage. Therefore, it is recommended to apply siphon-vacuum drainage system for the low-grade terrain of the Kura-Araks Lowland, including for constructing new irrigation and drainage systems and reconstructing existing systems.

Keywords: drainage, siphon, groundwater level, salinization, drainage water salinity, crop yields, groundwater.

Интенсификация сельского хозяйства в аридной зоне республики требует решения ряда вопросов, важнейшими из которых являются разработка, проектирование и строительство дренажных систем, позволяющих активно и целенаправленно регулировать водно-солевой и питательный режим орошаемых земель, находящихся в неблагоприятных гидрогеологических и геоморфологических условиях.

Многолетний опыт эксплуатации дренажа на орошаемых землях как в Республике Азербайджан, так и за рубежом показал, что недоучет при проектировании и строительстве специфических особен-

ностей массивов, подлежащих мелиорации, приводит к нежелательным последствиям. Дренаж в этих случаях не отвечает требованиям основного регулирующего элемента мелиоративной системы. В результате его использования возникают недопустимый подъем минерализованных грунтовых вод, рост засоления, резкое снижение урожайности сельскохозяйственных культур, а хозяйства терпят большие убытки [1–3].

В соответствии с районированием по уклонам местности орошаемые площади Кура-Араксинской

низменности находятся в неблагоприятных геоморфологических условиях (уклоны поверхности менее 0,001) [4, 5].

Эти земли являются основными поставщиками сельскохозяйственной продукции Азербайджана. Для большинства районов характерны неблагоприятные гидрогеолого-мелиоративные условия (слабая дренированность, близкое залегание от дневной поверхности сильноминерализованных грунтовых вод, аридность климата, засоление почв и т.п.), что осложняет и делает дороже проведение мелиоративных мероприятий на фоне традиционных систем горизонтального дренажа [6, 7].

Одним из возможных подходов к совершенствованию дренажа на засоленных орошаемых землях, приуроченных к малоуклонной местности, является применение дренажа сифонно-вакуумного действия, обладающего рядом преимуществ [8].

В такой системе первичные закрытые дрены имеют пьезометрический уклон, т.е. работают в условиях напорного питания. При такой системе дренажа отпадает надобность в строительстве глубоких открытых собирателей и коллекторов, отвод осуществляют лотки, уложенные на поверхности земли. Принцип работы системы заключается в следующем. По мере подъема уровня грунтовых вод в результате поливов или промывок система постепенно заполняется водой, вытесняя воздух из полости дренажных труб и сифонов к коленам, где установлено воздуховыпускающее устройство. После выхода воздуха из системы в действие включаются насосы для откачки дренажных вод. За счет понижения уровня воды в водоприемных колодцах происходит движение воды и начинает интенсивно функционировать дренажная сеть.

Объект исследований

Опытный участок дренажа сифонно-вакуумного действия построен по рекомендации АзНИИГиМ [8]

на площади 90 га в селе Марышлы Сальянского района. Участок расположен в дельтовой низменности, происхождение которой связано с аккумуляционной деятельностью р. Аракс и Кура. Почвенный покров участка представлен сероземно-луговыми разностями. По гранулометрическому составу почвогрунты представлены средними и легкими суглинками, средними и легкими глинами и незначительными прослоями супеси. Литология верхней трехметровой толщи почвогрунтов участка неоднородна как в плане, так и в вертикальном разрезе. Причем с глубиной в вертикальном разрезе наблюдается облегчение гранулометрического состава. Содержание глинистой фракции велико по всему почвенному профилю (50–70,0 %). Наибольшие её величины отмечаются в верхней метровой толще, глубже повышается доля пылеватых частиц и гранулометрический состав облегчается. Коэффициент фильтрации почв изменяется в пределах 8,0–10,0 м/сут. Плотность почв варьирует в пределах 1,20–1,45 г/см³. Плотность твердой фазы изменяется в пределах 2,70–2,82 г/см³. Предельно-полевая влагемкость в верхних горизонтах почв составляет 33,20–35,00 %. Скорость впитывания (за 8 ч наблюдений) насчитывает 0,002 мм/мин. Почвы среднекарбонатные (11,0–14,0 %), и по профилю содержание их носит стабильный характер. Содержание гипса не превышает 1,0 %. Емкость поглощения относительно высокая (свыше 20 мг-экв на 100 г почвы). Среди поглощенных катионов преобладает кальций. Его относительные величины колеблются в пределах 41,0–60,0 %. Следует отметить, что в поглощенном комплексе наблюдается завышенное содержание магния (чаще превышает 30,0 % от суммы поглощенных оснований). Содержание обменного натрия колеблется в пределах 7,0–11,0 %. Содержание гумуса составляет 1,5–2,5 %. Реакция почвенного раствора для исследуемого объекта рН=7,5.

В табл. 1 представлены некоторые физико-химические показатели почв опытного участка.

Таблица 1

Физико-химические показатели почв опытного участка
 / Physical and chemical characteristics of soils, experimental plot

Глубина, см	CaCO ₃ , %	Гипс, %	Поглощенные основания							Физическая глина, %
			мг-экв.			Сумма катионов	% от суммы			
			Ca	Mg	Na		Ca	Mg	Na	
0–10	11,21	1,109	13,60	7,40	2,00	23,00	59,13	32,17	8,70	57,9
10–20	11,62	0,561	12,60	8,60	1,80	23,00	54,78	37,39	7,83	44,4
20–30	13,25	0,181	12,76	10,40	1,80	24,96	51,12	41,66	7,22	59,6
30–50	12,64	0,288	11,70	9,40	1,60	22,76	51,67	41,30	7,03	70,0
50–100	13,86	0,263	12,70	10,50	2,00	25,20	50,40	41,67	7,93	58,5
100–150	13,66	0,418	12,70	12,40	2,00	27,10	46,76	45,76	7,38	65,0
150–200	12,64	0,496	10,60	10,40	2,20	23,20	45,69	44,83	9,48	38,8
200–250	13,25	0,349	10,60	13,40	2,00	26,00	40,77	51,54	7,69	35,6
250–300	13,66	0,934	9,80	6,40	2,00	18,20	53,89	35,16	10,99	34,4

Опытно-производственный участок дренажа сифонно-вакуумного действия включает три горизонтальные закрытые дрены с коленами, опущенными в водоприемные колодцы; два сифона-собирателя для транспортировки дренажных вод из крайних водоприемных колодцев в центральный, а также с опущенным коленом как в крайние, так и в центральные колодцы; насосную станцию для откачки дренажных вод из центрального водоприемного колодца; открытый лотковый канал для отвода дренажных вод за пределы мелиорируемого участка [9].

Средняя глубина заложения дренажа 3,2 м. Дрены длиной 800 м выполнены из пластмассовых перфорированных труб диаметром 100 мм, в круговой песчано-гравийной обсыпке.

Результаты и обсуждение

В данной статье рассматривается солевой режим почвогрунтов и грунтовых вод при сельскохозяйственном освоении на фоне сифонно-вакуумного дренажа. Мелиоративное состояние земель оценено по степени засоления, по минерализации грунтовых и дренажных вод и по урожайности сельскохозяй-

ственных культур. Фактические значения этих показателей установлены экспериментальным путем. Степень и химизм засоления, а также расчет гипотетического состава солей определены по методу, разработанному Н.И. Базилевич и Е.И. Панковой [10].

Солевой режим почвогрунтов зоны аэрации изучался посредством солевых съемок по 24 точкам динамики путем бурения скважин глубиной 3,0 м и полойного отбора проб на полную водную вытяжку.

На основании анализов почвенной съемки следует отметить, что почвы опытного участка относятся в основном к слабозасоленным и средnezасоленным типам. Химизм засоления почв хлоридно-сульфатный. За 2011–2016 гг. на землях участка произрастали хлопчатник (2011–2012, 2014–2015 гг.) и зерновые (2013 и 2016 гг.). Полив хлопчатника осуществлялся поверхностным способом, по бороздам с оросительной нормой 5000 м³/га. Оросительная норма при поливе зерновых составляла 3100 м³/га [11].

Солевые съемки проводились, как правило, осенью, в конце вегетационного периода. Результаты данных солевых съемок по участку в целом в многолетнем разрезе представлены в табл. 2.

Таблица 2

Динамика засоления почвогрунтов в процессе сельскохозяйственного освоения, %
 / Dynamics of salinization of soils in the process of agricultural development, %

Содержание ионов	Слой, м	Год освоения					
		2011	2012	2013	2014	2015	2016
HCO ₃ ⁻	0–1	0,04	0,04	0,03	0,03	0,03	0,03
	1–2	0,04	0,04	0,03	0,03	0,04	0,04
	2–3	0,04	0,04	0,03	0,03	0,03	0,03
Cl ⁻	0–1	0,04	0,05	0,04	0,04	0,04	0,04
	1–2	0,04	0,05	0,06	0,03	0,06	0,06
	2–3	0,05	0,08	0,06	0,04	0,05	0,07
SO ₄ ²⁻	0–1	0,25	0,27	0,14	0,14	0,14	0,17
	1–2	0,13	0,30	0,19	0,19	0,11	0,17
	2–3	0,21	0,29	0,19	0,20	0,23	0,24
Плотный остаток	0–1	0,40	0,50	0,40	0,39	0,34	0,34
	1–2	0,42	0,57	0,45	0,38	0,39	0,37
	2–3	0,48	0,54	0,51	0,42	0,41	0,40

Из табл. 2 видно, что в 2012 г. засоление почвогрунтов верхнего метрового слоя и всей зоны аэрации несколько увеличилось по сравнению с тем, что наблюдалось до строительства системы дренажа сифонно-вакуумного действия. Строительство указанной системы продолжалось весь 2010 г. и завершилось лишь в начале 2011 г. Естественно, что в период реконструкции земли опытного участка не дренировались и не осваивались, что в условиях близкого залегания минерализованных грунтовых вод и сильного испарения с поверхности почвы и грунтовых вод привело к быстрому росту засоления во всей трехметровой толще. В результате на землях

участка был получен сравнительно низкий урожай хлопчатника – 20,5 ц/га.

В 2012 г., уже на фоне активно действующего горизонтального дренажа сифонно-вакуумного действия, процесс засоления почвогрунтов зоны аэрации приостановился. Наметилась ярко выраженная тенденция к прогрессирующему рассолению. Наибольшему выщелачиванию в процессе длительного сельскохозяйственного освоения подвергся в основном сульфат-ион. Его содержание в 0–1-метровой толще в 2016 г. снизилось с 0,27 до 0,17 %, т.е. в 1,6 раза. Это обстоятельство связано с преобладающим содержанием указанного иона в солевом про-

филе, с типом засоления данных почв (хлоридно-сульфатный). Выщелачивание ионов HCO_3^- и Cl^- происходило сравнительно медленнее. Плотный остаток в слое 0–1 м за период исследования снизился в 1,4 раза (0,34 % в 2016 г. против 0,50 % в 2012 г.). Анализ показывает, что наряду с уменьшением содержания солей изменяется их гипотетический состав (табл. 3).

Снижение в почвенном растворе сульфатов натрия и магния произошло за счет обменных реакций с почвенно-поглощающим комплексом, в результате чего в почвенном растворе увеличилось содержание гипса, что особенно характерно для верхнего метрового слоя. Изменение содержания бикарбонатов натрия и кальция незначительно. Однако бикарбонаты магния полностью исчезли из почвенного раствора. Это связано с адсорбцией, а также с переходом их в карбонаты магния и осаждением в твердую фазу, что подтверждается отсутствием $\text{Mg}(\text{HCO}_3)_2$ в грунтовых водах. С уменьшением содержания хлористого натрия в почвенном растворе резко возрастает его содержание в грунтовых водах. В то же время в почвенном растворе образуется хлористый магний за счет капиллярного подтягивания солей грунтовыми водами.

В табл. 4 приводится изменение минерализации дренажных и грунтовых вод, их анионный и катионный состав.

Минерализация грунтовых вод до начала функционирования сифонно-вакуумного дренажа (2011 г.) составляла 13,4 г/л. Они относятся к сульфатно-натриевому II типа (по О.А. Алекину). В период сельскохозяйственного освоения наблюдается снижение минерализации грунтовых вод с сохранением их химизма. Тенденция к снижению из года в год увеличивается, т.е. происходит опреснение грунтовых вод. В 2016 г. минерализация грунтовых вод составила 5,93 г/л. Наряду с наблюдением за солевым режимом почв систематически изучен дренажный сток, который является одним из показателей мелиоративного состояния земель. Как видно из табл. 4, минерализация дренажных вод хлоридно-натриевого состава II типа (по О.А. Алекину) почти в 2–3 раза превышает минерализацию грунтовых вод как в 2016 г. (18,01 против 5,93 г/л), так и в 2011 г. (23,32 против 13,4 г/л).

Выявлена взаимосвязь грунтовых вод с засолением почвогрунтов на фоне сифонно-вакуумного дренажа. Грунтовые воды с минерализацией до 6 г/л не влияют на накопление солей в верхнем слое почвы (0–100 см). Кроме того, на миграцию солей в почвенном растворе влияют возделываемые культуры.

При орошении наблюдается подщелачивание почвы в динамике, что является одной из предпосылок к осолонцеванию. Одна из причин которого – сезонная миграция натриевых солей по профилю почв.

Таблица 3

Изменение солевого состава почв в динамике, % / Dynamics of change of salt composition of the soil, %

Глубина, м	Токсичные соли											
	NaHCO_3		Na_2SO_4		NaCl		$\text{Mg}(\text{HCO}_3)_2$		MgSO_4		MgCl_2	
	2011	2016	2011	2016	2011	2016	2011	2016	2011	2016	2011	2016
0–1	0,003	0,002	0,169	0,125	0,054	0,014	0,005	–	0,041	0,039	–	0,030
1–2	0,008	0,003	0,193	0,213	0,055	0,019	0,008	–	0,041	0,020	–	0,033
2–3	0,004	0,006	0,235	0,183	0,025	0,021	0,005	–	0,038	0,012	–	0,030
	Нетоксичные соли											
	$\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$		CaSO_4		Сумма всех солей				В том числе токсичных			
	2011	2016	2011	2016	2011		2016		2011		2016	
0–1	0,042	0,034	0,069	0,119	0,383		0,343		0,272		0,210	
1–2	0,040	0,038	0,059	0,035	0,404		0,368		0,305		0,288	
2–3	0,045	0,037	0,055	0,077	0,481		0,397		0,307		0,252	

Таблица 4

Химический состав грунтовых и дренажных вод, г/л, по участку в целом (после 6 года освоения) / Chemical composition of groundwater and drainage water, g/l (after 6 years experiment)

Наименования, год	$\text{CO}_3^{2-} + \text{HCO}_3^-$	Cl^-	SO_4^{2-}	Ca^{2+}	Mg^{2+}	$\text{Na}^+ + \text{K}^+$	Общая минерализация
Дренажные воды	2011	1,04	9,2	5,61	0,633	0,91	23,32
	2016	0,27	6,51	5,33	0,39	0,91	18,01
Грунтовые воды	2011	0,44	4,66	4,37	0,46	0,62	13,4
	2016	0,17	1,54	2,3	0,26	0,27	5,93

Необходимо, чтобы эта концентрация была такой высокой, чтобы присутствующий в почвенном растворе катион кальция не мешал вступлению натрия в поглощающий комплекс, т.е. щелочные катионы преобладали над щелочно-земельными.

Для предупреждения осолонцевания орошаемых земель необходимо периодически пополнять запасы кальция, что в значительной степени может быть решено путем внесения фосфорных удобрений – суперфосфата [12].

Подобные обстоятельства, а также различный химический состав грунтовых и дренажных вод указывают на факт отбора дренажем более глубоких минерализованных слоев грунтовых вод, т.е. характеризуют положительную, рассоляющую функцию дренажа сифонно-вакуумного действия.

Одним из показателей мелиоративного благополучия земель является урожайность сельскохозяйственных культур.

В табл. 5 представлена динамика урожайности сельскохозяйственных культур.

Хлопчатник на землях с различной степенью засоления почвогрунтов имеет следующую урожайность [13]:

- при сильной степени засоления – 7–10 ц/га;
- при средней степени засоления – 13–17 ц/га;
- при слабой степени засоления – 22–24 ц/га;
- на незасоленных землях – 30 ц/га.

Наряду с рациональными агротехническими мероприятиями и многополивным режимом орошения урожайность хлопчатника, а также озимых зерновых культур на фоне дренажа сифонно-вакуумного действия возрастает из года в год. Так, до строительства сифонно-вакуумного дренажа урожайность хлопчатника не превышала 20,5 ц/га, а в 2015 г. поднялась до 28,5 ц/га. Это свидетельствует о неуклонном повышении плодородия земель за счет создания оптимального водно-солевого режима земель на фоне дренажа сифонно-вакуумного действия, что может успешно применяться для улучшения мелиоративного состояния орошаемых земель.

Таблица 5

Динамика урожайности сельскохозяйственных культур / Dynamics of yield of agricultural crops

Показатель	Сельскохозяйственное освоение, год					
	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Сельскохозяйственные культуры	Хлопчатник	Хлопчатник	Озимые зерновые	Хлопчатник	Хлопчатник	Озимые зерновые
Урожайность, ц/га	21,0	20,5	32,7	26,7	28,5	34,2

Заключение

Проведенные исследования показали следующее:

- засоление почвогрунтов при сельскохозяйственном освоении на фоне дренажа сифонно-вакуумного действия носит стабильный характер с тенденцией к снижению;
- минерализация грунтовых и дренажных вод также имеет тенденцию к снижению их солесодержания;
- для предупреждения осолонцевания орошаемых земель необходимо предупреждать вынос кальциевых солей и периодически вносить удобрения (в форме простого суперфосфата);
- вакуумный дренаж сифонного действия обладает значительной водопонижающей (скорость спада 13 см/сут) и водоотводящей способностью (модуль дренажного 0,5–0,6 л/с·га), что позволяет рекомендовать его при строительстве новых гидро-мелиоративных систем и реконструкции существующих, в первую очередь в малоуклонных районах Кура-Араксинской низменности.

Литература

1. Дегтярев В.М., Калантаев В.А. Вакуумный дренаж на орошаемых землях. М. : Колос, 1976. 94 с.
2. Калантаев В.А. Дренаж орошаемых земель и методы его интенсификации. Ашхабад : Ыльм, 1984. 287 с.
3. Климко А.И. Об использовании вакуума при осушении сельскохозяйственных земель // Гидротехника и мелиорация. 1964. № 12. С. 57–62.
4. Геоморфология Азербайджана. Баку : Изд-во АН Азерб. ССР, 1959. С. 181–191.
5. Национальный атлас. Азербайджанская Республика. Баку, 2014. С. 64–79.
6. Гасанов С.Т. Многофункциональное новое поколение дренажных систем, их теоретические основы и гидравлические расчеты // Азербайджанская аграрная наука. 2006. № 5–6. С. 152–159.
7. Гурбанов М.Ф. Эколого-мелиоративное состояние земель орошаемых земель Мугано-Сальянского массива Азербайджанской Республики // Аграрный науч. журн. 2016. № 10. С. 3–5.

8. Салахов Ф.С. Система закрытого дренажа сифонного действия // Тр. АзНИИГиМ. Баку, 1974. Т. 2. С. 172–178.

9. Гурбанов М.Ф. Некоторые гидродинамические показатели дренажа в условиях малоуклонной местности // Науч. журн. Рос. НИИ проблем мелиорации. 2016. № 1. С. 35–45.

10. Базилевич Н.И., Панкова Е.И. Опыт классификации почв по содержанию токсичных солей и ионов // Бюл. Почвенного ин-та им. В.В. Докучаева. 1972. Вып. 5. С. 36–41.

11. Керимли Н.Б. Оросительные режимы сельскохозяйственных культур в Азербайджанской Республике. Баку, 2011. 57 с.

12. Заманов П.Б. Агрохимические основы действия питательных элементов и удобрений на свойства почв и урожайность сельскохозяйственных культур. Баку : НПМ -Техсил, 2013. 268 с.

13. Мамедов Р.Г., Джафаров Х.Ф. Мелиорация почв Азербайджана. Баку, 2000. С. 35.

References

1. Degtyarev V.M., Kalantaev V.A. *Vakuumniy drenazh na oroshaemykh zemlyakh* [Vacuum drainage on irrigated land]. Moscow: Kolos, 1976, 94 p.

2. Kalantaev V.A. *Drenazh oroshaemykh zemel' i metody ego intensivatsii* [Drainage of irrigated land and methods of its intensification]. Ashkhabad : YI'm, 1984, 287 p.

3. Klimko A.I. Ob ispol'zovanii vakuuma pri osushenii sel'skokhozyaistvennykh zemel' [On the use of vacuum in the drainage of agricultural lands]. *Gidrotekhnika i melioratsiya*. 1964, No. 12, pp. 57-62.

4. *Geomorfologiya Azerbaidzhana* [Geomorphology of Azerbaijan]. Baku : Izd-vo AN Azerb. SSR, 1959, pp. 181-191.

5. *Natsional'nyi atlas. Azerbaidzhanskaya Respublika* [National Atlas. The Republic of Azerbaijan]. Baku, 2014, pp. 64-79.

6. Gasanov S.T. Multifunktional'noe novoe pokolenie drenaznykh sistem, ikh teoreticheskie osnovy i gidravlicheskie raschety [Multifunctional new generation of drainage systems, their theoretical bases and hydraulic calculations]. *Azerbaidzhanskaya agrarnaya nauka*. 2006, No. 5-6, pp. 152-159.

7. Gurbanov M.F. Ekologo-meliorativnoe sostoyanie zemel' oroshaemykh zemel' Mugano-Salyanskogo massiva Azerbaidzhanskoi Respubliki [Ecological and meliorative state of irrigated lands in the Mugano-Salyan massif of the Republic of Azerbaijan]. *Agrarnyi nauch. zhurn.* 2016, No. 10, pp. 3-5.

8. Salakhov F.S. Sistema zakrytogo drenazha sifonnogo deistviya [System of closed draining of the siphon action]. *Tr. AzNIIGiM*. Baku, 1974, vol. 2, pp. 172-178.

9. Gurbanov M.F. Nekotorye gidrodinamicheskie pokazateli drenazha v usloviyakh malouklonnoi mestnosti [Some hydrodynamic parameters of drainage in conditions of low-grade terrain]. *Nauch. zhurn. Ros. NII problem melioratsii*. 2016, No. 1, pp. 35-45.

10. Bazilevich N.I., Pankova E.I. Opyt klassifikatsii pochv po soderzhaniyu toksichnykh solei i ionov [Experience in the classification of soils in terms of the content of toxic salts and ions]. *Byul. Pochvennogo in-ta im. V.V. Dokuchaeva*. 1972, iss. 5, pp. 36-41.

11. Kerimli N.B. *Orositel'nye rezhimy sel'skokhozyaistvennykh kul'tur v Azerbaidzhanskoi Respublike* [Irrigation regimes of agricultural crops in the Republic of Azerbaijan]. Baku, 2011, 57 p.

12. Zamanov P.B. *Agrokhimicheskie osnovy deistviya pitatel'nykh elementov i udobrenii na svoistva pochv i urozhainost' sel'skokhozyaistvennykh kul'tur* [Agrochemical bases of action of nutrients and fertilizers on properties of soils and productivity of agricultural crops]. Baku : NPM -Tekhsil, 2013, 268 p.

13. Mamedov R.G., Dzhafarov Kh.F. *Melioratsiya pochv Azerbaidzhana* [Melioration of soils in Azerbaijan]. Baku, 2000, p. 35.

УДК 556.314 + 550.42

DOI 10.23683/0321-3005-2017-4-1-110-120

ИЗОТОПНЫЙ И ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ВОД ЮЖНО-САХАЛИНСКОГО ГРЯЗЕВОГО ВУЛКАНА (ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ОПРОБОВАНИЯ 2009 И 2010 ГОДОВ)*

© 2017 г. В.В. Ершов¹, О.А. Никитенко¹

¹Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, Россия

ISOTOPIC AND CHEMICAL COMPOSITION OF WATERS OF THE YUZHNO-SAKHALINSK MUD VOLCANO (SAMPLING IN 2009 AND 2010)

V.V. Ershov¹, O.A. Nikitenko¹

¹Institute of Marine Geology and Geophysics, FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia

Ершов Валерий Валерьевич – кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, ул. Науки, 1б, г. Южно-Сахалинск, 693022, Россия, e-mail: valery_ershov@mail.ru

Valery V. Ershov - Candidate of Physics and Mathematics, Leading Researcher, Institute of Marine Geology and Geophysics, FEB RAS, Nauki St., 1b, Yuzhno-Sakhalinsk, 693022, Russia, e-mail: valery_ershov@mail.ru

Никитенко Ольга Александровна – младший научный сотрудник, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, ул. Науки, 1б, г. Южно-Сахалинск, 693022, Россия, e-mail: nikitenko.olga@list.ru

Olga A. Nikitenko - Junior Researcher, Institute of Marine Geology and Geophysics, FEB RAS, Nauki St., 1b, Yuzhno-Sakhalinsk, 693022, Russia, e-mail: nikitenko.olga@list.ru

Выполнены определения изотопного и химического состава вод Южно-Сахалинского грязевого вулкана. Отбор проб проводился в 2009 и 2010 гг. на этапе грифонной деятельности вулкана. Установлено, что грязевулканические воды относятся к гидрокарбонатно-хлоридно-натриевому типу, общая минерализация составляет 16–23 г/л. По гидрохимическим геотермометрам получены оценки температуры формирования грязевулканических вод. С учетом этих оценок полагается, что питающие вулкан водоносные пласты залегают на глубине 3 км и более. Изотопные характеристики грязевулканических вод ($\delta^{18}\text{O} \sim +5 \text{‰}$, $\delta\text{D} \sim -20 \text{‰}$) свидетельствуют о незначительном вкладе метеорных вод в водном питании вулкана. Предложена гипотеза о том, что химический состав грязевулканических вод во многом определяется поступлением в канал вулкана грязевулканических газов, в составе которых преобладает диоксид углерода. Обсуждаются также гипотезы формирования изотопного состава вод Южно-Сахалинского грязевого вулкана. При этом первоначальным источником водной фазы грязевулканического вещества считаются погребенные морские воды.

Ключевые слова: грязевой вулкан, подземные воды, изотопный состав, гидрогеохимия, гидрохимические геотермометры, остров Сахалин.

We determined the isotopic and chemical composition of the Yuzhno-Sakhalinsk mud volcano waters. Sampling was conducted in 2009 and 2010 at stage of the gryphon-salse activity of the volcano. It is established that mud volcanic waters belong to the hydrocarbonate-chloride-sodium type, total mineralization is 16-23 g/l. We estimate formation temperature of the mud volcanic waters according to hydrochemical geothermometers. Based on this estimates it is assumed that aquifers lie at the depth of 3 km and more, which feed the mud volcano. The isotopic characteristics of mud volcanic waters ($\delta^{18}\text{O} \sim +5 \text{‰}$, $\delta\text{D} \sim -20 \text{‰}$) indicate minor contribution of meteoric waters in the water supply of the volcano. A hypothesis is proposed that the chemical composition of mud volcanic waters is largely determined by the entry of mud volcanic gases (carbon dioxide predominates) into volcano channel. The hypotheses of formation of the isotope composition of the waters of the Yuzhno-Sakhalinsk mud volcano are also discussed. The original source of the aqueous phase of the mud volcanic substance is buried seawater.

Keywords: mud volcano, underground water, isotopic composition, hydrogeochemistry, hydrochemical geothermometers, Sakhalin Island.

* Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (грант № 15-05-01768).

Введение

Для восточной окраины России характерно наличие разнообразных типов минеральных и термальных вод. В большинстве своем закономерности их распространения, химический состав и условия формирования достаточно хорошо изучены [1, 2]. Между тем на Дальнем Востоке России – на острове Сахалин – имеются также такие интересные природные объекты, как грязевые вулканы. Гидрогеохимические исследования этих объектов до последнего времени практически не проводились. Немногочисленные литературные данные по этому вопросу относятся в основном к 50–70-м гг. XX в. В последние годы Институтом морской геологии и геофизики ДВО РАН (главным образом на базе центра коллективного пользования) проводятся детальные исследования по этой проблематике, некоторые результаты которых уже докладывались нами на всероссийской научной конференции [3].

Грязевые вулканы интенсивно выносят из земных недр на дневную поверхность углеродсодержащие газы и разжиженные осадочные породы – сопочную брекчию. В деятельности вулканов можно выделить две стадии: кратковременную (несколько часов или дней) стадию бурного извержения и гораздо более длительную (единицы и десятки лет) грифонную стадию. При извержении за небольшой промежуток времени вулканом выбрасываются большие объемы сопочной брекчии (порядка 10^3 – 10^5 м³) и подземных газов (часто с возгоранием). В связи с этим грязевой вулканизм относится к опасным геологическим процессам, которые необходимо учитывать при строительстве и эксплуатации инженерных сооружений. В грифонную стадию происходит постоянное выделение в относительно небольших количествах сопочной брекчии и газов из грифонов – эруптивных аппаратов на теле грязевого вулкана. Отметим, что, кроме острова Сахалин, грязевые вулканы на территории России встречаются только в Керченско-Таманском регионе. Наиболее же яркое проявление грязевой вулканизм получил в восточной части Азербайджана и прилегающей акватории Каспийского моря. По количеству и разнообразию грязевых вулканов этот регион не имеет себе равных в мире. Основные закономерности распространения, а также общие сведения об их морфогенетической типизации, строении и механизме деятельности достаточно подробно описаны в работах [4–6].

На острове Сахалин выделяют четыре участка проявления наземного грязевого вулканизма [7]. Одним из наиболее крупных и активных вулканов

является Южно-Сахалинский грязевой вулкан, который и был объектом наших исследований. В августе 2009 г. и сентябре 2010 г. был выполнен отбор проб воды, изливающейся из грифонов Южно-Сахалинского грязевого вулкана, на изотопный и химический анализ соответственно (рис. 1). На изотопный анализ отбирались также пробы воды из родника, расположенного у подножия вулкана.

Цель данной работы – охарактеризовать изотопный и химический состав опробованных вод, разгружаемых Южно-Сахалинским грязевым вулканом на стадии грифонной деятельности, и сделать обоснованные суждения об условиях формирования грязевулканических вод.

Объект исследования

Южно-Сахалинский грязевой вулкан находится в поле распространения мощной (около 3 км) высокопластичной алевролитово-аргиллитовой верхнемеловой толщи – быковской свиты [8]. Эта свита считается основным источником твердой фазы продуктов грязевого вулканизма. Вулкан приурочен к субмеридиональному Центрально-Сахалинскому (Тынь-Поронайскому) взбросонадвигу, который является одной из самых крупных и известных дизъюнктивных дислокаций острова Сахалин. По взбросонадвигу с запада на восток меловые отложения взброшены или надвинуты на палеоген-неогеновые отложения. Амплитуда взбросонадвиги достигает многих сотен метров. Плоскость сместителя наклонена на запад под разным углом – от 20 до 80°. О генетической связи вулкана с Центрально-Сахалинским разломом свидетельствует и тот факт, что по расположению большинство грифонов вулкана образует полосу длиной около 300 м и шириной около 50 м, ориентированную по простиранию разлома (рис. 1). В пределах этой полосы, исходя из пространственного расположения и морфологии грифонов, выделяют несколько самостоятельных групп грифонов. Общее число грифонов на вулкане остается практически неизменным из года в год и составляет 50–70. Температура водогрязевой смеси в грифонах определяется в основном температурой воздуха. Соответственно, значения температуры в грифонах при отборе проб были близки к значениям температуры воздуха (15–25 °С). Извержения Южно-Сахалинского грязевого вулкана происходят довольно часто. Сильные извержения вулкана зафиксированы в 1959, 1979 и 2001 гг. Одно относительно слабое извержение произошло в промежутке времени между 1994 и 1996 гг., а другое – в начале 2011 г.

