

ISSN 0321–3005

DOI 10.18522/0321-3005

ИЗВЕСТИЯ
ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

*Северо-Кавказский
регион*

ЕСТЕСТВЕННЫЕ

НАУКИ

2017

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, 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, 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, Россия
О.В. Назаренко – кандидат геогр. наук, доцент, Южный федеральный университет, Россия
Г.В. Пироговская – доктор с.-х. наук, профессор, Институт почвоведения и агрохимии НАН РБ, Белоруссия
В.С. Рабинович – доктор физ.-мат. наук, профессор, Национальный политехнический институт, Мексика
А.К. Сагателян – доктор геол.-мин. наук, Центр эколого-ноосферных исследований НАН РА, Армения
Э.С. Сианисян – доктор геол.-мин. наук, профессор, Южный федеральный университет, Россия
Ю.А. Устинов – доктор физ.-мат. наук, профессор, Южный федеральный университет, Россия
П. Фатгаль – доктор наук, профессор, Университет Нанта, Франция
Ю.А. Федоров – доктор геогр. наук, профессор, Южный федеральный университет, Россия
А.Д. Хованский – кандидат геол.-мин. наук, доктор геогр. наук, профессор, Южный федеральный университет, Россия
С.П. Чернышева – кандидат физ.-мат. наук, доцент Южный федеральный университет, Россия

Учредители:

Министерство образования и науки Российской Федерации, Дагестанский государственный технический университет, Дагестанский государственный университет, Донской государственный технический университет, Кабардино-Балкарский государственный университет, Кубанский государственный технологический университет, Кубанский государственный университет, Пятигорский государственный лингвистический университет, Ростовский государственный университет путей сообщения, Ростовский государственный экономический университет, Северо-Осетинский государственный университет, 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: Л.С. Ворович, В.И. Литвиненко, О.В. Назаренко, Н.Г. Шатравкина, М.С. Шипитко

Подписано в печать 03.04.2017. Формат 60×84 1/8. Бумага офсетная. Шрифт Times. Усл. печ. л. 15,57.

Уч.-изд. л. 18,42. Тираж 250 экз. Заказ № 5117

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, 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, 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, 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, Kabardino-Balkarian State University, Kuban State University, Kuban State Technological University, Pyatigorsk State Linguistic University, Rostov State Transport University, Rostov State University of Economics, 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 L.S. Vorovich, V.I. Litvinenko, O.V. Nazarenko, S.P. Chernysheva, N.G. Shatravkina, M.S. Shipitko

Signed print 03.04.2017. Format 60×84 1/8. Offset paper. Conv. print. sheets 15,27.
Font Times. Publ. sign. 18,42. Edition 250 copies. Order number 5117.

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

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

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

ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ РЕГИОН

IZVESTIYA VUZOV. SEVERO-KAVKAZSKII REGION

DOI 10.18522/0321-3005-2017-1

Регистрационный номер 011019
Комитета Российской Федерации по печати
Научно-образовательный и прикладной журнал
Издается с 1973 г.
Периодичность серии 4 номера в год
№ 1 (193) 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. 1 (193) 2017.

ЕСТЕСТВЕННЫЕ НАУКИ

NATURAL SCIENCE

СОДЕРЖАНИЕ

CONTENTS

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ

PHYSICAL AND MATHEMATICAL SCIENCES

<i>Авсянкин О.Г.</i> О точном решении многомерного интегрального уравнения с однородным ядром.....	4
<i>Белявский Г.И., Гирченко М.А.</i> Комбинированный метод Монте-Карло для расчета справедливых цен барьерных опционов.....	9
<i>Вагабов А.И.</i> О базисности собственных элементов дифференциального пучка шестого порядка с трехкратными характеристиками.....	14
<i>Деундяк В.М., Могилевская Н.С.</i> Об использовании мягких и вероятностных декодеров для восстановления данных при перехвате.....	18
<i>Ерусалимский Я.М.</i> 2- и 3-пути на графе-решетке и комбинаторные тождества.....	25
<i>Зинченко А.Б.</i> Компромиссные решения классической кооперативной игры.....	31
<i>Мироненко Г.В.</i> Задача о позиционировании случайного объекта за счет однократного изменения приращений его траектории.....	36
<i>Норкин М.В.</i> Отрывной удар и кавитационное торможение цилиндра под свободной поверхностью тяжелой жидкости.....	42
<i>Пасенчук А.Э.</i> Об обратимости операторов линейного сопряжения с поточно коммутирующими коэффициентами в счетно-нормированных пространствах гладких функций.....	47
<i>Штейнберг О.Б.</i> Классификация программных циклов с одним оператором присваивания.....	52

<i>Avsyankin O.G.</i> On Exact Solution of Multidimensional Integral Equation with Homogeneous Kernel.....	4
<i>Belavsky G.I., Girchenko M.A.</i> The Combined Monte-Carlo Method of Calculation the Barrier Options Fair Price.....	9
<i>Vagabov A.I.</i> On the Basis of Its Own Elements of the Sixth Order Differential Bundle with Triple Characteristics.....	14
<i>Deundyak V.M., Mogilevskaya N.S.</i> Application of Soft and Probabilistic Decoders for Intercepted Data Restorin.....	18
<i>Erusalimskiy Ya.M.</i> 2- and 3-Way on a Graph-Lattice and Combinatorial Identities.....	25
<i>Zinchenko A.B.</i> The Compromise Solutions of Classical Cooperative Game.....	31
<i>Mironenko G.V.</i> A Problem on Positioning of a Random Object by a Single Change of Its Trajectory Increments.....	36
<i>Norkin M.V.</i> Separation Impact and Cavitation Braking of the Cylinder under the Free Surface of Heavy Liquid.....	42
<i>Pasenchuk A.E.</i> On the Reversibility of Linear Conjugation Operators with Pointwise Switching Coefficients in Countably Normed Spaces of Smooth Functions.....	47
<i>Steinberg O.B.</i> Classification of a Programming Loops with One Assignment Statement.....	52

БИОЛОГИЧЕСКИЕ НАУКИ

BIOLOGICAL SCIENCES

<i>Жуков В.В., Кожин А.А., Мрыхин В.В., Попова В.А.</i> Биологические аспекты применения лазерного излучения в коррекции экологически обусловленных патологических процессов.....	59
<i>Миноранский В.А., Даньков В.И., Тихонов А.В.</i> Большой баклан (<i>Phalacrocorax carbo L.</i>) в дельте Дона и связанные с ним проблемы.....	67
<i>Симонова И.Р., Головин С.Н., Веркина Л.М., Березняк Е.А., Титова С.В.</i> Методы культивирования и изучения бактериальных биопленок.....	73

<i>Zhukov V.V., Kozhin A.A., Mrykhin V.V., Popova V.A.</i> Biological Aspects for Application of Laser Radiation When Managing Ecologically Determined Pathological Processes.....	59
<i>Minoranskiy V.A., Dankov V.I., Tikhonov A.V.</i> The Great Cormorant (<i>Phalacrocorax carbo L.</i>) in the Don Delta and the Problems of Its Existence.....	67
<i>Simonova I.R., Golovin S.N., Verkina L.M., Bereznyak E.A., Titova S.V.</i> Methods of Culturing and Studying Bacterial Biofilms.....	73

НАУКИ О ЗЕМЛЕ

SCIENCE OF EARTH

<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.....	80
<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).....	89
<i>Кипкеева П.А., Потапенко Ю.Я.</i> Анализ административно-территориальной структуры Карачаево-Черкесской Республики.....	96
<i>Куранов Ю.В.</i> Современная оценка перспектив нефтегазоносности и ресурсной базы Республики Калмыкия на основе новейших геолого-геофизических данных.....	101
<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-Черкесии.....	110
<i>Собисевич Л.Е., Лиходеев Д.В., Канониди Х.Д., Канониди К.Х.</i> Гравимагнитные возмущения и землетрясения.....	118
<i>Сухова М.Г., Журавлева О.В.</i> Динамика изменения температуры воздуха и осадков в Чуйской котловине.....	124

<i>Adjieva A.A., Shapovalov V.A.</i> Improved Forecasting and Monitoring of Severe Weather Phenomena Using Radar and Lightning Detection Methods on the Example of an Individual Thunderstorm Cells.....	80
<i>Volosukhin Ya.V., Ivankova T.V., Kipkeeva P.A., Potapenko Yu.Ya.</i> About Security with Target Information of Environmental Management of Mountain Territories (on the Example of the Karachay-Cherkess Republic).....	89
<i>Kipkeeva P.A., Potapenko Yu.Ya.</i> Analysis of Administrative-Territorial Structure of the Karachay-Cherkess Republic.....	96
<i>Kuranov Yu.V.</i> Modern Assessment of the Hydrocarbon Potential and Resource Base of Republic of Kalmykia, Supplemented the Newest Geological and Geophysical Data.....	101
<i>Onishchenko V.V., Dega N.S., Tokhchukov Sh.Yu., Korchagina N.M., Bairamkulova A.R.</i> Structure and Dynamics of the Daut Glacial-Hydrological Complex in Karachay-Cherkessia.....	110
<i>Sobisevich L.E., Likhodeev D.V., Kanonidi Kh.D., Kanonidi K.Kh.</i> Gravimagnetic Perturbations and Earthquakes.....	118
<i>Sukhova M.G., Zhuravleva O.V.</i> Dynamics of Air Temperature and Precipitation in the Chui Valley.....	124

НАШИ ЮБИЛЯРЫ

OUR PERSONS

<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).....	130
<i>Гамов М.И.</i> Вячеслав Николаевич Труфанов – известный ученый, педагог, творческая личность (к 80-летию со дня рождения).....	132
Правила для авторов.....	134

<i>Nazarenko O.V.</i> Vladimir Evgenievich Zakrutkin - Researcher, Mentor, Unique Specialist in the Field of Ecology and Environmental Protection (To the 70th Anniversary).....	130
<i>Gamov M.I.</i> Vyacheslav Nikolaevich Trufanov - Famous Scientist, Teacher, Creative Personality (To the 80th Anniversary).....	132
Rules for Authors.....	134

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ
PHYSICAL AND MATHEMATICAL SCIENCES

УДК 517.9

DOI 10.18522/0321-3005-2017-1-4-8

**О ТОЧНОМ РЕШЕНИИ МНОГОМЕРНОГО ИНТЕГРАЛЬНОГО УРАВНЕНИЯ
С ОДНОРОДНЫМ ЯДРОМ***

© 2017 г. О.Г. Авсянкин

**ON EXACT SOLUTION OF MULTIDIMENSIONAL INTEGRAL EQUATION
WITH HOMOGENEOUS KERNEL**

O.G. Avsyankin

Авсянкин Олег Геннадиевич – Южный федеральный университет, Институт математики, механики и компьютерных наук имени И.И. Воровича, доктор физико-математических наук, доцент, заведующий кафедрой дифференциальных и интегральных уравнений, ул. Мильчакова, 8а, г. Ростов н/Д, 344090, Россия, e-mail: avsyanki@math.sfedu.ru

Oleg G. Avsyankin – Southern Federal University, Vorovich Institute of Mathematics, Mechanics and Computer Science, Doctor of Physics and Mathematics, Associate Professor, Head of Department of Differential and Integral Equations, Milchakova St., 8a, Rostov-on-Don, 344090, Russia, e-mail: avsyanki@math.sfedu.ru

В пространстве $L_2(\mathbb{R}^n)$ рассматривается многомерное интегральное уравнение второго рода, ядро которого однородно степени $(-n)$, инвариантно относительно группы $SO(n)$ вращений пространства \mathbb{R}^n и удовлетворяет некоторому условию суммируемости. Предполагается, что символ уравнения является невырожденным, что обеспечивает однозначную разрешимость при любом свободном члене. Цель данной работы заключается в том, чтобы построить решение этого уравнения, для чего используется специальный метод, основанный на теории сферических гармоник. С его помощью осуществляется переход от многомерного интегрального уравнения к бесконечной диагональной системе одномерных интегральных уравнений, ядра которых однородны степени $l(v)$. Одномерные уравнения рассматриваются в пространстве l , и являются однозначно разрешимыми. С помощью теоремы Винера строятся решения этих уравнений, доказывается, что они представляют собой коэффициенты Фурье – Лапласа искомого решения многомерного уравнения. Более того, нормы операторов, определяющих эти решения, ограничены в совокупности. Основным результатом работы является теорема 1, в которой установлена формула решения исходного уравнения. Это решение строится в виде ряда по сферическим гармоникам, коэффициентами которого являются решения вышеупомянутых одномерных уравнений. Показано, что этот ряд сходится в пространстве (N, v) , а его сумма является решением исходного многомерного уравнения.

Ключевые слова: интегральное уравнение, однородное ядро, символ, сферические гармоника.

We study on the space $L_2(\mathbb{R}^n)$ the multidimensional integral equation of the second kind, which kernel is homogeneous of degree $(-n)$, invariant with respect to the rotations group $SO(n)$ of the space \mathbb{R}^n and satisfies to a certain summability condition. We suppose that the symbol of the equation is a non-degenerate that provides the equation is uniquely solvable for any free term. The purpose of this paper is to construct the solution of this equation. To do this, we use the special method based on the theory of spherical harmonics. Within this method, we perform a transition from a multidimensional integral equation to an infinite diagonal system of one-dimensional integral equations, whose kernels are homogeneous of degree (-1) . One-dimensional equations are considered on the space $L_2(\mathbb{R}_+)$ and are uniquely solvable. By means of the Wiener theorem we construct the solutions of these equations and prove that they are coincide with the Fourier-Laplace coefficients of the sought solutions of the multidimensional equation. Moreover, the norms of operators, which determine these solutions, are bounded. The main result of our paper is

*Работа выполнена в рамках международного проекта ГКН МОНРА-ЕГУ-ЮФУ, грант № ВнГр-07/2017-31.

Theorem 1, which establishes the formula of the solution of the original equation. This solution is constructed as a series by spherical harmonics, coefficients of which are the above-mentioned solutions of the one-dimensional equations. It is proved that this series converges on the space $L_2(R^n)$, and its sum is the solution of the original multidimensional equation.

Keywords: integral equation, homogeneous kernel, symbol, spherical harmonics.

Введение

Интегральные операторы с однородными степенями $(-n)$ ядрами играют заметную роль в математике и в приложениях. В настоящее время для таких операторов получены критерии обратимости и нетеровости, исследованы порожденные этими операторами банаховы алгебры, найдены условия применимости проекционного метода и описано предельное поведение спектральных характеристик усеченных операторов ([1–5] и цитированные в них источники). Однако решения многомерных интегральных уравнений с однородными ядрами ранее не строились.