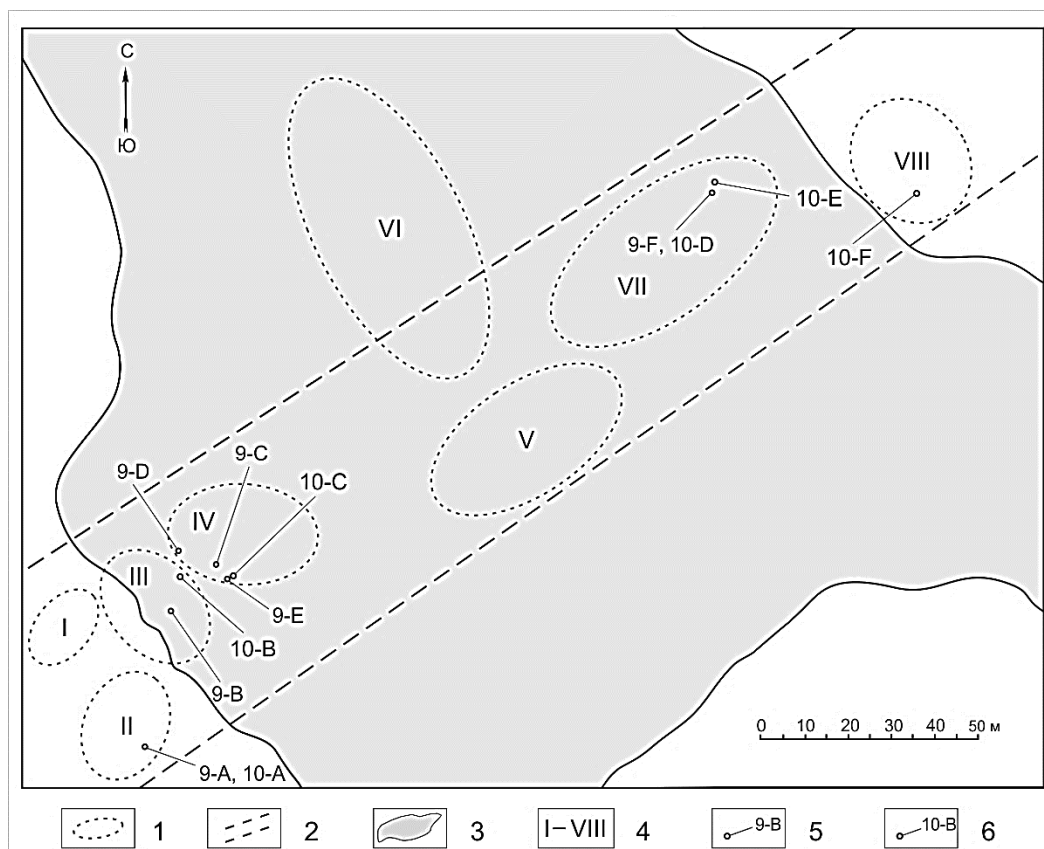


Рис. 1. Карта-схема Южно-Сахалинского грязевого вулкана: 1 – группы грифонов; 2 – линии, ограничивающие зону распространения грифонов на вулкане; 3 – границы грязевого поля от последнего (на момент отбора проб) извержения вулкана; 4 – номер грифонной группы; 5 – грифоны, из которых в 2009 г. производился отбор проб воды на изотопный анализ; 6 – грифоны, из которых в 2010 г. производился отбор проб воды на химический анализ / Fig. 1. Schematic map of the Yuzhno-Sakhalinsk mud volcano: 1 - groups of gryphons; 2 - lines bounding the area where there is gryphons; 3 - boundaries of the mud field formed after the volcanic eruption in 2001; 4 - number for group of gryphons; 5 - gryphons of which in 2009 was sampled water for isotope analysis; 6 - gryphons of which in 2010 was sampled water for chemical analysis

Методы исследования

Химический анализ грязевулканических вод проводился в Межведомственном центре аналитического контроля состояния окружающей среды при Дальневосточном федеральном университете (г. Владивосток). Непосредственно перед химическим анализом пробы с помощью бумажных и мембранных (0,45 мкм) фильтров очищались от грязевой взвеси. Концентрация макро- и микроэлементов определялась на атомно-эмиссионном спектрометре с индуктивно-связанной плазмой ICPE-9000 («Шимадзу», Япония). Концентрация Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , Li^+ , Cl^- , SO_4^{2-} определялась с помощью системы капиллярного электрофореза «Капель-105М» («Люмэкс», Россия). Концентрация HCO_3^- определялась титриметрическим методом. Содержание неорганического углерода (IC – inorganic carbon) в пробах определялось на анализаторе углерода TOC-L («Шимадзу», Япония).

Концентрация CO_3^{2-} определялась расчетным методом в предположении равновесия всех ионов в растворе из уравнения второй ступени диссоциации угольной кислоты, используя значение константы диссоциации при температуре 25 °C [9]. Коэффициенты активности ионов, необходимые при этих расчетах, определялись по формуле Дэвиса [10].

Изотопные отношения $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ и D/H в водных пробах определялись в лаборатории стабильных изотопов Дальневосточного геологического института ДВО РАН (г. Владивосток) на масс-спектрометре Thermo Finnigan MAT 253. Подготовка проб для изотопного анализа осуществлялась двумя способами. Одни пробы хранились и перевозились в аналитическую лабораторию в виде водогрязевой смеси, фильтрация проводилась в самой лаборатории уже непосредственно перед анализом. Другие пробы сразу отфильтровывались от грязевой взвеси, после чего фильтрат в герметичных контейнерах хранился и транспортировался в аналитическую лабораторию.

**Результаты исследования
и их обсуждение**

Таблица 1

Химический состав вод Южно-Сахалинского грязевого вулкана по литературным данным, мг/л / Chemical composition of waters of the Yuzhno-Sakhalinsk mud volcano from published data, mg/l

Проба	pH	Na ⁺	K ⁺	Na ⁺ +K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Источ-ник
Ю-1	–	–	–	4680	136,3	45,0	3370	5,8	7240	[11]
Ю-2	–	–	–	6370	140,0	70,0	4250	21,4	10330	[11]
Ю-3	–	–	–	8362	165,9	15,6	5020	55,9	9967	[12]
Ю-4	–	–	–	2241	5,8	7,8	1532	164,0	2306	[12]
Ю-5	8,0	5608	80,0	–	48,0	240,0	4042	116,0	9333	[13]
Проба	CO ₃ ²⁻	Br ⁻	HBO ₂	B	I ⁻	NH ₄ ⁺	Sr ²⁺	As	ОМ, г/л	Источ-ник
Ю-1	–	–	897	–	–	–	–	–	15	[11]
Ю-2	–	–	1131	–	–	–	–	–	21	[11]
Ю-3	2133	65,0	–	–	–	–	–	–	26	[12]
Ю-4	408	21,9	283	–	–	–	–	–	7	[12]
Ю-5	–	13,3	–	238	4,5	10,8	2,20	0,06	20	[13]

До настоящего времени химический состав вод Южно-Сахалинского грязевого вулкана был изучен слабо. В публикациях 50–70-х гг. XX в. изложены результаты химического анализа всего для пяти проб грязевулканических вод [11–13]. При этом имеющиеся данные отражают в основном макрокомпонентный состав. Полученные результаты имеют довольно большой разброс значений – как для общей минерализации, так и для многих из определяемых показателей (табл. 1).

Очевидно, что для уточнения химического состава грязевулканических вод были необходимы дополнительные исследования. Полученные нами результаты (табл. 2) в целом согласуются с результатами наших предшественников. Видно, что воды из всех грифонов Южно-Сахалинского грязевого вулкана имеют схожий химический состав и относятся к одному и тому же гидрокарбонатно-хлоридно-натриевому типу. Данные о значениях некоторых гидрохимических показателей были получены разными методами – атомно-эмиссионной спектроскопией с индуктивно-связанной плазмой (Na, Mg, Ca, K, Li, S) и капиллярного электрофореза (Na⁺, Mg²⁺, Ca²⁺, K⁺, Li⁺, SO₄²⁻). Эти данные хорошо согласуются между собой, значения коэффициентов корреляции между ними в основном 0,95 и выше. Этот факт свидетельствует о надежности полученных нами гидрохимических данных.

Есть сведения, что грифоны в пределах одного и того же вулкана могут выносить на поверхность воды различного состава [14]. Это объясняется залеганием корней грифонов на разных глубинах в нижних структурных этажах, т.е. наличием нескольких разных подводных каналов и питающих резервуаров в пределах одного грязевого вулкана. Следовательно, в силу схожести химического состава вод из разных грифонов можно говорить о том, что воды Южно-Сахалинского грязевого вулкана выносятся только из одного питающего резервуара.

Обращает на себя внимание высокая концентрация гидрокарбонат-ионов, которая существенно выше, чем в подавляющем большинстве минеральных и термальных источников Дальнего Востока России [1, 2]. Она также больше, чем в других грязевых вулканах на территории бывшего СССР [13]. При этом содержание гидрокарбонат-ионов по сути

Примечание. ОМ – общая минерализация.

определялось нами двумя независимыми методами и при необходимости корректировалось. Остановимся на этом моменте подробнее.

Методика определения содержания гидрокарбонат-ионов в водах различных типов основана на измерении величины щелочности [15]. При этом различают три формы щелочности – свободную, карбонатную и общую. Свободная щелочность обусловлена присутствием в воде гидроксильных и карбонатных ионов и определяется количеством кислоты, идущей на титрование пробы до pH = 8,3. Карбонатная щелочность обусловлена присутствием в воде солей угольной кислоты (карбонатов и гидрокарбонатов) и определяется количеством кислоты, необходимой для перевода карбонатов и гидрокарбонатов в угольную кислоту (pH = 4,5). Общая щелочность характеризует общее содержание в воде анионов слабых органических и неорганических кислот и гидроксильных ионов, титруемых сильной кислотой. Карбонатную щелочность приближенно принимают равной общей щелочности. Содержание гидрокарбонат-ионов определяется по разнице между общей и свободной щелочностью.

Учитывая сказанное, полезно сопоставить между собой суммарную концентрацию углерода, находящегося в гидрокарбонат- и карбонат-ионах, с содержанием неорганического углерода в пробах. Такое сравнение показывает, что концентрация углерода из гидрокарбонат- и карбонат-ионов завышена в среднем на 439 ppm (рис. 2а). Для слабощелочных и нейтральных вод свободная щелочность равна нулю. Соответственно, содержание гидрокарбонат-ионов будет определяться только величиной общей щелочности.

Таблица 2

**Химический состав вод из грифонов Южно-Сахалинского грязевого вулкана (опробование 2010 г.)
/ Chemical composition of waters from gryphons of the Yuzhno-Sakhalinsk mud volcano (sampling 2010)**

Грифон	pH	IC, ppm	Na	Na ⁺	Mg	Mg ²⁺	Ca	Ca ²⁺	K	K ⁺	Li	Li ⁺	HCO ₃ ⁻	CO ₃ ²⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	S
			мг/л														
10-A	8,5	2495	6150	5980	307	272	61	70	61	55	8,1	6,9	12375	515	3680	22,0	8,6
10-B	9,1	2450	5650	5360	276	269	65	75	58	49	7,4	6,5	10035	1665	3470	5,5	2,7
10-C	9,2	2260	5400	5480	252	233	72	84	65	56	7,4	6,8	8990	1875	3460	14,5	6,5
10-D	9,0	1640	4310	4350	165	162	71	84	48	51	6,4	5,9	7770	980	3590	12,0	5,6
10-E	9,2	1615	4470	4260	171	167	84	100	57	52	6,8	5,9	6085	1205	3600	17,0	8,4
10-F	8,9	1990	4850	5040	210	200	81	96	55	50	6,0	5,5	9590	985	3530	3,4	2,3

Грифон	Ba	Si	Sr	Fe	Zr	Al	P	As	Cu	Mo	Mn	Tl	Ti	V	Ag	Y	OM
	мг/л			мкг/л													
10-A	5,3	6,5	3,3	210	125	80	19	10	12	7,7	5,5	1,3	2,8	4,6	1,6	0,72	23,2
10-B	7,3	5,3	3,2	710	140	46	70	12	14	5,2	2,0	4,1	3,5	2,5	1,6	0,58	21,3
10-C	6,9	5,6	3,0	985	120	42	75	15	11	7,0	5,2	2,9	2,7	2,6	1,7	0,64	20,2
10-D	2,9	5,8	2,8	535	45	33	22	18	10	6,1	2,7	3,2	2,6	1,4	1,7	0,61	17,0
10-E	2,8	6,0	2,9	530	44	58	50	10	11	6,2	4,4	3,0	1,9	1,3	1,8	0,73	15,8
10-F	7,4	6,3	3,2	710	69	29	43	11	11	5,1	8,5	3,5	2,5	1,8	1,6	0,62	19,4

Примечание. Содержание Ni и Zn для всех проб составляет менее 10 мкг/л, Se и Co – менее 4 мкг/л, Sb – менее 3 мкг/л, Pb – менее 2 мкг/л, Cr – менее 0,5 мкг/л, La – менее 0,2 мкг/л, Cd – менее 0,1 мкг/л, Be и Yb – менее 0,05 мкг/л; OM – общая минерализация.

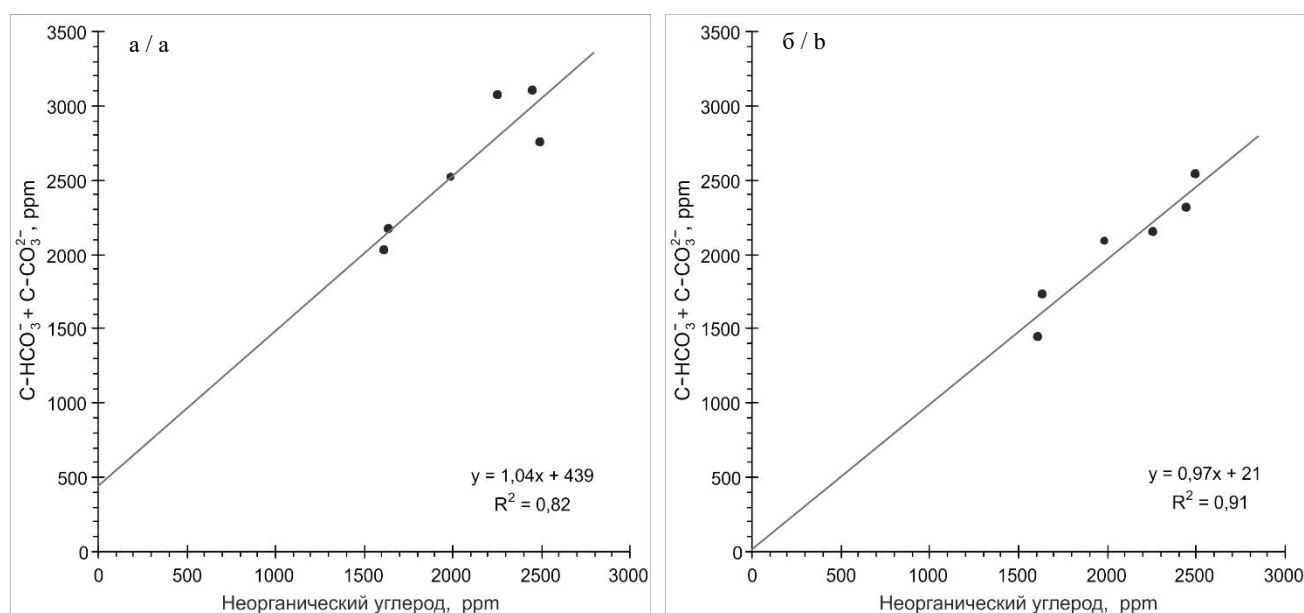


Рис. 2. Соотношение между суммарной концентрацией углерода, находящегося в HCO₃⁻ и CO₃²⁻, и содержанием неорганического углерода (IC): а – без коррекции; б – скорректированные значения (пояснения в тексте)
/ Fig. 2. The relationship between the total carbon concentration in HCO₃⁻ and CO₃²⁻ and the concentration of inorganic carbon: a - without correction; b - corrected values

В наших пробах определения pH и концентрации гидрокарбонат-ионов проводились отдельно друг от друга. Поэтому при титровании не учитывалось, что для всех исследуемых проб pH > 8,3 и часть кислоты пошла также на нейтрализацию свободной щелочности. В связи с этим содержание гидрокарбонат-ионов должно быть скорректировано. Зная величину общей щелочности и pH

пробы, а также предполагая равновесие гидрокарбонат- и карбонат-ионов в растворе, мы пересчитали концентрации этих анионов. Видно, что скорректированные значения хорошо согласуются с данными по содержанию неорганического углерода (рис. 2б). При этом несколько увеличился и коэффициент детерминации R² для соответствующей линейной регрессии.

Воды Южно-Сахалинского грязевого вулкана также богаты литием, содержание которого здесь гораздо выше, чем в большинстве минеральных и термальных водах Дальнего Востока России. Только в некоторых гидротермах Камчатки (Мутновский гидротермальный район, Узон-Гейзерная гидротермальная система, Налычевская долина) и Курильских островов (вулканы Баранского и Менделеева) встречаются сопоставимые концентрации лития – несколько мг/л [1, 2, 16]. Возможны различные объяснения таких высоких концентраций лития. В работе [16] говорится о том, что высокие концентрации редких щелочей (лития, рубидия, цезия) присутствуют ювенильным (мантийным) водам. Между тем высокое содержание лития характерно и для вод грязевых вулканов Грузии и Керченско-Таманского региона [17, 18]. В работах [17, 19] говорится о том, что обогащение подземных вод микрокомпонентами (литием, рубидием, цезием и др.) может происходить в процессе литогенеза осадочных отложений. В этом случае поступление лития в грязевулканические воды объясняется как результат десорбции этого элемента из обменного комплекса глин и/или трансформации глинистых минералов (иллитизации смектита) при высоких температурах. Так или иначе, можно считать, что повышенное содержание лития – это специфический признак грязевулканических вод, который может быть использован для идентификации таких вод. Возможно также, что вариации концентрации лития в грязевулканических водах могут отражать степень активности грязевых вулканов.

Для вод многих грязевых вулканов мира характерна сильная положительная линейная корреляция между концентрациями Na^+ и Cl^- [20–22]. При этом отношение Na^+/Cl^- в этих водах близко к аналогичному показателю для морской воды – 0,55 для весообъемных единиц концентрации. Указанная связь между Na^+ и Cl^- считается одним из признаков того, что основным источником вод грязевых вулканов являются морские воды, захороненные в порах осадочных отложений. Для вод Южно-Сахалинского грязевого вулкана подобной связи не обнаруживается. Коэффициент линейной корреляции Пирсона между концентрациями Na^+ и Cl^- , как и коэффициент ранговой корреляции Спирмена, имеет значение, близкое к нулю. Возможно, что отсутствие такой корреляции для анализируемой выборки является следствием ее малого объема. Однако в любом случае отношение Na^+/Cl^- для вод Южно-Сахалинского грязевого вулкана существенно больше, чем для морской воды. Значения этого показателя находятся в диапазоне от 1,2 до 1,6 (в весообъемных единицах концентрации) и зависят от суммарной концентрации ($\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-}$) – коэффициент линейной корреляции Пирсона равен 0,95

(рис. 3). Экстраполируя эту зависимость в область нулевой суммарной концентрации ($\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-}$), получаем, что отношение Na^+/Cl^- будет равно 0,51, т.е. близким к значению аналогичного показателя для морской воды. Заметим, что тесную положительную корреляционную связь с показателем ($\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-}$) имеют также концентрации магния, стронция, ванадия, циркония, меди.

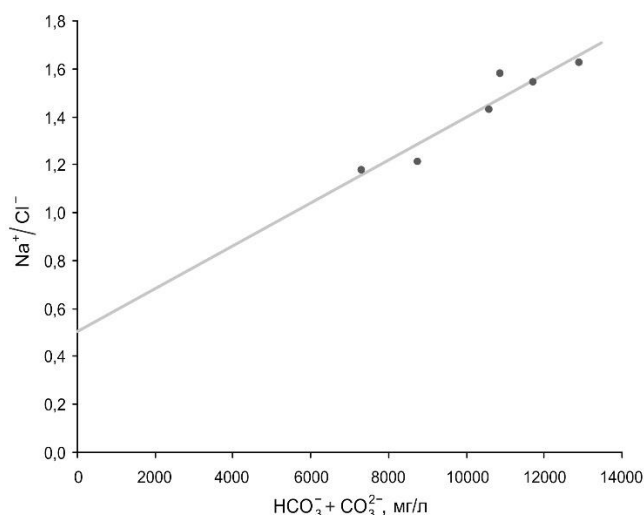


Рис. 3. Зависимость между отношением Na^+/Cl^- и суммарной концентрацией гидрокарбонат- и карбонат-ионов для вод Южно-Сахалинского грязевого вулкана / Fig. 3. Correlation between ratio Na^+/Cl^- and total concentration HCO_3^- and CO_3^{2-} for waters from gryphons of the Yuzhno-Sakhalinsk mud volcano

Изотопные определения показывают, что результаты для образцов с различными способами пробоподготовки не имеют существенных различий (табл. 3).

Таблица 3

Изотопный состав ($\delta^{18}\text{O}$ и δD , ‰ SMOW) вод из грифонов Южно-Сахалинского грязевого вулкана и близлежащего родника (опробование 2009 г.) / Isotopic composition ($\delta^{18}\text{O}$ и δD , ‰ SMOW) of waters from gryphons of the Yuzhno-Sakhalinsk mud volcano and nearby spring (sampling 2009)

Место отбора	«Нефильтрованные»		«Отфильтрованные»	
	$\delta^{18}\text{O}$	δD	$\delta^{18}\text{O}$	δD
9-A	+5,0	-20,3	+4,4	-19,0
9-B	+5,0	-21,6	–	–
9-C	+4,9	-19,6	+5,5	-16,6
9-D	+5,3	-17,2	+5,3	-19,7
9-E	+3,0	-24,2	+3,1	-23,9
9-F	+5,5	-17,4	+5,5	-17,0
Родник	-11,4	-81,7	-11,6	-81,0

Видно также, что на диаграмме $\delta^{18}\text{O}$ - δD фигуративные точки для грязевулканических вод лежат далеко в стороне от линии метеорных вод Крейга

(рис. 4). Фигуративные точки для родника, напротив, хорошо на нее ложатся. Следовательно, метеорные воды не принимают существенного участия в питании Южно-Сахалинского грязевого вулкана. Фигуративные точки для грязевулканических вод имеют четко выраженный линейный тренд (коэффициент корреляции равен 0,88). Указанный тренд обусловлен, вероятно, смешением грязевулканических вод с метеорными водами на современном этапе деятельности вулкана. При этом доля метеорных вод составляет не более 15–20 %. Отметим, что подобный линейный тренд описан в работе [23] для вод грязевых вулканов Таманского полуострова.

При этом утяжеление изотопного состава грязевулканических вод объясняется приближением к горному сооружению Большого Кавказа. Видно, что сахалинский и таманский тренды практически идентичны (рис. 4), хотя в нашем случае все пробы отобраны на одном и том же вулкане. Следовательно, возможно альтернативное объяснение линейного тренда и для вод грязевых вулканов Таманского полуострова.

Для оценки термодинамических условий формирования вод Южно-Сахалинского грязевого вулкана были использованы различные гидрохимические геотермометры (Na-K, K-Mg, Li-Mg и Na-Li) – зависимости, связывающие концентрации компонентов химического состава и температуру подземных вод [24]. Применение того или иного геотермометра имеет свою специфику и зависит от состава водовмещающих пород. Поэтому результаты расчетов по разным геотермометрам будут различаться. Полученные нами оценки температуры находятся в основном в диапазоне от 70 до 110 °С. Необходимо также учитывать, что при медленном подъеме с глубины водных растворов геотермометры занижают оценки температуры. С помощью численного моделирования это показано в работе [25] для Na-K-геотермометра. Поскольку для грязевых вулканов характерны низкие дебиты водогазовой смеси (еди-

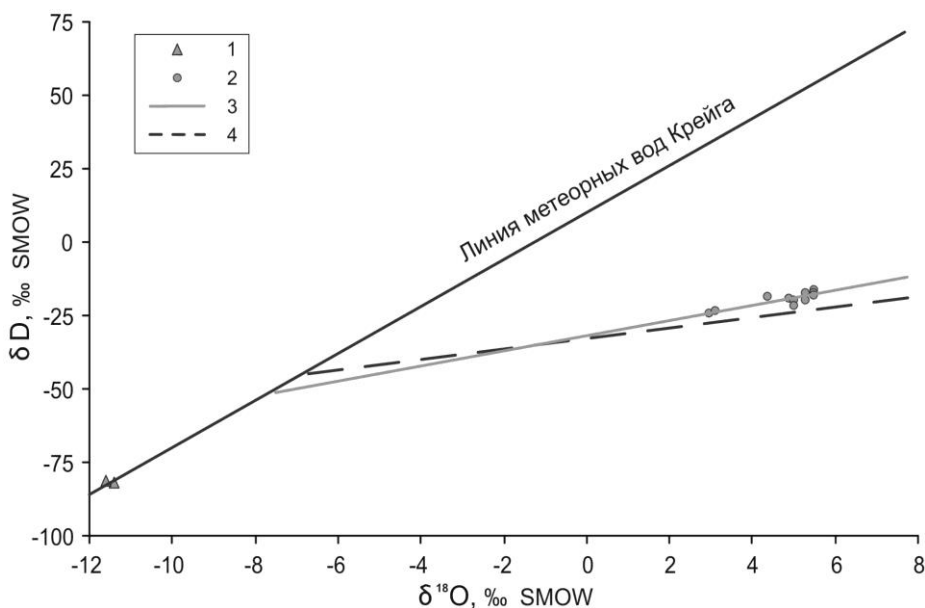


Рис. 4. Изотопный состав опробованных вод: 1 – родник у подножия Южно-Сахалинского грязевого вулкана; 2 – воды Южно-Сахалинского грязевого вулкана; 3 – линейный тренд для вод Южно-Сахалинского грязевого вулкана; 4 – линейный тренд для грязевулканических вод Таманского полуострова из работы [23] / Fig. 4. Isotopic composition of water samples: 1 – spring near the Yuzhno-Sakhalinsk mud volcano; 2 – waters of the Yuzhno-Sakhalinsk mud volcano; 3 – linear trend for waters of the Yuzhno-Sakhalinsk mud volcano; 4 – linear trend for waters of mud volcanoes of the Taman Peninsula (published in the article [23])

ницы и десятки литров в сутки), то нам следует ожидать занижения температуры как минимум на несколько десятков градусов. Средний геотермический градиент в южной части острова Сахалин, вычисленный нами по данным работы [26], составляет около 40 °С/км. Тогда температурный диапазон от 70 до 110 °С соответствует глубине от 1,8 до 2,8 км. Учитывая вышесказанные соображения о занижении температурных оценок, можно полагать, что Южно-Сахалинский грязевой вулкан питается водами с глубины 3 км и более. Оценки температуры генерации грязевулканических вод можно сделать также и по изотопным данным. В работе [19] на примере подземных вод Северного Кавказа получены зависимости для $\delta^{18}\text{O}$ и δD от температуры. Используя полученные уравнения (в варианте без разделения по литологии коллектора), для обсуждаемого вулкана получаем температурный диапазон 140–170 °С. В пересчете на геотермический градиент это соответствует глубине около 4 км.

Попытаемся объяснить закономерности изотопного и химического состава Южно-Сахалинского грязевого вулкана. Будем исходить из предположения, что грязевулканические воды трансформировались из захороненных при седиментации морских вод. Состав пород питающей вулкан быковской свиты указывает на морские условия накопления

осадков с обмелением бассейна в середине быковского времени и привнесом более грубозернистого терригенного материала [27]. В работе [28] также говорится о том, что углеводороды, обнаруженные в грязевых вулканах Сахалина, образовались из органического вещества морского генезиса. Исходя из изотопного состава углерода C_4 и CO_2 в грязевулканических газах, значения температуры газогенерации находятся в диапазоне от 320 до 350 °C [29]. Для юга острова Сахалин это соответствует глубине 8–9 км. Находящийся на больших глубинах CO_2 имеет высокое парциальное давление и, следовательно, согласно закону Генри в большом количестве растворяется в грязевулканических водах. Это способствует интенсивному гидролизу вмещающих алюмосиликатных пород (например, альбита) и приводит, в частности, к поступлению дополнительного количества натрия в водный раствор. В итоге в грязевулканических водах происходит согласованное повышение концентрации натрия и гидрокарбонатов. На этапе заложения грязевулканического очага седиментационные воды (изначально морского генезиса) опресняются, обогащаются кислородом-18 и обедняются дейтерием. Этот процесс может протекать по двум путям (рис. 5). В первом варианте полагаем, что на стадии континентального развития донных осадков погребенные морские воды частично замещаются поверхностными водами [30]. После чего эти воды при взаимодействии с водовмещающими породами в условиях повышенных температур претерпевают положительный кислородный сдвиг. Во втором варианте полагаем, что погребенные морские воды разбавляются относительно пресными дегидратационными водами, образующимися при фазовых превращениях глинистых минералов (иллитизации смектита). Такой механизм рассматривается в работе [23] при объяснении изотопного состава вод грязевых вулканов Грузии и Таманского полуострова. И уже на современном этапе

деятельности вулкана происходит смешение грязевулканических и метеорных вод, чему соответствует указанный выше линейный тренд на диаграмме $\delta^{18}\text{O}-\delta\text{D}$.