Данная работа посвящена построению точного решения многомерного интегрального уравнения, ядро которого однородно степени $(-n)$ и инвариантно относительно всех вращений пространства R^n . Доказано, что решение такого уравнения в пространстве $L_2(R^n)$ может быть получено в виде ряда по сферическим гармоникам, сходящегося по L_2 -норме. Метод исследования основан на редукции многомерного интегрального уравнения к бесконечной диагональной системе одномерных уравнений. Этот метод опирается на теорию сферических гармоник, некоторые положения которой приведены в разделе 1. Во втором разделе содержатся постановка задачи и основной результат работы.

Ниже используются следующие обозначения: R^n – n -мерное евклидово пространство; $x = (x_1, x_2, \dots, x_n) \in R^n$; $|x| = \sqrt{x_1^2 + \dots + x_n^2}$; $x' = x/|x|$; $x \cdot y = x_1 y_1 + \dots + x_n y_n$; $S_{n-1} = \{x \in R^n : |x| = 1\}$; $R_+ = (0, \infty)$; Z_+ – множество целых неотрицательных чисел.

1. Предварительные сведения

Напомним некоторые факты из теории сферических гармоник, полное изложение которой можно найти, например, в [6, § 4].

Определение 1. Сферической гармоникой порядка m называется сужение $Y_m(x')$ однородного порядка m гармонического многочлена $Y_m(x)$ на единичную сферу S_{n-1} .

Обозначим через H_m пространство сферических гармоник порядка m . Доказывается, что размерность $d_n(m)$ пространства H_m вычисляется по формуле

$$d_n(m) = (n + 2m - 2) \frac{(n + m - 3)!}{m!(n - 2)!}.$$

В гильбертовом пространстве $L_2(S_{n-1})$ со скалярным произведением

$$(f, g) = \int_{S_{n-1}} f(\sigma) \overline{g(\sigma)} d\sigma$$

можно построить ортонормированный базис $\{Y_{m\mu}\}$, $m \in Z_+$, $\mu = 1, 2, \dots, d_n(m)$. При этом функции, составляющие базис, можно выбрать вещественными. В дальнейшем будем считать, что выбран и зафиксирован некоторый базис, состоящий из вещественных сферических гармоник.

В теории сферических гармоник заметную роль играют многочлены Лежандра. Многочлен Лежандра $P_m(t)$ порядка m определяется на отрезке $[-1, 1]$ формулой

$$P_m(t) = \begin{cases} \cos(m \arccos t), & n = 2, \\ \frac{m!(n-3)!}{(m+n-3)!} C_m^{(n-2)/2}(t), & n \geq 3, \end{cases}$$

где $C_m^{(n-2)/2}(t)$ – многочлены Гегенбауэра.

Следующая формула является одной из ключевых в теории сферических гармоник.

Предложение 1 (формула Функа – Гекке). Пусть функция $f(t)(1-t^2)^{(n-3)/2}$ принадлежит пространству $L_1([-1, 1])$. Тогда для любой сферической гармоники $Y_m(x')$ справедлива формула

$$\int_{S_{n-1}} f(x' \cdot \sigma) Y_m(\sigma) d\sigma = \lambda_m Y_m(x'),$$

где

$$\lambda_m = \frac{2\pi^{(n-1)/2}}{\Gamma((n-1)/2)} \int_{-1}^1 f(t) P_m(t) (1-t^2)^{(n-3)/2} dt.$$

2. Постановка задачи и основной результат

В пространстве $L_2(R^n)$ рассмотрим интегральное уравнение

$$\varphi(x) = \int_{R^n} k(x, y) \varphi(y) dy + f(x), \quad x \in R^n, \quad (1)$$

предполагая, что функция $k(x, y)$ определена на $R^n \times R^n$ (здесь и далее предполагается, что $n \geq 2$) и удовлетворяет следующим условиям:

1° однородность степени $(-n)$, т.е.

$$k(\alpha x, \alpha y) = \alpha^{-n} k(x, y), \quad \forall \alpha > 0;$$

2° инвариантность относительно группы вращений $SO(n)$, т.е.

$$k(\omega(x), \omega(y)) = k(x, y), \quad \forall \omega \in SO(n);$$

3° суммируемость, т.е.

$$\int_{R^n} |k(e_1, y)| |y|^{-n/2} dy < \infty, \quad e_1 = (1, 0, \dots, 0).$$

Для любого $m \in Z_+$ определим функцию

$$\sigma_m(\xi) = 1 - \int_{R^n} k(e_1, y) P_m(e_1 \cdot y') |y|^{-n/2+i\xi} dy,$$

$$\xi \in R, \tag{2}$$

где $P_m(t)$ – многочлены Лежандра. В терминах этих функций формулируется критерий разрешимости уравнения (1).

Предложение 2 [1]. Уравнение (1) однозначно разрешимо в пространстве $L_2(R^n)$ при любом свободном члене $f \in L_2(R^n)$ тогда и только тогда, когда при любом $m \in Z_+$ выполнено условие

$$\sigma_m(\xi) \neq 0, \quad \forall \xi \in R. \tag{3}$$

Замечание. Подчеркнем, что, начиная с некоторого номера m_0 , зависящего только от ядра $k(x, y)$, условие (3) выполняется автоматически.

Пусть условие (3) выполнено. Построим решение уравнения (1). Так как функция $k(x, y)$ удовлетворяет условию 2°, то существует такая функция $k_0(r, \rho, t)$, что $k(x, y) = k_0(|x|^2, |y|^2, x' \cdot y')$ [6, с. 36]. Учитывая это и переходя в уравнении (1) к сферическим координатам $x = r\sigma$, $y = \rho\theta$, получаем

$$\Phi(r\sigma) = \int_0^\infty \int_{S_{n-1}} \frac{1}{r} D\left(\frac{\rho}{r}, \sigma \cdot \theta\right) \Phi(\rho\theta) d\rho d\theta + F(r\sigma), \tag{4}$$

где

$$\Phi(r\sigma) = \varphi(r\sigma)r^{(n-1)/2}, \quad F(r\sigma) = f(r\sigma)r^{(n-1)/2},$$

$$D(\rho, t) = k_0(1, \rho^2, t)\rho^{(n-1)/2}.$$

Умножая обе части уравнения (4) на сферические гармоники $Y_{m\mu}(\sigma)$, интегрируя по единичной сфере и применяя формулу Функа – Гекке (предложение 1), получим бесконечную диагональную систему одномерных интегральных уравнений

$$\Phi_{m\mu}(r) = \int_0^\infty \frac{1}{r} D_m\left(\frac{\rho}{r}\right) \Phi_{m\mu}(\rho) d\rho + F_{m\mu}(r), \tag{5}$$

где $r \in R_+$, $m \in Z_+$, $\mu = 1, 2, \dots, d_n(m)$,

$$\Phi_{m\mu}(r) = \int_{S_{n-1}} \Phi(r\sigma) Y_{m\mu}(\sigma) d\sigma,$$

$$F_{m\mu}(r) = \int_{S_{n-1}} F(r\sigma) Y_{m\mu}(\sigma) d\sigma,$$

$$D_m(\rho) = \frac{2\pi^{(n-1)/2}}{\Gamma((n-1)/2)} \int_{-1}^1 D(\rho, t) P_m(t) (1-t^2)^{(n-3)/2} dt.$$

В пространстве $L_2(R_+)$ определим оператор A_m , $m \in Z_+$, формулой

$$(A_m g)(r) = g(r) - \int_0^\infty \frac{1}{r} D_m\left(\frac{\rho}{r}\right) g(\rho) d\rho, \quad r \in R_+.$$

Заметим, что символом этого оператора является функция $\sigma_m(\xi)$ вида (2). Так как выполнено условие (3), то оператор A_m обратим в пространстве $L_2(R_+)$ [7, с. 31]. Построим обратный оператор. Поскольку $\sigma_m(\xi)$ принадлежит расширенному винеровскому кольцу и удовлетворяет условию (3), то по теореме Винера [6, с. 50] найдется такая функция $b_m \in L_1(R)$, что

$$\frac{1}{\sigma_m(\xi)} = 1 - \widehat{b}_m(\xi), \tag{6}$$

где \widehat{b}_m – преобразование Фурье функции b_m . В пространстве $L_2(R_+)$ рассмотрим оператор

$$(B_m g)(r) = g(r) - \int_0^\infty \frac{1}{\sqrt{r\rho}} b_m\left(\ln \frac{\rho}{r}\right) g(\rho) d\rho, \quad r \in R_+. \tag{7}$$

Очевидно, что ядро этого оператора однородно степени (-1) . Найдем символ $\beta_m(\xi)$ оператора B_m . Имеем

$$\beta_m(\xi) = 1 - \int_0^\infty \frac{1}{\sqrt{\rho}} b_m(\ln \rho) \rho^{-1/2+i\xi} d\rho = 1 - \widehat{b}_m(\xi).$$

Тогда из равенства (6) следует, что $B_m = A_m^{-1}$ при любом $m \in Z_+$.

Перепишем уравнение (5) в виде $(A_m \Phi_{m\mu})(r) = F_{m\mu}(r)$. Тогда

$$\Phi_{m\mu}(r) = (B_m F_{m\mu})(r) \tag{8}$$

для всех $m \in Z_+$, $\mu = 1, 2, \dots, d_n(m)$. Функции $\Phi_{m\mu}(r)$ представляют собой коэффициенты Фурье – Лапласа функции $\Phi(r\sigma)$, являющейся решением уравнения (4). Чтобы найти это решение, исследуем некоторые свойства операторов B_m .

Лемма 1. Для нормы оператора B_m выполняется равенство

$$\|B_m\| = \sup_{\xi \in R} |\sigma_m^{-1}(\xi)|. \tag{9}$$

Доказательство. Определим изоморфизм $W : L_2(R_+) \rightarrow L_2(R)$ равенством

$$(Wg)(t) = e^{-t/2} g(e^{-t}).$$

Нетрудно проверить, что оператор

$$C_m = WB_m W^{-1} \quad (10)$$

задается в пространстве $L_2(R)$ формулой

$$(C_m \psi)(t) = \psi(t) - \int_{-\infty}^{+\infty} b_m(t-s) \psi(s) ds, \quad t \in R.$$

Заметим, что $\|W\| = \|W^{-1}\| = 1$. Тогда из формулы

(10) следует, что $\|B_m\| = \|C_m\|$. Как известно [8, с. 231],

$$\|C_m\| = \sup_{\xi \in R} |1 - \widehat{b}_m(\xi)|.$$

Учитывая (6), приходим к равенству (9). Лемма доказана.

Лемма 2. Нормы операторов B_m ограничены в совокупности.

Доказательство. Множество $Z_+ \times R$ с топологией, индуцированной евклидовой топологией пространства R^2 , является локально компактным топологическим пространством. Обозначим через $Z_+ \dot{\times} R$ его компактификацию одной бесконечно удаленной точкой. Определим на компакте $Z_+ \dot{\times} R$ функцию $\sigma(m, \xi)$ равенствами

$$\begin{aligned} \sigma(m, \xi) &= \sigma_m(\xi), \text{ если } (m, \xi) \in Z_+ \times R, \\ \sigma(\infty) &= 1. \end{aligned}$$

Очевидно, что функция $\sigma(m, \xi)$ непрерывна на компакте $Z_+ \dot{\times} R$ и, в силу условия (3), не обращается в нуль. Следовательно, функция $\sigma^{-1}(m, \xi)$ ограничена на компакте $Z_+ \dot{\times} R$. Тогда, используя лемму 1, получаем

$$\sup_{m \in Z_+} \|B_m\| = \sup_{Z_+ \dot{\times} R} |\sigma^{-1}(m, \xi)| < \infty.$$

Лемма доказана.

Основным результатом данной работы является

Теорема. Пусть выполнено условие (3) и оператор B_m задается формулой (7). Тогда решение уравнения (1) имеет вид

$$\varphi(x) = |x|^{-(n-1)/2} \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{\mu=1}^{d_n(m)} (B_m F_{m\mu})(|x|) Y_{m\mu}(x'), \quad (11)$$

где ряд сходится в пространстве $L_2(R^n)$.

Доказательство. Заметим, что $\varphi(x) = |x|^{-(n-1)/2} \Phi(x)$, причем коэффициенты Фурье – Лапласа $\Phi_{m\mu}(|x|)$ функции $\Phi(x)$ определяются формулой (8). Следовательно, теорема будет доказана, если мы пока-

жем, что ряд в правой части равенства (11) сходится в пространстве $L_2(R^n)$. Положим

$$S_{M,p}(x) = |x|^{-(n-1)/2} \sum_{m=M}^{M+p} \sum_{\mu=1}^{d_n(m)} (B_m F_{m\mu})(|x|) Y_{m\mu}(x'),$$

где M и p – некоторые натуральные числа. Тогда

$$\begin{aligned} \|S_{M,p}\|_2^2 &= \int_{R^n} S_{M,p}(x) \overline{S_{M,p}(x)} dx = \\ &= \int_{0S_{n-1}} \int S_{M,p}(r\sigma) \overline{S_{M,p}(r\sigma)} r^{n-1} dr d\sigma. \end{aligned}$$

Так как сферические гармоники $\{Y_{m\mu}\}$, $m \in Z_+$, $\mu = 1, 2, \dots, d_n(m)$, образуют вещественный ортонормированный базис, то

$$\begin{aligned} \|S_{M,p}\|_2^2 &= \sum_{m=M}^{M+p} \sum_{\mu=1}^{d_n(m)} \int_0^\infty |(B_m F_{m\mu})(r)|^2 dr = \\ &= \sum_{m=M}^{M+p} \sum_{\mu=1}^{d_n(m)} \|B_m F_{m\mu}\|_2^2 \leq \sum_{m=M}^{M+p} \sum_{\mu=1}^{d_n(m)} \|B_m\|^2 \|F_{m\mu}\|_2^2. \end{aligned}$$

Учитывая лемму 2, приходим к неравенству

$$\|S_{M,p}\|_2^2 \leq C \sum_{m=M}^{M+p} \sum_{\mu=1}^{d_n(m)} \|F_{m\mu}\|_2^2, \quad (12)$$

где $C = \sup_{m \in Z_+} \|B_m\|^2$.

Так как $f \in L_2(R^n)$, то функция f разлагается в ряд Фурье – Лапласа, сходящийся к ней по L_2 -норме, причем справедливо неравенство

$$\sum_{m=0}^{\infty} \sum_{\mu=1}^{d_n(m)} \int_0^\infty |f_{m\mu}(r)|^2 r^{n-1} dr \leq \|f\|_2^2. \quad (13)$$

Поскольку $F(r\sigma) = f(r\sigma)r^{(n-1)/2}$, то

$$\int_0^\infty |f_{m\mu}(r)|^2 r^{n-1} dr = \int_0^\infty |F_{m\mu}(r)|^2 dr = \|F_{m\mu}\|_2^2.$$

Это позволяет переписать неравенство (13) в виде

$$\sum_{m=0}^{\infty} \sum_{\mu=1}^{d_n(m)} \|F_{m\mu}\|_2^2 \leq \|f\|_2^2.$$

Возьмем произвольное $\varepsilon > 0$ и подберем такой номер M_0 , что для всех $M > M_0$ и $p \in N$ выполняется условие

$$\sum_{m=M}^{M+p} \sum_{\mu=1}^{d_n(m)} \|F_{m\mu}\|_2^2 < \frac{\varepsilon^2}{C}.$$

Но тогда из неравенства (12) вытекает, что $\|S_{M,p}\|_2 < \varepsilon$. Следовательно, в силу критерия Коши ряд (11) сходится по L_2 -норме. Теорема доказана.

Литература

1. Авсянкин О.Г., Карапетыанц Н.К. Многомерные интегральные операторы с однородными степенями $(-n)$ ядрами // Докл. РАН. 1999. Т. 368, № 6. С. 727–729.
2. Авсянкин О.Г., Карапетыанц Н.К. О псевдоспектрах многомерных интегральных операторов с однородными степенями $-n$ ядрами // Сиб. мат. журн. 2003. Т. 44, № 6. С. 1199–1216.
3. Авсянкин О.Г. О C^* -алгебре, порожденной многомерными интегральными операторами с однородными ядрами и операторами мультипликативного сдвига // Докл. РАН. 2008. Т. 419, № 6. С. 727–728.
4. Авсянкин О.Г. К вопросу об ограниченности многомерных интегральных операторов с однородными ядрами // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2015. № 3. С. 5–9.
5. Авсянкин О.Г. О C^* -алгебре интегральных операторов с однородными ядрами и осциллирующими коэффициентами // Мат. заметки. 2016. Т. 99, вып. 3. С. 323–332.
6. Самко С.Г. Гиперсингулярные интегралы и их приложения. Ростов н/Д., 1984. 208 с.
7. Карапетыанц Н.К., Самко С.Г. Уравнения с инволютивными операторами и их приложения. Ростов н/Д., 1988. 192 с.
8. Гохберг И.Ц., Фельдман И.А. Уравнения в свертках и проекционные методы их решения. М., 1971. 352 с.

References

1. Avsyankin O.G., Karapetyants N.K. *Mnogomernye integral'nye operatory s odnorodnymi stepeni $(-n)$ yadrami* [Multidimensional integral operators with homo-

geneous degree $(-n)$ kernels]. *Dokl. RAN.* 1999, vol. 368, No. 6, pp. 727-729.

2. Avsyankin O.G., Karapetyants N.K. *O psevdospektrakh mnogomernykh integral'nykh operatorov s odnorodnymi stepeni $-n$ yadrami* [On the pseudo spectra of multidimensional integral operators with homogeneous degree $-n$ kernels]. *Sib. mat. zhurn.* 2003, vol. 44, No. 6, pp. 1199-1216.

3. Avsyankin O.G. *O C^* -algebre, porozhdennoi mnogomernymi integral'nymi operatorami s odnorodnymi yadrami i operatorami multiplikativnogo sdviga* [On the C^* -algebra generated by multidimensional integral operators with homogeneous kernels and multiplicative shift operators]. *Dokl. RAN.* 2008, vol. 419, No. 6, pp. 727-728.

4. Avsyankin O.G. *K voprosu ob ogranichenosti mnogomernykh integral'nykh operatorov s odnorodnymi yadrami* [On the question of the boundedness of multidimensional integral operators with homogeneous kernels]. *Izv. vuzov. Sev.-Kavk. region. Estestv. nauki.* 2015, No. 3, pp. 5-9.

5. Avsyankin O.G. *O C^* -algebre integral'nykh operatorov s odnorodnymi yadrami i ostilliruyushchimi koeffitsientami* [On the C^* -algebra of integral operators with homogeneous nuclei and oscillating coefficients]. *Mat. zametki.* 2016, vol. 99, iss. 3, pp. 323-332.

6. Samko S.G. *Gipersingulyarnye integraly i ikh prilozheniya* [Hyper-singular integrals and their applications]. *Rostov-on-Don*, 1984, 208 p.

7. Karapetyants N.K., Samko S.G. *Uravneniya s involyutivnymi operatorami i ikh prilozheniya* [Equations with involutive operators and their applications]. *Rostov-on-Don*, 1988, 192 p.

8. Gokhberg I.Ts., Fel'dman I.A. *Uravneniya v svertkakh i proeksionnye metody ikh resheniya* [Convolution equations and projection methods for their solution]. *Moscow*, 1971, 352 p.

УДК 519.2

DOI 10.18522/0321-3005-2017-1-9-13

КОМБИНИРОВАННЫЙ МЕТОД МОНТЕ-КАРЛО ДЛЯ РАСЧЕТА СПРАВЕДЛИВЫХ ЦЕН БАРЬЕРНЫХ ОПЦИОНОВ

© 2016 г. Г.И. Белявский, М.А. Гирченко

THE COMBINED MONTE-CARLO METHOD OF CALCULATION THE BARRIER OPTIONS FAIR PRICE

G.I. Belavsky, M.A. Girchenko

Белявский Григорий Исаакович – Южный федеральный университет, Институт математики, механики и компьютерных наук имени И.И. Воровича, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой высшей математики и исследования операций, ул. Мильчакова, 8а, г. Ростов н/Д, 344090, Россия, e-mail: belavsky@hotmail.com

Grigori I. Belavsky – Southern Federal University, Vorovich Institute of Mathematics, Mechanics and Computer Science, Doctor of Technical Science, Professor, Head of High Mathematics and Operations Research Department, Milchakova St., 8a, Rostov-on-Don, 344090, Russia, e-mail: belavsky@hotmail.com

Гирченко Михаил Александрович – Южный федеральный университет, Институт математики, механики и компьютерных наук имени И.И. Воровича, аспирант, кафедра высшей математики и исследования операций, ул. Мильчакова, 8а, г. Ростов н/Д, 344090, Россия, e-mail: girchenkomikhail@gmail.com

Mikhail A. Girchenko – Southern Federal University, Vorovich Institute of Mathematics, Mechanics and Computer Science, Postgraduate, High Mathematics and Operations Research Department, Milchakova St., 8a, Rostov-on-Don, 344090, Russia, e-mail: girchenkomikhail@gmail.com

Целью данной работы является нахождение справедливой цены барьерного опциона в рамках модели Леви с бесконечной интенсивностью скачков на основе комбинированного метода, в котором вероятность пересечения барьера кусочно-непрерывной траекторией цены акции вычисляется аналитически путем аппроксимации процесса Леви броуновскими мостами, а математическое ожидание по моментам скачков от функции выплаты барьерного опциона рассчитывается численно методом Монте-Карло. На примере умеренно устойчивого процесса было показано, что данный метод может быть применен к случаю бесконечной вариации путем аппроксимации малых скачков броуновским движением. Особое внимание уделено преимуществам моделей, основанных на процессах Леви, по сравнению с классической моделью Блэка – Шоулса. Отмечается, что общее число случайных величин, необходимое для одной симуляции Монте-Карло, может быть сокращено по сравнению с полным моделированием траектории процесса цены из-за отсутствия необходимости полностью воспроизводить траекторию процесса цены акции. Проведены численные эксперименты расчета справедливой цены барьерного опциона в модели под управлением умеренно устойчивого процесса. Исследована и преодолена проблема взаимосвязи ошибки нормальной аппроксимации и интенсивности скачков, влияющей на вычислительные затраты применения метода Монте-Карло.

Ключевые слова: процесс Леви, ценообразование опционов, метод Монте-Карло, броуновский мост, модель со скачками.

The purpose of this work is to find the fair price of a barrier option under the Levy model with infinite intensity of jumps, by using the combined method, in which the probability of crossing the barrier by piecewise continuous trajectory of the stock price is calculated analytically through approximating the Levy process by Brownian bridges, and the expectation of the barrier option payment function over jump times is calculated numerically by using the Monte Carlo method. It has been shown that in case of the tempered stable process this method can be applied to the case of infinite variation, through approximation of the Brownian motion by small jumps. Special attention is given to the advantages of the models based on Levy processes in contrast with the classical Black-Sholes model. It is noted that the required total number of random values for the Monte Carlo simulation can be reduced in contrast with the full simulation of the price process trajectory due to the lack of need to completely reproduce the trajectory of the stock price process. Numerical experiments to calculate the fair price of an barrier option in model under tempered stable process were conducted. The problem of the relationship between the normal approximation error and intensity of jumps was studied.

Keywords: Levy process, option pricing, Monte Carlo method, Brownian bridge, model with jumps.

Введение

В финансовой математике процессы Леви приобретают все большую популярность, так как они позволяют описывать реальную динамику рынков в

отличие от моделей, основанных только на броуновском движении [1, 2]. Анализ финансовых рынков показывает, что траектории процесса цены активов не являются непрерывными, а имеют скачки. Эмпирические исследования указывают на

асимметрию и толстые хвосты в распределении лог-доходностей активов, что противоречит предположению об их нормальном распределении [3, 4]. Модели под управлением процесса Леви лишены данных недостатков.

На данный момент существуют вычислительные методы, позволяющие разрешать интегродифференциальные уравнения, связанные с барьерными опционами в моделях Леви (методы сеток [5], факторизации Винера – Хопфа [6], с использованием преобразования Лапласа [6]).

Целью данной работы является нахождение справедливой цены барьерного опциона в рамках модели Леви на основе комбинированного метода, в котором аналитические вычисления сочетаются с методом Монте-Карло [7].

Аналитическая часть метода справедлива для процесса типа jump-diffusion (конечная мера Леви), но на примере умеренно устойчивого процесса показано, что данный метод может быть применен также и к случаю бесконечной меры Леви путем аппроксимации малых скачков с бесконечной интенсивностью броуновским движением.

Основное достоинство данного комбинированного метода состоит в отсутствии необходимости полностью воспроизводить траекторию процесса цены акции. Достаточно генерировать моменты скачков и для каждого из них – две случайные величины. Таким образом, общее число случайных величин для одной симуляции в Монте-Карло может быть сокращено по сравнению с воспроизведением всей траектории процесса цены.

Аппроксимация чисто скачкообразного процесса Леви с бесконечной мерой Леви

Пусть случайный адаптированный процесс X_t , $t \geq 0$, определённый на стохастическом базисе $(\Omega, (F_t)_{t \geq 0}, F, P)$ со значениями в \mathbb{R} , и $X_0 = 0$ является процессом Леви.

Поведение процесса Леви может быть описано с помощью символа Леви, для которого существует представление Леви – Хинчина:

$$\psi(u) = imu - \frac{\sigma^2}{2} u^2 + \int_{\mathbb{R}} (e^{iux} - 1 - iuxI_{|x| \leq 1}(x)) \nu(dx),$$

где $\sigma \geq 0$, $m \in \mathbb{R}$, I – функция-индикатор; $\nu(dx)$ – σ -конечная мера Леви, удовлетворяющая свойству $\int_{\mathbb{R} \setminus \{0\}} \min\{1, x^2\} \nu(dx) < \infty$. В случае конечной меры Леви она может быть нормализована ($\mu(dx) = \frac{\nu(dx)}{\lambda}$, $\lambda = \int_{-\infty}^{\infty} \nu(dx)$) и интерпретирована как распределение размеров скачков.

Исследуем задачу аппроксимации процесса с бесконечной степенью активности скачков. Рассмотрим интегральную часть символа Леви $\widehat{\psi}(u) = \int_{\mathbb{R}} (e^{iux} - 1 - iuxI_{|x| \leq 1}(x)) \nu(dx)$ относительно меры Леви умеренно устойчивого процесса. Для этой меры символ Леви будет иметь вид

$$\widehat{\psi}(u) = \tilde{N}_+ \int_0^{\infty} (e^{iux} - 1 - iuxI_{|x| \leq 1}(x)) \frac{e^{-\lambda_+ x}}{x^{1+\alpha}} dx + C_- \int_{-\infty}^0 (e^{iux} - 1 - iuxI_{|x| \leq 1}(x)) \frac{e^{-\lambda_- |x|}}{|x|^{1+\alpha}} dx.$$

Зафиксируем некоторое положительное число $\varepsilon > 0$ и на интервале $(0, \varepsilon)$ разложим функцию e^{iux} в ряд Тейлора до второй степени в каждом из интегралов. После проведения промежуточных выкладок получим приближенное представление для символа Леви

$$\widehat{\psi}(u) \approx C_+ \left[\int_{\varepsilon}^{\infty} (e^{iux} - 1) \frac{e^{-\lambda_+ x}}{x^{1+\alpha}} dx - ium_1 - \frac{u^2}{2} \widehat{\sigma}^2 \right] + C_- \left[\int_{-\infty}^{-\varepsilon} (e^{iux} - 1) \frac{e^{-\lambda_- |x|}}{|x|^{1+\alpha}} dx - ium_2 - \frac{u^2}{2} \widehat{\sigma}^2 \right],$$

$$m_1 = \int_{\varepsilon}^1 \frac{e^{-\lambda_+ x}}{x^{\alpha}} dx, \quad m_2 = - \int_{-\varepsilon}^1 \frac{e^{-\lambda_- |x|}}{|x|^{\alpha}} dx, \quad \widehat{\sigma} = \sqrt{\frac{\varepsilon^{2-\alpha}}{2-\alpha}}.$$

Далее

$$\widehat{\psi}(u) \approx imu - \frac{u^2}{2} \sigma^2 + \frac{C_+}{D_+} \int_{\varepsilon}^{\infty} D_+(e^{iux} - 1) \frac{e^{-\lambda_+ x}}{x^{1+\alpha}} dx + \frac{C_-}{D_-} \int_{-\infty}^{-\varepsilon} D_-(e^{iux} - 1) \frac{e^{-\lambda_- |x|}}{|x|^{1+\alpha}} dx,$$

$$m = -(C_+ m_1 + C_- m_2), \quad \sigma^2 = \widehat{\sigma}^2 (C_+ + \tilde{N}_+).$$

Нормализующие константы: $D_+ = 1 / \int_{\varepsilon}^{\infty} \frac{e^{-\lambda_+ x}}{x^{1+\alpha}} dx$,

$$D_- = 1 / \int_{-\infty}^{-\varepsilon} \frac{e^{-\lambda_- |x|}}{|x|^{1+\alpha}} dx.$$

Обозначим через A интенсивность наступления скачков: $A = \frac{C_+}{D_+} + \frac{C_-}{D_-}$. В результате для символа Леви получим

$$\widehat{\psi}(u) \approx imu - \frac{u^2}{2} \sigma^2 + A \left(p \int_{\varepsilon}^{\infty} D_+(e^{iux} - 1) \frac{e^{-\lambda_+ x}}{x^{1+\alpha}} dx + (1-p) \int_{-\infty}^{-\varepsilon} D_-(e^{iux} - 1) \frac{e^{-\lambda_- |x|}}{|x|^{1+\alpha}} dx \right),$$

где $p = \frac{C_+}{D_+ A}$.