Заключение

Воды Южно-Сахалинского грязевого вулкана представляют собой слабосолёные воды гидрокарбонатно-натриевого типа. При этом грязевулканические воды в разных грифонах вулкана имеют сходный химический состав. Это позволяет говорить о том, что все грифоны вулкана имеют один и тот же источник водного питания. Грязевулканические воды богаты гидрокарбонатами, литием, имеют повышенные значения отношения Na^+/Cl^- по сравнению с морской водой. С учетом температурных оценок, полученных по разным гидрохимическим геотермометрам, можно полагать, что грязевулканические воды выносятся с глубины 3 км и более. Предполагается, что основным фактором метаморфизма грязевулканических вод является поступление CO_2 из питающей грязевой вулкан глубинной газовой

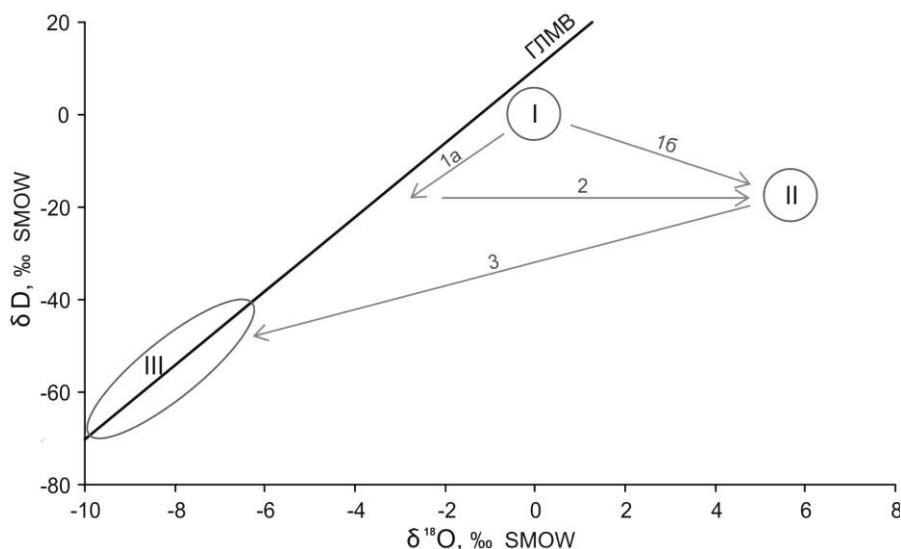


Рис. 5. Эволюция изотопного состава подземных вод в процессе формирования и деятельности Южно-Сахалинского грязевого вулкана: I – поле изотопного состава морских вод; II – поле изотопного состава грязевулканических вод; III – поле изотопного состава метеорных вод; 1a – процесс разбавления погребенных морских вод поверхностными водами на стадии континентального развития донных осадков; 1b – процесс разбавления погребенных морских вод дегидратационными водами; 2 – процесс изотопного обмена по кислороду-18 с водовмещающими породами; 3 – разбавление грязевулканических вод метеорными водами на современном этапе деятельности вулкана / Fig. 5. Evolution of isotopic composition of underground waters during formation and activity of the Yuzhno-Sakhalinsk mud volcano: I - isotopic composition of seawaters; II - isotopic composition of mud volcanic waters; III - isotopic composition of surface waters; 1a - dilution of fossil seawaters with surface waters after marine regression; 1b - dilution of fossil seawaters with waters produced during the dehydration of clay minerals; 2 - isotopic exchange of oxygen-18 with enclosing rocks; 3 - dilution of mud volcanic waters with surface waters at stage of the modern activity of the mud volcano

залежи. Большое количество растворенного CO_2 способствует интенсивному гидролизу водовмещающих пород, что приводит к дополнительному поступлению в водный раствор ряда макро- и микроэлементов. Предполагается также, что основным источником водной фазы грязевулканического вещества для рассматриваемого вулкана являются седиментационно-погребенные воды морского генезиса. Изотопный состав грязевулканических вод является результатом наложения нескольких возможных процессов, протекающих на разных этапах деятельности вулкана: смешения с метеорными и дегидратационными водами, изотопного обмена по кислороду-18 с водовмещающими породами.

Литература

1. Чудаев О.В. Состав и условия образования современных гидротермальных систем Дальнего Востока России. Владивосток : Дальнаука, 2003. 216 с.
2. Бортникова С.Б., Бессонова Е.П., Гора М.П., Шевко А.Я., Панин Г.Л., Ельцов И.Н., Жарков Р.В., Котенко Т.А., Бортникова С.П., Маништейн Ю.А., Котенко Л.В., Козлов Д.Н., Абросимова Н.А., Карин Ю.Г., Поспеева Е.В., Казанский Л.Ю. Газогидротермы активных вулканов Камчатки и Курильских островов: состав, строение, генезис. Новосибирск : ИНГГ СО РАН, 2013. 282 с.
3. Еришов В.В. Характерные особенности химического состава вод Южно-Сахалинского грязевого вулкана // Геологическая эволюция взаимодействия воды с горными породами : материалы II Всерос. конф. с междунар. участием. Владивосток : Дальнаука, 2015. С. 257–260.
4. Kopf A.J. Significance of mud volcanism // *Reviews of Geophysics*. 2002. Vol. 40. P. 1–52.
5. Холодов В.Н. Грязевые вулканы: распространение и генезис // Геология и полезные ископаемые Мирового океана. 2012. № 4. С. 5–27.
6. Mazzini A., Etiopie G. Mud volcanism: An updated review // *Earth-Science Reviews*. 2017. Vol. 168. P. 81–112.
7. Мельников О.А., Еришов В.В. Грязевой (газоводолитокластитовый) вулканизм острова Сахалин: история, результаты и перспективы исследований // *Вестн. ДВО РАН*. 2010. № 6. С. 87–93.
8. Мельников О.А. Структура и геодинамика Хоккайдо-Сахалинской складчатой области. М. : Наука, 1987. 95 с.
9. Гаррелс Р.М., Крайст Ч.Л. Растворы, минералы, равновесия. М. : Мир, 1968. 368 с.
10. Борисов М.В., Шваров Ю.В. Термодинамика геохимических процессов. М. : Изд-во МГУ, 1992. 256 с.
11. Чернышевская З.А. О грязевых вулканах в южной части Сахалина // *Труды СахКНИИ СО АН СССР*. 1958. Вып. 6. С. 118–130.
12. Шилов В.Н., Захарова М.А., Ильев А.Я., Подзоров А.В. Извержение Южно-Сахалинского грязевого вулкана весной 1959 г. // *Труды СахКНИИ СО АН СССР*. 1961. Вып. 10. С. 83–99.
13. Лагунова И.А., Гемп С.Д. Гидрогеохимические особенности грязевых вулканов // *Советская геология*. 1978. № 8. С. 108–124.
14. Якубов А.А., Григорьянц Б.В., Алиев Ад.А., Бабазаде А.Д., Велиев М.М., Гаджиев Я.А., Гусейнзаде И.Г., Кабулова А.Я., Кастрюлин Н.С., Матанов Ф.А., Мустафаев М.Г., Рахманов Р.Р., Сафарова О.Б., Сеидов А.Г. Грязевой вулканизм Советского Союза и его связь с нефтегазоносностью. Баку : Элм, 1980. 167 с.
15. РД 52.24.493-2006. Массовая концентрация гидроркарбонатов и величина щелочности поверхностных вод суши и очищенных сточных вод : методика выполнения измерений титриметрическим методом. Ростов н/Д. : Росгидромет, 2006. 42 с.
16. Арсанова Г.И. Происхождение термальных вод вулканических областей // *Вулканология и сейсмология*. 2014. № 6. С. 44–58.
17. Лаврушин В.Ю., Kopf A., Deyhle A., Степанец М.И. Изотопы бора и формирование грязевулканических флюидов Тамани (Россия) и Кахетии (Грузия) // *Литология и полезные ископаемые*. 2003. № 2. С. 147–182.
18. Еришов В.В., Левин Б.В. Новые данные о вещественном составе продуктов деятельности грязевых вулканов Керченского полуострова // *Докл. АН*. 2016. Т. 471, № 1. С. 82–86.
19. Федоров Ю.А. Стабильные изотопы и эволюция гидросферы. М. : Истина, 1999. 370 с.
20. Planke S., Svensen H., Hovland M., Banks D.A., Jamtveit B. Mud and fluid migration in active mud volcanoes in Azerbaijan // *Geo-Marine Letter*. 2003. Vol. 23. № 3–4. P. 258–268.
21. You C.F., Gieskes J.M., Lee T., Yui T., Chen H. Geochemistry of mud volcano fluids in the Taiwan accretionary prism // *Applied Geochemistry*. 2004. Vol. 19, № 5. P. 695–707.
22. Ray S.J., Kumar A., Sudheer A.K., Deshpande R.D., Rao D.K., Patil D.J., Awasthi N., Bhutani R., Bhushan R., Dayal A.M. Origin of gases and water in mud volcanoes of Andaman accretionary prism: implications for fluid migration in forearcs // *Chemical Geology*. 2013. Vol. 347. P. 102–113.
23. Лаврушин В.Ю., Дубинина Е.О., Авдеенко А.С. Изотопный состав кислорода и водорода вод грязевых вулканов Тамани (Россия) и Кахетии (Восточная Грузия) // *Литология и полезные ископаемые*. 2005. № 2. С. 143–158.
24. Verma S.P., Pandarinath K., Santoyo E. SolGeo: A new computer program for solute geothermometers and its application to Mexican geothermal fields // *Geothermics*. 2008. Vol. 37, № 6. P. 597–621.
25. Алексеев В.А. Кинетика и механизмы реакций полевых шпатов с водными растворами. М. : ГЕОС, 2002. 256 с.

26. Веселов О.В., Соинов В.В. Тепловой поток Сахалина и Южных Курильских островов // Геодинамика тектоносферы зоны сочленения Тихого океана с Евразией. Южно-Сахалинск : ИМГиГ ДВО РАН, 1997. Т. IV. С. 153–176.

27. Сырык И.М. Нефтегазоносность восточных склонов Западно-Сахалинских гор. М. : Наука, 1968. 248 с.

28. Полоник Н.С., Шакиров Р.Б., Сорочинская А.В., Обжиров А.И. Изучение состава углеводородных компонентов Южно-Сахалинского и Пугачевского грязевых вулканов // Доклады Академии наук. 2015. Т. 462, № 1. С. 79–83.

29. Ершов В.В., Шакиров Р.Б., Обжиров А.И. Изотопно-геохимические характеристики свободных газов Южно-Сахалинского грязевого вулкана и их связь с региональной сейсмичностью // Докл. АН. 2011. Т. 440, № 2. С. 256–261.

30. Смирнов С.И. Введение в изучение геохимической истории подземных вод седиментационных бассейнов. М. : Недра, 1974. 264 с.

References

1. Chudaev O.V. *Sostav i usloviya obrazovaniya sovremennykh gidrotermal'nykh sistem Dal'nego Vostoka Rossii* [Composition and origin of the hydrothermal systems of the Far East Russia]. Vladivostok: Dal'nauka, 2003, 216 p.

2. Bortnikova S.B., Bessonova E.P., Gora M.P. [i dr.]. *Gazogidrotermny aktivnykh vulkanov Kamchatki i Kuril'skikh ostrovov: sostav, stroenie, genezis* [Gashydrotherms of active volcanoes of the Kamchatka and the Kuril Islands: composition, structure, genesis]. Novosibirsk: INGG SO RAN, 2013, 282 p.

3. Ershov V.V. [Characteristic features of chemical composition of waters of the Yuzhno-Sakhalinsk mud volcano]. *Geologicheskaya evolyutsiya vzaimodeistviya vody s gornymi porodami* [Geological evolution of the interaction of water with rocks]. Materials of the II All-Russian Conference with the International participation. Vladivostok: Dal'nauka, 2015, pp. 257-260.

4. Kopf A.J. Significance of mud volcanism. *Reviews of Geophysics*. 2002, vol. 40, pp. 1-52.

5. Kholodov V.N. Gryazevye vulkany: rasprostranenie i genezis [Mud volcanoes: distribution and genesis]. *Geologiya i poleznye iskopaemye Mirovogo okeana*. 2012, No. 4, pp. 5-27.

6. Mazzini A., Etiopie G. Mud volcanism: An updated review. *Earth-Science Reviews*. 2017, vol. 168, pp. 81-112.

7. Mel'nikov O.A., Ershov V.V. Gryazevoi (gazovodolitoklastitovyi) vulkanizm ostrova Sakhalin: istoriya, rezultaty i perspektivy issledovaniya [Mud (gas-water-lithoclastite) volcanism of the Sakhalin Island: history, results and prospects in research]. *Vestnik DVO RAN*. 2010, No. 6, pp. 87-93.

8. Mel'nikov O.A. *Struktura i geodinamika Khokkaido-Sakhalinskoi skladchatoi oblasti* [Structure and geodynamics of the Hokkaido-Sakhalin folded region]. Moscow: Nauka, 1987, 95 p.

9. Garrels R.M., Kraist Ch.L. *Rastvory, mineraly, ravnovesiya* [Solutions, Minerals and Equilibria]. Moscow: Mir, 1968, 368 p.

10. Borisov M.V., Shvarov Yu.V. *Termodinamika geokhimicheskikh protsessov* [Thermodynamics of geochemical processes]. Moscow: Izd-vo MGU, 1992, 256 p.

11. Chernyshevskaya Z.A. O gryazevykh vulkanakh v yuzhnoi chasti Sakhalina [About mud volcanoes in the Southern Sakhalin]. *Trudy SakhKNII SO AN SSSR*. 1958, iss. 6, pp. 118-130.

12. Shilov V.N., Zakharova M.A., P'ev A.Ya., Podzorov A.V. Izverzhenie Yuzhno-Sakhalinskogo gryazeвого vulkana vesnoi 1959 g. [Eruption of the Yuzhno-Sakhalinsk mud volcano in the spring of 1959]. *Trudy SakhKNII SO AN SSSR*. 1961, iss. 10, pp. 83-99.

13. Lagunova I.A., Gemp S.D. Hidrogeokhimicheskie osobennosti gryazevykh vulkanov [Hydrogeochemical features of mud volcanoes]. *Sovetskaya geologiya*. 1978, No. 8, pp. 108-124.

14. Yakubov A.A., Grigor'yants B.V., Aliev Ad.A. [i dr.]. *Gryazevoi vulkanizm Sovetskogo Soyuza i ego svyaz' s neftegazonosnost'yu* [Mud volcanism of the Soviet Union and its relationship to presence of oil and gas]. Baku: Elm, 1980, 167 p.

15. RD 52.24.493-2006. *Massovaya kontsentratsiya gidrokarbonatov i velichina shchelochnosti poverkhnostnykh vod sushi i ochishchennykh stochnykh vod. Metodika vypolneniya izmerenii titrimetricheskimi metodami* [Mass concentration of hydrocarbonates and alkalinity values of inland surface water and treated wastewater. Methodology for measuring procedures by titrimetric method]. Rostov-on-Don: Rosgidromet, 2006, 42 p.

16. Arsanova G.I. Proiskhozhdenie termal'nykh vod vulkanicheskikh oblastei [The origin of thermal waters in volcanic areas]. *Vulkanologiya i seismologiya*. 2014, vol. 8, iss. 6, pp. 361-374.

17. Lavrushin V.Yu., Kopf A., Deyhle A., Stepanets M.I. Izotopy bora i formirovanie gryazevulkanicheskikh flyuidov Tamani (Rossiya) i Kakhetii (Gruziiya) [Isotopes of boron and formation of mud volcanic fluids of Taman (Russia) and Kakhetia (Georgia)]. *Litologiya i poleznye iskopaemye*. 2003, vol. 38, iss. 2, pp. 120-153.

18. Ershov V.V., Levin B.V. Novye dannye o veshchestvennom sostave produktov deyatelnosti gryazevykh vulkanov Kerchenskogo poluostrova [New data on the material composition of mud volcano products on Kerch Peninsula]. *Dokl. AN*. 2016, vol. 471, iss. 1, pp. 1149-1153.

19. Fedorov Yu.A. *Stabil'nye izotopy i evolyutsiya gidrosfery* [Stable isotopes and evolution of the hydrosphere]. Moscow: Istina, 1999, 370 p.

20. Planke S., Svensen H., Hovland M., Banks D.A., Jamtveit B. Mud and fluid migration in active mud volcanoes in Azerbaijan. *Geo-Marine Letter*. 2003, vol. 23, No. 3-4, pp. 258-268.

21. You C.F., Gieskes J.M., Lee T., Yui T., Chen H. Geochemistry of mud volcano fluids in the Taiwan accretionary prism. *Applied Geochemistry*. 2004, vol. 19, No. 5, pp. 695-707.

22. Ray S.J., Kumar A., Sudheer A.K., Deshpande R.D., Rao D.K., Patil D.J., Awasthi N., Bhutani R., Bhushan R., Dayal A.M. Origin of gases and water in mud volcanoes of Andaman accretionary prism: implications for fluid migration in forearcs. *Chemical Geology*. 2013, vol. 347, pp. 102-113.

23. Lavrushin V.Yu., Dubinina E.O., Avdeenko A.S. Izotopnyi sostav kisloroda i vodoroda vod gryazevykh vulkanov Tamani (Rossiya) i Kakhetii (Vostochnaya Gruziiya) [Isotopic composition of oxygen and hydrogen in mud-volcanic waters from Taman (Russia) and Kakhetia (Eastern Georgia)]. *Litologiya i poleznye iskopaemye*. 2005, vol. 40, iss. 2, pp. 123-137.

24. Verma S.P., Pandarinath K., Santoyo E. SolGeo: A new computer program for solute geothermometers and its application to Mexican geothermal fields. *Geothermics*. 2008, vol. 37, No. 6, pp. 597-621.

25. Alekseev V.A. *Kinetika i mekhanizmy reaktsii polevykh shpatov s vodnymi rastvorami* [Kinetics and mechanisms of the reactions of feldspars with aqueous solutions]. Moscow: GEOS, 2002, 256 p.

26. Veselov O.V., Soinov V.V. [Heat flux of the Sakhalin and the South Kuril Islands]. *Geodinamika tektonosfery zony sochleneniya Tikhogo okeana s Evraziei* [Geodynamics of the tectonosphere of the zone of articulation of the

Pacific Ocean with Eurasia]. Yuzhno-Sakhalinsk: IMGIG DVO RAN, 1997, vol. IV, pp. 153-176.

27. Siryk I.M. *Neftegazonosnost' vostochnykh sklonov Zapadno-Sakhalinskikh gor* [Presence of oil and gas of the eastern slopes of the Western Sakhalin mountains]. Moscow: Nauka, 1968, 248 p.

28. Polonik N.S., Shakirov R.B., Sorochinskaya A.V., Obzhirov A.I. Izuchenie sostava uglevodorodnykh komponentov Yuzhno-Sakhalinskogo i Pugachevskogo gryazevykh vulkanov [Studies of the composition of hydrocarbon components of the Yuzhno-Sakhalinsk and Pugachevo mud volcanoes]. *Doklady Akademii nauk*. 2015, vol. 462, No. 1, pp. 463-467.

29. Ershov V.V., Shakirov R.B., Obzhirov A.I. Izotopno-geokhimicheskie kharakteristiki svobodnykh gazov Yuzhno-Sakhalinskogo gryazevogo vulkana i ikh svyaz' s regional'noi seismichnost'yu [Isotopic-geochemical characteristics of free gases of the South Sakhalin mud volcano and their relationship to regional seismicity]. *Dokl. AN*. 2011, vol. 440, No. 1, pp. 1334-1339.

30. Smirnov S.I. *Vvedenie v izuchenie geokhimicheskoi istorii podzemnykh vod sedimentatsionnykh basseinov* [Introduction to the study of the geochemical history of underground waters of sedimentation basins]. Moscow: Nedra, 1974, 264 p.

УДК 502.335

DOI 10.23683/0321-3005-2017-4-1-121-127

ОСНОВНЫЕ ТЕНДЕНЦИИ ИЗМЕНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ И СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКОГО РАЗВИТИЯ УГЛЕПРОМЫШЛЕННЫХ РАЙОНОВ ВОСТОЧНОГО ДОНБАССА В СВЯЗИ С РЕСТРУКТУРИЗАЦИЕЙ УГОЛЬНОЙ ОТРАСЛИ

© 2017 г. В.Е. Закруткин¹, Ю.Ю. Меринова¹, Е.В. Гибков¹, Ю.Н. Меринов²

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

²Ростовский филиал Российской таможенной академии, Ростов-на-Дону, Россия

THE MAIN TRENDS OF ENVIRONMENT STATE AND SOCIO-ECONOMIC DEVELOPMENT OF COAL MINING REGIONS IN EASTERN DONBASS IN CONNECTION WITH THE COAL INDUSTRY RESTRUCTURING

V.E. Zakrutkin¹, Yu.Yu. Merinova¹, E.V. Gibkov¹, Yu.N. Merinov²

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

²Rostov Branch of Russian Custom's Academy, Rostov-on-Don, Russia

Закруткин Владимир Евгеньевич – доктор геолого-минералогических наук, профессор, заведующий кафедрой геоэкологии и прикладной геохимии, Институт наук о Земле, Южный федеральный университет, ул. Зорге, 40, г. Ростов-на-Дону, 344090, Россия, e-mail: vezak@list.ru

Vladimir E. Zakrutkin - Doctor of Geology and Mineralogy, Professor, Head of the Department of Geoecology and Applied Geochemistry, Institute of Earth Sciences, Southern Federal University, Zorge St., 40, Rostov-on-Don, 344090, Russia, e-mail: vezak@list.ru

Меринова Юлия Юрьевна – кандидат географических наук, старший преподаватель, кафедра социально-экономической географии и природопользования, Институт наук о Земле, Южный федеральный университет, ул. Зорге, 40, г. Ростов-на-Дону, 344090, Россия, e-mail: yuliyamerinova@yandex.ru

Yuliya Yu. Merinova - Candidate of Geography, Senior Lecturer, Department of Socio-Economic Geography and Nature Management, Institute of Earth Sciences, Southern Federal University, Zorge St., 40, Rostov-on-Don, 344090, Russia, e-mail: yuliyamerinova@yandex.ru

Гибков Евгений Викторович – кандидат географических наук, старший преподаватель, кафедра геоэкологии и прикладной геохимии, Институт наук о Земле, Южный федеральный университет, ул. Зорге, 40, г. Ростов-на-Дону, 344090, Россия, e-mail: irvict@mail.ru

Eugeniy V. Gibkov - Candidate of Geography, Senior Lecturer, Department of Geoecology and Applied Geochemistry, Institute of Earth Sciences, Southern Federal University, Zorge St., 40, Rostov-on-Don, 344090, Russia, e-mail: irvict@mail.ru

Меринов Юрий Николаевич – кандидат географических наук, доцент, кафедра управления и экономики таможенного дела, Ростовский филиал Российской таможенной академии, пр. Будёновский, 20, г. Ростов-на-Дону, 344002, Россия, e-mail: unmerinov@gmail.com

Yuriy N. Merinov - Candidate of Geography, Associate Professor, Department of Management and Economics of Customs, Rostov Branch of Russian Custom's Academy, Budennovskii Ave., 20, Rostov-on-Don, 344002, Russia, e-mail: unmerinov@gmail.com

Приведены данные об экологическом состоянии и особенностях социально-экономического развития Восточного Донбасса. Проанализированы изменения в масштабах антропогенного воздействия на основные компоненты окружающей среды – атмосферный воздух, почвенный покров, поверхностные и подземные воды – при реализации природоохранных мероприятий в регионе. Выявлены тенденции экономического развития, особенности демографических и социальных процессов, использования трудовых ресурсов и привлечения инвестиций. Намечены основные направления поддержания процесса гармонизации экономического, социального и экологического развития Восточного Донбасса.

Ключевые слова: *углепромышленные территории, Восточный Донбасс, социально-экономическое развитие, экологическая ситуация.*

The article presents data on ecological state and features of socio-economic development in Eastern Donbass. Changes in the scale of anthropogenic impact on main components of environment - atmosphere, soils, surface and groundwater - in the implementation of environmental measures in the region are analyzed. The paper deals with tendencies of economic development, features of demographic and social processes, using of labor force and attraction of investments. The main directions of maintenance of harmonization process of economic, social and ecological development in Eastern Donbass are outlined.

Keywords: coal-mining territories, Eastern Donbass, social and economic development, ecological situation.

Поступательное региональное развитие предполагает, как известно, сбалансированность и согласованность между экономическими, социальными и экологическими интересами населения. Возможность его достижения в значительной мере зависит от принимаемых региональными органами власти решений по проблемам охраны окружающей среды как неотъемлемой и равнозначной части общего процесса развития территории.

Проблема гармонизации развития актуальна для всех субъектов Российской Федерации, но если в регионах с диверсифицированной экономикой существует больше возможностей перестройки хозяйства, то в узкоспециализированных территориях, в частности, углепромышленных, позитивные изменения отраслевой структуры и природоохранной деятельности реализуется значительно сложнее. Господствовавший на протяжении XX в. приоритет стратегических и индустриальных потребностей над экологическими привёл к формированию в углепромышленных районах существенных перекосов в эколого-экономическом балансе, что выразилось в тотальном загрязнении всех компонентов окружающей среды.

Переход страны к рыночной экономике сопровождался масштабным экономическим кризисом, в том числе в угольной отрасли, следствием которого стали остановка деятельности многих добывающих предприятий и даже отдельных угольных бассейнов (Подмосковный, Кизеловский и др.), всплеск безработицы и резкое падение уровня жизни населения. Закрытие шахт, часто происходившее без необходимых природоохранных мероприятий в силу ограниченности финансовых ресурсов у собственников и отсутствия контроля со стороны государства, привело к усугублению и без того непростой экологической ситуации. Данные тенденции в полной мере проявились и в Восточном Донбассе – традиционной зоне концентрации горнодобывающей промышленности Ростовской области – который к середине 1990-х гг. из локомотива экономики южного региона перешёл в категорию депрессивных территорий.

Природные компоненты окружающей среды Восточного Донбасса на протяжении многих десятилетий испытывают значительную антропогенную нагрузку, в общей доле которой основную роль играли объекты добычи и переработки угля. Негативное влияние на природную среду резко усилилось в последние годы в связи с реструктуризацией угольной промышленности, которая предусматривала ликвидацию нерентабельных шахт в основном путём их затопления. Закрытие шахт осуществлялось на фоне глубокого экономического кризиса 90-х гг.,

в связи с чем мероприятия по снижению экологических последствий проводились крайне ограниченно, без единого системного подхода. В результате этого возникли новые и обострились традиционные экологические проблемы Восточного Донбасса.

Одним из наиболее характерных источников экологической опасности в пределах углепромышленных территорий являются твёрдые отходы – отвалы угольных шахт, хвостохранилища обогатительных фабрик, золошлаковые отходы и др., складываемые на поверхности в виде терриконов высотой до 60 м. К началу реструктуризации угольной отрасли на территории Донбасса находилось более 400 терриконов общим объёмом порядка 400 000 тыс. м³, которые занимали более 3 тыс. га наиболее плодородных земель – чернозёмов. Породные отвалы являются мощным источником загрязнения окружающей среды, в первую очередь атмосферного воздуха. Поступление загрязняющих веществ в атмосферу происходит в результате ветровой эрозии и самовозгорания терриконов. По имеющимся оценкам, в процессе дефляции за год с одного террикона в атмосферу поступает свыше 100 т пыли, которая, оседая, загрязняет 2,5 га сельскохозяйственных земель. А один интенсивно горящий отвал является источником выделения в атмосферный воздух от 5 до 25 т в год опасных для здоровья населения загрязняющих веществ – главным образом оксида углерода, диоксида серы, сероводорода и оксидов азота, а также тяжёлых металлов – Ti, Cr, Cd, As, Co и др. [1]. Следствием этого стало формирование в Восточном Донбассе комплексной атмогеохимической аномалии, отвечающей критическому и кризисному уровням загрязнённости атмосферного воздуха [2].

В результате затопления нерентабельных шахт массовым явлением стал самоизлив высокоминерализованных техногенных вод на дневную поверхность, что оказывало существенное влияние на качество поверхностных вод. При этом наиболее уязвимыми оказались малые и средние реки в силу невысокой самоочищающей способности. Многие из них практически полностью утратили свои природные функции, стали непригодными для использования не только в питьевых, но и в хозяйственных целях [3]. Сопоставимая по глубине трансформация затронула и подземные воды региона. Нарушение их режима, баланса и химического состава наложилось на негативные природные (засушливые климатические условия) и хозяйственные факторы (густонаселённость аграрных регионов). Несмотря на высокую потребность населения, подземные воды так же, как и поверхностные, не могли в полной мере использоваться в хозяйственных целях из-за сильной загрязнённости [4].

За долгий период техногенного воздействия по мере увеличения площади и глубины ведения горных работ, снижения уровня подземных вод под влиянием шахтного водоотлива нарастало региональное нарушение равновесия в системе минеральный скелет горных пород – подземные воды. Следствием этого стали возникновение и развитие просадок земной поверхности, подвижек породного массива в зонах прямого влияния горных работ. Общая площадь потенциально опасных зон по возникновению провалов земной поверхности к началу действия мероприятий по оздоровлению экологической ситуации составляла 350 га, на которых расположено порядка 1500 жилых домов.

При закрытии шахт характерными процессами стали вытеснение подземными водами опасных газов (метана, уголекислоты и др.) из горного массива на дневную поверхность и проникновение их в здания и сооружения. В результате инструментальных исследований выявлено более 300 опасных по газовыделению участков, в которых расположено более 9 000 жилых и административно-хозяйственных зданий.

Процесс реструктуризации угольной промышленности вызвал значительные изменения в экономике и социальной сфере Восточного Донбасса. Оставшиеся в 90-е гг. без государственной поддержки приватизированные предприятия угольной промышленности показали низкую рентабельность и технологическую отсталость. Производственные фонды большинства шахт ввиду высокого физического износа оборудования (доходившего в отдельных шахтах до 70–80 %) и морального устаревания применявшихся технологий добычи для стабильной работы требовали глубокой и дорогостоящей модернизации, средств на которую у новых собственников часто не хватало. За счёт многолетней эксплуатации возникла необходимость отработки некондиционных запасов угля на большой глубине ведения горных работ, что в совокупности с дополнительными затратами на поддержку горных выработок в рабочем состоянии увеличивало себестоимость производимой продукции, ещё больше снижая её конкурентоспособность. Разрыв устоявшихся хозяйственных кооперативных связей с бывшими союзными государствами, усложнивший транспортно-логистические потоки, вытеснение угля более дешёвым и доступным природным газом, ставшим основным видом топлива в стране, существенно

обострили кризис в отрасли и привели к банкротству значительной части шахтёрских предприятий. В нулевые годы произошла некоторая стабилизация экономической ситуации за счёт возобновления вливания государственных инвестиций в отрасль, завершения этапа приватизации и оптимизации шахтного производства, наметился рост добычи угля. Однако мировой кризис 2008–2010 гг. нарушил эти тенденции. Сокращение зарубежных контрактов, свертывание объёмов внутреннего рынка, усложнение условий получения кредитов для угледобывающих предприятий, снижение инвестиций в Россию и, в частности, в инвестиционные проекты Восточного Донбасса привели к падению эффективности производства. В результате из 64 шахт, действовавших в Ростовской области с начала реструктуризации, осталось только 6 стабильно работающих, ещё 6 находятся в режиме поддержания жизнедеятельности, реконструкции и внешнего наблюдения. Полностью утратил угольную специализацию Донецк, все угольные предприятия были закрыты в Новошахтинске и Шахтах. Как следствие, добыча угля в области сократилась более чем в 6 раз (с 30 до 4,7 млн т в год) [5].

Данные процессы, особенно остро сказавшиеся на экономике моногородов, специализировавшихся на горнодобывающих отраслях, не могли не оказать негативного влияния на уровень жизни населения региона [6]. В 1990-е гг. в Восточном Донбассе сформировались тенденции депопуляции, деградации хозяйственного комплекса, роста безработицы и резкого снижения качества жизни населения, пик которых пришёлся на начало нового столетия. Динамика численности густонаселённого региона, в среднем составляющего пятую часть от населения области, приняла устойчивый отрицательный тренд, сократившись с 1998 г. на 220 тыс. чел. (табл. 1).