Для генерации псевдослучайной величины с символом Леви (1) можно воспользоваться методом Неймана.

Ниже представлен график плотности распределения размеров скачков вверх (рис. 1).

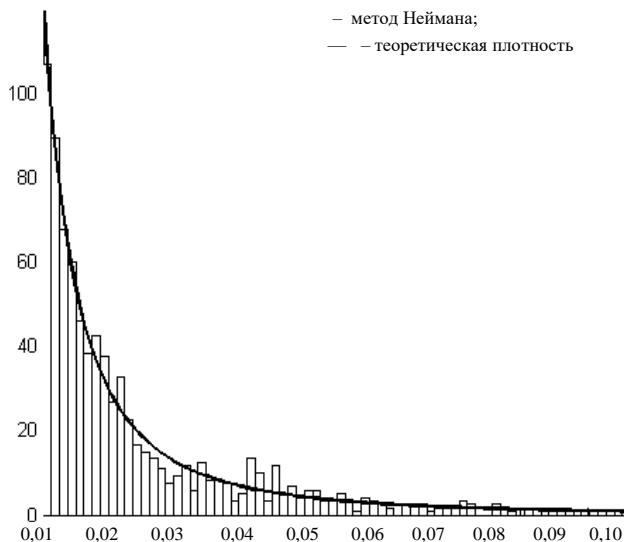


Рис. 1. Плотность скачка вверх /
 Fig. 1. The jump up density

Таким образом, процесс Леви с бесконечной интенсивностью аппроксимирован процессом jump-diffusion путем замены процесса с бесконечной интенсивностью малых скачков гауссовским процессом. Этот способ аппроксимации довольно популярен в настоящее время [8, 9].

Метод Монте-Карло для барьерных опционов в модели jump-diffusion

Рассмотрим экспоненциальную модель Леви $S_t = S_0 e^{X_t + rt}$ на конечном интервале, где X_t является процессом jump-diffusion: $X_t = mt + \sigma B_t + \xi_t$ на конечном интервале $[0, T]$. Представим процесс следующим образом: сгенерируем моменты скачков τ_i и размеры скачков с распределением, заданным мерой Леви. В момент i -го скачка $X_{\tau_i} = X_{\tau_{i-1}} + \xi_{\tau_i}$, закон распределения случайной величины ξ_{τ_i} определяется конечной мерой Леви и $X_{\tau_i} = m(\tau_i - \tau_{i-1}) + \sigma \sqrt{\tau_i - \tau_{i-1}} N_i, N_i \in N(0,1)$. Траектория процесса X_t между двумя соседними скачками непрерывна. А именно между двумя моментами времени τ_i и τ_{i+1} процесс X_t является броуновским мостом. Данный факт позволяет вычислить требуемые функционалы между моментами скачков, так как подобного рода совместные законы распре-

деления с броуновским движением хорошо изучены [10].

В качестве примера такого вычисления рассмотрим барьерный опцион call типа up & out. Не нарушая общности, положим безрисковую процентную ставку равной нулю, $S_0 = 1$. Проблема оценки такого опциона сводится к вычислению математического ожидания $C = E[(e^{X_T} - K)^+ 1_{M_T < b}]$, где $X_t, t > 0$ – процесс jump-diffusion такой, что e^{X_t} – мартингал; $M_t = \max_{\{0 \leq s \leq t\}} X_s$. В работе [4] был предложен комбинированный метод вычисления данного математического ожидания, основанный наconcatenation броуновских мостов. Если какая-либо из генерируемых величин X_{τ_i}, X_{τ_i-} окажется больше барьера, то выплата для этой траектории станет равной нулю. В противном случае можно аналитически вычислить вероятность того, что эта траектория пересекла барьер и вернулась обратно между двумя соседними скачками (так как между двумя скачками траектория – броуновский мост). Выплата по такой траектории будет равна выплате по европейскому опциону, умноженной на вероятность пересечения барьера.

В [4] получена формула для вычисления барьерного опциона в модели Леви, однако в ней не учитывается вероятность того, что броуновское движение в момент скачка может пересечь барьер. Ниже представлен исправленный вариант:

$$C = E[(e^{X_T} - K)^+ \prod_{i=1}^N I_{(X(\tau_i) < b) \wedge (X(\tau_i-) < b)} (1 - e^{-\frac{2(X_{\tau_i-} - b)(X_{\tau_i-1} - b)}{(\tau_i - \tau_{i-1})\sigma^2}})]$$

Алгоритм (метод Монте-Карло для процесса jump-diffusion)

- пока $\tau_i < T$, генерировать моменты скачков;
- генерировать размеры скачков ξ_{τ_i} ;
- генерировать X_{τ_i-} и X_{τ_i} ;
- вычислить функционал под математическим ожиданием;
- повторить первые четыре пункта необходимое количество раз, чтобы вычислить среднее значение функционала с желаемой точностью.

Используя аппроксимацию малых скачков броуновским движением и алгоритм, можно вычислить барьерные опционы в модели с бесконечной активностью скачков.

Результаты численных экспериментов

После 50 000 итераций метод Монте-Карло дает приемлемую погрешность. Рассмотрим для данного числа симуляций эксперимент, в ходе которого

будем уменьшать параметр аппроксимации броуновским движением ε и подсчитывать вычислительное время работы. Эксперимент был проведен в среде Matlab R2014a с использованием параллельных вычислений (parfor) на процессоре AMD Athlon X4 860K (таблица).

**Вычислительное время работы метода Монте-Карло /
 The computing time of Monte Carlo method**

ε	$\lambda(\varepsilon)$	Вычислительное время, с
0,1	0,1306	10,58
0,05	0,4141	14,27
0,01	3,3113	78,48
0,005	7,1751	265,24
0,001	38,8552	5 141,8

Из результатов, представленных в таблице, следует, что при достаточно малом параметре аппроксимации ε применять исследуемый комбинированный метод нецелесообразно.

Оценка погрешности метода

Рассмотрим оценку погрешности метода Монте-Карло при вычислении математического ожидания от функции с ограниченной производной при аппроксимации малых скачков броуновским движением.

Для процесса Леви X_t аппроксимация малых скачков броуновским движением имеет вид $\hat{X}_t^\varepsilon = X_t^\varepsilon + \sigma(\varepsilon)W_t$.

Достаточным условием сходимости по распределению для данной аппроксимации при $\varepsilon \rightarrow 0$ является выражение $\frac{\sigma(\varepsilon)}{\varepsilon} \rightarrow \infty$ [4], помимо которого существуют и другие условия сходимости, которые гораздо проще использовать [11].

Важное значение для дальнейшего имеет

Теорема [4]. Пусть f – вещественнозначная функция, для которой выполняется неравенство $|f'(x)| \leq C$ для некоторого C . Тогда

$$|E[f(X_T^\varepsilon + R_T^\varepsilon)] - E[f(X_T^\varepsilon + \sigma(\varepsilon)W_T)]| \leq A\rho(\varepsilon)C\sigma(\varepsilon),$$

где $A < 16,5$; $R_t^\varepsilon = t \int_{-\varepsilon}^{\varepsilon} v(x) dx$; $\rho(\varepsilon) = \frac{\int_{-\varepsilon}^{\varepsilon} |x|^3 v(x) dx}{\sigma^3(\varepsilon)}$;

дисперсия вычисляется по формуле $VarR_t^\varepsilon = t \int_{-\varepsilon}^{\varepsilon} x^2 v(x) dx = t\sigma^2(\varepsilon)$.

Если мера Леви задается умеренно устойчивым процессом $\hat{\sigma}(\varepsilon) = \rho(\varepsilon)\sigma(\varepsilon) = \varepsilon \frac{2-\alpha}{3-\alpha}$, то при $\varepsilon \rightarrow 0$ ошибка аппроксимации процесса Леви

$$\frac{C_-}{D_-} \int_{-\infty}^{-\varepsilon} (e^{ix} - 1) \frac{e^{-\lambda|x|}}{|x|^{1+\alpha}} dx$$

стремится к нулю. Не-

трудно заметить, что при уменьшении ε растет λ , и, как было показано выше, этот факт приводит к значительным вычислительным затратам.

В случае комбинированного метода Монте-Карло число операций, необходимое для моделирования одной траектории процесса, равно $2\lambda(\varepsilon)$,

где $\lambda(\varepsilon) = \frac{C_+}{D_+} + \frac{C_-}{D_-}$.

На рис. 2 показана зависимость ошибки оценки опциона и интенсивности скачков от параметра аппроксимации ε , а также отмечено оптимальное значение для ε (выколота точка).

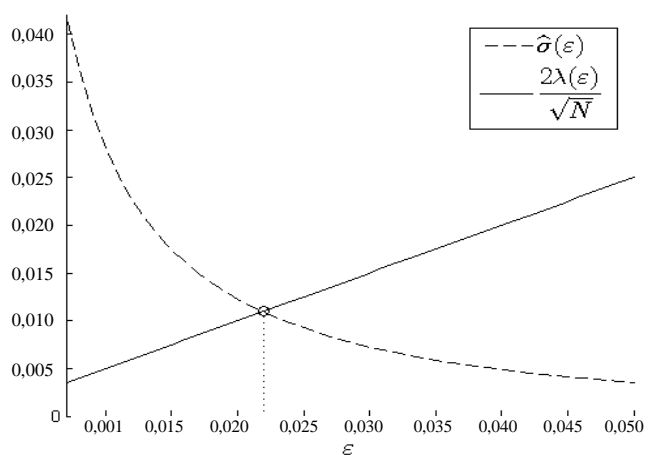


Рис. 2. Зависимость ошибки метода и интенсивности от ε / Fig. 2. Dependence of the method error and intensity of the ε

Таким образом, становится возможным выбор надлежащим образом параметра аппроксимации ε с целью сокращения вычислительного времени и экономии вычислительных ресурсов.

Заключение

Задача вычисления стоимости барьерного опциона в модели Леви с бесконечной активностью решена при помощи аппроксимации процесса малых скачков с бесконечной интенсивностью винеровским процессом и последующим вычислением цены финансового обязательства комбинированным методом Монте-Карло, который основывается на аппроксимации процесса Леви последовательностью броуновских мостов.

В качестве процесса с бесконечной интенсивностью скачков рассмотрен умеренно устойчивый процесс Леви.

Исследована взаимосвязь ошибки аппроксимации и интенсивности скачков, влияющей на вычислительные затраты применения метода Монте-Карло. Предложен способ ее преодоления.

Результаты численных экспериментов позволяют утверждать, что для рассматриваемого класса моделей применяемый метод дает приемлемые результаты после 50 000 симуляций Монте-Карло, что соответствует его теоретической оценке.

Стоит также отметить, что с увеличением барьера цена опциона стремится к стоимости европейского опциона, что выглядит вполне естественным.

Основное достоинство метода состоит в отсутствии необходимости полностью воспроизводить траекторию случайного процесса. Достаточно моделировать моменты скачков и для каждого из них генерировать две случайные величины. Общее число случайных величин для одной симуляции Монте-Карло составляет $T/2\lambda$, в отличие от полного воспроизведения траектории, для которого общее число случайных величин равно T/N , где T – рассматриваемый временной интервал; λ – интенсивность скачков; N – количество точек траектории случайного процесса.

Литература

1. Ширяев А.Н. Основы стохастической финансовой математики. Т. 2 : Теория. М., 1998. 544 с.
2. Ширяев А.Н. Основы стохастической финансовой математики. Т. 1 : Факты. Модели. М., 1998. 512 с.
3. Carr P., Geman H., Madan D.B., Yor M. The Fine Structure of Asset Returns: An Empirical Investigation // *J. of Business*. 2002. № 75. P. 305–332.
4. Cont R., Tankov P. *Financial Modelling with Jump Processes*. L., 2004.
5. Cont R., Voltchkova E. A finite difference scheme for option pricing in jump diffusion and exponential Levy models // *SIAM J. on Numerical Analysis*. 2005. Vol. 43, № 4. P. 1596–1626.
6. Кудрявцев О.Е. Современные численные методы решения интегро-дифференциальных уравнений, возникающих в приложениях. М., 2010. 144 с.
7. Glasserman P. *Monte Carlo Methods in Financial Engineering*. N.Y., 2004.
8. Crosby J., Saux N., Mijatovic A. Approximating Levy processes with a view to option pricing // *International J. of Theoretical and Applied Finance*. 2010. № 13. P. 63–91.

9. Hackmann D., Kuznetsov A. Approximating Lévy processes with completely monotone jumps // *The Annals of Applied Probability*. 2016. Vol. 1, № 26. P. 328–359.

10. Borodin A.N., Salminen P. *Handbook of Brownian Motion - Facts and Formulae*. Basel, 2002. 685 p.

11. Asmussen S., Rosiński J. Approximations of small jumps of Lévy processes with a view towards simulation // *J. of Applied Probability*. 2001. Vol. 2, № 38. P. 482–493.

References

1. Shiryayev A.N. *Osnovy stokhasticheskoi finansovoi matematiki. T. 2 : Teoriya* [Fundamentals of stochastic financial mathematics. Vol. 2. Theory]. Moscow, 1998, 544 p.
2. Shiryayev A.N. *Osnovy stokhasticheskoi finansovoi matematiki. T. 1 : Fakty. Modeli* [Fundamentals of stochastic financial mathematics. Vol. 1. Facts. Models]. Moscow, 1998, 512 p.
3. Carr P., Geman H., Madan D.B., Yor M. The Fine Structure of Asset Returns: An Empirical Investigation. *J. of Business*. 2002, No. 75, pp. 305-332.
4. Cont R., Tankov P. *Financial Modelling with Jump Processes*. London, 2004.
5. Cont R., Voltchkova E. A finite difference scheme for option pricing in jump diffusion and exponential Levy models. *SIAM J. on Numerical Analysis*. 2005, vol. 43, No. 4, pp. 1596-1626.
6. Kudryavtsev O.E. *Sovremennye chislennye metody resheniya integro-differentsial'nykh uravnenii, vznikayushchikh v prilozheniyakh* [Modern numerical methods for solving integro-differential equations arising in applications]. Moscow, 2010, 144 p.
7. Glasserman P. *Monte Carlo Methods in Financial Engineering*. New York, 2004.
8. Crosby J., Saux N., Mijatovi A. Approximating Levy processes with a view to option pricing. *International J. of Theoretical and Applied Finance*. 2010, No. 13, pp. 63-91.
9. Hackmann D., Kuznetsov A. Approximating Lévy processes with completely monotone jumps. *The Annals of Applied Probability*. 2016, vol. 1, No. 26, pp. 328-359.
10. Borodin A.N., Salminen P. *Handbook of Brownian Motion - Facts and Formulae*. Basel, 2002, 685 p.
11. Asmussen S., Rosiński J. Approximations of small jumps of Lévy processes with a view towards simulation. *J. of Applied Probability*. 2001, vol. 2, No. 38, pp. 482-493.