Произошли падение уровня рождаемости (до 8,4 ‰ в 2000 г.) и скачок смертности (до 20,5 ‰ в сравнении со средним значением по области – 15,5 ‰), значительный разрыв которых и по сей день определяет высокую естественную убыль населения территории. Усугубляет положение и постоянный миграционный отток: в поисках применения труда и достойного заработка регион покидает молодое экономически активное население. В результате данных процессов в Восточном Донбассе сложилась острая

Таблица 1

Динамика численности населения Восточного Донбасса [7, 8] / Population dynamics of the Eastern Donbass [7, 8]

Регион	1989	1998	2000	2004	2008	2012	2016
Ростовская область, тыс. чел.	4292,3	4387,6	4340,8	4365,6	4254,4	4260,6	4231,3
Восточный Донбасс, тыс. чел.	979,7	984,3	967,5	966,2	933,2	905,5	763,7
Доля Восточного Донбасса от области в целом, %	19,6	19,2	19,1	19,2	21,9	21,3	18,0

демографическая ситуация, усиливаемая концентрацией здесь старших возрастных групп (26–30 %), что, в свою очередь, также способствовало низкой рождаемости и повышенной смертности.

Стагнирующая экономика региона не содействовала увеличению доходов и росту занятости населения. Высокие темпы закрытия шахт привели к массовому высвобождению рабочей силы и необходимости трудоустройства десятков тысяч узкоспециализированных работников. Количество занятых в угольной промышленности сократилось в 15 раз (со 117,3 до 7,5 тыс. чел.) [5], создав один из самых высоких показателей безработицы в Ростовской области. В 2008 г. в среднем по области численность безработных составляла 6–8 чел. в расчёте на 1000 жителей, в отдельных городах и районах Донбасса она доходила до 10–20 чел., а в Шахтах превышала показатель 57 безработных на 1000 чел. (табл. 2). Относительно удовлетворительная в этом отношении ситуация в

моногородах (1–5 безработных) нивелировалась распространённостью в них режимов неполной занятости, сокращённого рабочего дня, неоплачиваемых отпусков и долгов по выплате заработной платы, растягивающихся на многие месяцы. Как следствие, произошли резкое снижение доходов населения и возрастание социальной напряжённости в депрессивном регионе. Среднемесячная начисленная заработная плата одного работника региона, как горожан, так и сельских жителей, была в среднем на 1,5–3 тыс. р. ниже средней по области. Аналогичная ситуация сложилась и при выплате пенсий с той лишь разницей, что из-за её общего достаточно низкого размера отставание региона от области в целом не было столь существенно (в среднем на 300–600 р.) [7, 8]. В этот период остро проявились слабая проработанность конкретных мер по адаптации граждан к новым экономическим условиям и недостаточность социальной поддержки населения.

Таблица 2

Основные показатели доходов и занятости населения Восточного Донбасса в сравнении с показателями по Ростовской области [7, 8] / Key indicators of income and employment of the population of the Eastern Donbass in comparison with the figures for the Rostov Region

Зоны Восточного Донбасса	Среднемесячная начисленная заработная плата одного работника, р.			Численность безработных на 1000 жителей		
	2000	2008	2015	2000	2008	2015
Ростовская область	1384,4	12539,0	25007,5	2,9	6,7	4,7
Гуково	1503,1	10231,6	18045,3	2,9	5,4	4,0
Донецк	1302,6	9451,9	16831,1	4,6	1,3	1,4
Зверево	1884,4	10217,7	23623,5	6,1	3,0	2,0
Каменск-Шахтинский	1416	11030,3	23172,8	4,9	11,2	10,1
Новошахтинск	1299,1	8987,1	18423,9	3,9	13,1	8,2
Шахты	1203,3	10847,9	21459,0	5,3	57,5	46,2
Белокалитвинский район	951	10083,6	19918,1	-	16,7	7,9
Каменский район	714,1	9117,0	19556,9	2,8	6,8	5,1
Красносулинский район	2318,7	11538,0	22312,3	-	21,9	30,8
Октябрьский район	1124,4	10526,3	24164,6	3,0	2,2	1,6
Родионово-Несветайский район	777,9	9230,7	20127,1	3,1	0,9	0,8

Таким образом, первый этап реструктуризации угольной промышленности оказал крайне негативное влияние на социальную сферу Донбасса, проявившись в росте безработицы, невозможности трудоустройства по профессии значительной части населения, снижении реальных располагаемых доходов, росте трудовой эмиграции и усилении депопуляционных процессов.

Сформировавшаяся в начальном этапе реструктуризации неблагоприятная экологическая ситуация потребовала принятия радикальных природоохранных мер, направленных на оздоровление экологической обстановки в регионе.

Так, в частности, снижение нагрузки на атмосферный воздух осуществлялось путём тушения горящих породных отвалов и рекультивации перегоревших. К 2008 г. на территории Восточного Донбасса насчитывалось 44 горящих терриконика, а в результате проводимых работ их количество сократилось до 10. Таким образом, объём поступления газообразных загрязняющих веществ от этих источников сократился примерно на 500 т в год. Работы по рекультивации отвалов на треть сократили площадь, которую они занимали прежде. Это позволило существенно снизить объёмы пылевой нагрузки в регионе – с 280 тыс. т/год пыли в 2008 г. до 190 тыс. т/год в 2016 г. Пропорционально этому сократилась и площадь сельскохозяйственных земель, подвергавшаяся интенсивному воздействию продуктов техногенной дефляции (с исходных 1000 га до 680 га в 2016 г.).

Для улучшения качества поверхностных вод были построены 6 водоотливных комплексов и 5 сооружений для очистки шахтных вод. Общий объём очищенных шахтных вод достиг около 30 млн м³ из

37 млн м³ образующихся ежегодно. Результатом работы этих объектов послужило значительное снижение количества загрязняющих веществ, поступающих в речную сеть. Так, объемы поступления железа – типоморфного элемента техногенных шахтных вод – сократились в 7 раз (с 790 т/год в 2008 г. до 113 т/год в 2015-м). Наряду с этим проводилась очистка русел малых рек, что также способствовало снижению уровня их загрязненности. Однако данные мероприятия в настоящее время осуществляются достаточно локализовано, поэтому не могут способствовать радикальному изменению качества вод. Тем не менее, по имеющимся данным, для большей части территории отмечается стабилизация, а в отдельных случаях и улучшение гидроэкологической обстановки (рис. 1). Все это свидетельствует о том, что предпринимаемых усилий оказалось достаточно для предотвращения формирования здесь зоны острого экологического неблагополучия, но для существенного оздоровления экологической обстановки требуется дополнительный комплекс мероприятий [9].

В последние годы стали заметны первые положительные изменения и в социально-экономической сфере региона, проявляющиеся в наметившемся росте инвестиций в реальный сектор экономики, открытии новых предприятий, снижении масштабов депопуляции и стабилизации социального развития. Введение импортозамещающих мероприятий несколько стабилизировало ситуацию, хотя для значительных изменений требуется больше времени. Уровень инвестиций (как частных, так и государственных) в основной капитал по полному кругу организаций с 2011 по 2015 г. вырос в 3 раза (на 48,5 млрд р.), а доля Восточного Донбасса в областном инвестиционном объеме возросла с 17 до 25 % [7]. Основная часть инвестиционного потока пришлась на реальный сектор экономики, строительство новых и модернизацию действующих обрабатывающих предприятий взамен закрывающихся угольных. В результате произошло переориентирование региона с добывающих отраслей на обрабатывающие (рис. 2).

В пределах региона размещается более 15 % от всех предприятий Ростовской области (около 1/3 из них в Шахтах), количество которых с 2012 г. возросло на 6 %. Здесь действуют приуроченные к городским округам инвестиционные площадки и индустриальные парки (Гуковский, Красносулинский, Октябрьский), которые должны стать

опорами развития промышленного потенциала данной территории. При этом, несмотря на закрытие многих старых шахт, регион сохраняет угольную специализацию, в рамках которой планируется открытие новых современных шахт и сопутствующих производств. Стоимость основных фондов горнодобывающих отраслей с 2010 по 2015 г. выросла более чем в два раза и продолжает увеличиваться.

Определенный социальный результат, которого удалось достичь в регионе при перестройке экономики и закрытии ключевых предприятий в моногородах, – постепенное уменьшение безработицы, несмотря на отдельные ожидаемые всплески по территориям в период закрытия шахт. В целом по области с 2009 по 2015 г. отмечается снижение численности безработных (с 6,7 до 4,7 чел. на 1000 жителей) во всех муниципальных образованиях Донбасса [7].

Сокращение работающих в отдельных районах происходило поэтапно, в течение нескольких лет, значительная часть высвободившейся рабочей силы была переориентирована на вновь открытые производства, не связанные с угледобычей, за счет постепенного создания многоотраслевой специализации хозяйства региона, осуществлялись поддержка самозанятости населения, содействие предпринимательской инициативе безработных, профессиональное переобучение шахтеров.

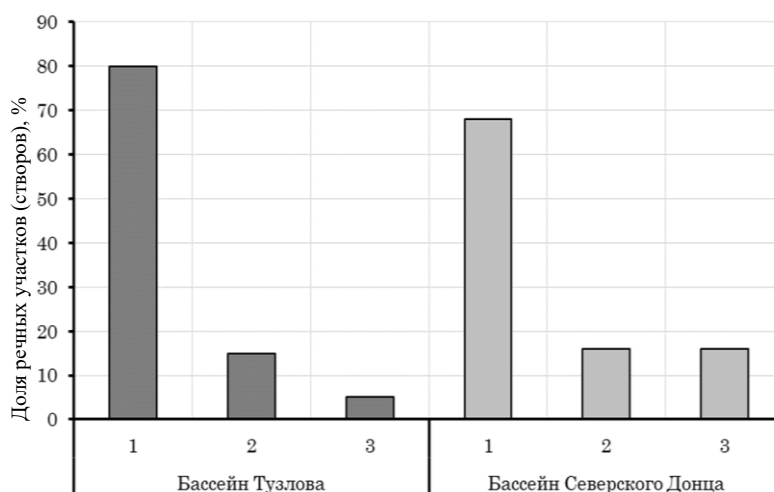


Рис. 1. Соотношение участков рек (створов) в бассейнах Тузлова и Северского Донца с разными тенденциями изменчивости качества воды: 1 – стабильно высокая степень загрязненности воды (4-й или 5-й класс качества); 2 – улучшение качества воды с 5-го на 4-й класс качества; 3 – ухудшение качества воды с 4-го на 5-й класс качества / Fig. 1. Ratio of river cross-sections in the Tuzlov and Seversky Donets basins with different trends of water quality variability: 1 - stably high degree of water pollution (4th or 5th grade of quality); 2 - improvement of water quality from the 5th to the 4th grade of quality; 3 - deterioration of water quality from the 4th to the 5th grade of quality

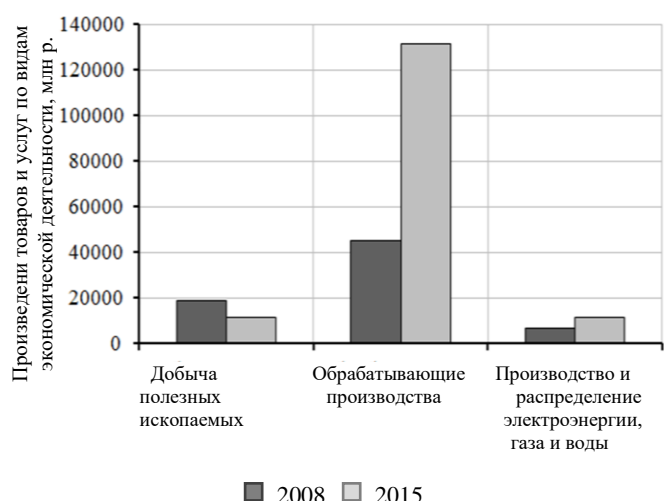


Рис. 2. Динамика структуры экономики Восточного Донбасса, млн р. [7, 8] / Fig. 2. Dynamics of economy structure of Eastern Donbass, million rubles

Однако проблема трудоустройства жителей шахтерских территорий еще очень далека от решения. Улучшению уровня жизни способствует обновление социальной инфраструктуры региона. Так, за период реструктуризации было построено свыше 200 социальных объектов, включая котельные (23), сооружения газификации (36), водоснабжения и канализации (66), из ветхого жилья было переселено около 10 тыс. семей [5].

В демографических процессах региона намечаются определённые положительные перемены. Общей тенденцией для страны, распространившейся в том числе и на Донбасс, стали постепенное увеличение уровня рождаемости (до 10,4 ‰), понижение смертности (до 15,4 ‰) и сокращение естественной убыли (до -5 ‰), хотя они всё ещё не выходят на среднеобластные значения (табл. 3).

Таблица 3

Демографические показатели Восточного Донбасса, ‰ [7, 8] / The demographics of Eastern Donbass, ‰ [7, 8]

Регион	1996	2000	2008	2015
Рождаемость				
Ростовская область	8,8	8,2	10,8	12,1
Восточный Донбасс	10,0	8,4	10,2	10,4
Смертность				
Ростовская область	14,9	15,5	15,0	13,9
Восточный Донбасс	19,5	20,5	16,4	15,4
Естественный прирост				
Ростовская область	-6,1	-7,3	-4,2	-1,8
Восточный Донбасс	-9,5	-12,1	-6,2	-5,0

С 2014 г. в Гуково, Донецке, Шахтах и Новошахтинске отмечается миграционный прирост. И если для

первых двух городов он объясняется в первую очередь политическими событиями в приграничных районах, то рост миграционной привлекательности Шахт и Новошахтинска определяется экономическими перспективами округов.

Позитивные процессы, начавшиеся в социально-экономической сфере, сопровождаемые улучшением экологической обстановки, находят свое отражение и в состоянии здоровья населения. Уровень заболеваемости в Восточном Донбассе в последние годы (2011–2015 гг.) в целом по большинству видов болезней имеет тенденцию к снижению. Наблюдается незначительный рост заболеваемости туберкулезом (Донецк) и онкологии (Белокалитвинский и Родионово-Несветайский районы), но он остается в границах среднеобластных показателей.

Проведенный анализ позволил выявить намечающиеся положительные тенденции в изменении экологической обстановки и социально-экономическом развитии Восточного Донбасса, что в целом должно способствовать гармонизации развития региона. Тем не менее существует ряд обстоятельств, которые могут девальвировать достигнутые результаты. К внешним факторам здесь можно отнести замедлившийся экономический рост и снижение уровня доходов населения в пределах большей части Российской Федерации. В ряду внутрирегиональных факторов ключевыми являются планы по развитию угледобывающей отрасли до 2020 г., включающие в себя формирование новых центров угледобычи, а также существенный износ водоотливных комплексов техногенных шахтных вод, возникающий при работе с объемами, превышающими проектные значения.

Таким образом, для сохранения текущей, в целом положительной, динамики развития необходим комплекс оперативных и упреждающих природоохранных мероприятий. Структурные преобразования в экономике углепромышленных территорий должны ориентироваться на социально-экономические приоритеты, социальную защиту и повышение качества жизни населения, предусматривать модернизацию её социальной инфраструктуры, экологическое оздоровление, формирование эффективных и безопасных для окружающей среды производств и т.д. Важным фактором экономического развития региона может стать строительство новых обрабатывающих предприятий, не наносящих ущерба природной среде (легкой и пищевой промышленности) и создание эколого ориентированных производств (заводы по утилизации и переработке отходов), которые, с одной стороны, будут содействовать оздоровлению экологической ситуации, а с другой – обеспечивать занятость населения и рост его благосостояния.

Литература

1. Закруткин В.Е., Гибков Е.В. Техногенные геохимические потоки угледобывающих территорий и их влияние на окружающую среду (на примере Донецкого бассейна) // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2016. № 3. С. 66–71.
2. Экологический атлас Ростовской области / под ред. В.Е. Закруткина. Ростов н/Д. : Изд-во СКНЦ ВШ, 2000. 120 с.
3. Закруткин В.Е., Иваник В.М., Гибков Е.В. Эколого-географический анализ рисков реструктуризации угольной промышленности в Восточном Донбассе // Изв. РАН. Серия географическая. 2010. № 5. С. 94–102.
4. Закруткин В.Е., Склярченко Г.Ю., Гибков Е.В. Особенности химического состава и степень загрязненности подземных вод углепромышленных районов Восточного Донбасса // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2014. № 4. С. 73–77.
5. Концепция развития угольной промышленности Ростовской области на период до 2030 года: постановление правительства Ростовской области № 599 от 05.07.2012 (ред. от 29.12.2014 № 914). URL: <http://consultant.ru> (дата обращения: 02.05.2017).
6. Меринова Ю.Ю., Меринов Ю.Н. Особенности промышленного воздействия на уровень загрязнения воздушной среды в городских округах Ростовской области // Естеств. и техн. науки. 2015. № 8 (86). С. 33–37.
7. Сравнительные показатели социально-экономического положения городских округов и муниципальных районов Ростовской области. 2015 : стат. сб. Ростов н/Д. : Ростовстат, 2016. 392 с.
8. Сравнительные показатели социально-экономического положения городов и районов Ростовской области. 2000 : стат. сб. Ростов н/Д. : Ростоблкомстат, 2001. 320 с.
9. Закруткин В.Е., Склярченко Г.Ю., Бакаева Е.Н., Решетняк О.С., Гибков Е.В., Фоменко Н.Е. Поверхностные и подземные воды в пределах техногенно нарушенных геосистем Восточного Донбасса: формирование химического состава и оценка качества. Ростов н/Д. : Изд-во ЮФУ, 2017. 171 с.

References

1. Zakrutkin V.E., Gibkov E.V. Tekhnogennye geokhimicheskie potoki ugledobyvayushchikh territorii i ikh vliyanie na okruzhayushchuyu sredu (na primere Donetskogo basseina) [Technogenic geochemical flows of coal-mining areas and their impact on the environment (for

example, the Donets basin)]. *Izv. vuzov. Sev.-Kavk. region. Estestv. nauki.* 2016, No. 3, pp. 66-71.

2. *Ekologicheskii atlas Rostovskoi oblasti* [Environmental atlas of Rostov Region]. Ed. V.E. Zakrutkin. Rostov-on-Don: Izd-vo SKNTs VSh, 2000, 120 p.

3. Zakrutkin V.E., Ivanik V.M., Gibkov E.V. *Ekologo-geograficheskii analiz riskov restrukturyzatsii ugol'noi promyshlennosti v Vostochnom Donbasse* [Ecology-geographical analyses of coal industry risks restructure in Eastern Donbass]. *Izvestiya RAN. Seriya geograficheskaya*, 2010, No. 5, pp. 94-102.

4. Zakrutkin V.E., Sklyarenko G.Yu., Gibkov E.V. *Osobennosti khimicheskogo sostava i stepen' zagryaznenosti podzemnykh vod uglepromyshlennykh raionov Vostochnogo Donbassa* [The chemical composition and degree of groundwater contamination in coal-mining areas of the Eastern Donbass]. *Izv. vuzov. Sev.-Kavk. region. Estestv. nauki.* 2014, No. 4, pp. 73-77.

5. *Kontseptsiya razvitiya ugol'noi promyshlennosti Rostovskoi oblasti na period do 2030 goda* [The Concept of Coal Industry Development of Rostov Region]: postanovlenie pravitel'stva Rostovskoi oblasti No. 599 ot 05.07.2012 (red. ot 29.12.2014 No. 914). Available at: <http://consultant.ru> (accessed 02.05.2017).

6. Merinova Yu.Yu., Merinov Yu.N. *Osobennosti promyshlennogo vozdeistviya na uroven' zagryazneniya vozdukhnoi sredy v gorodskikh okrugakh Rostovskoi oblasti* [The features of industrial impact on the level of air pollution in urban districts of the Rostov region]. *Estestvennye i tekhnicheskie nauki.* 2015, No. 8 (86), pp. 33-37.

7. *Sravnitel'nye pokazateli sotsial'no-ekonomicheskogo polozheniya gorodskikh okrugov i munitsipal'nykh raionov Rostovskoi oblasti. 2015* [Comparative indicators of socio-economic situation in urban and municipal districts of Rostov Region. 2015]. Rostov-on-Don: Rostovstat, 2016, 392 p.

8. *Sravnitel'nye pokazateli sotsial'no-ekonomicheskogo polozheniya gorodov i raionov Rostovskoi oblasti. 2000* [Comparative indicators of socio-economic situation in urban and municipal districts of Rostov Region. 2000]. Rostov-on-Don: Rostoblkcomstat, 2001, 320 p.

9. Zakrutkin V.E., Sklyarenko G.Yu., Bakaeva E.N., Reshetnyak O.S., Gibkov E.V., Fomenko N.E. *Poverkhnostnye i podzemnye vody v predelakh tekhnogenno narushennykh geosistem Vostochnogo Donbassa: formirovanie khimicheskogo sostava i otsenka kachestva* [Surface and underground water within technogenic disturbed geosystems of Eastern Donbass: formation of chemical composition and quality assessment]. Rostov-on-Don: Izd-vo YuFU, 2017, 171 p.

ПРОСТРАНСТВЕННОЕ И ВРЕМЕННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ МОЛНИЕВЫХ РАЗРЯДОВ ПО ТЕРРИТОРИИ АЛТАЕ-САЯНСКОГО РЕГИОНА*

© 2017 г. С.Ю. Каранина¹, Н.А. Кочеева¹, А.В. Каранин¹

¹Горно-Алтайский государственный университет, Горно-Алтайск, Россия

SPATIAL AND TEMPORAL DISTRIBUTION OF LIGHTNING DISCHARGES ON THE TERRITORY OF THE ALTAI-SAYAN REGION

S.Yu. Karanina¹, N.A. Kocheeva¹, A.V. Karanin¹

¹Gorno-Altai State University, Gorno-Altai, Russia

Каранина Светлана Юрьевна – кандидат физико-математических наук, доцент, кафедра физики и информатики, Горно-Алтайский государственный университет, ул. Ленкина, 1, г. Горно-Алтайск, Республика Алтай, 649000, Россия, e-mail: krechetovas@yandex.ru

Svetlana Yu. Karanina - Candidate of Physics and Mathematics, Associate Professor, Department of Physics and Informatics, Gorno-Altai State University, Lenkina St., 1, Gorno-Altai, Altai Republic, 649000, Russia, e-mail: krechetovas@yandex.ru

Кочеева Нина Алексеевна – кандидат геолого-минералогических наук, доцент, кафедра географии, Горно-Алтайский государственный университет, ул. Ленкина, 1, г. Горно-Алтайск, Республика Алтай, 649000, Россия, e-mail: nina_kocheewa@mail.ru

Nina A. Kocheeva - Candidate of Geology and Mineralogy, Associate Professor, Department of Geography, Gorno-Altai State University, Lenkina St., 1, Gorno-Altai, Altai Republic, 649000, Russia, e-mail: nina_kocheewa@mail.ru

Каранин Андрей Владимирович – кандидат географических наук, доцент, кафедра географии, Горно-Алтайский государственный университет, ул. Ленкина, 1, г. Горно-Алтайск, Республика Алтай, 649000, Россия, e-mail: vedmedk@bk.ru

Andrey V. Karanin - Candidate of Geography, Associate Professor, Department of Geography, Gorno-Altai State University, Lenkina St., 1, Gorno-Altai, Altai Republic, 649000, Russia, e-mail: vedmedk@bk.ru

Целью работы является изучение динамики молниевой активности на территории Алтае-Саянского региона. Информационной базой исследований послужили данные о молниевых разрядах за 2011–2016 гг., регистрируемые WWLLN.

На территории Алтае-Саянского региона число молниевых разрядов начинает возрастать в мае, максимум достигается в июле, в августе происходит спад. Выявлено наличие двух суточных максимумов числа молниевых разрядов: первый – в 12–15 ч и второй – около 19 ч. В отдельные годы максимальное число разрядов в течение летнего сезона смещается на июнь, а в течение суток – на вечерние и ночные часы.

Установлено, что наибольшая плотность молниевых разрядов (более 0,35 разряда/км² в год) свойственна территориям с высотами от 250 до 1500 м над уровнем моря, наименьшая (менее 0,15 разряда/км² в год) – территориям выше 2000 м над уровнем моря. Максимизация молниевой активности происходит преимущественно за счет увеличения числа грозовых событий на территориях со средней плотностью молниевых разрядов (0,15–0,35 разряда/км² в год). В годы минимальной грозовой активности количество грозовых разрядов снижается преимущественно на территориях с наибольшей плотностью молниевых разрядов.

Ключевые слова: WWLLN, Алтае-Саянский регион, молниевый разряд, плотность молниевых разрядов, суточный и сезонный ход молниевых разрядов.

The purpose of this paper is to study the dynamics of lightning activity in the Altai-Sayan Region. The information base was represented by data on lightning discharges in 2011-2016 using WWLLN data.

In the Altai-Sayan Region, the number of lightning discharges begins to increase in May, the maximum is observed in July, and in August a recession occurs. The occurrence of two daily maximum was revealed: the first maximum of number of lightning discharges is in the interval from to 12 o'clock and the second is about 19 o'clock of local time. In certain years the maximum of lightning discharges shifts to June, and during the day - to the evening and night hours.

It was found that the highest density of lightning discharges (more than 0.35 discharges/km² per year) is typical for territories with altitudes from 250 to 1500 m asl, the smallest (less than 0.15 discharges/km² per year) - to areas above 2000 m above the sea level. Maximization of lightning activity occurs, mainly, due to the increase in the number of thunderstorm events in areas with an average density of lightning discharges (0.15-0.35 discharges/km² per year). In years of minimal thunderstorm activity, the amount of lightning discharges decreases mainly in areas with the highest density of lightning discharges.

* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-47-040081 p_a.

Keywords: WWLLN, Altai-Sayan Region, lightning discharges, density of lightning discharges, diurnal and seasonal variations of lightning discharges.

Введение

Изучение пространственно-временных особенностей проявления гроз имеет важное фундаментальное и прикладное значение. В последние годы планетарная активность гроз рассматривается не только как метеорологическое явление, но и как один из важных компонентов глобальной электрической цепи. Практическая значимость исследования региональной климатологии гроз связана с развитием инженерной инфраструктуры территорий (высотные здания, линии электропередачи, трубопроводы и т.п.), а также с охраной лесных массивов (природные пожары от действия молниевых разрядов).

Алтае-Саянский регион (АСР) расположен в центре Азиатского континента и занимает обширную площадь. Горные хребты региона являются самыми высокими в Северной Азии и выполняют роль водоразделов крупных сибирских рек – Енисея, Иртыша и Оби. Разнообразие природных условий обусловило богатство растительного и животного мира, а также привело к формированию множества видов ландшафтов – от пустынь до тундр. Пестрота местных геосистем, существенные различия природной среды и микроклимата делают данный регион интересным для исследования пространственных и временных особенностей возникновения грозовых явлений.

Изучение гроз на территории АСР в целом как горной страны не проводилось. Однако нужно отметить, что территориально регион относится к нескольким крупным административным единицам, в границах которых был осуществлен анализ площадного и временного распределения гроз [1–4]. Еще в 1970-х гг. было выявлено увеличение количества грозовых явлений в направлении с севера на юг, на территории Западной Сибири (Тюменская область, Томская область, Кемеровская область, Алтайский край и Республика Алтай) [2]. При этом широтная зональность распределения гроз характерна для северных районов, выше 63° с.ш., для остальной территории отмечается очаговость проявления гроз с абсолютным максимумом в предгорьях АСР. Данная пространственная закономерность была уточнена с помощью построения карт плотности молниевых разрядов, зарегистрированных спутником Microlab-1 в период 1995–1999 гг. [5]. Ряд исследований показал, что очаговость грозовой активности обусловлена не только широтой места, но в значительной мере местными особенностями рельефа, направлением воздушных потоков, состоянием подстилающей поверхности [3, 5], геолого-геофизическими факторами и активностью Солнца [1, 4]. Отметим, что полученные оценки пространственного распределения гроз носили экспертный характер,

так как проводились на основе данных сети метеостанций, которая не в состоянии дать точное представление обо всех особенностях проявления активности гроз над горными территориями.

Более точные оценки пространственного распределения гроз в настоящее время получают с помощью инструментальных наблюдений, которые проводятся в отдельных регионах РФ. Наиболее полно инструментальными измерениями грозовой активности с помощью однопунктовых и многопунктовых систем грозопеленгации охвачена территория европейской части России до Урала [6–9] и территория Восточной Сибири [10]. На территории Западной Сибири проводится регистрация молниевых разрядов в радиусе 480 км от г. Томска [11, 12].

Здесь важно подчеркнуть, что в границах названных регионов располагаются горные массивы различной площади и высоты. Для этих территорий установлено, что повышение грозовой активности как правило, происходит в предгорьях, при этом приурочено к определенным геоморфологическим элементам – речным долинам и котловинам (абсолютная высота колеблется в широких пределах, может быть от 100 до 2000 м), а также к территориям с высотами около 500 м над уровнем моря.

В последние годы для изучения пространственного и временного распределения гроз как в глобальном планетарном масштабе, так и для решения региональных задач оценки территорий по степени грозоопасности, а также для оценки точности грозопеленгационных систем [7] активно привлекаются данные Всемирной сети локализации молний (World Wide Lightning Location Network, WWLLN) [13, 14].

На основе данных WWLLN за 2009–2010 гг. впервые были построены карты плотности молниевых разрядов для всей территории Северной Азии (40°–80° с.ш. и 60°–180° в.д.) [15]. В дальнейшем была проведена корректировка данных о разрядах за 2009–2014 гг. согласно пространственному распределению эффективности детектирования сети и предложено аналитическое выражение пространственного распределения плотности грозовых разрядов для указанной территории [16]. В результате была получена интегральная характеристика грозовой активности на всей территории Северной Азии за 2009–2014 гг. и выявлены два мощных грозовых очага: в районе Западно-Сибирской равнины и между Становым хребтом и Малым Хинганом. Построены численные уравнения для плотности молниевых разрядов и определена зависимость их от широты и долготы местности.

Тем не менее представленные в работах [15, 16] карты плотности молниевых разрядов и анализ сезон-

ного хода числа молниевых разрядов дают общую картину грозовой активности. По мнению авторов настоящей работы, для использования в практике грозозащиты в горных территориях Северной Азии, на примере Алтае-Саянского региона, необходимы дополнительное изучение и уточнение динамики грозовой активности, что и является целью данной работы.

Материал и методы исследования

В работе использованы данные Всемирной сети локализации молний WWLLN с июня по август за период с 2011 по 2016 г. Работа сети WWLLN основана на приеме радиосигналов от молний-атмосфериков и анализе разностей времени их прихода до как минимум 5 ближайших станций [13]. Подробное описание технологии регистрации молниевых разрядов сетью можно найти в ряде публикаций, представленных на сайте wwlln.net, а также в работе [15].

Данные об атмосферах, регистрируемых WWLLN, содержат следующие показатели: дату, время, широту, долготу, погрешность и количество станций, в которых был зарегистрирован электромагнитный импульс. Стоит отметить, что эффективность определения молниевых разрядов и точность определения их места (в среднем около 5,4 км) WWLLN не являются высокими, и сеть не обнаруживает все молниевые разряды, возникающие при грозе. В большей степени WWLLN определяет молниевый разряд в конвективной грозовой ячейке в грозовом фронте, при этом регистрируются наиболее сильные разряды в ней [17]. Тем не менее оценка активности гроз на основе данных WWLLN является лучшей по сравнению с данными сети метеорологических станций.