УДК 517.941

DOI 10.18522/0321-3005-2017-1-14-17

О БАЗИСНОСТИ СОБСТВЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО ПУЧКА ШЕСТОГО ПОРЯДКА С ТРЕХКРАТНЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

© 2017 г. А.И. Вагабов

ON THE BASIS OF ITS OWN ELEMENTS OF THE SIXTH ORDER DIFFERENTIAL BUNDLE WITH TRIPLE CHARACTERISTICS

A.I. Vagabov

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

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

Вопросы базисности функций по собственным функциям линейных дифференциальных операторов восходят к работам Фурье, Пуассона, Коши, Лиувилля, Гильберта, Кнезера и др. В наиболее общей постановке их решение для обыкновенных дифференциальных операторов и пучков операторов было дано в фундаментальных работах Г. Биркгофа и Я.Д. Тамаркина. Ими же было определено понятие регулярности граничных условий дифференциальных пучков, которое строго предполагало различность характеристических корней рассматриваемых пучков и которого придерживались многочисленные последователи в спектральной теории пучков. Статья рассматривает теорию дифференциального пучка шестого порядка, не относящегося к случаю регулярных в классическом смысле спектральных задач с параметром. Частные случаи таких задач порядка 2, 3, 4, с кратными корнями их характеристических уравнений, описаны ранее в ряде работ. В данной статье, в случае особого дифференциального пучка шестого порядка с двумя трехкратными характеристиками, установлена базисность ее собственных элементов. Хорошо известны трудности, связанные с изучением задач с кратными характеристическими корнями (даже в случае обыкновенных матричных операторов). В этом отношении понятна важность рассмотрения частных типов таких дифференциальных пучков, которые могут указать путь к общей теории пучков с кратными характеристиками. Мы используем модифицированные методы, связанные с построением и исследованием функции Грина соответствующей задачи. Предлагаемая работа служит одной из цепей в выработке теории спектральных задач с кратными характеристиками в случае обыкновенных дифференциальных пучков операторов.

Ключевые слова: функция Коши, функция Грина, асимптотика, параметр, корневые функции.

Questions of basis functions on eigenfunctions of the linear differential operators go back to works of Fourier, Poisson, Cauchy, Liouville, Gilbert, Knezer and others. In the most common statement their decision for ordinary differential operators and bunches of operators was given in G. Birkhoff and J. D. Tamarkin's fundamental works. The defined notion of a regularity of boundary conditions of differential bunches which strictly assumed a differently of characteristic roots of the considered bunches and to which numerous followers in the spectral theory of bunches adhered was them. Our article falls into to studying of the theory of a differential bunch of the sixth order which is not falling into to a case of the regular in classical sense of spectral tasks with parameter. Special cases of such problems of orders 2, 3, 4, with the multiple roots of their secular equations, were considered in a number of works earlier. In this article, in case of a special differential bunch of the sixth order with two triple characteristics, the basis property of its characteristic elements is established. Difficulties, the bound to studying of tasks to the multiple characteristic roots are well-known (even in case of ordinary matrix operators). Importance of consideration of private types of such differential bunches which can specify a way to the common theory of bunches with the multiple characteristics is in this regard clear. We use the modified methods, the bound to construction and a research of a Green function of the corresponding task. The offered work serves one of chains in development of the theory of spectral tasks with the multiple characteristics, in case of ordinary differential bunches of operators.

Keywords: Cauchy function, Green function, asymptotic, parameter, root functions.

Введение

Известны трудности, связанные с решением задач алгебры, геометрии, дифференциальных уравнений, в случаях кратности корней соответствующим

характеристическим уравнениям, относящимся к этим задачам. Не является исключением и теория рядов по собственным элементам спектральных задач для дифференциальных операторов. В ситуациях двукратного и трехкратного порядка характе-

ристических корней дифференциальных операторов второго и третьего порядка задача базисности собственных элементов решена в работах [1, 2]. Для n -го порядка и единственности характеристического корня (n -го порядка) решена задача n -кратной базисности в работе [3]. Однако даже случай двух кратных характеристических корней не входит в схему решения работы [3], представляя значительные трудности. Они преодолены в [4] для оператора четвертого порядка.

В данной работе путем более конструктивного и трудоемкого анализа резольвенты дифференциального оператора шестого порядка с двумя характеристическими корнями порядка 3 удалось установить базисность системы собственных элементов оператора. Отметим, что задача решается при распадающихся граничных условиях, все из которых заданы на одном конце интервала, кроме одного. В классических случаях такие условия порождают нерегулярную задачу (кроме условий типа Штурма) [5, с. 616].

Постановка задачи и предварительные построения

Рассматривается дифференциальный операторный пучок

$$l(y) \equiv \left(\frac{d^2}{dx^2} - \lambda^2 \right)^3 y(x), \quad 0 < x < 1 \quad (1)$$

с комплексным параметром λ и распадающимися краевыми условиями

$$U_s(y) \equiv \frac{d^{s-1}y(0)}{dx^{s-1}} = 0, \quad s = \overline{1,5}, \quad U_6(y) \equiv y(1) = 0. \quad (2)$$

Будем опираться на фундаментальные решения уравнения $l(y) = 0$ при $\lambda \neq 0$:

$$\begin{aligned} y_1(x) &= e^{\lambda x}, \quad y_2(x) = xe^{\lambda x}, \quad y_3(x) = x^2 e^{\lambda x}, \\ y_4(x) &= e^{-\lambda x}, \quad y_5(x) = xe^{-\lambda x}, \quad y_6(x) = x^2 e^{-\lambda x}. \end{aligned} \quad (3)$$

В случае $\lambda = 0$, взяв вместо (3) систему $1, x, x^2, x^3, x^4, x^5$, убедимся, что нуль не является собственным значением, т.е. полюсом функции Грина (см. далее). Для определителя

$$\det \left\{ \frac{d^{i-1}y_j(\xi)}{d\xi^{i-1}} \right\}_1^6 \equiv |Y(\xi, \lambda)| \quad \text{матрицы Вронского}$$

$Y(\xi, \lambda)$ решений (3) подсчетом получаем

$$|Y(\xi, \lambda)| = -2^{11} \lambda^9. \quad (4)$$

Вычисление алгебраических дополнений последней строки определителя $|Y(\xi, \lambda)|$ приводит к формулам

$$\begin{aligned} Y_{61}(\xi, \lambda) &= (-2^7 \xi^2 \lambda^6 - 3 \cdot 2^7 \xi \lambda^5 - 2^7 \cdot 3 \lambda^4) e^{-\lambda \xi}, \\ Y_{62}(\xi, \lambda) &= (2^6 \xi \lambda^6 + 2^5 \cdot 3 \lambda^5) e^{-\lambda \xi}, \quad Y_{63}(\xi, \lambda) = 2^6 \lambda^6 e^{-\lambda \xi}, \\ Y_{64}(\xi, \lambda) &= 2^7 (\lambda^6 \xi^2 - 3 \lambda^5 \xi + 3 \lambda^4) e^{\lambda \xi}, \\ Y_{65}(\xi) &= (2^7 \xi \lambda^6 - (3 \cdot 2^7 \xi + 2^6) \lambda^5 + 3 \cdot 2^6 \lambda^4) e^{\lambda \xi}, \\ Y_{66}(\xi, \lambda) &= -2^7 \lambda^6 e^{\lambda \xi}. \end{aligned} \quad (5)$$

Обозначим через $Z(\xi) \equiv Y^{-1}(\xi)$,

$$z_k(\xi) = \frac{Y_{6k}(\xi)}{|Y(\xi)|}, \quad k = \overline{1,6}. \quad (6)$$

Определение. Функцией Коши уравнения (1) назовем

$$g(x, \xi, \lambda) = \begin{cases} \sum_{k=1}^6 y_k(x) z_k(\xi) & \text{при } x < \xi, \\ 0 & \text{при } x \geq \xi \end{cases} \quad (7)$$

или с учетом (4), (6) функцию

$$g(x, \xi, \lambda) = \begin{cases} \begin{vmatrix} y_1(\xi) \cdots y_6(\xi) \\ y_1'(\xi) \cdots y_6'(\xi) \\ \dots \\ y_1^{IV}(\xi) \cdots y_6^{IV}(\xi) \\ y_1(\xi) \cdots y_6(\xi) \end{vmatrix} \frac{-1}{2^{11} \lambda^9} & \text{при } x \leq \xi \\ 0 & \text{при } x \geq \xi. \end{cases} \quad (8)$$

Она шестикратно дифференцируема при $x \neq \xi$, и лишь пятая производная имеет разрыв при $x = \xi$:

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

Определение функции Коши неоднозначно. Так, функция

$$\tilde{g}(x, \xi, \lambda) = \begin{cases} 0 & \text{при } x \leq \xi \\ -\sum_{k=1}^6 y_k(x) z_k(\xi) & \text{при } x \geq \xi \end{cases} \quad (9)$$

также является функцией Коши уравнения $l(y) = 0$. Функцию (8) удобно использовать при $\text{Re} \lambda > 0$, а функцию (9) – при $\text{Re} \lambda < 0$. Для определенности дальнейшие суждения отнесем к правой λ -полуплоскости.

Лемма 1. Для любой шестикратно непрерывно дифференцируемой на $(0,1)$ функции $f(x)$, обращающейся в нуль с производными до девятого порядка включительно на концах интервала $(0, 1)$, справедлива формула

$$\int_0^1 g(x, \xi, \lambda) f^{(6)}(\xi) d\xi = f(x) + O\left(\frac{1}{\lambda^2} \int_x^1 e^{\lambda(x-\xi)} f(\xi) d\xi\right), \quad \text{Re} \lambda > 0, \quad |\lambda| \gg 1. \quad (10)$$

Доказательство. Интегрированием шесть раз по частям и отбрасыванием внеинтегральных слагаемых, равных нулю, придем к равенству

$$\int_x^1 g(x, \xi, \lambda) f^{(6)}(\xi) d\xi = \frac{d^5 g(x, \xi, \lambda)}{d\xi^5} f(\xi) \Big|_{\xi=x}^1 + \int_x^1 \frac{d^6 g(x, \xi, \lambda)}{d\xi^6} f(\xi) d\xi = f(x) + \int_x^1 \frac{d^6 g(x, \xi, \lambda)}{d\xi^6} f(\xi) d\xi, \text{ т.е.}$$

$$\int_x^1 g(x, \xi, \lambda) f^{(6)}(\xi) d\xi = f(x) - \int_x^1 \frac{d^6 g(x, \xi, \lambda)}{d\xi^6} f(\xi) d\xi. \quad (11)$$

На основании формулы (11) оценку по λ интегрального выражения в ее правой части можно заменить оценкой интегрального выражения в левой части. Таким путем по формулам (3)–(7) легко приддем к оценке

$$\int_x^1 \frac{d^6 g(x, \xi, \lambda)}{d\xi^6} f(\xi) d\xi = O\left(\frac{1}{\lambda^2} \int_x^1 e^{\lambda(x-\xi)} f(\xi) d\xi\right).$$

Замечание 1. Что касается требования от функции $f(x)$ на левом конце интервала $(0, 1)$, не использованного нами при доказательстве теоремы, то оно необходимо в случае $\text{Re} \lambda < 0$, и, таким образом, лемма 1 верна в обеих полуплоскостях $(\text{Re} \lambda < 0) \cup (\text{Re} \lambda > 0)$. Опираясь на установленную лемму, докажем

Утверждение 1. Пусть C_l – окружности с центром в начале λ -плоскости и радиусами $l \rightarrow \infty$; $f(x)$ – функция, указанная в лемме 1. Справедлива формула

$$\lim_{l \rightarrow \infty} \frac{1}{2\pi\sqrt{-1} C_l} \int_0^1 d\lambda \int g(x, \xi, \lambda) f^{(6)}(\xi) d\xi = f(x). \quad (12)$$

Доказательство опирается на формулу (10). Как отмечено в самой лемме и замечании 1, достаточно видеть, что $\int_{C_l} \frac{d\lambda}{\lambda^2} \int_x^1 e^{\lambda(x-\xi)} f(\xi) d\xi \rightarrow 0$ при $l \rightarrow \infty$.

Функция Грина и основная теорема

Приведем широко известное выражение мероморфной по λ функции Грина задачи (1), (2) [6, с. 46].

$$G(x, \xi, \lambda) = \frac{\Delta(x, \xi, \lambda)}{\Delta(\lambda)}, \quad (13)$$

где

$$\Delta(x, \xi, \lambda) = \begin{vmatrix} g(x, \xi, \lambda) & y_1(x) \cdots y_6(x) \\ U_1(g)_x & \\ \vdots & \\ U_6(g)_x & \{U_s(y_j(x))\}_{s,j=1}^6 \end{vmatrix},$$

(индекс x за скобкой означает применение функционала U_s к $g(x, \xi, \lambda)$ по x).

$$\Delta(\lambda) = \det \{u_{sj}(\lambda)\}_1^6 \equiv \det \{U_s(y_j(x))\}_{s,j}^6. \quad (14)$$

Подсчет выражения (14) с использованием формул (2), (3) дает

$$\Delta(\lambda) = 3 \cdot 2^7 \lambda^4 (e^{-\lambda} - \lambda e^\lambda). \quad (15)$$

Нетрудно проверить, что асимптотическая последовательность

$$\lambda_n \approx \ln \sqrt{2\pi n} + \frac{1}{4\pi n} \pm \sqrt{-1} \left(\pi n + \frac{\pi}{4} - \frac{\ln 2\pi n}{4\pi n} \right), \quad n \in N,$$

является асимптотикой корней $\Delta(\lambda)$, иначе полюсов функции Грина. Переходя к дальнейшему исследованию выражения (13) для функции Грина, разложим ее на две части

$$G(x, \xi, \lambda) = g(x, \xi, \lambda) + \frac{E(x, \xi, \lambda)}{\Delta(\lambda)}, \quad (16)$$

где $E(x, \xi, \lambda)$ получено из числителя $\Delta(x, \xi, \lambda)$ заменой элемента в его левом верхнем углу нулем.