На основе данных WWLLN был проведен анализ суточного и сезонного хода активности молниевых разрядов. Для анализа особенностей площадного распределения грозовых событий были построены карты плотности молниевых разрядов, которые рассчитывались для участков размером 10×10 км. Карты плотности молниевых разрядов для каждого года наблюдений послужили базой для вычисления и построения карт среднегодовой плотности, среднеквадратического отклонения и коэффициента вариации числа молниевых разрядов для участков исследуемой территории, соответственно, по формулам

$$n_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^N n_i}{N}, \quad S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (n_i - n_{cp})^2}{N}}, \quad V = \frac{S}{n_{cp}} \cdot 100\%, \quad \text{где}$$

n_i – число молниевых разрядов в i -й год; N – число лет наблюдений.

Дополнительно было выполнено построение серии карт, позволяющих выявить участки АСР с наибольшими отклонениями годовой плотности молниевых разрядов от средней за исследуемый

период. Для каждого года наблюдений и для каждого участка размером 10×10 км было рассчитано нормированное отклонение числа молниевых разрядов от среднего, выраженное в процентах:

$$R_i = \frac{n_i - n_{cp}}{n_{cp}} \cdot 100\%, \quad \text{где } n_i \text{ – число молниевых разрядов за } i \text{ год; } n_{cp} \text{ – среднегодовое число молниевых разрядов за период исследования.}$$

Отметим, что R_i для участков с малым числом молниевых разрядов, так же как и коэффициент вариации, может превышать 100 %, что снижает информативность показателя. Для исключения данного эффекта был рассчитан коэффициент изменчивости числа молниевых разрядов по сравнению со средним

$$K_i = \frac{R_i}{V}, \quad (1)$$

где R_i – нормированное отклонение числа молниевых разрядов от среднегодового за i год; V – коэффициент вариации числа молниевых разрядов. Способ вычисления данного коэффициента позволяет проводить более наглядную по сравнению с коэффициентом вариации интерпретацию его значений. Если величина полученного коэффициента K_i попадает в диапазон от -1 до 1 , то для данного участка территории число молниевых разрядов для заданного года было близким к среднегодовому. Если величина K_i ниже -1 , то для таких участков характерно снижение числа молниевых разрядов относительно среднегодового, если больше 1 – то, соответственно, повышение.

Полученные результаты и их обсуждение

На территории АСР наименьшее число молниевых разрядов (86 521) было зафиксировано сетью WWLLN в 2011 г. В 2012, 2013 и 2015 гг. число зарегистрированных разрядов изменяется от 120 000 до 140 000. Наибольшее число молниевых разрядов отмечено в 2014 г. – 208 137 и в 2016 г. – 182 604.

Ход молниевой активности в течение летнего сезона соответствует выявленной ранее на основе данных метеонаблюдений тенденции: число молниевых разрядов начинает возрастать в мае, максимум достигается в июле, в августе происходит спад грозовой активности (рис. 1а). Эта тенденция характерна для средних за период значений. В годы минимума (2011) и максимума (2014) молниевой активности наибольшее число молниевых разрядов отмечается в июне (рис. 1б). В августе наблюдается большее по сравнению с маем число грозовых разрядов.

Время регистрации молниевых разрядов сетью WWLLN осуществляется по всемирному скоординированному времени. Территория АСР расположена в нескольких часовых поясах, поэтому для оценки суточного хода молниевых разрядов был выполнен пересчет времени для каждого разряда из

всемирного скоординированного времени к местному солнечному времени.

Распределение числа молниевых разрядов в течение суток имеет явный минимум в интервале с 5 до 9 ч утра. К середине дня число разрядов нарастает и в интервале с 12 до 15 ч регистрируется в среднем наибольшее их число (рис. 2а). Обращает на себя внимание тот факт, что после плавного снижения грозовой активности в интервале 15–18 ч формируется второй максимум в 19 ч, после которого снижение

продолжается. Эта ситуация отмечается каждый год исследуемого периода (рис. 2б). При этом в 2011 г. второй 19-часовой максимум числа молниевых разрядов сравним с полуденным максимумом в 12–15 ч.

Для 2014–2016 гг. наблюдается более высокая интенсивность ночных грозовых событий по сравнению с предыдущими годами. В частности, в 2014 г. число молниевых разрядов в ночное время практически совпадает с таковым в дневные часы для других лет наблюдений.

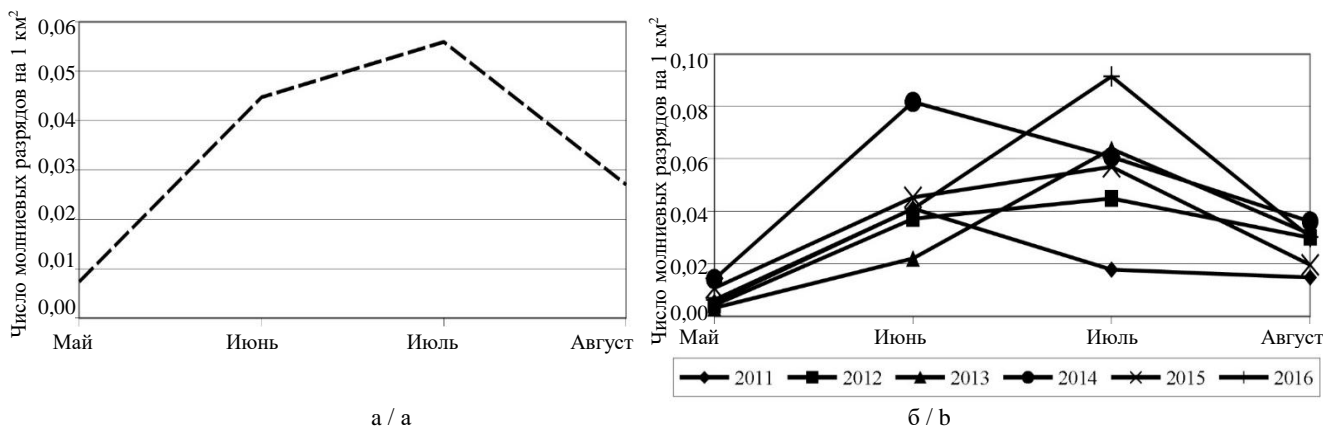


Рис. 1. Распределение числа молниевых разрядов в течение грозового сезона: а – среднее за месяц за период с 2011 по 2016 г.; б – по каждому году / Fig. 1. Distribution of the number of lightning discharges during the thunderstorm season: a - average per month for the period from 2011 to 2016; b - for each year

Анализ суточного распределения числа молниевых разрядов по месяцам летних сезонов выявил тенденцию расширения интервала молниевой активности к ночному времени в июле и августе по сравнению с маем и июнем. Так, в начале сезона в мае наибольшее число молниевых разрядов прослеживается в интервале от 11 до 19 ч, в июне интервал расширяется с 10 до 24 ч, в июле и августе – с 10 до 2 и 4 ч соответственно. При этом в июле и августе 2011 г. максимум числа грозовых разрядов приходился на 18–24 ч, что обусловило существование в этом году двух практически равновеликих максимумов активности молниевых разрядов в 14 и 19 ч (рис. 2б). Таким образом, именно тенденция смещения активности интенсивных гроз, определяемых по числу молниевых разрядов, на ночное время в течение летнего сезона определяет наличие второго максимума в 19 ч (рис. 2а).

Характер суточного хода числа молниевых разрядов на территории АСР в общем соответствует результатам исследований для других территорий Западной и Восточной Сибири [3, 15], а также суточной периодичности гроз на суше [18, 19], однако есть некоторые отличия. Так, для Восточной Сибири максимум гроз приходится на послеполуденное время, преимущественно с 15 до 20 ч, а для Евразии в целом – с 13 до 17 ч. Как мы отмечали выше, для АСР макси-

мум грозовой активности приходится на более ранний срок – с 12 до 15 ч. Минимумы грозовой активности во всех случаях совпадают.

Несмотря на некоторые различия во временных интервалах максимумов, для территории Восточной Сибири и территории АСР наблюдается общая закономерность смещения молниевой активности на более поздние часы суток, свойственная концу летнего сезона в августе.

Формирование грозовых облаков и порядок распределения гроз по территории АСР во многом определяется микроклиматическими условиями, которые носят мозаичный характер. АСР представляет собой сложное сочетание горных хребтов субширотного и субмеридионального простирания. Наиболее низко опущенные блоки земной коры формируют межгорные котловины. Реки выработали широкие долины, а на отдельных участках сформировали котловинообразные расширения долин. Абсолютные отметки таких участков не превышают на севере 250 м над уровнем моря, максимальная высота хребтов в северных физико-географических провинциях составляет 1500 м, высота вершин в горных цепях находится в широких пределах (около 2000 м). Максимальная отметка 4500 м – г. Белуха (Центрально-Алтайская провинция).

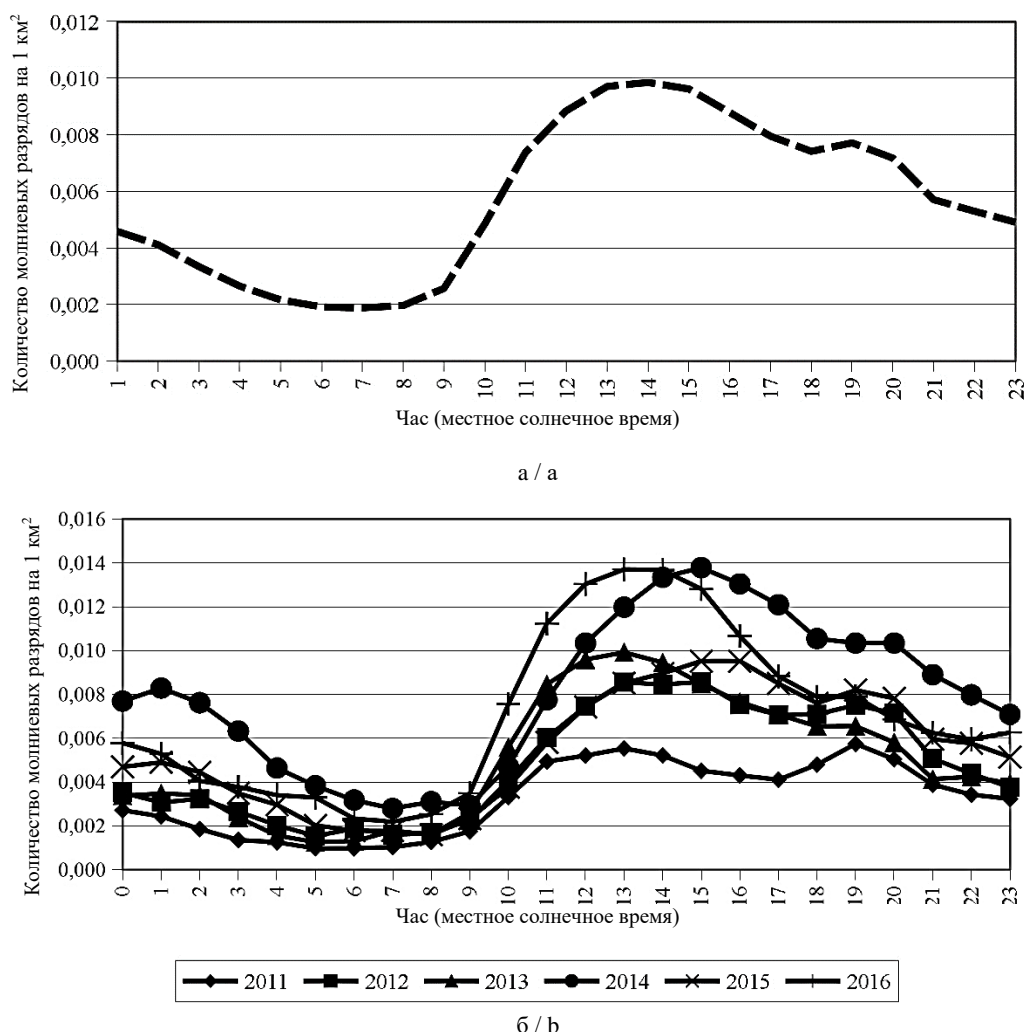


Рис. 2. Суточный ход молниевой активности: а – среднее за период с 2011 по 2016 г.; б – по каждому году
 / Fig. 2. Daily rate of thunderstorm activity: a - average for the period from 2011 to 2016; b - for each year

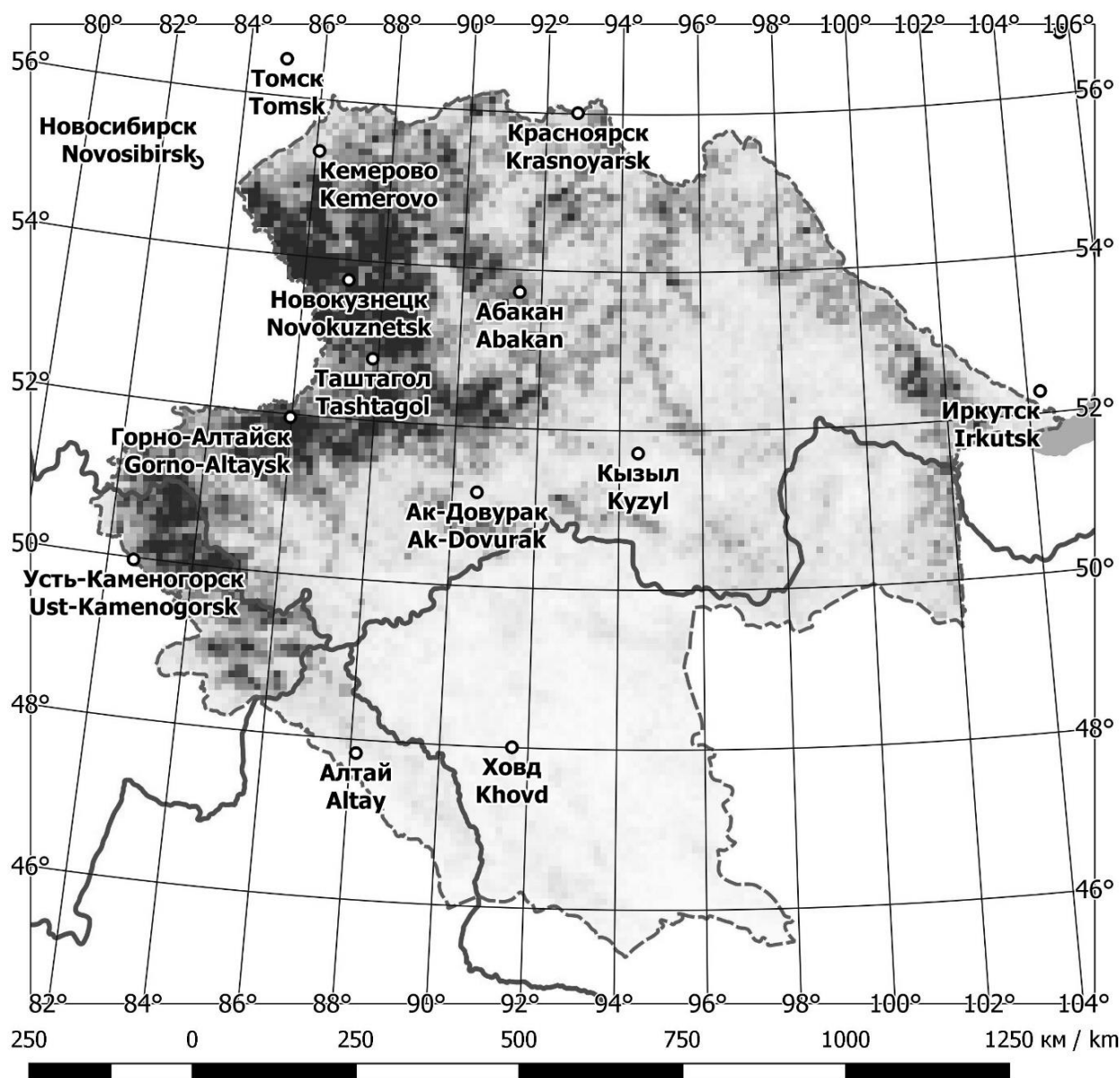
На рис. 3 представлена карта плотности молниевых разрядов на рассматриваемой территории. В целом полученные величины среднегодовой плотности молниевых разрядов совпадают с значениями, вычисленными для периода с 2009 по 2014 г. и представленными в работе [15].

К районам с повышенной плотностью разрядов (более 0,35 разряда/км² в год) нами были отнесены три достаточно крупные территории:

- 1) приграничные районы Восточного Казахстана и России;
- 2) северо-западная часть АСР – дуга Горно-Алтайск – Таштагол – Новокузнецк, включая западную часть Западного Саяна;
- 3) юго-восточная часть Восточного Саяна – участок в пределах 52°–53° с.ш., 101°–103° в.д., вдоль границы Республики Бурятия и Иркутской области.

Средняя плотность молниевых разрядов (0,15–0,35 разряда/км² в год) характерна для следующих районов:

- 1) район озера Маркаколь – часть Восточного Казахстана южнее 49° с.ш.;
- 2) бассейн р. Чарыш к юго-западу от Горно-Алтайского максимума;
- 3) район вокруг г. Кемерово;
- 4) северная и северо-восточная часть АСР вдоль границы региона в пределах 90°–101° в.д.;
- 5) Восточный и Западный Танну-Ола – участок вдоль южной границы России в пределах 90°–95° в.д.;
- 6) бассейн р. Эгийн-Гол – участок в пределах 49°–52° с.ш., 101°–102° в.д., включая часть территории Республики Бурятия до хр. Тункинские Гольцы;
- 7) восток Западного Саяна – участок в пределах 52°–54° с.ш., 92°–96° в.д.



Условные обозначения:
 - - - - границы Алтае-Саянского региона — границы государств о города

Среднегодовая плотность грозовых событий на 1 км²:
 □ менее 0,01; □ 0,15; □ 0,20;
 ■ 0,25; ■ 0,30; ■ более 0,35

Рис. 3. Плотность молниевых разрядов – средняя за 2011–2016 гг.
 / Fig. 3. Density of lightning discharges - average for 2011-2016

Участки с числом молниевых разрядов менее 0,15 разряда/км² в год нами были определены как минимумы молниевой активности:

1) монгольский минимум – Монголия, включая китайскую часть территории региона и юг Республики Алтай;

2) хакасский минимум – участок в пределах 53°–54° с.ш. 89°–91° в.д., к юго-западу от г. Абакана;

3) тувинский минимум – участок в пределах 51°–52° с.ш. 91°–96° в.д., южнее и западнее г. Кызыла;

3) бассейн Большого и Малого Енисея – участок в пределах 50°–54° с.ш., 96°–100° в.д.

АСР располагается на пути западного переноса воздушных масс. Обращают на себя внимание субмеридиональность распределения плотности грозовых разрядов и приуроченность максимальной

плотности к предгорным и низкогорным территориям. Стоит отметить, что пограничные северо-западные территории АСР с высотами 250–1500 м над уровнем моря характеризуются наибольшей плотностью населения и уровнем освоенности. Именно здесь отмечается наибольшая плотность молниевых разрядов, что создает повышенную угрозу для инженерных сооружений.

При продвижении вглубь горной страны активность проявления грозовых событий несколько снижается. На территориях с высотами от 800 до 2500 м наибольшее число молниевых разрядов приурочено к западным и северо-западным макросклонам хребтов. Также наибольшей плотностью разрядов харак-

теризуются наветренные склоны хребтов, ограждающих межгорные котловины в Северо-Западном, Северном, Центральном Алтае, Туве и Хакасии. Территория Восточного Саяна и монгольской части АСР существенно отличается по этому показателю от остальной части АСР. Плотность молниевых разрядов уменьшается, а на высотах более 2000 м снижается, достигая минимума в опустыненных частях Монголии и Алтая.

Для определения характера изменения грозовой активности на отдельных участках территории АСР была построена карта распределения коэффициента вариации числа молниевых разрядов для участков 10×10 км (рис. 4).

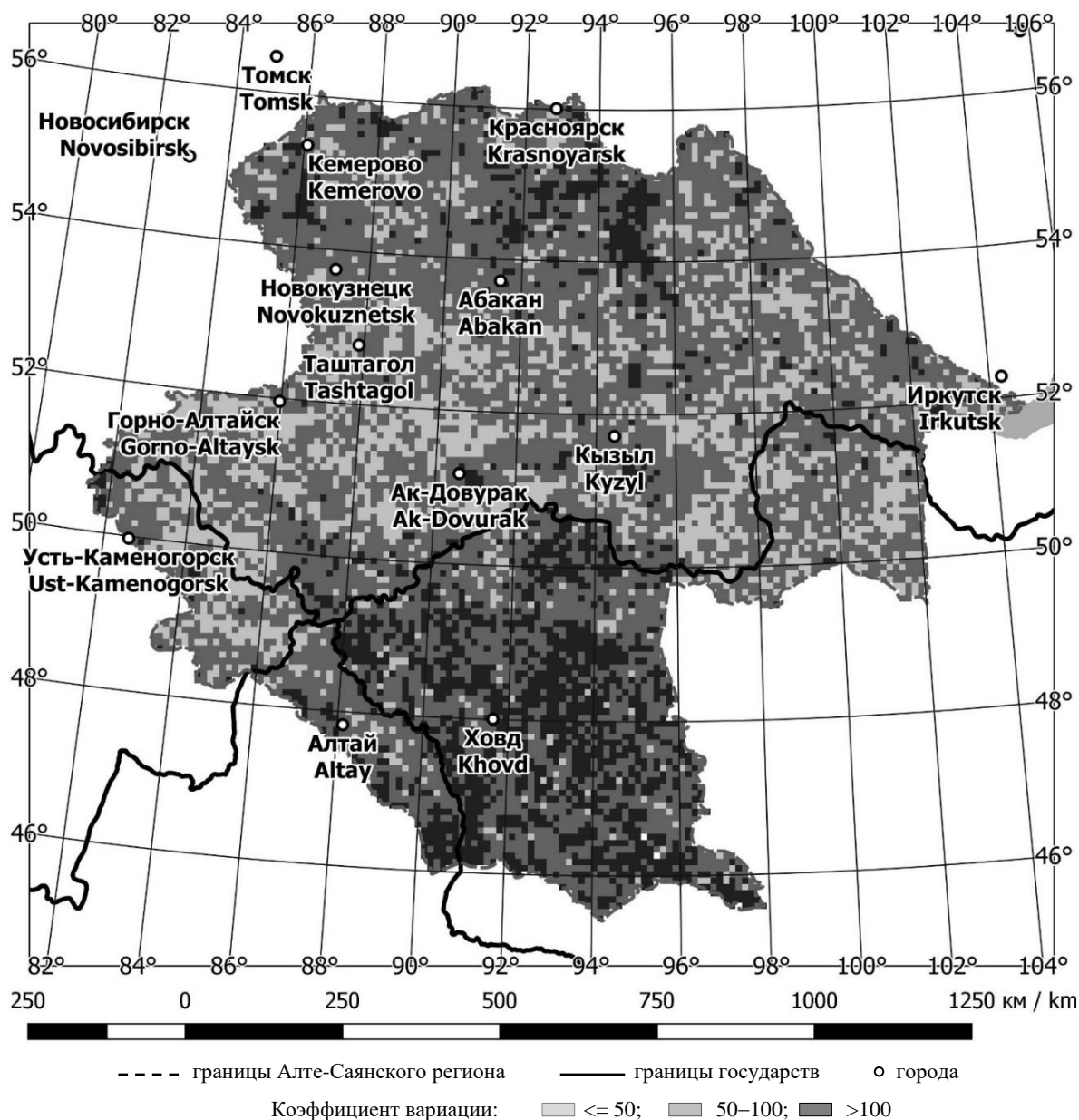


Рис. 4. Коэффициент вариации числа молниевых разрядов за 2011–2016 гг.
 / Fig. 4. Coefficient of variation of the number lightning's discharges for 2011–2016

Наиболее стабильно (коэффициент вариации меньше 50 %) молниевая активность проявлялась на тех территориях, которые отнесены авторами к категории высокой и средней плотности грозовых разрядов:

1) приграничные районы Восточного Казахстана и России, включая район озера Маркаколь;

2) северо-западная часть АСР – западнее Горно-Алтайска и западная часть Западного Саяна;

3) Восточный и Западный Танну-Ола – участок вдоль южной границы России в пределах 90° – 95° в.д.;

4) бассейн р. Эгийн-Гол – участок в пределах 49° – 52° с.ш., 101° – 102° в.д., включая часть территории Республики Бурятия до хр. Тункинские Гольцы.

Также невысокий уровень вариации числа молниевых разрядов наблюдается на территории хакасского минимума и бассейна Большого и Малого Енисея, имеющих низкую плотность молниевых разрядов.

Молниевая активность на большей части горной страны испытывает значительные колебания. Это

подтверждается значением коэффициента вариации, которое превышает 50 %. На обширных пространствах Монгольского Алтая (высоты около 2000 м), в долинах рек Томь, Кан и Мана, в северных предгорьях Восточного Саяна коэффициент вариации превышает 100 %. Это связано с низкой среднегодовой плотностью молниевых разрядов, свойственной данным территориям. Любое незначительное увеличение или снижение абсолютного количества гроз приводит к кратному изменению относительного показателя. Поэтому карта вариативности числа гроз, построенная на основе расчета коэффициента вариации для 2011–2016 гг., имеет экспертно-оценочный характер.

Несмотря на некоторую территориальную лимитированность полезности показателя вариативности, имеющиеся данные позволяют отследить тенденцию пространственной изменчивости активности гроз в отдельные годы по сравнению со среднегодовым показателем. На рис. 5 представлено распределение значений коэффициента изменчивости числа молниевых разрядов, вычисленного по формуле (1).

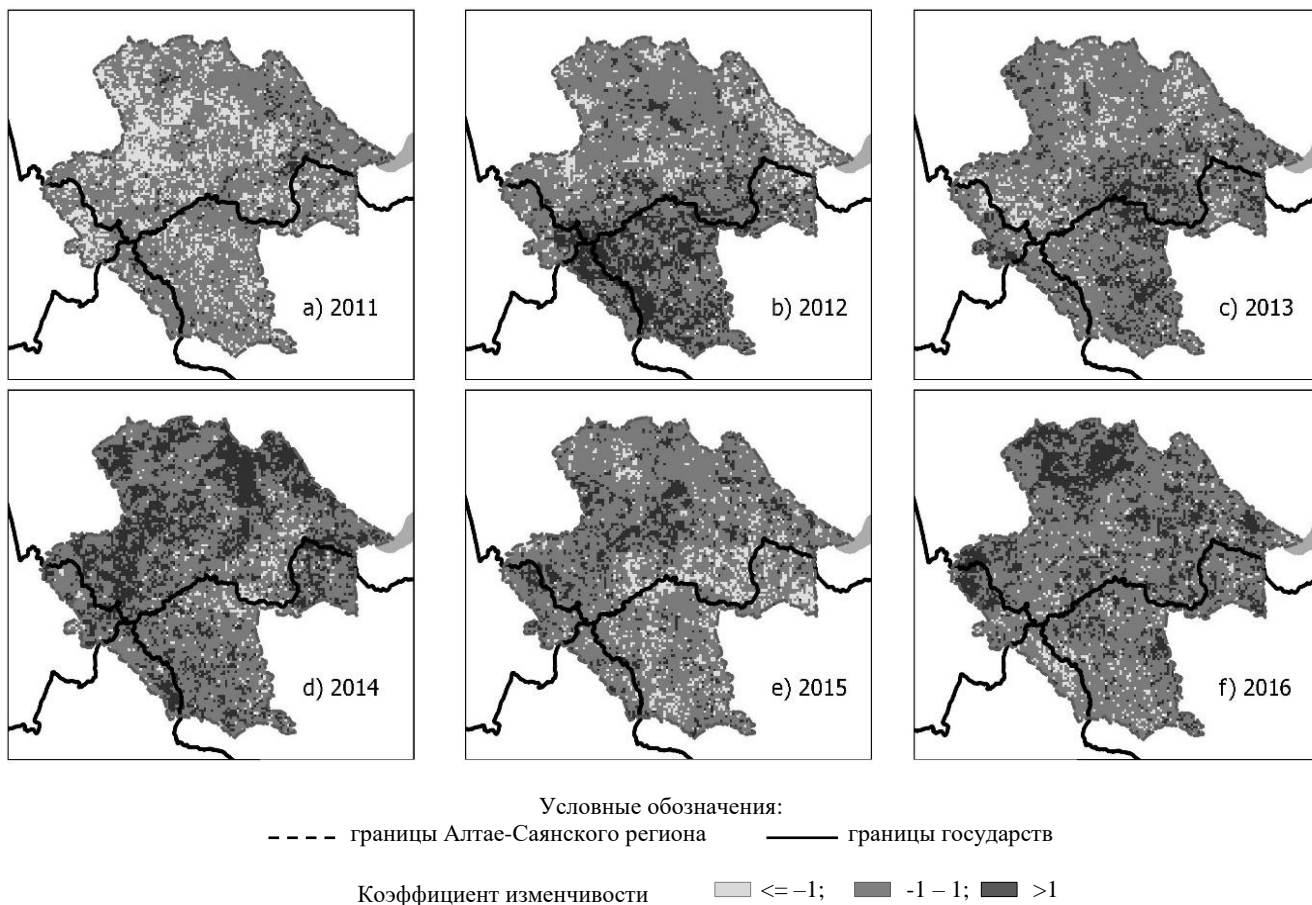


Рис. 5. Распределение коэффициента изменчивости числа молниевых разрядов относительно среднегодовой плотности / Fig. 5. The distribution of the coefficient of variability of the number lightning's discharges relative to the average annual density

В 2011 г. (минимум грозовой активности по числу молниевых разрядов) практически повсеместно активность гроз сравнима со средней. При этом снизилось число молниевых разрядов относительно среднего за рассматриваемый период преимущественно на территориях наибольшей плотности молниевых разрядов в приграничных районах Восточного Казахстана и России и в северо-западной части АСР.

Для 2012 и 2013 гг. выявлен рост числа молниевых разрядов в основном в южном и центральном районах АСР, на территории монгольского и тувинского минимума активности молний соответственно (рис. 5). Снижение числа разрядов отмечается в 2012 г. в основном в нижнем течении реки Катунь, реки Томь северо-западнее г. Новокузнецка, на востоке и юго-востоке Восточного Саяна, в 2013 г. – на юго-западе Республики Алтай в приграничной зоне с Казахстаном, а также на севере Восточного Саяна (участок в пределах 54° – 56° с.ш., 96° – 98° в.д.).

В 2014 г., когда наблюдалась максимальное число молниевых разрядов за рассматриваемый период, наибольший рост их числа обнаруживается преимущественно на территориях со средней и низкой активностью молний на северо-востоке АСР и на территории Республики Алтай, а также частично в районе наибольшей плотности молниевых разрядов в северо-западной части АСР (дуга Горно-Алтайск – Таштагол – Новокузнецк).