Лемма 2. Справедливо асимптотическое по λ представление в правой λ -полуплоскости

$$E(x, \xi, \lambda) \sim \xi \lambda^4 e^{\lambda(x-\xi)}, \quad x < \xi. \quad (17)$$

Доказательство. Принимая во внимание формулы (2)–(7) и выделяя в первом столбце определителя $E(x, \xi, \lambda)$ лишь старшие по росту степени λ члены, представим асимптотику этого столбца в виде

$$\left(0, \frac{\xi}{\lambda^4}, \frac{\xi^2}{\lambda^2}, \frac{\xi^2}{\lambda^2}, \frac{\xi}{\lambda^2}, \xi, 0 \right)^t \cdot e^{-\lambda \xi}, \quad \xi > x, \quad \text{Re} \lambda > 0. \quad (18)$$

Из (18) легко определим старший по росту λ член определителя $E(x, \xi, \lambda)$ в виде (17).

Утверждение 2. Для любой непрерывной на $[0, 1]$ функции $\phi(x)$ имеет место равенство

$$I \approx \lim_{l \rightarrow \infty} \int_{C_l \cap (\text{Re} \lambda > 0)} d\lambda \int_x^1 \frac{E(x, \xi, \lambda)}{\Delta(\lambda)} \phi(\xi) d\xi = 0, \quad (19)$$

где C_l – окружность радиусом $l + \frac{1}{2}$, где $l \in N$.

Доказательство. Согласно (15), (17),

$$I \approx \lim_{l \rightarrow \infty} \int_{C_l \cap (\text{Re} \lambda > 0)} d\lambda \int_x^1 \frac{\xi e^{\lambda + \lambda(x-\xi)}}{\lambda e^\lambda} f(\xi) d\xi = 0.$$

Замечание 2. В случае $\text{Re} \lambda < 0$ утверждение 2 также справедливо, если учесть, что первый столбец в $E(x, \xi, \lambda)$ значительно проще, чем в (18), а именно имеет вид $(0, 0, 0, 0, 0, e^{\lambda(1-\xi)})^t$.

Теорема. Для любой функции $f(x)$, удовлетворяющей условиям леммы 1, справедлива формула разложения по корневым элементам задачи (1), (2)

$$\lim_{l \rightarrow \infty} \frac{1}{2\pi\sqrt{-1}} \int_{C_l} d\lambda \int_0^1 G(x, \xi, \lambda) f^{(6)}(\xi) d\xi = f(x), \quad (20)$$

где \tilde{N}_a – окружности радиусами $l + \frac{1}{2}$, $l \in N$, с центром в начале λ -плоскости. Сходимость в (20) – равномерная на $(0, 1)$.

Доказательство. Согласно формуле (16), левую часть равенства (20) запишем в виде

$$\begin{aligned} & \lim_{l \rightarrow \infty} \frac{1}{2\pi\sqrt{-1}} \int_{C_l} d\lambda \int_0^1 g(x, \xi, \lambda) f^{(6)}(\xi) d\xi + \\ & + \lim_{l \rightarrow \infty} \frac{1}{2\pi\sqrt{-1}} \int_{C_l} d\lambda \int_0^1 \frac{E(x, \xi, \lambda)}{\Delta(\lambda)} f^{(6)}(\xi) d\xi. \end{aligned} \quad (21)$$

На основании формулы (12) первый предел в (21) равен $f(x)$, второй равен нулю, согласно (19), чем завершается доказательство теоремы.

Литература

1. Печенцов А.С. Краевые задачи для дифференциальных уравнений, содержащих параметр, с кратными корнями характеристического уравнения // Диф. уравнения. 1984. Т. 20, № 2. С. 263–273.
2. Абуд А.Х. Спектральная задача с трехкратными корнями основного характеристического уравнения дифференциального пучка третьего порядка // Успехи современной науки. 2016. Т. 1, № 2. С. 145–147.
3. Вагабов А.И. N-кратная формула разложения в ряды Фурье по корневым элементам дифференциального пучка с n-кратной характеристикой // Диф. уравнения. 2016. Т. 52, № 5. С. 555–560.
4. Вагабов А.И. Спектральная задача с двумя двукратными корнями характеристического уравнения дифференциального пучка четвертого порядка // Успехи современной науки. 2016. Т. 3, № 5. С. 115–119.
5. Вагабов А.И. О равносходимости разложений в тригонометрический ряд Фурье и по главным функциям обыкновенных дифференциальных опе-

раторов // Изв. АН СССР. Сер. мат. 1984. Т. 48, № 3. С. 614–630.

6. Наймарк М.А. Линейные дифференциальные операторы. М., 1969. 526 с.

References

1. Pechentsov A.S. Kraevye zadachi dlya differentsial'nykh uravnenii, sodержashchikh parametr, s kratnymi korniyami kharakteristicheskogo uravneniya [Boundary value problems for differential equations containing a parameter with multiple roots of the characteristic equation]. *Dif. uravneniya*, 1984, vol. 20, No. 2, pp. 263-273.
2. Abud A.Kh. Spektral'naya zadacha s trekhkratnymi korniyami osnovnogo kharakteristicheskogo uravneniya differentsial'nogo puchka tret'ego poryadka [Spectral task with a triple zoot of the main characteristic equation of a differential buch third order]. *Uspekhi sovremennoi nauki*, 2016, vol. 1, No. 2, pp. 145-147.
3. Vagabov A.I. N-kratnaya formula razlozheniya v ryady Fur'e po kornevym elementam differentsial'nogo puchka s n-kratnoi kharakteristikoi [N-multiple expansion formula in Fourier series on root elements of a differential buch with the n-multiple characteristic]. *Dif. uravneniya*, 2016, vol. 52, No. 5, pp. 555-560.
4. Vagabov A.I. Spektral'naya zadacha s dvumya dvukratnymi korniyami kharakteristicheskogo uravneniya differentsial'nogo puchka chetvertogo poryadka [Spectral task with two double roots of the characteristic equation of a differential buch of the fouzth order]. *Uspekhi sovremennoi nauki*, 2016, vol. 3, No. 5, pp. 115-120.
5. Vagabov A.I. O ravnoskhodimosti razlozhenii v trigonometricheskii ryad Fur'e i po glavnym funktsiyam obyknovennykh differentsial'nykh operatorov [About an eguiconvergence of decomposition in a trigonometrical Fourier series and on the main functions differential operators]. *Izv. AN SSSR. Ser. mat.*, 1984, vol. 48, No. 3, pp. 614-630.
6. Naimark M.A. *Lineinye differentsial'nye operatory* [Linear differential operators]. Moscow, 1969, 526 p.

УДК 519.724

DOI 10.18522/0321-3005-2017-1-18-24

ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ МЯГКИХ И ВЕРОЯТНОСТНЫХ ДЕКОДЕРОВ ДЛЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ДАННЫХ ПРИ ПЕРЕХВАТЕ

© 2017 г. В.М. Деундяк, Н.С. Могилевская

APPLICATION OF SOFT AND PROBABILISTIC DECODERS FOR INTERCEPTED DATA RESTORING

V.M. Deundyak, N.S. Mogilevskaya

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

Vladimir M. Deundyak – Southern Federal University, Vorovich Institute of Mathematics, Mechanics and Computer Science, Candidate of Physics and Mathematics, Associate Professor, Department of Algebra and Discrete Mathematics, Milchakova St., 8a, Rostov-on-Don, 344090, Russia; Senior Researcher, FGNU SRI «Specvuzavtomatika», Gazetnyi Lane, 51, Rostov-on-Don, 344002, Russia, e-mail: vlade@math.sfedu.ru

Могилевская Надежда Сергеевна – Донской государственной технической университет, кандидат технических наук, доцент, кафедра кибербезопасности информационных систем, пл. Гагарина, 1, г. Ростов-на-Дону, 344010, Россия, e-mail: broshka2011@yandex.ru

Nadezhda S. Mogilevskaya – Don State Technical University, Candidate of Technical Science, Associate Professor, Department of Information Systems Cybersecurity, Gagarina Sq., 1, Rostov-on-Don, 344000, Russia, e-mail: broshka2011@yandex.ru

Исследуется возможность восстановления зашумленных данных, полученных из канала перехвата с помощью мягких и вероятностных декодеров помехоустойчивых кодов. В работе получены следующие результаты. Построена общая модель информационно-аналитической системы канала наблюдения, включающая в себя двух легальных участников и канал связи, их соединяющий, а также одного нелегального участника (наблюдателя), осуществляющего перехват данных, который может быть организован с помощью как каналов технической утечки информации, так и физического подключения к действующему каналу передачи. Цель легитимных участников – организация защищенной передачи конфиденциальных данных от отправителя к получателю. Цель нелегитимного участника состоит в несанкционированном получении защищенных данных, даже при некоторых их искажениях и при значительной задержке во времени. Формирование канала перехвата выполняется с целью нарушения только конфиденциальности данных легальных пользователей, так как такой канал не предполагает обратной связи, необходимой для нарушения, например, целостности данных наблюдателем. Основной частью общей модели является модель нелегитимного наблюдателя, который организует канал перехвата данных из легального канала. Описаны возможные действия наблюдателя для получения данных приемлемого качества из нелегитимного канала связи с высоким уровнем зашумления за счет использования специальных декодеров помехоустойчивых кодов, работающих за пределом половины кодового расстояния. В связи с построением модели работа содержит описание общей схемы передачи данных, некоторых типов декодеров. Результаты получены на базе следующей методологии: теоретико-вероятностные методы, методы имитационного моделирования и методы проведения вычислительного эксперимента. Результаты работы применимы при проектировании каналов передачи конфиденциальной информации для оценки возможности получения данных наблюдателем на границах контролируемой зоны.

Ключевые слова: канал наблюдения, канал перехвата, помехоустойчивое кодирование, вероятностный декодер, спичный декодер, мягкий декодер, информационно-аналитическая система.

The possibility to restore noisy data received from channel interception with a soft and probabilistic decoding error-correcting codes. The following results were obtained. A general model of information-analytical channel monitoring system, which includes two legal members and the link connecting them, as well as one of the illegal member (observer). Data intercepting can be organized as through technical channels of information leakage, and via a physical connection to the existing transmission channel. The purpose of the legitimate participants - organization of secure transmission of confidential data from the sender to the recipient. The goal of the illegitimate member is unauthorized receipt of secure data, even if some of their distortions and with considerable delay in time. Formation of the interception is carried out channel to violate privacy only legitimate users of data, such as the channel does not involve feedback needed for violations, such as data integrity observer. The main part of the model is the model of illegitimate observer who organizes the interception of data channel from the legal channel. We describe the possible actions of the observer to obtain acceptable quality of data from illegitimate channel due to the high level of noise pollution due to the use of special decoder

error-correcting codes, working outside half of the minimum distance. In connection with the building work model describes a common data transmission scheme, a description of some types of decoders. The results obtained on the basis of the following methodology: theoretical and probabilistic methods, simulation modelling and techniques of computational experiment. The results are applicable for designing the channels of confidential information transmission to assess the possibility of obtaining data by an observer on the borders of the controlled area.

Keywords: monitoring channel, channel of information leakage, error-correction coding, probabilistic decoder, payroll decoder, soft decoder, information-analytical system.

Введение

Перехватом, согласно ГОСТу Р.50.1.053-2005, называют непроверенное получение информации с использованием технического средства, осуществляющего обнаружение, прием и обработку информативных сигналов. Перехват может быть организован с помощью как каналов технической утечки информации, так и физического подключения к действующему каналу передачи. Легальный канал связи и канал, по которому осуществляется перехват, можно рассматривать как информационно-аналитическую систему (ИАС), состоящую из двух

легитимных участников – отправителя и получателя, а также одного нелегитимного участника – наблюдателя. Такие системы изучены, например, в [1]. Цель легитимных участников – организация защищенной передачи конфиденциальных данных от отправителя к получателю. Цель нелегитимного участника состоит в несанкционированном получении защищенных данных, даже при некоторых их искажениях и при значительной задержке во времени. Эту ИАС будем называть информационно-аналитической системой канала наблюдения (ИАС КН). Принципиальная схема ИАС КН представлена на рис. 1.

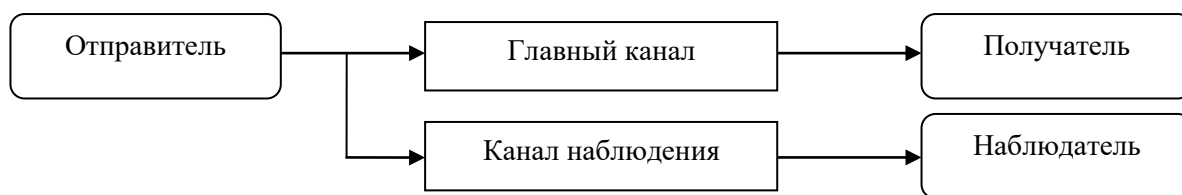


Рис. 1. Принципиальная схема ИАС КН / Fig. 1. Schematic diagram of information-analytical system of monitoring channel (IAS MC)

Канал, связывающий отправителя и получателя, принято называть главным, а канал, связывающий отправителя и наблюдателя, – каналом наблюдения. Качество канала наблюдения, как правило, хуже качества главного канала; наблюдатель снимает из линии связи данные, зашумление которых значительно превосходит зашумление данных в главном канале связи. Примером ИАС КН может быть система обмена данными, все участники которой снабжены мобильными устройствами, а каналы связи между ними реализуются по беспроводным линиям связи; если получатель и наблюдатель находятся в различных местах по отношению к отправителю, то и качество связи в главном канале и канале наблюдения может быть различным [1].

Для борьбы с ошибками в цифровых каналах связи традиционно используют помехоустойчивые коды, в состав которых входят кодеры и декодеры, работающие на основе какого-либо алгебраического кода. Использование алгебраических методов помехоустойчивой защиты в системах связи, с одной стороны, позволяет уменьшить количество ошибок, искажающих передаваемые данные, но с другой – повышает объем передаваемых данных.

Увеличение объема влечет за собой либо снижение скорости передачи, либо необходимость улучшения технических характеристик канала связи для сохранения прежней скорости передачи. Таким образом, в системах связи при использовании алгебраических помехоустойчивых кодов обычно не предусмотрен большой «запас прочности» по количеству исправляемых ошибок, так как это влечет за собой рост технических затрат.