В 2015 на территории Монголии и в приграничных с ней районах России (участок хребтов Западный и Восточный Танну-Ола, верховье Малого и Большого Енисея, а также район озера Хубсугул в пределах 50° – 52° с.ш., 90° – 102° в.д.) число молниевых разрядов ниже среднегодового. Увеличение числа разрядов характерно для западной (участок Республики Алтай в пределах 50° – 51° с.ш., 82° – 86° в.д.) и центральной (участок Западного Саяна в пределах 51° – 54° с.ш., 88° – 94° в.д.) частей АСР.

В 2016 г., год второго максимума числа молниевых разрядов, отмечается усиление активности гроз практически на всей территории АСР. При этом выделяются западные (участок в пределах 49° – 52° с.ш., 82° – 86° в.д.) и северные районы (участок в пределах 53° – 56° с.ш., 84° – 94° в.д.), которые характеризуются повышенным и средним уровнем грозовой активности.

Таким образом, территории наибольшей плотности молниевых разрядов имеют преимущественно невысокий уровень изменчивости числа молниевых разрядов. Наибольшая вариативность числа молниевых разрядов наблюдается в районах, расположенных в северной и южной частях АСР и имеющих среднюю и низкую плотность разрядов соответственно. В годы минимальной молниевой активности снижение интегрального числа грозовых событий по

исследуемому региону происходит главным образом за счет уменьшения их количества на территориях с наибольшей плотностью молниевых разрядов, в то время как участки со средней и низкой плотностью молниевых разрядов подвержены изменениям в меньшей степени. Годы максимальной молниевой активности, напротив, характеризуются в основном активизацией грозовых событий на территориях со средней плотностью молниевых разрядов.

Выводы

В целом полученные результаты согласуются с известными к настоящему времени закономерностями пространственно-временного распределения числа молниевых разрядов на материках. При этом в пространственном распределении молниевой активности на территории АСР имеется ряд особенностей, которые удалось выявить впервые:

1. Число молниевых разрядов начинает возрастать в мае, максимум достигается в июле, а в августе происходит спад грозовой активности. В отдельные годы максимальное число молниевых разрядов смещается на июнь.

2. В суточном ходе развития молниевой активности отмечается первый полуденный максимум числа молниевых разрядов в 12–15 ч и второй максимум (в среднем меньший по числу разрядов) – около 19 ч по местному времени. Наличие второго максимума обусловлено увеличением числа молниевых разрядов в вечернее время к концу летнего сезона. В отдельные годы и месяцы летнего сезона первый максимум числа молниевых разрядов может наблюдаться в вечерние и ночные часы.

3. Наибольшая плотность молниевых разрядов (более $0,35$ разряда/ км^2 в год) отмечается на территориях с высотами от 250 до 1500 м над уровнем моря, наименьшая (менее $0,15$ разряда/ км^2 в год) – на территориях выше 2000 м над уровнем моря.

4. В годы максимальной молниевой активности интегральное число молниевых разрядов растет главным образом за счет увеличения количества грозовых событий на территориях со средней плотностью грозовых разрядов. Напротив, в годы минимальной молниевой активности наибольшее уменьшение количества грозовых событий отмечается на территориях с высокой плотностью грозовых разрядов. Выявленный эффект имеет предварительный характер и требует подтверждения при увеличении временного ряда исходных данных о грозовых разрядах.

Литература

1. Дмитриев А.Н., Кречетова С.Ю., Кочеева Н.А. Грозы и лесные пожары от гроз на территории Республики Алтай. Горно-Алтайск: Изд-во Горно-Алтайского госуниверситета, 2011. 195 с.

2. Опасные явления погоды на территории Сибири и Урала / под ред. С.Д. Кошинского. Ч. 1 : Алтайский край, Кемеровская, Новосибирская и Томская области. Л. : Гидрометеиздат, 1979. 383 с.

3. Горбатенко В.П., Ершова Т.В. Молния как звено глобальной электрической цепи. Томск : Изд-во ТГПУ, 2011. 204 с.

4. Кочеева Н.А., Кречетова С.Ю. Особенности внутрисезонного распределения гроз и грозовые очаги на территории Республики Алтай // Казанская наука. 2011. № 1. С. 460–462.

5. Горбатенко В.П., Ершова Т.В., Константинова Д.А. Пространственное распределение плотности разрядов молнии в землю над территорией Западной Сибири // Вестн. Томского гос. ун-та. 2009. № 329. С. 251–256.

6. Бурцев А.В., Невретдинов Ю.М., Сытина А.Н. Опыт регистрации грозовой активности на территории Кольского полуострова // Вестн. Кольского науч. центра РАН. 2014. № 2. С. 130–137.

7. Мареев Е.А., Стасенко В.Н., Булатов А.А., Дементьева С.О., Евтушенко А.А., Ильин Н.В., Кутерин Ф.А., Слюняев Н.Н., Шаталова М.В. Российские исследования атмосферного электричества в 2011–2014 гг. // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2016. Т. 52, № 2. С. 175–186.

8. Аджиев А.Х., Князева З.М., Думаева Л.В. Анализ грозовой активности на территории Западного Кавказа по данным инструментальных регистраций и наблюдений на метеостанциях // Изв. Кабардино-Балкарского науч. центра РАН. 2013. № 3 (53). С. 31–37.

9. Аджиев А.Х., Юрченко Н.В., Князева З.М. Создание для Северного Кавказа карты поражаемости территории разрядами молнии и карты районирования по опасности возникновения чрезвычайных ситуаций при грозах // Изв. Кабардино-Балкарского науч. центра РАН. 2013. № 3 (53). С. 38–44.

10. Козлов В.И., Муллаяров В.А. Грозовая активность в Якутии. Якутск : ЯФ Изд-ва СО РАН, 2004. 104 с.

11. Константинова Д.А., Горбатенко В.П. Молнии над юго-востоком Западной Сибири // VII Всерос. конф. по атмосферному электричеству : сб. тр. : в 2 т. СПб. : Главн. геофиз. обсерватория им. А.И. Воейкова, 2012. С. 133–135.

12. Константинова Д.А., Горбатенко В.П. Результаты регистрации молний над юго-восточной территорией Западной Сибири // Изв. вузов. Физика. 2011. № 11/3. С. 156–162.

13. Dowden R.L., Brundell J.B., Rodger C.J. VLF lightning location by time of group arrival (TOGA) at multiple sites // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. 2002. Vol. 64, № 7. P. 817–830. URL: <http://wwlln.net/publications/dowden.toga.article.pdf> (дата обращения: 22.05.2017).

14. Hutchins M.L., Holzworth R.H., Brundell J.B., Rodger C.J. Relative detection efficiency of the World Wide Lightning Location Network // Radio Science. 2012. Vol. 47, № RS6005. DOI: 10.1029/2012RS005049. URL: https://wwlln.net/publications/Hutchins_Detection_Efficiency_RadioSci_2012.pdf (дата обращения: 22.05.2017).

15. Козлов В.И., Муллаяров В.А., Каримов Р.Р. Пространственное распределение плотности грозовых разрядов на Востоке России по данным дистанционных наблюдений // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8, № 3. С. 257–262.

16. Тарабукина Л.Д., Козлов В.И., Каримов Р.Р. Аналитическое выражение для распределения плотности грозовых разрядов по территории Северной Азии // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13, № 3. С. 184–191.

17. Jacobson A.R., Holzworth R., Harlin J., Dowden R., Lay E. Performance assessment of the World Wide Lightning Location Network (WWLLN), using the Los Alamos Sferic Array (LASA) as ground truth // J. Atmos. Oceanic Technol. 2006. Vol. 23. P. 1082–1092. URL: <https://wwlln.net/publications/jacobson.jtech.2006.pdf> (дата обращения: 20.06.2017).

18. Blakeslee R.J., Mach D.M., Bateman M.G., Bailey J.C. Seasonal variations in the lightning diurnal cycle and implications for the global electric circuit // Atmospheric research. 2014. Vol. 135–136. P. 228–243. DOI 10.1038/srep20874. URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4750006/> (дата обращения: 10.09.2017).

19. Hutchins M.L., Holzworth R.H., Brundell J.B. Diurnal variation of the global electric circuit from clustered thunderstorms // J. of Geophysical Research : Space Physics, 2014. Vol. 119, № 1. P. 620–629. DOI 10.1002/2013JA019593. URL: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/2013JA019593/full> (дата обращения: 10.09.2017).

References

1. Dmitriev A.N., Krechetova S.Yu., Kochееva N.A. *Grozy i lesnye požary ot groz na territorii Respubliki Altai* [Thunderstorms and forest fires from thunderstorms on the territory of the Altai Republic]. Gorno-Altai: Izd-vo Gorno-Altai'skogo gosuniversiteta, 2011, 195 p.

2. *Opasnye yavleniya pogody na territorii Sibiri i Urala* [Dangerous weather phenomena in the territory of Siberia and the Urals]. Ed. S.D. Koshinskii. Ch. 1: Altaiskii krai, Kemerovskaya, Novosibirskaya i Tomskaya oblasti [Altai Territory, Kemerovo, Novosibirsk and Tomsk regions]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1979, 383 p.

3. Gorbatenko V.P., Ershova T.V. *Molniya kak zveno global'noi elektricheskoi tsepi* [Lightning as a link in the global electrical circuit]. Tomsk : Izd-vo TGPU, 2011, 204 p.

4. Kochееva N.A., Krechetova S.Yu. Osobennosti vnutrisazonnogo raspredeleniya groz i grozovye ochagi na territorii Respubliki Altai [Features of intraseasonal distribution of thunderstorms and thunderstorm foci in the territory of the Altai Republic]. *Kazanskaya nauka*. 2011, No. 1, pp. 460-462.

5. Gorbatenko V.P., Ershova T.V., Konstantinova D.A. Prostranstvennoe raspredelenie plotnosti razryadov molnii v zemlyu nad territoriei Zapadnoi Sibiri [The spatial distribution of the density of lightning discharges into the

earth above the territory of Western Siberia]. *Vestn. Tomskogo gos. un-ta*. 2009, No. 329, pp. 251-256.

6. Burtsev A.V., Nevretdinov Yu.M., Sytina A.N. Opyt registratsii grozovoi aktivnosti na territorii Kol'skogo poluostrova [Experience in recording thunderstorm activity in the Kola Peninsula]. *Vestn. Kol'skogo nauch. tsentra RAN*. 2014, No. 2, pp. 130-137.

7. Mareev E.A., Stasenko V.N., Bulatov A.A., Dement'eva S.O., Evtushenko A.A., Il'in N.V., Kuterin F.A., Slyunyaev N.N., Shatalina M.V. Rossiiskie issledovaniya atmosfernogo elektrichestva v 2011–2014 gg. [Russian studies of atmospheric electricity in 2011-2014]. *Izv. RAN. Fizika atmosfery i okeana*. 2016, vol. 52, No. 2, pp. 175-186.

8. Adzhiev A.Kh., Knyazeva Z.M., Dumaeva L.V. Analiz grozovoi aktivnosti na territorii zapadnogo Kavkaza po dannym instrumental'nykh registratsii i nablyudenii na meteostantsiyakh [Analysis of thunderstorm activity in the territory of the Western Caucasus according to instrumental registrations and observations at weather stations]. *Izv. Kabardino-Balkarskogo nauch. tsentra RAN*. 2013, No. 3 (53), pp. 31-37.

9. Adzhiev A.Kh., Yurchenko N.V., Knyazeva Z.M. Sozdanie dlya Severnogo Kavkaza karty porazhaemosti territorii razryadami molnii i karty raionirovaniya po opasnosti vozniknoveniya chrezvychainykh situatsii pri grozakh [Creation of a map of the region's damage to the territory by lightning discharges and a map of regionalization for the danger of emergencies during thunderstorms for the North Caucasus]. *Izv. Kabardino-Balkarskogo nauch. tsentra RAN*. 2013, No. 3 (53), pp. 38-44.

10. Kozlov V.I., Mullayarov V.A. *Grozovaya aktivnost' v Yakutii* [Thunderstorm activity in Yakutia]. Yakutsk : YaF Izd-va SO RAN, 2004, 104 p.

11. Konstantinova D.A., Gorbatenko V.P. [Lightning over the south-east of Western Siberia]. *VII Vseros. konf. po atmosfernomu elektrichestvu* [VII All-Russian Conference on Atmospheric Electricity]. Saint Petersburg, 2012, pp. 133-135.

12. Konstantinova D.A., Gorbatenko V.P. Rezul'taty registratsii molnii nad yugo-vostochnoi territoriei Zapadnoi Sibiri [The results of recording lightning over the southeastern territory of Western Siberia]. *Izv. vuzov. Fizika*. 2011, No. 11/3, pp. 156-162.

13. Dowden R.L., Brundell J.B., Rodger C.J. VLF lightning location by time of group arrival (TOGA) at multiple sites. *J. Atmos. Solar.-Terr. Phys.* 2002, vol. 64, No. 7, pp. 817-830. Available at: http://wwlln.net/publications/dowden.toga_article.pdf (accessed 22.05.2017).

14. Hutchins M.L., Holzworth R.H., Brundell J.B., Rodger C.J. Relative detection efficiency of the World Wide Lightning Location Network. *Radio Science*. 2012, vol. 47, No. RS6005. DOI 10.1029/2012RS005049. Available at: https://wwlln.net/publications/Hutchins_Detection_Efficiency_RadioSci_2012.pdf (accessed 22.05.2017).

15. Kozlov V.I., Mullayarov V.A., Karimov R.R. Prostranstvennoe raspredelenie plotnosti grozovykh razryadov na Vostoke Rossii po dannym distantsionnykh nablyudenii [Spatial distribution of the density of lightning discharges in the East of Russia according to remote observations]. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2011, vol. 8, No. 3, pp. 257-262.

16. Tarabukina L.D., Kozlov V.I., Karimov R.R. Analiticheskoe vyrazhenie dlya raspredeleniya plotnosti grozovykh razryadov po territorii Severnoi Azii [Analytical expression for the distribution of the density of lightning discharges over the territory of North Asia]. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2016, vol. 13, No. 3, pp. 184-191.

17. Jacobson A.R., Holzworth R., Harlin J., Dowden R., Lay E. Performance assessment of the World Wide Lightning Location Network (WWLLN), using the Los Alamos Sferic Array (LASA) as ground truth. *J. Atmos. Oceanic Technol.* 2006, vol. 23, pp. 1082-1092. Available at: <https://wwlln.net/publications/jacobson.jtech.2006.pdf> (accessed 20.06.2017).

18. Blakeslee R.J., Mach D.M., Bateman M.G., Bailey J.C. Seasonal variations in the lightning diurnal cycle and implications for the global electric circuit. *Atmospheric research*. 2014, vol. 135-136, pp. 228-243. DOI 10.1038/srep20874. Available at: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4750006/> (accessed 10.09.2017).

19. Hutchins M.L., Holzworth R.H., Brundell J.B. Diurnal variation of the global electric circuit from clustered thunderstorms. *J. of Geophysical Research : Space Physics*. 2014, vol. 119, No. 1, pp. 620-629. DOI 10.1002/2013JA019593. Available at: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/2013JA019593/full> (accessed 10.09.2017).

УДК 502.35

DOI 10.23683/0321-3005-2017-4-1-139-145

АНАЛИЗ И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРИРОДООХРАННОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬЮ В РЕГИОНЕ

© 2017 г. А.Д. Хованский¹, О.А. Хорошев¹, В.В. Латун¹

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

ANALYSIS AND IMPROVEMENT OF THE SYSTEM OF ENVIRONMENTAL MANAGEMENT IN THE REGION

A.D. Khovanskiy¹, O.A. Khoroshev¹, V.V. Latun¹

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

Хованский Александр Дмитриевич – доктор географических наук, профессор, кафедра социально-экономической географии и природопользования, Институт наук о Земле, Южный федеральный университет, ул. Зорге, 40, г. Ростов-на-Дону, 344090, Россия, e-mail: khovansk@yandex.ru

Alexandr D. Khovanskiy - Doctor of Geography, Professor, Department of Socio-Economic Geography and Nature Management, Institute of Earth Sciences, Southern Federal University, Zorge St., 40, Rostov-on-Don, 344090, Russia, e-mail: khovansk@yandex.ru

Хорошев Олег Анатольевич – кандидат географических наук, доцент, кафедра социально-экономической географии и природопользования, Институт наук о Земле, Южный федеральный университет, ул. Зорге, 40, г. Ростов-на-Дону, 344090, Россия, e-mail: ourregion@mail.ru

Oleg A. Khoroshev - Candidate of Geography, Associate Professor, Department of Socio-Economic Geography and Nature Management, Institute of Earth Sciences, Southern Federal University, Zorge St., 40, Rostov-on-Don, 344090, Russia, e-mail: ourregion@mail.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 Nature Management, Institute of Earth Sciences, Southern Federal University, Zorge St., 40, Rostov-on-Don, 344090, Russia, e-mail: vlatun@yandex.ru

Выполнен анализ существующей системы управления природопользованием в регионе, определены наличие и содержание основных элементов управления, их положительные и слабые стороны, выявлены основные проблемы управления. Для совершенствования природоохранной деятельности и обеспечения экологической безопасности в регионе предлагается создание региональной системы экологического менеджмента (СЭМ), соответствующей современным требованиям и международным стандартам. Разработана модель и определены основные задачи региональной СЭМ, сформулировано выполнение основных элементов управления в региональной системе экологического менеджмента.

Ключевые слова: экологический менеджмент, региональная система управления природопользованием, международные стандарты ISO 14000, экологическая безопасность, совершенствование региональной системы экологического менеджмента, Ростовская область.

In the article the analysis of existing system of environmental management in the region, identified the availability and content of the basic controls, their strong and weak points, the basic problems of management. To improve conservation and environmental security in the region proposes the creation of a regional environmental management system (EMS), corresponding to modern requirements and international standards. The developed model and identified the main tasks of the regional EMS, formulated the implementation of basic controls in regional environmental management system.

Keywords: environmental management, regional environmental management system, international standards ISO 14000, environmental safety, improvement of the regional environmental management system, Rostov Region.

Значительная часть регионов России относится к развитым в хозяйственном отношении территориям с крупными предприятиями добывающей, энергетической, химической промышленности, машиностроительного, агропромышленного, строительного, жи-

лично-коммунального комплексов. Следствием высоких темпов развития промышленности и сельского хозяйства в регионах является неизбежное усиление антропогенного воздействия на окружающую среду.

Для многих субъектов Российской Федерации (РФ) характерны высокий уровень загрязнения атмосферного воздуха в городских поселениях, проблемы утилизации отходов производства и потребления, загрязнение водных объектов недостаточно очищенными сточными водами, деградация почвенного покрова, неудовлетворительное состояние растительного покрова, снижение биоразнообразия и др.

Для решения вышеперечисленных проблем одной из важнейших задач, определенной «Основами государственной политики в области экологического развития Российской Федерации на период до 2030 года» [1], является формирование эффективной региональной системы управления в области охраны окружающей среды и обеспечения экологической безопасности, предусматривающей применение современных методов управления и взаимодействие органов государственной власти.

Таким образом, целью настоящей работы являются анализ существующей системы управления природоохранной деятельности в регионе и разработка региональной системы управления природопользованием, соответствующей международным стандартам и обеспечивающей экологическую безопасность субъекта РФ.

В настоящее время в сфере охраны окружающей среды и использования природных ресурсов на территории субъектов РФ действует четырехуровневая система управления природоохранной деятельностью. Федеральный уровень – Министерство природных ресурсов и экологии РФ и его территориальные подразделения, региональный уровень – министерство природных ресурсов и экологии региона, муниципальный уровень – экологическая служба или эколог муниципального образования, локальный уровень – экологическая служба предприятия или организации (рис. 1).

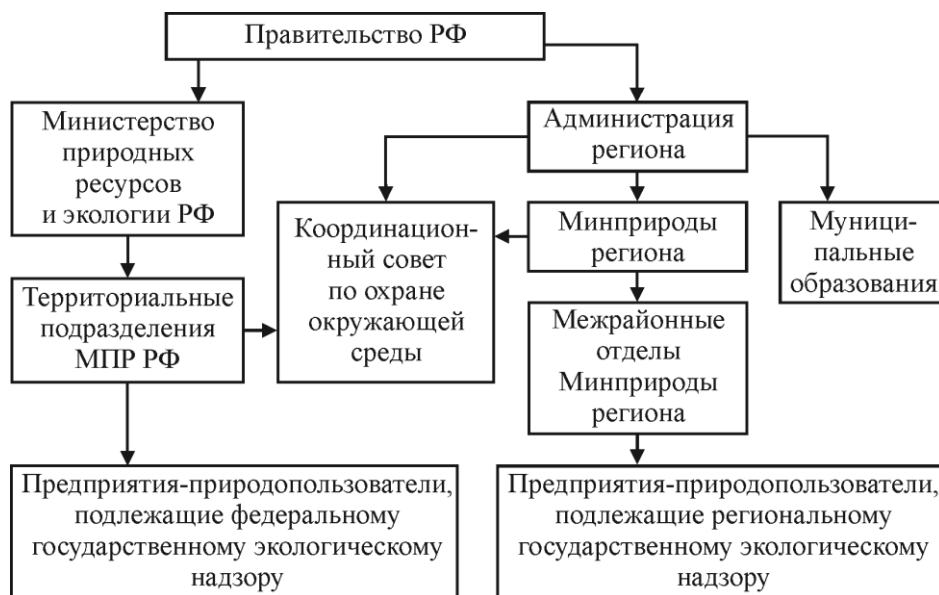


Рис. 1. Схема управления природоохранной деятельностью в регионах Российской Федерации / Fig. 1. The scheme of environmental management in the regions of the Russian Federation

Полномочия указанных природоохранных органов в регионах отражены в Законе РФ «Об охране окружающей среды» и других нормативных актах.

Современные системы управления основаны на методологии, известной как Plan – Do – Check – Act (PDCA) – «Планируй – выполняй – проверяй – улучшай». Кратко методология PDCA может быть описана следующим образом.

Планируй – установи цели и мероприятия для реализации политики в определенной сфере деятельности.

Выполняй – выполни запланированные мероприятия.

Проверяй – осуществляй мониторинг и измерения полученных результатов по отношению к политике, целям, законодательным и другим требованиям в определенной сфере деятельности и сообщай результаты.

Улучшай – предпринимай меры по постоянному улучшению действенности в определенной сфере.

Для управления экологическими аспектами хозяйственной деятельности Международной организацией по стандартизации разработана серия международных стандартов в области охраны окружающей среды и использования природных ресурсов ISO 14000. Основные требования к созданию систем

управления природоохранной деятельностью представлены в стандарте ISO 14001:2015 (ГОСТ Р ИСО 14001-2016) [2, 3]. Они заключаются в следующем:

1. *Среда организации.* Организация должна определить внешние и внутренние факторы, влияющие на природоохранную деятельность и экологическую ситуацию в организации; заинтересованные стороны, их потребности и ожидания, имеющие отношение к природоохранной деятельности организации.

2. *Лидерство.* Высшее руководство организации должно принимать участие в системе экологического менеджмента и отвечать за ее результативность посредством обеспечения разработки экологической политики и экологических целей; интеграции системы экологического менеджмента в общую систему управления организации; обеспечения необходимых для системы экологического менеджмента ресурсов; распределения полномочий и ответственности в системе экологического менеджмента.

3. *Планирование.* Организация должна установить экологические цели и разработать план действий по их достижению и реализации экологической политики. При планировании необходимо учесть значимые экологические аспекты, принятые обязательства, а также риски и возможности, связанные с управлением природоохранной деятельностью и достижением целей.

4. *Средства обеспечения.* Организация должна выделить необходимые ресурсы для разработки, внедрения, поддержания и постоянного улучшения системы экологического менеджмента, а также обеспечить компетентность и осведомленность персонала, внутренний и внешний обмен информацией, создание и управление документированной информации.

5. *Деятельность.* Организация должна выполнять запланированные мероприятия, осуществлять экологическое управление производственными процессами, быть готовой к реагированию на потенциальные аварийные и другие нештатные ситуации.

6. *Оценка результатов деятельности.* Организация должна осуществлять мониторинг и оценивать экологические результаты своей деятельности; производить оценку выполнения принятых ею обязательств; проводить внутренние аудиты системы экологического менеджмента для определения ее соответствия требованиям стандарта ISO 14001.

7. *Улучшение.* Анализ и постоянное улучшение собственной системы экологического менеджмента и природоохранной деятельности в целом для повышения своей общей экологической результативности.

В процессе анализа функционирования региональной системы управления природоохранной деятельностью на примере одного из регионов Российской Федерации – Ростовской области – и оценивались наличие и содержание основных элементов

управления, их соответствие требованиям международного стандарта ISO 14001:2016 (ГОСТ Р ИСО 14001:2016) с учетом особенностей и структуры существующей системы управления.

По результатам анализа были определены наличие и содержание основных элементов управления, их положительные и отрицательные стороны, выявлены основные проблемы управления и представлены предложения по совершенствованию системы управления природоохранной деятельностью в регионе.

В Ростовской области реализуются все основные элементы управления природоохранной деятельностью, однако содержание и способы управления не всегда соответствуют современным требованиям, предъявляемым к системам экологического менеджмента.

В регионе на основании данных экологического мониторинга и экологической отчетности производится оценка состояния окружающей среды. Однако по её результатам не составляется перечень значимых источников воздействия на окружающую среду (экологических аспектов), не выделяются и не систематизируются основные экологические проблемы территории.

В системе управления природоохранной деятельностью региона определены участники управления и заинтересованные стороны. Результаты анализа показывают, что не все предприятия и организации (рис. 1) принимают участие в процессе планирования природоохранной деятельности. В региональных документах по планированию природоохранной деятельности практически не отражены мероприятия по охране окружающей среды предприятий-природопользователей, оказывающих значительное воздействие на окружающую среду.

Правительством и министерством природных ресурсов и экологии Ростовской области разработаны План действий по реализации Основ государственной политики в области экологического развития РФ на период до 2030 г. и Стратегия сохранения окружающей среды и природных ресурсов Ростовской области на период до 2020 г., которые отражают основные направления природоохранной деятельности в регионе. Однако основные направления природоохранной деятельности не в полной мере согласуются с экологическими проблемами региона и требуют корректировки с учетом характера и масштаба воздействия хозяйственной деятельности на окружающую среду.

В регионе разработаны и действуют государственная программа Ростовской области и муниципальные программы «Охрана окружающей среды и рациональное природопользование» на период 2014–2020 гг. В связи с тем, что не произведена

идентификация значимых источников воздействия на окружающую среду и экологических проблем региона, в программах не отражены мероприятия по снижению воздействия на окружающую среду предприятиями, осуществляющими наиболее значительные выбросы и сбросы загрязняющих веществ, размещение отходов. Кроме того, недостаточно согласованы между собой план действий, стратегия и экологическая программа региона.

К недостаткам реализации природоохранной деятельности следует отнести невыполнение ряда запланированных мероприятия по охране окружающей среды, снижению воздействия на окружающую среду, соблюдению требований природоохранного законодательства, а также отсутствие данных по выполнению природоохранных мероприятий предприятиями, оказывающими значительное воздействие на окружающую среду.

При осуществлении государственного экологического надзора выявляются и устраняются нарушения природоохранного законодательства. В Ростовской области проводится мониторинг состояния окружающей среды, который представляет собой комплексную систему наблюдений за состоянием атмосферного воздуха, водных объектов, земель, недр. Однако по результатам не проводится комплексная экологическая оценка региона, не выявляются значимые источники воздействия на окружающую среду и экологические проблемы региона. Кроме того, не проводится аудит региональной системы управления природоохранной деятельностью.

В качестве анализа и улучшения природоохранной деятельности проводится оценка эффективности реализации экологической программы Ростовской области по следующим показателям: степень достижения целей программы, степень реализации основных мероприятий программы, степень соответствия расходов запланированному уровню затрат.

Указанные показатели не в полной мере соответствуют системе показателей, рекомендуемых ГОСТ Р ИСО 14031-2001 [4]. В анализе практически отсутствуют показатели снижения антропогенного воздействия на окружающую среду и улучшения состояния окружающей среды в результате реализации природоохранных мероприятий.

Рассмотренные элементы управления природоохранной деятельностью в регионе не представляют собой единую систему управления, направленную на снижение воздействия хозяйственной деятельности на окружающую среду, улучшение состояния окружающей среды и повышение результативности системы экологического управления.

Для совершенствования природоохранной деятельности в регионе предлагается создание региональной системы экологического менеджмента (СЭМ), соответствующей современным требованиям и международным стандартам. Модель такой системы представлена на рис. 2.

Главной целью региональной СЭМ являются повышение результативности природоохранной деятельности и обеспечение экологической безопасности региона.

К основным задачам региональной СЭМ относятся:

1. Экологический анализ хозяйственной деятельности, включающий экологический анализ внешней и внутренней среды региона и комплексную оценку состояния окружающей среды.

2. Распределение полномочий и ответственности между институциональными структурами, участвующими в региональной СЭМ.

3. Разработка экологической политики, стратегическое и оперативное планирование природоохранной деятельности.

4. Реализация мероприятий по снижению негативного воздействия на окружающую среду, рациональному использованию природных ресурсов, охране природных экосистем, выполнению принятых обязательств.

5. Экологизация производства, энерго- и ресурсосбережение, экологическое управление технологическими процессами.

6. Региональный экологический контроль и мониторинг, аудит СЭМ.

7. Обеспечение экологической безопасности региона.

8. Оценка результативности природоохранной деятельности.

9. Совершенствование природоохранной деятельности и СЭМ.

На основании имеющегося опыта разработки и внедрения СЭМ [5, 6] выполнение основных элементов управления в региональной СЭМ в соответствии с требованиями международного стандарта ISO 14001:2016 можно сформулировать следующим образом:

1. Используя данные региональной экологической отчетности и мониторинга окружающей среды, производится экологическая оценка хозяйственной деятельности в регионе. В процессе оценки определяются воздействие на окружающую среду выбросов в атмосферу, сбросов в водные объекты, отходов производства и потребления, использование водных и энергетических ресурсов, нарушение почвенного и растительного покрова, общая антропогенная нагрузка. Производится как комплексная оценка со-

5. Экологизация производства предполагает энерго- и ресурсосбережение, уменьшение энерго- и природоемкости производственных процессов за счет совершенствования существующих и внедрения новых технологий, модернизации и замены оборудования, снижение воздействия на окружающую среду в процессе оптимизации технологических режимов и экологического управления технологическими процессами на действующем оборудовании, учет экологических проблем в общей системе управления производством.

6. Для определения соответствия хозяйственной деятельности существующим природоохранным требованиям выполняется государственный и производственный экологический контроль. Соответствие качества окружающей среды установленным нормативам определяется по данным экологического мониторинга. Проверка соответствия систем экологического менеджмента требованиям международных стандартов производится в процессе экологического аудита. По результатам экологического контроля и аудита выявляются несоответствия и разрабатываются мероприятия по их устранению.

7. Обеспечение экологической безопасности региона, повышение защищенности человека, общества и окружающей среды от источников экологической опасности достигается в процессе реализации системы мероприятий по обеспечению промышленной и экологической безопасности опасных производственных объектов; по охране окружающей среды в процессе повседневной хозяйственной деятельности; по предупреждению и ликвидации чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера.

8. На основании данных экологического контроля, мониторинга и аудита, с помощью разработанной системы критериев и показателей, производятся анализ и оценка результативности природоохранной деятельности в регионе. По результатам анализа выполняются оценка достижения поставленных целей, выявление возможностей для улучшения, разработка новых целевых показателей.

Условиями эффективной разработки и функционирования региональной СЭМ являются:

- постановление правительства (администрации) региона о принятии концепции региональной системы экологического менеджмента и утверждение плана действий по ее разработке и внедрению;
- наличие или создание эффективных структур, выделение необходимых ресурсов для реализации принятых решений;

- четкое распределение полномочий и ответственности между институциональными структурами;

- разработка нормативно-методического обеспечения региональной СЭМ, определяющего порядок выполнения основных элементов управления;

- информационно-методическое обеспечение СЭМ.

Разработку и внедрение СЭМ условно можно разделить на 5 этапов:

1. Выполнение экологической оценки хозяйственной деятельности, определение экологических проблем региона, установление экологической политики и целей.

2. Разработка средств и методов управления, процессов и процедур в системе управления, определение порядка их выполнения.

3. Внедрение и функционирование региональной СЭМ, распределение ответственности и полномочий, обучение персонала, обеспечение понимания участниками основных элементов управления.

4. Проведение экологического контроля, мониторинга и аудита на соответствие установленным требованиям, экологической политике и целям, выявление несоответствий, разработка мероприятия для исправлений и улучшений.

5. Анализ со стороны руководства полученных результатов, выполнение предупреждающих и корректирующих действий, улучшение СЭМ и природоохранной деятельности, корректировка экологической политики и целей.

Функционирование региональной СЭМ обеспечивает повышение эффективности природоохранной деятельности, систематическое снижение отрицательного воздействия на окружающую среду, выполнение требований природоохранного законодательства, соответствие требованиям международных стандартов ISO 14000, обеспечение экологической безопасности региона.

Литература

1. Основы государственной политики в области экологического развития Российской Федерации на период до 2030 года. URL: <http://www.consultant.ru> (дата обращения: 10.06.2017).

2. ISO 14001:2015. Environmental Management Systems Requirements with guidance for use.

3. ГОСТ Р ИСО 14001-2016. Системы экологического менеджмента. Требования и руководство по применению. URL: <http://www.consultant.ru> (дата обращения: 05.06.2017).

4. ГОСТ Р ИСО 14031-2001. Управление окружающей средой. Оценивание экологической эффективности. Общие требования. URL: <http://www.consultant.ru> (дата обращения: 05.06.2017).

5. Зинovieв В.В., Будзуляк Б.В., Сайфуллин И.Ш., Хованский А.Д., Аксютин О.Е. Разработка системы экологического управления на предприятиях газовой отрасли // Газовая промышленность. 2006. № 7. С. 66–68.

6. Завгороднев А.В., Хованский А.Д., Маслова Е.В., Коняев С.В. Организация природоохранной деятельности на газотранспортных предприятиях : учеб.-метод. пособие. Ставрополь : Дизайн-студия, 2014. 348 с.

References

1. *Osnovy gosudarstvennoi politiki v oblasti ekologicheskogo razvitiya Rossiiskoi Federatsii na period do 2030 goda* [Principles of state policy in the field of environmental development of the Russian Federation for the period till 2030]. Available at: <http://www.consultant.ru> (accessed 10.06.2017).

2. *ISO 14001:2015. Environmental Management Systems. Requirements with guidance for use.*

3. *GOST R ISO 14001-2016. Sistemy ekologicheskogo menedzhmenta. Trebovaniya i rukovodstvo po primeneniyu* [GOST R ISO 14001-2016. Environmental management systems. Requirements with guidance for use]. Available at: <http://www.consultant.ru> (accessed 05.06.2017).

4. *GOST R ISO 14031-2001. Upravlenie okruzhayushchei sredoi. Otsenivanie ekologicheskoi effektivnosti. Obshchie trebovaniya* [GOST R ISO 14031-2001. The management of the environment. Evaluating environmental efficiency. General requirements]. Available at: <http://www.consultant.ru> (accessed 05.06.2017).

5. Zinov'ev V.V., Budzulyak B.V., Saifullin I.Sh., Khovanskii A.D., Aksyutin O.E. *Razrabotka sistemy ekologicheskogo upravleniya na predpriyatiyakh gazovoi otrasli* [Development of system of ecological management at the enterprises of the gas industry]. *Gazovaya promyshlennost'*. 2006, No. 7, pp. 66-68.

Zavgorodnev A.V., Khovanskii A.D., Maslova E.V., Konyaev S.V. *Organizatsiya prirodookhrannoi deyatel'nosti na gazotransportnykh predpriyatiyakh* [Organization of environmental activities at gas transmission companies]. Textbook. Stavropol: Dizain-studiya, 2014, 348 p.

НАУЧНАЯ ЖИЗНЬ

SCIENTIFIC LIFE

DOI 10.23683/0321-3005-2017-4-1-146-147

1-Я И 2-Я МЕЖДУНАРОДНЫЕ КОНФЕРЕНЦИИ «СОДЕРЖАНИЕ И РАЗВЕДЕНИЕ САЙГАКА В ИСКУССТВЕННЫХ УСЛОВИЯХ»

(Ростов-на-Дону, Москва, 2013, 2017 гг.)

1ST AND 2ND INTERNATIONAL CONFERENCE "THE SAIGA CONTENT AND BREEDING IN ARTIFICIAL CONDITIONS"

(Rostov-on-Don, Moscow, 2013, 2017)

Из характерных степных копытных до настоящего времени в Европе сохранился только сайгак. К началу XX в. в Евразии его почти полностью истребили, но благодаря охранным мерам к середине XX в. в ряде мест он был восстановлен и стал промысловым видом (поголовье калмыцкой популяции доходило до 600–800 тыс. особей). Развитие орошаемого земледелия и животноводства, массовый отстрел животных, другие причины привели в 70–80-е гг. XX в. к снижению поголовья сайгака, а с 90-х гг. к его резкому падению. В начале XXI в. количество особей в России сократилась до 21 тыс. экз., в 2014–2017 гг. – до 3–5 тыс. особей. Вид включен в приложение II СИТЕС, в Красный список Международного союза охраны природы (МСОП), Красные книги Калмыкии, Ростовской, Оренбургской и Омской областей, охраняется WWF. Для него создали заповедники «Черные земли» и «Ростовский», заказник «Степной», ряд других особо охраняемых природных территорий (ООПТ), но ситуация с сайгаком остается критической. В России он находится на грани исчезновения.

Одним из важных направлений в сохранении животных является их содержание и разведение в неволе (*ex situ*) с последующим выпуском в природу (примеры – лошадь Пржевальского, зубр и т.д.). Попытки содержания сайгаков в зоопарках имели место в XIX–XX вв. в России, Америке, Европе и Азии, но везде отмечалась их высокая смертность, что привело к отказу зоопарков от этих животных. Ведутся работы по разведению сайгака в питомниках России, Китая, Украины, Казахстана, где сталкиваются с многими трудностями, осложняющими развитие этого направления. Успехов в разведении сайгака в вольерах России добилась ассоциация «Живая природа степи» (далее Ассоциация). В

хут. Кундрюченском Орловского р-на она создала Центр редких животных европейских степей (Центр), где в 2004 г. поместила 10 сайгаков. Были выяснены наиболее удобные размеры, конструкции и формы вольеров, определены корма для взрослых и молодых особей в разные периоды года, время кормления и состав смесей для искусственного выкармливания молодняка, налажено распределение животных по вольерам в зависимости от возраста, пола, физиологического состояния, количества особей. Уже в 2008–2011 гг. удалось значительно сократить смертность животных, сделать её меньше природной, довести поголовье до 60–70 экз. и создать самовоспроизводящуюся группировку сайгаков.

Опыт работы Ассоциации, других питомников и зоопарков был обобщен в книге В.А. Миноранского и С.В. Толчеевой «Вольерное содержание сайгака (*Saiga tatarica* L.)» (Ростов н/Д., 2010. 288 с.). В 2013 г. на базе Центра прошла 1-я Международная конференция «Содержание и разведение сайгака в искусственных условиях». В ней участвовали представители Минприроды РФ и РО, ЮНЕСКО, ЮФУ, ФГБУ «Центрохотконтроль», Ин-та проблем экологии и эволюции РАН (ИПЭЭ РАН), ЮНЦ РАН, Ин-та степи УрО РАН, заповедников «Ростовский», «Аскания-Нова» и «Черные земли», Центра диких животных Республики Калмыкия, Московского и Ростовского зоопарков, Ин-та зоологии Казахстана и других структур. Были даны рекомендации по сохранению этого вида. Ряд из них внедрили (Постановление Правительства РФ № 978 от 31.10.2013 г. о включении сайгака в перечень особо ценных диких животных); созданы питомники в Казахстане и Крыму; появились сайгаки в зоопарке в Алма-Ате и др.

К сожалению, ситуация с сайгаком продолжает ухудшаться. Массовая их гибель в 2015 г. в Казахстане и в зиму 2016/2017 гг. в Монголии, в питомниках «Сайгак» ГООХ «Астраханское» (2009) и Центре диких животных Калмыкии (2014) свидетельствует о критическом состоянии поголовья. В этих условиях возросло внимание к содержанию сайгаков в искусственных условиях. Вышла книга Т.Ю. Каримова, А.А. Лушекиной и В.В. Рожнова «Сайгаки в неволе: от содержания и разведения до выпуска в природу» (М., 2017. 122 с.). В ИПЭЭ РАН в Москве по инициативе МСОП, Альянса по сохранению сайгака (SCA), зоопарка Сан-Диего и ИПЭЭ РАН 28–30 августа 2017 г. прошла 2-я Международная конференция по разведению сайгака в неволе с целью его сохранения, включающая семинар и ежегодное общее собрание SCA.

В её работе участвовали сотрудники МСОП (Д. Мэллон), Минприроды РФ (А. Межнев), Альянса SCA (Э. Милнер-Гулланд), зоопарков Берлина (К. Керн), Сан-Диего (Э. Блу, Д. О'Коннор, США) и Денвера (К. Сили, США), ИПЭЭ РАН (В. Рожнов, В. Неронов, А. Лушекина, М. Холодова), Казахстана (Ш. Зутер, Ю. Грачев), Монголии (Чимеддорж Буяна), Узбекистана (А. Есипов, В. Солдатов), Центра по сохранению тропических копытных США (Д. Холланд), Королевского зоологического общества Шотландии (М. Эндерби), Международного фонда защиты животных (IFAW – М. Воронцова), Международного фонда дикой природы (WWF – О. Переладова) и др. Участники обсудили состояние сайгаков в различных регионах, негативно влияющие на них причины, принимаемые для сохранения меры. Большое внимание уделили роли центров по разведению сайгака и условиям их содержания в неволе, значению для пополнения популяций в природе.

Об опыте содержания сайгаков в неволе рассказали Ю.Н. Арылов (Центр диких животных Калмыкии), С.А. Калашников (Астраханский центр защиты сайгака), Б.Б. Сарсенова (Центр разведения сайгака Казахстана) и другие участники. Интересные материалы по разведению этих животных накоплены в заповеднике «Аскания-Нова» (В.С. Гавриленко), Китайском питомнике сайгаков (Жианг Жиганг). В России самая многочисленная и продолжительно существующая их группировка имеется в Центре Ассоциации. С 2004 г. здесь было создано «домашнее» стадо сайгаков, способных обитать в питомниках, зоопарках, на фермах. В связи с угрозой гибели животных от болезней и других причин, необходимостью увеличения их поголовья и подготовки части особей к выпуску в природу Ассоциация в 2015–2017 гг. в 50 км от Центра построила в естественной степи дополнительные загоны площадью 63 и 512 га, куда выпустила часть сайгаков. Животные уже адаптировались к новым условиям и начали размножаться.

Участники конференции всесторонне проанализировали сложившуюся с сайгаками ситуацию, оценили успехи и трудности их разведения в искусственных условиях, обсудили меры по успешному развитию искусственного содержания и размножения животных. Отмечена важность улучшения генетического фонда, поведения и физического состояния животных, содержащихся в неволе. Подчеркнут научный, образовательный и информационный потенциал сайгаков, содержащихся в неволе. Резолюция конференции направлена правительствам стран, где имеются эти животные, природоохранным государственным и общественным структурам, международным неправительственным организациям, включая IFAW, WCS и WWF.

*В.А. Миноранский, доктор сельскохозяйственных наук, профессор,
Южный федеральный университет*

DOI 10.23683/0321-3005-2017-4-1-148-149

**VIII МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
«ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ. ВЗГЛЯД В БУДУЩЕЕ»**
(Ростов-на-Дону, Абрау, 8–11 сентября 2017 г.)

**VIII INTERNATIONAL SCIENTIFIC-PRACTICAL CONFERENCE
"ENVIRONMENTAL PROBLEMS. LOOKING TO THE FUTURE"**
(Rostov-on-Don, Abrau, September, 8–11, 2017)

С 8 по 11 сентября 2017 г. на базе Южного федерального университета состоялась VIII Международная научно-практическая конференция «Экологические проблемы. Взгляд в будущее». Следует отметить, что организация данного мероприятия стало доброй традицией, которого все с нетерпением ждали.

В Российской Федерации 2017 г. объявлен Годом экологии, а для Ростовского областного отделения Русского географического общества – это еще и юбилей – 70 лет со дня основания. Именно этим событиям и была посвящена VIII Международная научно-практическая конференция «Экологические проблемы. Взгляд в будущее».

Повышенный интерес к тематике конференции проявился в широкой географии заявленных докладов. В работе конференции приняли участие более 100 ученых, среди которых были ведущие российские и зарубежные специалисты. Наиболее широко были представлены вузовские организации, ведущие исследования в различных областях, связанных с экологией, охраной окружающей среды и природопользования, а также академические институты. Активное участие в работе приняли коллеги из Германии, Испании, Китая, Кубы, США, Украины и Франции. Была чрезвычайно высока представительность на конференции молодых ученых, аспирантов и студентов.

На конференцию было подано 130 докладов, освещающих широкий круг проблем. Была организована работа пяти секций:

1. «Глобальные, региональные и локальные эколого-географические проблемы».
2. «Мониторинг, диагностика и индикация природных и антропогенных наземных и аквальных ландшафтов».
3. «Теоретические и практические проблемы экологии, охраны окружающей среды и рационального природопользования».
4. «Водные ресурсы, гидрология и гидрохимия. Экологические проблемы океанических, морских и эстуарных акваторий, побережий и прилегающих территорий».

5. «Принципы и методы изучения и прогнозирования состояния окружающей среды».

Регламент конференции предусматривал пленарные получасовые лекции, секционные доклады продолжительностью 15 минут, а также стендовые доклады.

На конференции были представлены результаты современных исследований в области антропогенной трансформации наземных и аквальных ландшафтов и их компонентов. Во время заседаний секций обсуждались вопросы современного состояния и развития водных и наземных природных и природно-техногенных комплексов в условиях хозяйственной деятельности человека. Важное место среди них занимают исследования биогеохимических особенностей миграции, аккумуляции и трансформации поллютантов в различных средах.

С приветственным докладом выступил председатель оргкомитета международной научно-практической конференции главный научный сотрудник Института наук о Земле, заведующий кафедрой физической географии, экологии и охраны природы ЮФУ, профессор, д.г.н. Ю.А. Федоров.

Высокий уровень конференции был задан уже первым пленарным докладом *В.Н. Зырянова* (Институт водных проблем РАН, Москва), который был посвящен исследованию закономерностей роста льда, роли пампинг-эффекта (эффекта накачки) в процессах нелинейной диффузии тепла в ледяном покрове и его влияния на скорость нарастания льда. Большой интерес вызвал доклад *С.А. Бузмакова* (Пермский государственный национальный исследовательский университет) о трансформации природной среды в карстовом районе при добыче нефти.

В докладах сотрудников Института наук о Земле ЮФУ были рассмотрены теоретические, методические и практические вопросы геохимии различных элементов в природных и природно-техногенных комплексах. Например, доклад *И.В. Доценко* был посвящен геохимии микроэлементов в постоянно меняющейся ветровой обстановке в Азовском море. *Д.Н. Гарькуша* посвятил свое выступление образо-

ванию метана и сероводорода в донных осадках озера Байкал. *В.Т. Богучарсков* рассказал об истории создания Ростовского отделения Русского географического общества. *А.Н. Кузнецов* с соавторами привел результаты многолетних наблюдений динамики естественной трансформации разлившегося мазута танкера «Престиж» на побережье Испании. *М.Г. Тарасов* и *В.Н. Волков* рассмотрели использование трассерных исследований для решения экологических проблем, а также эколого-гидрогеологические проблемы территории Ботанического сада и предложили пути их решения. *Д.Ю. Шишкина* дала характеристику структуры землепользования в Ростовской области и оценила ее роль как индикатора антропогенной нагрузки. Серия докладов была представлена молодыми учеными, аспирантами и магистрами Ведущей научной школы проф. Ю.А. Федорова. Причем спектр тематики их докладов был очень широк – от геохимии тяжелых металлов и железа в речных, эстуарных и морских экосистемах (*О.В. Назаренко*, *Л.Ю. Дмитрик*, *А.А. Зимовец*, *А.В. Михайленко*, *В.А. Савицкий* и др.) и ландшафтах Полистовского заповедника (*Г.В. Шипкова*) до изучения в лечебных сульфидных грязях распределения естественных и техногенных радионуклидов (*В.М. Ярославцев*) и сульфитредуцирующих кластридий (*Р.Г. Трубник*).

Представителями делегации Академии биологии и биотехнологии были сделаны доклады об экологическом состоянии почв Ростова (*С.Н. Горбов*) и Красной книге почв Ростовской области (*О.С. Безуглова*), большое внимание было уделено вопросам экотоксикологического мониторинга с помощью батареи бактериальных lux-сенсоров и загрязнению биоценозов генами антибиотикорезистентности (*М.А. Сазыкина*, *И.С. Сазыкин* и др.).

Сотрудники Московского государственного университета сделали интересные доклады, вызвавшие многочисленные вопросы. Трансформация органических веществ при миграции в водном потоке стала темой исследования *О.Ю. Дроздовой*, *С.А. Лапицко*. Сравнительному геохимическому анализу составов донных отложений водотоков и водоемов бере-

альной климатической зоны была посвящена работа *Е.С. Гришанцевой*, *Ю.В. Алехина* и других. *Р.В. Фяйзуллина* посвятила свое сообщение ртути в атмосферном воздухе регионов России.

Изучению влияния шторма на процессы эрозии на побережье Вандеи была посвящена работа французских исследователей *Paul Fattal* и др. Коллега из США *T. Morin* с соавторами представил оценку физических и химических свойств ливневой воды и почв г. Нью-Йорка. Интересный доклад был представлен сотрудником Росгидромета *П.М. Лурье* по изменению распределения стока по рукавам в дельте реки Дон в связи с изменением климата. Большой интерес вызвал доклад *В.И. Черных* из г. Луганска «Создание системы локального мониторинга угледобывающего района», который дал экологическую характеристику угледобывающего района. Сотрудник Института геологии и минералогии СО РАН (Новосибирск) *Е.А. Овдина* сделала сообщение о радиозекологической оценке сапропелей зоны южной тайги на примере Западной Сибири. О влиянии экстремальных гидрологических ситуаций на химический состав речных вод на примере рек Дальнего Востока был доклад *В.М. Шулькина* и его коллег (Тихоокеанский институт географии, Владивосток). *Е.А. Зубков* дал характеристику влияния подземных вод застроенных и сельскохозяйственных территорий юга Ростовской области на качество воды Нижнего Дона. Российские и испанские коллеги (*В.В. Сухоруков*, *Д.Н. Гарькуша*, *А. Гонсалес*, *Д. Тассин*) посвятили свое выступление структуре образования и опыту обучения в Университете города Кадис. Доклад кубинских коллег стал результатом исследований экосистемы севера провинции Ольгиен (Куба) и оценки качества природных вод (*Я. Куао*).

Участники конференции выразили благодарность организаторам конференции за высокий уровень ее проведения и выразили надежду на скорейшую следующую встречу.

Высокий статус VIII Международной научно-практической конференции «Экологические проблемы. Взгляд в будущее» был подтвержден грантом РФФИ № 17-05-20426.

О.В. Назаренко, кандидат географических наук, доцент,
Южный федеральный университет

DOI 10.23683/0321-3005-2017-4-1-150

МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ PHENMA-2017

(Джабалпур (Индия), 14–16 октября 2017 г.)

INTERNATIONAL CONFERENCE PHENMA-2017

(Jabalpur (India), October, 14-16, 2017)

Традиционная ежегодная Международная конференция Physics and Mechanics of New Materials and Their Applications (PHENMA), одним из организаторов которой был Южный федеральный университет (ЮФУ), состоялась в г. Джабалпуре (Индия) с 14 по 16 октября 2017 г.

Программа конференции, проходившей по формуле очно-заочного участия, включала 327 докладов ученых из 21 страны с общим числом авторов докладов около 1000 чел. PHENMA-2017 стала уже шестой конференцией, традиционно проводимой в странах Азии: предыдущие конференции состоялись в г. Ростове-на-Дону (2012 г.), на Тайване (2013 г.), в Таиланде (2014 г.), в г. Азове (2015 г.), она была посвящена 100-летию Южного федерального университета) и в Индонезии (2016 г.). Индийская сторона приложила большие усилия, чтобы все участники смогли в максимальной степени представить на этой конференции свои результаты, найти новых друзей и сформировать конкурентоспособные команды для проведения новых совместных исследований.

Доклады, представленные на PHENMA-2017, продемонстрировали существующий довольно высокий уровень международного сотрудничества и включали результаты совместных российско-тайваньских и российско-индонезийских исследований, целая секция устных докладов была посвящена российско-индийскому научному сотрудничеству. Доклады были разбиты по 4 основным направлениям: процессы изготовления, физика, механика и применение новых материалов. Отдельные секции были посвящены различным экологическим и экономическим аспектам, связанным

с изготовлением и промышленным применением современных материалов, а также вопросам управления. Сборник тезисов докладов подготовлен в электронном виде и представлен на веб-сайте PHENMA-2017: <http://phenma2017.math.sfedu.ru>. Полнотекстовые доклады будут изданы в двух коллективных монографиях издательств Springer и Nova science publishers, а также в международном электронном журнале Material Physics and Mechanics. Бренд PHENMA уже получил широкую известность в азиатских странах. На конференции представителями университетов России, Тайваня, Индии и Индонезии было принято решение учредить PHENMA International Association, которую возглавит главный научный сотрудник Института математики, механики и компьютерных наук ЮФУ И.А. Паринов. Членами этой ассоциации смогут стать как физические, так и юридические лица, оплатившие одноразовый членский взнос, который позволит им уменьшить последующие регистрационные взносы при дальнейшем участии во всех конференциях и выставках, организуемых PHENMA. Задачи, которые ставит перед собой новая ассоциация, включают финансовую поддержку для участия в форумах PHENMA молодых ученых – членов ассоциации и для выполнения совместных научно-образовательных проектов коллективных членов ассоциации. Очередная конференция вместе с впервые проводимой выставкой PHENMA-2018 состоится в августе 2018 г. в г. Пусане (Южная Корея) и позволит сделать очередной шаг в быстроразвивающемся международном научно-образовательном сотрудничестве России и стран Азиатского континента.

*И.А. Паринов, доктор технических наук, главный научный сотрудник,
Южный федеральный университет*

НАШИ ЮБИЛЯРЫ

OUR PERSONS

DOI 10.23683/0321-3005-2017-4-1-151-152

ГАЙИРБЕГ МАГОМЕДОВИЧ АБДУРАХМАНОВ

HAIRBEG MAGOMEDOVICH ABDURAKHMANOV



20 ноября 2017 г. исполнилось 75 лет со дня рождения Гайирбегу Магомедовичу Абдурахманову – профессору, доктору биологических наук, заслуженному деятелю науки республик Дагестан и Ингушетия, Российской Федерации, академику РЭА и Международной академии ноосферы. Гайирбег Магомедович – ведущий на Юге России ученый, обогативший науку рядом достижений в области биогеографии, экосистем, зоологии, антропогенного воздействия на экосистемы и медицинской географии, создавший школу энтомологов и специалистов экологов.

Г.М. Абдурахманов в 1966 г. окончил биологический ф-т Дагестанского государственного университета (ДГУ), в 1970 г. – аспирантуру Зоологического ин-та АН СССР (г. Ленинград), в 1972 г. там же защитил кандидатскую диссертацию; в этом же институте прошел докторантуру и в 1982 г. защитил докторскую диссертацию по теме «Состав и происхождение жесткокрылых восточной части Большого Кавказа».

Многие годы Гайирбег Магомедович занимается учебной, научной и методической работой в Дагестанском государственном педагогическом университете (ДГПУ), пройдя путь от старшего преподавателя до заведующего кафедрами зоологии, экологии и рационального природопользования. В это же время он ведет большую общественную и научно-организационную работу, занимая должность секретаря комитета комсомола, первого секретаря Махачкалинского горкома комсомола; избирается депутатом Махачкалинского горсовета народных депутатов.

В 1993 г. он создал и возглавил Институт прикладной экологии Республики Дагестан; с 1997 г. – декан эколого-географического факультета ДГУ, заведующий кафедрой биологии и биологического разнообразия; с 2015 г. – директор Института экологии и устойчивого развития. Гайирбег Магомедович – разработчик закона «Об экологическом образовании населения Республики Дагестан», создатель и руководитель нового научного направления по генезису альпийских фаун Кавказа, главный редактор журнала «Юг России: экология, развитие» и международного журнала на английском языке «Биологическое разнообразие Каспийского моря и прибрежных экосистем»; руководит докторантами, аспирантами и соискателями ДГПУ, ДГУ, Дагестанского НЦ РАН по экологии, энтомологии, зоологии, является соруково-

дителем цикла исследований аспирантов Санкт-Петербургского государственного педагогического университета им. Герцена по экологическому образованию и воспитанию дошкольников. Под его руководством защищены 100 кандидатских и 10 докторских диссертаций.

Г.М. Абдурахманов активно участвует в общественной жизни России и Дагестана: он член центрального совета Российской энтомологического общества РАН, президиума УМО университетов России по экологии и устойчивому развитию, председатель докторского диссертационного совета, член центрального совета и председатель Дагестанского отделения Российской экологической партии «Зелёные», эксперт ООН (ЮНЕП) по проблемам Каспийского моря, директор Международного ин-та проблем экологии и развития при Ассоциации университетов Прикаспийских стран, директор НЦ по проблемам Каспийского моря Министерства образования и науки РФ.

Гайирбег Магомедович – создатель научного направления по генезису альпийских фаун Кавказа, автор бассейно-ландшафтной концепции природопользования в горных регионах, разработчик интегральной оценки состояния окружающей среды на Северном Кавказе и ее влияния на состояние здоровья и онкозаболеваемость населения СКФО. Им выполнена большая работа по анализу экологического содержания, разработке стратегии и плана действий по устойчивому развитию СКФО. Ученым создана и реализуется программа изучения, дана подробная оценка эколого-экономического

потенциала экосистем Каспийского моря, степени антропогенной трансформации прибрежных экосистем. Им разработано научное обоснование биомелиорации опустыниваемых почв Прикаспия, стратегии и плана действий по сохранению и сбалансированному использованию биологического разнообразия СКФО. Этими и другими исследованиями, вкладом в науку и практику ученый широко известен на Кавказе, Юге России и за пределами нашей страны.

Г.М. Абдурахманов – автор более 1300 научных публикаций, в том числе 120 монографий, из которых 12 выпустило издательство «Наука», 4 монографии изданы в США, Австрии, Германии и Польше. Им составлены учебные пособия, программы и 2 учебника для высшей школы; подготовлена и принята постановлением Правительства Дагестана «Государственная программа экологической безопасности и устойчивого развития Республики Дагестан», разработан закон РД «Об экологическом образовании населения Республики Дагестан». Ученый характеризуется обширностью и глубиной знаний в различных направлениях науки, практической направленностью исследований и их результативностью. Проф. Г.М. Абдурахманов внес большой вклад в решение проблем экологии и рационального природопользования на Кавказе, в стране, и коллеги искренне желают ему долгих лет жизни, бодрого здоровья, дальнейших успехов в научной, педагогической и общественной деятельности.

*В.А. Миноранский, доктор сельскохозяйственных наук, профессор,
Южный федеральный университет*

DOI 10.23683/0321-3005-2017-4-1-153-154

ВИКТОР ТРОФИМОВИЧ БОГУЧАРСКОВ
(к 80-летию со дня рождения)

VIKTOR TROFIMOVICH BOGUCHARSKOV
(To the 80th Anniversary)

Чтобы быть хорошим преподавателем,
нужно любить то, что преподаешь,
и любить тех, кому преподаешь.
В.О. Ключевский



24 октября 2017 г. исполнилось 80 лет со дня рождения и 60 лет научной и педагогической деятельности Виктора Трофимовича Богучарского, доктора географических наук, профессора кафедры физической географии, экологии и охраны природы Института наук о Земле Южного федерального университета (РГУ).

В 1960 г. Виктор Трофимович окончил геолого-географический факультет РГУ по специальности «физическая география». В течение 10 лет В.Т. Богучарсков работал в Азовском НИИ рыбного хозяйства (АзНИИРХ), пройдя путь от старшего техника до старшего научного сотрудника и ученого секретаря института. Он исследовал условия формирования рыбопродуктивности Азовского бассей-

на, участвовал в комплексных исследованиях дельты реки Кубани, на основе которых в 1967 г. защитил кандидатскую диссертацию на тему «Гидрология кубанских лиманов в связи с их мелиорацией» и написал монографию «Дельта Кубани».

В 1970 г. Виктор Трофимович был приглашен на кафедру физической географии РГУ и с тех пор постепенно продвигался по лестнице должностей от преподавателя до профессора. В период 1972–1975 гг. В.Т. Богучарсков исполнял обязанности заместителя декана геолого-географического факультета.

В 1977/78 учебном году обучался на курсах французского языка при Киевском университете. В 1981–1984 гг. преподавал в Национальной инженерной школе в Республике Мали. Свои впечатления о трехлетней зарубежной командировке изложил в книге «Моя Африка».

С 1985 по 2003 г. В.Т. Богучарсков выполнял обязанности заместителя заведующего кафедрой физической географии, экологии и охраны природы, председателя секции географии и геоэкологии методической комиссии факультета, члена научно-методического совета университета, члена экспертного совета Комитета по охране природы Ростовской области.

По возвращению в РГУ, помимо занятий со студентами по курсам лекций по физической и рекреационной географии, ему было поручено чтение лекций по истории и методологии географии. Это послужило основанием для составления фундаментального учебника «История географии», выдержавшего несколько изданий. В 2004 г. В.Т. Богучарскову Министерством образования РФ присвоено ученое звание профессора. В 2006 г. в виде научного доклада «История географии и ее преподавания в вузах России» была защищена диссертация на соискание ученой степени доктора географических наук по специальности 07.00.10 «История науки и техники».

Научные интересы профессора В.Т. Богучарскова связаны с историей и теорией географической

науки, проблемами географического образования, исследованиями региональных эколого-географических проблем. В активе В.Т. Богучарскова – свыше 120 опубликованных научных и научно-методических работ, 12 из которых монографического содержания. Наиболее важными являются:

– «История географии (учебное пособие с грифом Минобразования РФ). М.; Ростов н/Д. : Март, 2004. 448 с.»;

– «Очерки по истории экологического учения (географический аспект). Ростов н/Д. : изд-во РГУ, 2005. 189 с.»;

– «История географии (учебное пособие с грифом Минобразования РФ). М. : Академический проект, 2006. 560 с.»;

– «История географии и современность (научное издание). М. : Академический проект, 2006. 560 с.».