Как было отмечено, качество отводного канала наблюдения обычно ниже качества главного канала, следовательно, наблюдатель при использовании детерминированного декодера, такого же как и у легальных пользователей, не сможет полностью восстановить полученные им зашумленные данные. Для их восстановления наблюдателю ИАС КН имеет смысл воспользоваться специальными декодерами, которые исправляют большее по сравнению с детерминированными декодерами количество ошибок, однако время их работы значительно превышает время работы детерминированных декодеров.

Для разработки способов защиты от злоумышленников, организующих и использующих ИАС КН, представляется актуальным исследовать воз-

возможности наблюдателя в этой информационной системе. Цель настоящей работы состоит в построении общей модели ИАС КН, основной частью которой является модель нелегитимного наблюдателя. Работа содержит описание общей схемы передачи данных и некоторых типов декодеров. Построены общая модель ИАС КН и модель нелегитимного наблюдателя, в которой описаны его возможные действия для получения данных приемлемого качества из нелегитимного канала связи с высоким уровнем зашумления за счет использования специальных декодеров помехоустойчивых кодов, работающих за пределом половины кодового расстояния.

Схема передачи данных

Рассмотрим основные функциональные блоки общей схемы передачи данных [2] (рис. 2), которая содержит источник сообщений, кодер канала и передатчик на передающем конце канала передачи данных; приемник, декодер канала и получатель сообщений на приемном конце канала передачи сообщений. Источник сообщений формирует информационные векторы $\mathbf{m} = (m_1, m_2, \dots, m_k) \in F_q^k$, где m_i – элементы поля Галуа F_q , которые поступают в кодер канала. Для исправления ошибок, возникающих в линии связи, кодером канала использу-

ется некоторый блочный $[n, k, d]_q$ -код, где n – длина; $k (< n)$ – размерность; d – минимальное кодовое расстояние; q задает поле F_q , над которым определен код [2, 3]. На выходе кодера канала формируются кодовые векторы $\mathbf{c} \in F_q^n$, откуда они поступают на вход передатчика, который преобразует элементы \tilde{n}_j вектора $\tilde{\mathbf{n}}$ в сигналы z_j , принадлежащие некоторому множеству M_q мощности q , т.е. в рассматриваемой схеме передатчик выполняет модуляцию сигнала. Затем полученные сигналы передатчик на физическом уровне отправляет в линию связи, они искажаются из-за непреднамеренных помех. Таким образом, сигналы на выходе линии связи могут принадлежать некоторому более широкому множеству M , включающему в себя M_q . Подобная линия связи с мягким выходом, с $M_q = \{-1; 1\}$, $M = \mathbf{R}$, рассмотрена, например, в [4]. Приемник оцифровывает полученные сигналы (демодулирует), формирует вектор $\mathbf{c}' \in F_q^n$ и направляет его в декодер помехоустойчивого кода. Результат декодирования $\mathbf{m}' \in F_q^k$ поступает получателю. Очевидно, что при успешном декодировании $\mathbf{m} = \mathbf{m}'$, однако при высоком уровне шума $\mathbf{m} \neq \mathbf{m}'$.

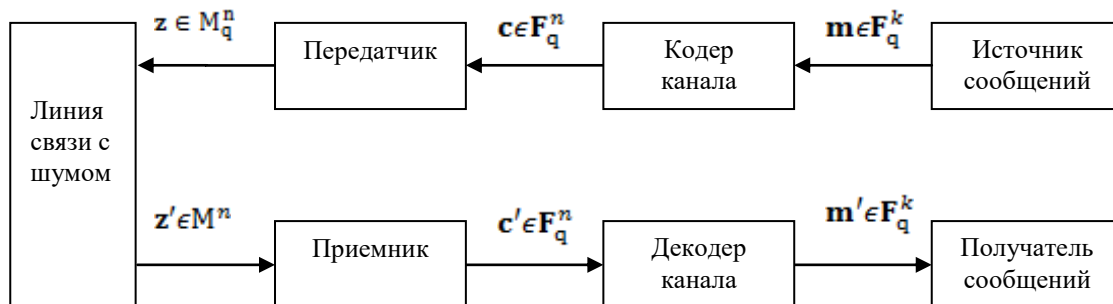


Рис. 2. Общая схема передачи данных / Fig. 2. The total data transfer scheme

Декодеры помехоустойчивых кодов

В основе кодера и декодера, отмеченных на типичной схеме передачи данных, лежит какой-либо помехоустойчивый $[n, k, d]_q$ -код. Все помехоустойчивые коды базируются на одной общей идее: для обнаружения и исправления ошибок, которые могут возникнуть в процессе передачи и хранения данных, к ним добавляется некоторая специальным образом организованная избыточность, которая в дальнейшем используется для исправления ошибок, повредивших кодовое слово во время его пе-

редачи по каналу связи [2, 3]. Кодер каждому входному информационному слову длины k ставит в соответствие кодовое слово длины n , где $(k < n)$. Декодер выполняет обратную задачу. Обычно для любого кода существует несколько подходящих алгоритмов кодирования и декодирования.

Задача алгоритма декодирования состоит в поиске решения уравнения

$$\mathbf{x} + \mathbf{e} = \mathbf{x}', \tag{1}$$

где $\mathbf{x} \in C \left(\subset F_q^n \right)$ – исходный кодовый вектор; \mathbf{e} – вектор ошибок, вес Хемминга которого $wt(\mathbf{e}) \leq t$,

где t – число гарантированно исправляемых кодом ошибок $t = \lfloor (d-1)/2 \rfloor$; \mathbf{x}' – зашумленный вектор \mathbf{x} , полученный на выходе из линии связи. Алгоритму декодирования известен вектор \mathbf{x} и неизвестны векторы \mathbf{x}' и \mathbf{e} . Из теории помехоустойчивого кодирования известно, что уравнение (1) имеет единственное решение, если $d \geq 2t + 1$. Если $d < 2t + 1$, то говорят о декодировании за пределами половины кодового расстояния [3, с. 125].

Рассмотрим некоторые разновидности декодеров, которые актуальны для задачи, рассматриваемой в работе, а также приведем примеры таких декодеров для широко известных кодов Рида – Маллера и Рида – Соломона.

Если для одних и тех же входных данных декодер выдает постоянный выходной результат, то говорят о детерминированном декодере; если же результат декодера является случайной величиной, то говорят о вероятностном декодере. Обычно в цифровой связи используются детерминированные декодеры. Их достоинствами являются высокая скорость работы и правильный результат декодирования в случае, если число ошибок, искажающих кодовое слово, не превышает числа t гарантированно исправляемых ошибок. О таких декодерах говорят, что они исправляют ошибки в пределах половины кодового расстояния. Их серьезным недостатком является то, что при искажении кодового слова более чем t ошибками качество связи резко падает [5, 6].

Вероятностные декодеры всегда правильно восстанавливают кодовое слово, если число ошибок не превосходит t . Если число ошибок превышает количество t гарантированно исправляемых кодом ошибок, то декодер продолжает, как правило, работать с высоким, но не стопроцентным качеством декодирования. Увеличение числа исправляемых ошибок вероятностными декодерами достигается за счет роста их сложности по сравнению с детерминированными декодерами. Таким образом, вероятностные декодеры могут исправлять значительно большее число ошибок по сравнению с детерминированными декодерами, однако скорость работы этих декодеров довольно низкая, что делает их непривлекательными для штатного использования в сетях связи, предполагающих оперативный обмен данными.

Для кодов Рида – Маллера детерминированными декодерами являются, например, мажоритарный декодер Рида, универсальный синдромный декодер, декодер по минимуму расстояния Хемминга [2]. Вероятностные декодеры кодов Рида – Маллера представлены в [4, 7]. В [8] для кодов Рида – Соломона описаны детерминиро-

ванные декодеры во временной и частотной областях. Примером вероятностного декодера кодов Рида – Соломона является декодер из [3, с. 140–146].

По взаимосвязи с демодулятором разделяют декодеры с мягким и жестким входом. В случае мягкого входа декодер объединяется с демодулятором и оперирует входными данными в вещественном или комплексном виде. В случае жесткого входа декодер оперирует входными данными, полученными с выхода демодулятора и заданными над некоторым фиксированным полем Галуа. Все детерминированные декодеры являются жесткими.

Для двоичных кодов Рида – Маллера мягкими являются декодеры [4], а также [9, 10]; для троичных кодов мягкий декодер представлен в [11]. Для кодов Рида – Соломона примером мягкого декодера является [12].

Если алгоритм декодирования вычисляет не единственное решение, а список ограниченного размера, в который входят одно или несколько решений уравнения (1), то говорят о списочном декодировании [3, с. 125]. Такие декодеры возвращают список наиболее вероятных слов, при этом длина списка определяется параметрами алгоритма. Следует отметить, что верное кодовое слово может и не содержаться в списке, возвращаемом декодером; обычно это возникает при большом числе ошибок в канале связи. Несписочные декодеры всегда возвращают одно кодовое слово. Обзор списочных декодеров содержится в [13].

Модель ИАС КН

Схема модели ИАС КН представлена на рис. 3. В левой части схемы расположены блоки, относящиеся к главному каналу, подробнее он представлен на рис. 2.

Рассмотрим структуру канала наблюдения (рис. 3). Как и в случае главного канала, основными функциональными блоками канала наблюдения являются источник сообщений, кодер канала, передатчик, линия связи с шумом, приемник, декодер канала и получатель сообщений. Однако источник сообщения, кодер канала и передатчик сформированы главным каналом; наблюдатель пользуется результатами их работы, но влиять на состав или качество работы не может. Оставшиеся блоки канала наблюдения, а именно приемник, декодер канала и получатель сообщений (назовем совокупность этих блоков приемным блоком), наблюдатель формирует самостоятельно.

В линию связи из передатчика легальных пользователей поступает вектор $\mathbf{z} \in \mathbb{I}_q^n$; легальные участники получают из линии связи вектор $\mathbf{z}' \in \mathbb{I}^n$, нелегальный – $\mathbf{z}'' \in \mathbb{I}^n$. Как уже было отмечено, качество отводного канала наблюдения

обычно ниже качества главного канала. Следовательно, наблюдатель при использовании детерминированного декодера, стандартно используемого в легальных каналах связи, не сможет восстановить полученные им зашумленные данные; ему следует использовать специальные декодеры.

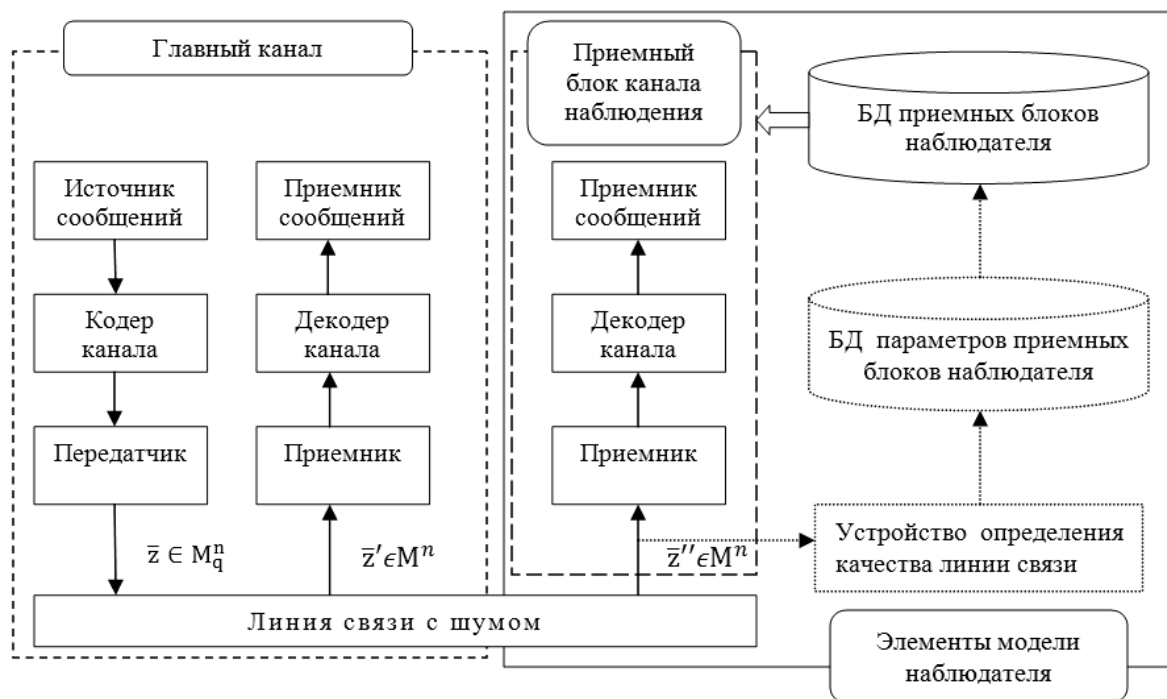


Рис. 3. Структурная схема ИАС КН (БД – база данных) / Fig. 3. Block diagram of IAS MC (DB - database)

Например, предположим, что в ИАС КН используются двоичные коды Рида – Маллера второго порядка, а в главном канале связи применяется детерминированный мажоритарный декодер. Наблюдатель может использовать в отводном канале

различные декодеры, например мажоритарный и вероятностный [4, 14]. Последний может работать в двух режимах: с жестким и мягким входом. Некоторые результаты имитационных экспериментов над декодерами приведены в таблице.

Вероятности появления ошибочных бит для различных декодеров двоичных кодов Рида – Маллера / The probabilities of occurrence of erroneous bits to the various decoders of Reed-Muller binary codes

Двоичный код Рида – Маллера с параметрами	Отношение сигнал–шум, дБ	Вероятность появления ошибочного бита после применения декодера		
		детерминированного мажоритарного	вероятностного	
			с жестким входом	с мягким входом
[64,22,16] ₂	1	0,6	0,13	0,01
	3	0,114	0,017	0,0001
	4	0,025	0,000	0,000
[16,11,4] ₂	3	0,38	0,331	0,153
	4	0,229	0,222	0,062

Из таблицы видно, что при фиксированных параметрах канала связи, при использовании вероятностного декодера с мягким и жестким входом, удастся понизить остаточную вероятность ошибки по сравнению с детерминированным декодером.

Подчеркнем, что в случае мягкого входа остаточная вероятность ошибки понижается в десятки раз.

Аналогичный результат наблюдается и в случае применения в ИАС КН троичных кодов Рида – Маллера второго порядка. В работе [15] представ-

лены результаты тестирования вероятностного декодера [11] этих кодов. Этот декодер может работать в мягком и жестком режимах в зависимости от типа данных, поступающих на его вход. Рассмотрим результаты исследования [81, 15, 27]-кода $RM_3(2,4)$. Вероятность 0,9999 верного декодирования при использовании дискретных входных данных достигается при вероятности ошибки в канале 0,18, а при использовании мягкого входа декодера это же значение вероятности остаточной ошибки достигается при вероятности ошибки в канале, равной 0,37.