«История географии» В.Т. Богучарскова решением ВАК утверждена одним из основных пособий для подготовки к экзамену кандидатского минимума – «История и философия науки» по географическим специальностям.

Вот уже 35 лет Виктор Трофимович беспрерывно является научным консультантом, экспертом и председателем жюри секции географии и геоэкологии в Донской академии наук юных исследователей (ДАНЮИ), Центра по работе с одаренными детьми, многолетний председатель жюри областных и городских географических олимпиад школьников, был в жюри телевизионного конкурса «Эрудит Дона», регулярно выступал с докладами перед учителями по современным проблемам географической науки и образования.

Под руководством В.Т. Богучарскова подготовлены три кандидата географических наук и большое число специалистов: географов и геоэкологов.

Награжден почетной грамотой Министерства образования Российской Федерации (приказ №15/911 от 26.12.2000 г.), почетными грамотами и благодарственным письмом министра образования Ростовской области (2006, 2008 и 2012 гг.), почетной грамотой объединенного профкома при Посольстве СССР в Республике Мали (1983 г.), дипломом Русского географического общества за выдающиеся научные работы в области географии. От имени Президента Русского географического общества награжден также памятными медалями П.П. Семенова-Тян-Шанского и Н.М. Пржевальского за пропаганду географических знаний. За успехи в учебно-научной деятельности проф. В.Т. Богучарсков был награжден грамотами Министерств образования России и Ростовской области, отделом образования Администрации г. Ростова-на-Дону, а также юбилейной медалью «За заслуги перед Южным федеральным университетом» в связи со 100-летием университета в г. Ростове-на-Дону.

В.Т. Богучарсков пользуется заслуженным авторитетом у студентов и преподавателей. Он щедро делится своим опытом с коллегами и вносит большой вклад в достижение ключевых стратегических целей развития университета.

Сотрудники кафедры физической географии, экологии и охраны природы Южного федерального университета поздравляют В.Т. Богучарскова с юбилеем! Желают ему дальнейших творческих успехов, здоровья и жизненного благополучия!

*О.В. Назаренко, кандидат географических наук, доцент,
Южный федеральный университет*

Редакция и редколлегия журнала присоединяются ко всем поздравлениям, желают юбилярам крепкого здоровья на многие лета, благодарных учеников и покорения новых творческих вершин!

Указатель материалов, опубликованных в журнале
 «Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Естественные науки» в 2017 г.

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ

<i>Авсянкин О.Г.</i> О точном решении многомерного интегрального уравнения с однородным ядром.....	1
<i>Белявский Г.И., Гирченко М.А.</i> Комбинированный метод Монте-Карло для расчета справедливых цен барьерных опционов.....	1
<i>Беляева М.С., Данилова Н.В.</i> Расчёт справедливой цены для диффузионной модели со стохастической процентной ставкой.....	3-1
<i>Вагабов А.И.</i> О базисности собственных элементов дифференциального пучка шестого порядка с трехкратными характеристиками.....	1
<i>Вакулов Б.Г., Костецкая Г.С.</i> Обобщенные пространства Гельдера на сфере $H_k^{\rho}(S_{n-1}), H_k^{\rho}(S_{n-1}, \rho)$ и их связь с дифференциальными свойствами гармонических в шаре функций.....	3-1
<i>Ватульян А.О., Гусаков Д.В.</i> Исследование волновых процессов в неоднородном пористоупругом слое.....	2
<i>Ватульян А.О., Дударев В.В.</i> Об одном способе определения модуля сдвига двуслойной среды.....	3-1
<i>Гиль А.В., Нозин В.А.</i> Комплексные степени одного дифференциального оператора, связанного с оператором Гельмгольца.....	4-1
<i>Денисенко В.В., Деундяк В.М.</i> Об ограниченности интегральных операторов с однородными ядрами на группе Гейзенберга с нормой Кораньи.....	3-1
<i>Деундяк В.М., Мозилевская Н.С.</i> Об использовании мягких и вероятностных декодеров для восстановления данных при перехвате.....	1
<i>Долгих Т.Ф.</i> Решение задачи о переносе массы под действием электрического поля в двухкомпонентной смеси.....	3-1
<i>Ерусалимский Я.М.</i> 2- и 3-пути на графе-решетке и комбинаторные тождества.....	1
<i>Зинченко А.Б.</i> Компромиссные решения классической кооперативной игры.....	1
<i>Зинченко А.Б.</i> Специальные классы игр с нечеткими коалиционными структурами.....	4-1
<i>Золотов Н.Б., Пожарская Е.Д., Пожарский Д.А.</i> К контактными задачам для цилиндра.....	2
<i>Каменецкий Е.С., Орлова Н.С., Волик М.В., Минасян Д.Г.</i> Тестирование модели виброкипящего слоя, использующей метод дискретного элемента.....	4-1
<i>Коханенко В.Н., Кондратенко А.И., Косиченко М.Ю., Лидневский В.И., Келехсаев Д.Б.</i> Решение задачи свободного растекания потока за безнапорными водопропускными отверстиями.....	2
<i>Куракин Л.Г., Мелехов А.П., Островская И.В.</i> Об устойчивости правильной системы вихревых зарядов вне круговой области.....	4-1
<i>Мелехина Т.Л., Рустанов А.Р.</i> Конгармонические аналоги тождеств Грея для почти контактных метрических многообразий класса S_{10}	4-1
<i>Мироненко Г.В.</i> Задача о позиционировании случайного объекта за счет однократного изменения приращений его траектории.....	1
<i>Николенко П.В.</i> О множестве разреза в некоторых экстремальных задачах, связанных с перемещением в поле скоростей.....	4-1
<i>Норкин М.В.</i> Отрывной удар и кавитационное торможение цилиндра под свободной поверхностью тяжелой жидкости.....	1
<i>Пасенчук А.Э.</i> Об обратимости операторов линейного сопряжения с поточечно коммутирующими коэффициентами в счетно-нормированных пространствах гладких функций.....	1
<i>Плюкова Н.М., Ширяева Е.В.</i> О вычислении коэффициента турбулентного переноса в задаче о седиментации примеси.....	4-1
<i>Свиридкин Д.О., Скороходов В.А.</i> О задаче размещения потребителей в сетях с распределением потока. I. NP-полнота.....	3-1
<i>Хубежты Ш.С., Бесаева З.В.</i> Приближенное решение сингулярного интегрального уравнения, не ограниченное на концах интегрирования, с применением рядов Чебышева.....	2
<i>Чебаков М.И., Данильченко С.А., Ляпин А.А.</i> Контактная задача для упругого параллелепипеда при наличии трения и износа.....	2
<i>Чебаков М.И., Данильченко С.А., Ляпин А.А.</i> Моделирование износа на контакте двух упругих тел с учетом тепловыделения от трения.....	4-1
<i>Чеголин А.П.</i> Отрицательные комплексные степени классического двумерного телеграфного оператора в пространствах $L_p(R^2)$	4-1
<i>Штейнберг О.Б.</i> Классификация программных циклов с одним оператором присваивания.....	1

БИОЛОГИЧЕСКИЕ НАУКИ

<i>Бандовкина В.А., Нескубина И.В., Франциянц Е.М., Ткаля Л.Д., Пржедецкий Ю.В.</i> Влияние роста перевивной меланомы V16/F10 на функционирование системы перекисного окисления липидов в печени самок мышей C57BL/6.....	3-2
<i>Босенко Е.С., Кучкина Л.П., Луганская Р.Г., Сафорян Н.С., Тодоров С.С., Босенко С.Ж.-П., Ващенко Л.Н., Шатова Ю.С., Солдаткина Н.В.</i> Прогностическое значение некоторых белков в генезе пролиферативных состояний и опухолевых заболеваний молочной железы.....	4-2
<i>Водолажский Д.И., Куцын К.А., Панина С.Б., Енин Я.С., Кит О.И., Солдаткина Н.В., Бурицев Д.В., Шапошников А.В.</i> Влияние возрастного и гендерного статуса пациентов Юга России с колоректальным раком на мутационный статус гена KRAS.....	3-2
<i>Горошинская И.А., Маслов А.А., Медведева Д.Е., Сурикова Е.И., Немайкалова Л.А., Бурицев Д.В., Максимов А.Ю.</i> Уровень эндотоксикоза в крови больных раком желудка с разным гистотипом опухоли.....	3-2
<i>Горошинская И.А., Сурикова Е.И., Шалашина Е.В., Неродо Г.А., Максимова Н.А., Меньшенина А.П., Сергеева М.М., Качесова П.С., Немайкалова Л.А., Чудилова А.В., Кит О.И.</i> Состояние свободнорадикальных процессов при раке яичников с разной распространенностью и течением заболевания.....	4-2
<i>Гречишников Д.А., Попцова М.С.</i> Распознавание структур стебель – петля транспозонов человека и прогнозирование их функции при помощи модели машинного обучения.....	4-1

<i>Гуськова Н.К., Франциянц Е.М., Гуськова Е.А., Верескунова М.И., Шатова Ю.С., Моисеенко Т.И.</i> Экспериментальная модель как доказательство нарушений гормонопродуцирующей функции яичников при хламидиозе	4-2
<i>Демина О.Н., Борлакова Ф.М., Узденов И.Р., Дмитриев П.А., Рогаль Л.Л.</i> Закономерности распределения травяной растительности Скалистого хребта	2
<i>Демина О.Н., Борлакова Ф.М., Узденов И.Р., Дмитриев П.А.</i> Непрямая ординация травяной растительности Скалистого хребта (в пределах Карачаево-Черкесии).....	3-1
<i>Димитриади Т.А., Кит О.И., Бурцев Д.В.</i> Скрининг рака шейки матки. Мировой опыт. Ситуация в России.....	4-2
<i>Жуков В.В., Кожин А.А., Мрыхин В.В., Попова В.А.</i> Биологические аспекты применения лазерного излучения в коррекции экологических обусловленных патологических процессов	1
<i>Жукова Г.В., Шихлярова А.И., Бартенева Т.А., Шевченко А.Н., Атмачиои Д.П., Протасова Т.П., Филатова Е.В., Бабиева С.М., Пржедецкий Ю.В., Димитриади С.Н.</i> Эффекты активационной магнитотерапии при злокачественном процессе и «мелатониновая» гипотеза онкогенеза.....	3-2
<i>Жукова Г.В., Шихлярова А.И., Зинькович М.С., Розенко Л.Я., Ширнина Е.А., Росторгуев Э.Э., Кузнецова Н.С., Протасова Т.П.</i> Стрессорная ареактивность как механизм психосоматической адаптации больных с метастатическим поражением головного мозга.....	4-2
<i>Залибеков З.Г., Гамзатова Х.М.</i> Типы опустынивания почв и критерии оценки деградационных процессов	2
<i>Златник Е.Ю., Непомнящая Е.М., Шульгина О.Г., Золотарева Е.И., Туркин И.Н., Светицкий П.В., Ушакова Н.Д.</i> Морфологические особенности тимуса и селезенки мышей-опухоленосителей при введении металлических наночастиц	4-2
<i>Златник Е.Ю., Новикова И.А., Золотарева Е.И., Шульгина О.Г., Непомнящая Е.М., Ульянова Е.П., Бондаренко Е.С.</i> Влияние цитокиновых иммуномодуляторов на динамику роста и метастазирование перевиваемой меланомы В16 в эксперименте	3-2
<i>Каплиева И.В., Франциянц Е.М., Трештаки Л.К., Черярина Н.Д., Геворкян Ю.А., Бурцев Д.В.</i> Мониторинг факторов апоптоза в селезенке и печени у крыс на этапах экспериментального метастазирования в печень	3-2
<i>Касьяненко А.В., Краснов И.Н., Кравченко И.А., Толстоухова Т.Н.</i> О совершенствовании технологии подготовки семян зерновых перед посевом в условиях аридизации климата	4-1
<i>Кательническая О.В., Кит О.И., Гуськова Н.К., Аванесова К.А., Кательницкий И.И., Солдаткина Н.В., Петров Д.С.</i> Оценка функционального состояния свертывающей системы в послеоперационном периоде у больных со злокачественными новообразованиями органов желудочно-кишечного тракта	4-2
<i>Кит О.И., Водолажский Д.И., Татимов М.З., Васильченко Н.Г., Пушкин А.А., Куцын К.А., Колесников Е.Н., Маслов А.А., Геворкян Ю.А., Максимов А.Ю., Дурицкий М.Н., Фоменко Ю.А.</i> CNV генов в качестве биомаркера и терапевтической мишени при раке желудка	4-2
<i>Кит О.И., Горошинская И.А., Зудерман Н.Е., Ушакова Н.Д., Лысенко И.Б., Немайкалова Л.А., Нескубина И.В., Николаева Н.В., Капуза Е.А., Шатохина О.Н.</i> Показатели эндогенной интоксикации у больных множественной миеломой в динамике комплексного лечения	4-1
<i>Кит О.И., Франциянц Е.М., Моисеенко Т.И., Козлова Л.С., Назаралиева Н.А., Бойко К.П., Розенко Л.Я., Гурнак В.В., Вереникина Е.В., Ушакова Н.Д.</i> Исследование каскада активации плазминогена в ткани рака шейки матки	3-2
<i>Козлова Л.С., Франциянц Е.М., Ващенко Л.Н., Барашев А.А., Верескунова М.И., Розенко Л.Я., Николаева Н.В., Шатова Ю.С.</i> Кининовая система и ингибиторы плазмы крови у пациентов с остеолитическими метастазами	3-2
<i>Колесников С.И., Дульцев А.Н., Вернигорова Н.А., Казеев К.Ш., Акименко Ю.В., Тер-Мисакянц Т.А.</i> Биодиагностика устойчивости рисовых почв Кубани к химическому загрязнению.....	2
<i>Комарова Е.Ф., Шихлярова А.И., Брагина М.И., Ширнина Е.А., Бартенева Т.А., Коробейникова Е.П., Ванжа Л.В., Позднякова В.В., Максимов А.Ю., Спасов А.А., Дашкова И.Р., Морковник А.С., Жуковская О.Н., Анисимова В.А.</i> Оценка противоопухолевой активности антиоксиданта энноксифола на модели меланомы В16 в эксперименте	3-2
<i>Комарова Е.Ф., Шихлярова А.И., Коробейникова Е.П., Ванжа Л.В., Лихачев-Мищенко О.В., Кучкина Л.П., Дашков А.В., Позднякова В.В., Луганская Р.Г., Максимова Н.А., Ильченко М.Г., Шейко Е.А., Босенко Е.С., Туркин И.Н.</i> Попытка оптимизации режимов фотодинамической терапии на модели экспериментальной злокачественной опухоли легкого	4-2
<i>Котиева И.М., Кит О.И., Франциянц Е.М., Бандовкина В.А., Каплиева И.В., Погорелова Ю.А., Черярина Н.Д., Трештаки Л.К., Бликян М.В.</i> Содержание гормонов в ткани щитовидной железы в динамике роста перевивной меланомы В16/F10, воспроизведенной на фоне хронической нейрогенной боли у самок мышей.....	4-2
<i>Кочуев С.С., Златник Е.Ю., Демидова А.А., Новикова И.А., Пржедецкий Ю.В., Позднякова В.В., Хохлова О.В., Загора Г.И., Пржедецкая В.Ю., Непомнящая Е.М., Лысенко Е.П.</i> Разработка математической модели для расчета прогноза течения меланомы кожи	3-1
<i>Кутилин Д.С., Айрапетова Т.Г., Анистратов П.А., Пыльцин С.П., Лейман И.А., Чубарян А.В., Туркин И.Н., Водолажский Д.И., Николаева Н.В., Лысенко И.Б.</i> Изменение относительной копийности генетических локусов во внеклеточной ДНК у пациентов с аденокарциномой легкого	3-2
<i>Кутилин Д.С., Кит О.И., Водолажский Д.И., Шапошников А.В., Николаева Н.В., Бурцев Д.В., Дженкова Е.А., Маслов А.А., Дурицкий М.Н., Фоменко Ю.А.</i> Особенности протеомного профиля в тканях больных колоректальным раком с метастазами и без метастазов	4-2
<i>Мамедова А.Д., Алиев Р.Т.</i> Изменение содержания РНК и структурного состояния ДНК при засолении у сортообразцов хлопчатника вида <i>G. barbadense</i> L., отличающихся различной степенью устойчивости к стрессу	2
<i>Миноранский В.А., Даньков В.И., Тихонов А.В.</i> Большой баклан (<i>Phalacrocorax carbo</i> L.) в дельте Дона и связанные с ним проблемы	1
<i>Моисеенко Т.И., Кит О.И., Франциянц Е.М., Нескубина И.В., Назаралиева Н.А., Погорелова Ю.А., Ткаля Л.Д., Верескунова М.И., Меньшенина А.П., Вереникина Е.В.</i> Показатели системы ростовых факторов при различных вариантах роста рака шейки матки и их биологический смысл.....	3-2

<i>Мокриков Г.В., Казеев К.Ш., Акименко Ю.В., Колесников С.И.</i> Влияние технологии прямого посева на эколого-биологические свойства чернозёмов	2
<i>Неродо Г.А., Кравцова О.Е., Непомнящая Е.М., Никитина В.П., Вереникина Е.В., Никитин И.С., Максимова Н.А., Крузе П.А., Моисеенко Т.И., Владимирова Л.Ю.</i> Патоморфоз опухоли яичников при использовании разных схем неоадьювантной химиотерапии.....	3-2
<i>Неродо Г.А., Новикова И.А., Златник Е.Ю., Непомнящая Е.М., Дженкова Е.А., Иванова В.А., Вереникина Е.В., Ульянова Е.П., Таджибаева Ю.Т.</i> Прогностическая значимость некоторых иммуногистохимических маркеров у больных раком вульвы	4-2
<i>Никипелова Е.А., Кит О.И., Шапошников А.В., Златник Е.Ю., Новикова И.А., Владимирова Л.Ю., Позднякова В.В., Лысенко И.Б., Шевченко А.Н., Демидова А.А.</i> Иммунологические критерии развития отдаленных метастазов рака толстой кишки	3-2
<i>Никитина В.П., Неродо Г.А., Тютюнова А.М., Шурыгина Э.А., Вереникина Е.В., Никитин И.С., Кравцова О.Е., Максимова Н.А., Шатова Ю.С.</i> Состояние гипофизарно-гонадной системы у больных раком тела матки репродуктивного и постменопаузального периода	4-2
<i>Новикова И.А., Златник Е.Ю., Золотарева Е.И., Непомнящая Е.М., Шульгина О.Г., Ульянова Е.П., Гранкина А.О., Бондаренко Е.С., Лысенко И.Б., Владимирова Л.Ю.</i> Оптимизация способов цитокиновой иммунотерапии перевиваемых злокачественных опухолей в эксперименте	3-2
<i>Розенко Л.Я., Зинкович М.С., Арапова Ю.Ю., Протасова Т.П., Шихлярова А.И., Попова Н.Н., Коробейникова Е.П., Ващенко Л.Н., Ушакова Н.Д.</i> Действие ксенона на пространственную организацию биоэлектрической активности мозга.....	4-2
<i>Самбыла Ч.Н.</i> Изучение содоминирующих и сопутствующих видов в запасе надземной фитомассы сообществ гумидных высокогорий Алтае-Саянской горной области	4-1
<i>Симонова И.Р., Головин С.Н., Веркина Л.М., Березняк Е.А., Титова С.В.</i> Методы культивирования и изучения бактериальных биопленок	1
<i>Суниева Б.М., Шаов М.Т., Пищикова О.В., Паритов А.Ю., Хаихожеева Д.А., Мариенкулова Ф.А., Башиева И.А., Хотова А.Р.</i> Сравнительная оценка влияния желто-красного света и бета-каротина на показатели сердечно-сосудистой системы....	4-1
<i>Сурикова И.А., Кит О.И., Горошинская Е.И., Франциянц Е.М., Маслов А.А., Медведева Д.Е., Шалашная Е.В., Качесова П.С., Немайшалова Л.А., Нескубина И.В., Чудилова А.В., Геворкян Ю.А., Петров Д.С.</i> Функционирование системы глутатионзависимых ферментов в тканях аденокарцином желудка.....	4-2
<i>Тимошкина Н.Н., Водолажский Д.И., Ефимова И.Ю., Петрусенко Н.А., Маслов А.А., Бурцев Д.В., Николаева Н.В.</i> Исследование CpG-метилирования промоторных участков генов APC, CDH13, MLH1, MGMT, P16, RASSF1A при метастазирующем раке толстой кишки	3-2
<i>Франциянц Е.М., Бандовкина В.А., Каплиева И.В., Тренички Л.К., Черярина Н.Д., Димитриади С.Н., Пржедецкий Ю.В.</i> Влияние роста перевивной меланомы B16/F10 на функционирование гипоталамо-гипофизарно-надпочечниковой и тиреоидной осей организма у самцов и самок мышей	3-2
<i>Цандекова О.Л., Седельникова Л.Л.</i> Оценка устойчивости травянистых многолетников по уровню малонового диальдегида в условиях урбанизированной среды.....	3-1
<i>Шейко Е.А., Шихлярова А.И., Бартенева Т.А., Куркина Т.А., Бабиева С.М., Атмачиди Д.П., Айрапетова Т.Г., Николаева Н.В., Светицкий П.В.</i> Изменение жизнеспособности опухолевых клеток под влиянием оптических излучений: экспериментальные исследования in vitro.....	4-2
<i>Шихлярова А.И., Жукова Г.В., Франциянц Е.М., Черярина Н.Д., Бартенева Т.А., Ширнина Е.А., Куркина Т.А., Брагина М.И., Светицкий П.В., Маслов А.А.</i> Системные механизмы реализации цАМФ-индуцированного противоопухолевого эффекта у крыс с карциномой Герена	4-2

НАУКИ О ЗЕМЛЕ

<i>Абукова Л.А., Абрамова О.П., Анисимов Л.А., Сианисян Э.С., Воронцова И.В., Исаева Г.Ю.</i> Геохимия пластовых вод месторождений углеводородов Северного и Среднего Каспия	4-1
<i>Аветисян С.Р., Бураева Е.А., Новиковский Н.М.</i> Элементный состав некоторых горных и степных почв юга европейской части России	3-1
<i>Аджиева А.А., Шаповалов В.А.</i> Совершенствование прогнозирования и контроля развития опасных явлений погоды с использованием радиолокационных и грозопеленгационных методов на примере отдельного грозового очага.....	1
<i>Бабаян Г.Г., Закруткин В.Е., Решетняк О.С., Саакян Г.А.</i> Гидрохимические особенности рек Армении в зависимости от высотной зональности ландшафтов и типов природопользования в их бассейнах	2
<i>Власова А.Н.</i> Методические подходы к ландшафтному планированию бассейна р. Салгир	2
<i>Волосухин Я.В., Иванкова Т.В., Кипкеева П.А., Потапенко Ю.Я.</i> Об обеспеченности целевой информацией природопользования горных территорий (на примере Карачаево-Черкесской Республики).....	1
<i>Гамов М.И., Гордеев И.В.</i> Основные факторы и экологические последствия самовозгорания отвалов угольных шахт Восточного Донбасса	2
<i>Гурбанов М.Ф.</i> Солевой режим орошаемых земель на фоне сифонно-вакуумного дренажа в условиях малоуклонной местности.....	4-1
<i>Еришов В.В., Никитенко О.А.</i> Изотопный и химический состав вод Южно-Сахалинского грязевого вулкана (по результатам опробования 2009 и 2010 годов)	4-1
<i>Закруткин В.Е., Зубова Л.Г., Гибков Е.В., Зубов А.Р., Воробьев С.Г.</i> Терриконы углепромышленных районов Донбасса как источник воздействия на окружающую среду	3-1
<i>Закруткин В.Е., Меринова Ю.Ю., Гибков Е.В., Меринов Ю.Н.</i> Основные тенденции изменения состояния окружающей среды и социально-экономического развития углепромышленных районов Восточного Донбасса в связи с реструктуризацией угольной отрасли	4-1

<i>Закруткин В.Е., Решетняк О.С., Бабаян Г.Г., Гибков Е.В., Саакян Г.А., Решетняк В.Н.</i> Современный химический состав и тенденции пространственно-временной изменчивости качества речных вод Восточного Донбасса	2
<i>Каранина С.Ю., Кочеева Н.А., Каранин А.В.</i> Пространственное и временное распределение молниевых разрядов по территории Алтае-Саянского региона	4-1
<i>Кипкеева П.А., Потапенко Ю.Я.</i> Анализ административно-территориальной структуры Карачаево-Черкесской Республики	1
<i>Косенко Ю.В., Барабаишин Т.О., Баскакова Т.Е.</i> Динамика гидрохимических характеристик Азовского моря в современный период осолонения	3-1
<i>Кошовский Т.С., Ткаченко О.В., Ткаченко А.Н., Цибарт А.С., Лычагин М.Ю.</i> Полициклические ароматические углеводороды в аквальных ландшафтах дельты реки Дон в зимний период	2
<i>Куранов Ю.В.</i> Современная оценка перспектив нефтегазоносности и ресурсной базы Республики Калмыкия на основе новейших геолого-геофизических данных	1
<i>Куранов Ю.В., Шарафутдинов В.Ф., Калабин В.В., Сианисян Э.С., Шлыгин Д.А.</i> Особенности формирования залежей углеводородов и перспективы нефтегазоносности мезозойского комплекса вала Карпинского и Восточно-Маньчжунского прогиба в Республике Калмыкия	2
<i>Лецук С.И., Суркова И.В., Сенкевич Н.В.</i> Взаимосвязь загрязнения окружающей среды и экологически обусловленной заболеваемости населения на территории техногенного загрязнения	2
<i>Мартышова Н.А., Хоружая Т.А.</i> Особенности «цветения» воды Цимлянского водохранилища сине-зелеными микроводорослями ...	2
<i>Мельникова Е.В.</i> Прогнозирование депрессии при освоении скважин на основе анализа геолого-промысловой информации	3-1
<i>Онищенко В.В., Дега Н.С., Тохчуков Ш.Ю., Корчагина Н.М., Байрамкулова А.Р.</i> Структура и динамика Даутского гляциально-гидрологического комплекса в Карачаево-Черкессии	1
<i>Павленко Л.Ф., Клименко Т.Л., Анохина Н.С., Скрыпник Г.В., Экилик В.С., Вотнинова Т.В., Севостьянова М.В.</i> Загрязнение экосистемы Нижнего Дона нефтяными компонентами и полиароматическими углеводородами	3-1
<i>Скляренко Г.Ю., Закруткин В.Е., Зубов А.Р., Зубова Л.Г., Решетняк О.С.</i> Влияние угледобычи в Донбассе на подземные и поверхностные воды	3-1
<i>Собисевич Л.Е., Лиходеев Д.В., Канониди Х.Д., Канониди К.Х.</i> Гравимагнитные возмущения и землетрясения	1
<i>Сухова М.Г., Журавлева О.В.</i> Динамика изменения температуры воздуха и осадков в Чуйской котловине	1
<i>Федоров Ю.А., Ярославцев В.М., Доценко И.В.</i> Естественные и техногенные радионуклиды в донных отложениях (на примере р. Дон, ст. Маньчжунская)	3-1
<i>Хардигов А.Э., Астахова А.А.</i> Изучение низкотемпературного метаморфизма золотовмещающих толщ Верхояно-Кольмской складчатой области при проведении поисково-оценочных работ	3-1
<i>Хованский А.Д., Хорошев О.А., Латун В.В.</i> Анализ и совершенствование системы управления природоохранной деятельностью в регионе	4-1
<i>Шишкина Д.Ю.</i> Экологическая оценка динамики сельскохозяйственных земель Ростовской области	3-1

НАУЧНАЯ ЖИЗНЬ

<i>Авсянкин О.Г.</i> VII Международная конференция «Современные методы и проблемы теории операторов и гармонического анализа и их приложения», посвященная памяти Н.К. Карапетянца (Ростов-на-Дону, 23–28 апреля 2017 г.)	2
<i>Миноранский В.А.</i> 1-я и 2-я Международные конференции «Содержание и разведение сайгака в искусственных условиях» (Ростов-на-Дону; Москва, 2013, 2017 г.)	4-1
<i>Миноранский В.А.</i> Сохраним природу степи вместе	3-1
<i>Михалкович С.С., Штейнберг Б.Я.</i> Всероссийская научная конференция «Языки программирования и компиляторы» (Ростов-на-Дону, 3–5 апреля 2017 г.)	3-1
<i>Назаренко О.В.</i> VIII Международная научно-практическая конференция «Экологические проблемы. Взгляд в будущее» (Ростов-на-Дону; Абрау, 8–11 сентября 2017 г.)	4-1
<i>Паринов И.А.</i> Международная конференция RHENMA-2017 (Джабалпур (Индия), 14–16 октября 2017 г.)	4-1

НАШИ ЮБИЛЯРЫ

<i>Гамов М.И.</i> Вячеслав Николаевич Труфанов – известный ученый, педагог, творческая личность (к 80-летию со дня рождения)	1
<i>Миноранский В.А.</i> Гайирбег Магомедович Абдурахманов	4-1
<i>Назаренко О.В.</i> Виктор Трофимович Богучарсков (к 80-летию со дня рождения)	4-1
<i>Назаренко О.В.</i> Владимир Евгеньевич Закруткин – исследователь, наставник, уникальный специалист в области экологии и защиты окружающей среды (к 70-летию со дня рождения)	1
<i>Штейнберг Б.Я.</i> Юбилей Якова Михайловича Ерусалимского (70 лет со дня рождения)	2

**НАУЧНО-ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЙ И ПРИКЛАДНОЙ ЖУРНАЛ
ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ.
СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ РЕГИОН. ЕСТЕСТВЕННЫЕ НАУКИ**

Журнал «Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки», имеющий статус центрального издания, включенного в перечень ВАК, продолжает прием работ по следующим отраслям науки:

1. Физико-математические науки (математика, механика).
2. Биологические науки (общая биология, физико-химическая биология).
3. Науки о Земле.

Также публикуются материалы в разделах:

- заметки о книгах;
- научная жизнь;
- штрихи к портрету.

Журнал издается с периодичностью 4 номера в год. Помимо основных номеров выходят специальные тематические выпуски, посвященные разным научным направлениям, работам отдельных организаций, а также научные труды вузов, приуроченные к юбилейным датам. С электронной версией журнала можно ознакомиться на сайте Научной электронной библиотеки http://elibrary.ru/title_about.asp?id=7362.

Публикация материалов, на которые получена положительная рецензия, оплачивается лично автором или организацией. Стоимость работ – договорная.

Оформление работ осуществляется согласно правилам:

1. Печатный и электронный вариант статьи. В начале статьи указать индекс УДК.
2. Текст должен быть набран в редакторе MicroSoft Office 98 Word 2000, 2003, 2007, 2010 через 1,5 интервала, шрифтом Times New Roman, размером 14 пт, страницы пронумерованы. Для записи формул применять только редактор формул Equation 3.0.
3. Сопроводительное или рекомендательное письмо, если статья представляется от организации.
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