Из приведенных примеров видно, что наблюдатель с помощью выбора декодера может значительно влиять на качество отводного канала.

Модель наблюдателя

Построим словесную модель нелегитимного наблюдателя. Потенциально наблюдатель может сформировать базу приемных блоков, которые могут отличаться друг от друга, например, типом сигналов на выходе приемника (цифровой, непрерывный) и типом помехоустойчивого декодера. Наблюдатель может использовать тот или иной приемный блок в зависимости от текущих условий связи, необходимой скорости работы декодера и иных причин. Для оперативного выбора приемного блока наблюдателю целесообразно заранее провести исследование таких характеристик доступных ему приемных блоков, как корректирующая способность декодеров в условиях различной помеховой обстановки, скорость работы, требования к техническим характеристикам используемой наблюдателем аппаратуры. Из полученных результатов наблюдатель может сформировать базу данных параметров используемых приемных блоков. Этой базой удобно пользоваться, если наблюдатель имеет возможность оперативно оценивать качество линии связи. На рис. 3 блоки, соответствующие базе данных параметров приемных блоков наблюдателя и устройству определения качества линии связи, изображены прерывистыми линиями, так как могут отсутствовать в модели наблюдателя. В связи с тем, что скорость работы декодеров специального вида обычно не позволяет наблюдателю декодировать данные в режиме реального времени, ему может понадобиться устройство для записи данных, полученных из линии связи.

Отметим, что формирование отводного канала наблюдателем выполняется с целью нарушения только конфиденциальности данных легальных пользователей, так как такой канал не предполагает обратной связи, необходимой для нарушения, например, целостности данных наблюдателем. В ста-

тье не рассматривается вопрос о наличии или отсутствии криптографической защиты данных, используемой в главном канале. На практике известны каналы связи, в которых хотя и не используется криптографическая защита, но данные передаются конфиденциальные [1]. Такие ситуации возможны, например, если предполагается, что за пределами контролируемой зоны уровень шума не позволяет восстановить данные.

Заключение

В работе построена общая модель ИАС КН, которая может быть полезна в задачах разработки способов защиты от злоумышленников, организующих нелегитимные каналы перехвата данных. Показано, что сторонний наблюдатель может влиять на качество получаемых им данных, используя специальные виды декодеров, исправляющие ошибки за пределом половины кодового расстояния.

Литература

1. Косолапов Ю.В. Метод кодового зашумления в задачах защиты информации. Ростов н/Д., 2014. 164 с.
2. Деундяк В.М., Маевский А.Э., Могилевская Н.С. Методы помехоустойчивой защиты данных. Ростов н/Д., 2014. 309 с.
3. Сидельников В.М. Теория кодирования. М., 2008. 324 с.
4. Сидельников В.М., Першаков А.С. Декодирование кодов Рида – Маллера при большом числе ошибок // Проблемы передачи информации. 1992. Т. 28, № 3. С. 80–94.
5. Деундяк В.М., Могилевская Н.С. О некоторых экспериментальных исследованиях помехоустойчивых кодеров с помощью имитационной модели канала // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Техн. науки. 2003. № 4. С. 7.
6. Деундяк В.М., Могилевская Н.С. Методы оценки применимости помехоустойчивого кодирования в каналах связи. Ростов н/Д., 2007. 86 с.
7. Ashikhmin A., Litsyn S. Simple MAP decoding of first-order Reed-Muller and Hamming codes // IEEE Transactions on Information Theory. 2004. Vol. 50, № 8. P. 1812–1818.
8. Муттер В.М. Основы помехоустойчивой телепередачи информации. Л., 1990. 288 с.
9. Dumer I. Soft-decision decoding of Reed-Muller codes: A simplified algorithm // IEEE Transactions on Information Theory. 2006. Vol. 52, № 3. P. 954–963.
10. Solte N., Sorger U. Soft-decision stack decoding of binary Reed-Muller codes with «Look-ahead» technique // 7th International Workshop on Algebraic and Combinatorial Coding Theory. June 18–24, 2000. Bansko, Bulgaria, 2000. P. 293–298.

11. Деундяк В.М., Могилевская Н.С. Модель троичного канала передачи данных с использованием декодера мягких решений кодов Рида – Маллера второго порядка // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Техн. науки. 2015. № 1. С. 3–10.

12. Koetter R., Vardy A. Algebraic soft-decision decoding of Reed-Solomon codes // *IEEE Transactions on Information Theory*. 2003. Vol. 49, № 11. P. 2809–2825.

13. Guruswami V. *List Decoding of Error-Correcting Codes*. Berlin, 2004. 350 S.

14. Могилевская Н.С., Скоробогат В.Р., Чудаков В.С. Экспериментальное исследование декодеров кодов Рида – Маллера второго порядка // Вестн. Донского гос. техн. ун-та. 2008. Т. 8, № 3. С. 231–237.

15. Могилевская Н. С. Корректирующая способность декодера мягких решений троичных кодов Рида – Маллера второго порядка при большом числе ошибок // Вестн. Донского гос. техн. ун-та. 2015. Т. 15, № 1. С. 121–130.

References

1. Kosolapov Yu.V. *Metod kodovogo zashumleniya v zadachakh zashchity informatsii* [Method of code noise in data protection problems]. Rostov-on-Don, 2014, 164 p.

2. Deundyak V.M., Maevskii A.E., Mogilevskaya N.S. *Metody pomekhoustoichivoi zashchity dannykh* [Methods of anti-jamming data protection]. Rostov-on-Don, 2014, 309 p.

3. Sidel'nikov V.M. *Teoriya kodirovaniya* [Theory of coding]. Moscow, 2008, 324 p.

4. Sidel'nikov V.M., Pershakov A.S. Dekodirovanie kodov Rida - Mallera pri bol'shom chisle oshibok [Decoding of Reed-Muller codes with a large number of errors]. *Problemy peredachi informatsii*. 1992, vol. 28, No. 3, pp. 80-94.

5. Deundyak V.M., Mogilevskaya N.S. O nekotorykh eksperimental'nykh issledovaniyakh pomekhoustoichivyykh kodekov s pomoshch'yu imitatsionnoi modeli kanala [On some experimental investigations of noise-failure codecs using the simulation channel model]. *Izv. vuzov. Sev.-Kavk. region. Tekhn. nauki*. 2003, No. 4, p. 7.

6. Deundyak V.M., Mogilevskaya N.S. *Metody otsenki primenimosti pomekhoustoichivogo kodirovaniya*

v kanalakh svyazi [Methods for assessing the applicability of noise-immune coding in communication channels]. Rostov-on-Don, 2007, 86 p.

7. Ashikhmin A., Litsyn S. Simple MAP decoding of first-order Reed-Muller and Hamming codes. *IEEE Transactions on Information Theory*. 2004, vol. 50, No. 8, pp. 1812-1818.

8. Mutter V.M. *Osnovy pomekhoustoichivoi teleperedachi informatsii* [Fundamentals of noise-immune telecasting of information]. Leningrad, 1990, 288 p.

9. Dumer I. Soft-decision decoding of Reed-Muller codes: A simplified algorithm. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2006, vol. 52, No. 3, pp. 954-963.

10. Solte N., Sorger U. Soft-decision stack decoding of binary Reed-Muller codes with “Look-ahead” technique. *7th International Workshop on Algebraic and Combinatorial Coding Theory*. June 18-24. Bansko, Bulgaria, 2000, pp. 293-298.

11. Deundyak V.M., Mogilevskaya N.S. Model' troichnogo kanala peredachi dannykh s ispol'zovaniem dekodera myagkikh reshenii kodov Rida - Mallera vtorogo poryadka [Model of a ternary data transmission channel using a soft decision decoder of second-order Reed-Muller codes]. *Izv. vuzov. Sev.-Kavk. region. Tekhn. nauki*. 2015, No. 1, pp. 3-10.

12. Koetter R., Vardy A. Algebraic soft-decision decoding of Reed-Solomon codes. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2003, vol. 49(11), pp. 2809-2825.

13. Guruswami V. *List Decoding of Error-Correcting Codes*. Berlin, 2004, 350 S.

14. Mogilevskaya N.S., Skorobogat V.R., Chudakov V.S. Eksperimental'noe issledovanie dekodеров kodov Rida - Mallera vtorogo poryadka [Experimental investigation of decoders of Reed-Muller codes of the second order]. *Vestn. Donskogo gos. tekhn. un-ta*. 2008, vol. 8, No. 3, pp. 231-237.

15. Mogilevskaya N.S. Korrektiruyushchaya sposobnost' dekodera myagkikh reshenii troichnykh kodov Rida - Mallera vtorogo poryadka pri bol'shom chisle oshibok [The corrective power of the decoder for soft solutions of the ternary Reed-Muller codes of the second order with a large number of errors]. *Vestn. Donskogo gos. tekhn. un-ta*. 2015, vol. 15, No. 1, pp. 121-130.

УДК 519.1

DOI 10.18522/0321-3005-2017-1-25-30

2- И 3-ПУТИ НА ГРАФЕ-РЕШЕТКЕ И КОМБИНАТОРНЫЕ ТОЖДЕСТВА

© 2017 г. Я.М. Ерусалимский

2- AND 3-WAY ON A GRAPH-LATTICE AND COMBINATORIAL IDENTITIES

Ya.M. Erusalimskiy

Ерусалимский Яков Михайлович – Южный федеральный университет, Институт математики, механики и компьютерных наук им. И.И. Воровича, доктор технических наук, кандидат физико-математических наук, профессор, кафедра алгебры и дискретной математики, ул. Мильчакова, 8а, г. Ростов н/Д, 344090, Россия, e-mail: ymerusalimskiy@sfnu.ru

Yakov M. Erusalimskiy – Southern Federal University, Vorovich Institute of Mathematics, Mechanics and Computer Science, Doctor of Technical Science, Candidate of Physics and Mathematics, Professor, Department of Algebra and Discrete Mathematics, Milchakova St., 8a, Rostov-on-Don, 344090, Russia, e-mail: ymerusalimskiy@sfnu.ru

Граф-решетка имеет вершины в точках плоскости с неотрицательными целыми координатами. Из каждой вершины выходят две ориентированные дуги: горизонтальная и вертикальная в соседние вершины (правую и верхнюю). Вероятность перехода по каждой из дуг равна $1/2$. Рассмотрены задачи о случайных блужданиях по вершинам графа с ограничениями на достижимость. Допустимыми на графе-решетке считаются только 2- и 3-пути. Под 2(3)-путем на графе решетке будем понимать путь, удовлетворяющий условию: его начальный и все внутренние максимальные по вложению подпути, состоящие только из вертикальных дуг, имеют длину, кратную 2 (3). Получена формула для количества таких путей, соединяющих заданные вершины графа-решетки, найдена вероятность попадания из одной вершины в другую по 2- и 3-путям. Следствием последнего является комбинаторное тождество, использующее элементы треугольника Паскаля.

Ключевые слова: ориентированный граф, граф-решетка, случайные блуждания, вероятность перехода, достижимость вершин, треугольник Паскаля, комбинаторное тождество.

Graph-lattice has vertices at the points of a plane with a non-negative integer coordinates. Each vertex has two oriented arcs: horizontal and vertical arcs to the neighboring vertices (right and top). The transition probability for each of the arc is equal to $1/2$. We considered the problem of random walks on the vertices of the graph with restrictions on the achievability. Valid for consideration are only 2(3)-paths. Under the 2(3)-path on the graph-lattice we mean a path of satisfying the next condition - maximum by embedding beginning sub-path consisting only of vertical arcs and all maximum by embedding internal sub-paths consisting only of vertical arcs have a length multiple of 2 (3). We obtain a formula for the number of paths connecting specified vertices of the graph-lattice, found the probability of getting from one vertex to another via 2(3)-paths. The consequence of the latter is the combinatorial identity, which contained elements of Pascal's triangle.

Keywords: directed graph, graph-lattice, random walk, transition probability, the attainability of the vertices, Pascal's triangle, combinatorial identity.

Граф-решётка и 2-пути на нём

Рассматривается бесконечный ориентированный граф, который будем называть графом-решёткой. Множество вершин этого графа – $Z_+ \times Z_+$ (здесь Z_+ – множество неотрицательных целых чисел). Из каждой вершины $(p; q)$ выходят две дуги: одна (горизонтальная) – в вершину $(p+1; q)$, другая (вертикальная) – $(p; q+1)$. Будем считать, что длины всех дуг графа-решетки равны единице.

Ясно, что:

1. Граф-решётка не содержит контуров.
2. Все пути на этом графе простые.

3. Из вершины $x = (p; q)$ существует путь в вершину $y = (s; t)$ тогда и только тогда, когда $(p \leq s) \& (q \leq t)$, при этом длины всех путей равны $(s-p) + (t-q)$. Все эти пути находятся на графе-решётке в прямоугольнике с нижней левой вершиной x и правой верхней вершиной y и сторонами, параллельными координатным осям.

Задача о попадании из вершины $x = (p; q)$ в вершину $y = (s; t)$ равносильна задаче о попадании из вершины $\bar{O} = (0; 0)$ в вершину $(s-p; t-q)$.

На этом графе будем рассматривать 2-пути (определения дадим ниже) и ограниченную достижимость по 2-путям. Ограничение на достижимость

означает, что допустимыми являются не все возможные пути, а только удовлетворяющие поставленному ограничению [1].

Рассмотрим задачу о количестве 2-путей, ведущих из вершины $\bar{O} = (0;0)$ в вершину $\bar{A} = (n-m; m)$. Все пути, ведущие из вершины \bar{O} в вершину \bar{A} , имеют длину, равную n , и располагаются в прямоугольнике, имеющем стороны, параллельные координатным осям, а противоположные вершины прямоугольника находятся в точках $\bar{O} = (0;0)$ и $\bar{A} = (n-m; m)$. Путь представляет собой ломанную, состоящую из $n-m$ горизонтальных и m вертикальных дуг.

Каждый путь будем кодировать n -разрядным двоичным числом, содержащим m единиц и $n-m$ нулей. Единица, стоящая на i -м месте (нумерация мест слева направо), означает, что на i -м шаге путь проходит по вертикальной дуге, а ноль, стоящий на i -м месте, – по горизонтальной дуге.

Что означает утверждение, что путь удовлетворяет поставленному ограничению? Для этого дадим некоторые определения.

Определение 1. Начальным 1-фрагментом пути длины k будем называть его начальный отрезок, состоящий из k следующих подряд вертикальных дуг, такой что его кодировка имеет вид $(1\dots 10)$ (здесь за многоточием «спрятаны» единицы, «пробельная» зона заполнена произвольным набором нулей и единиц).

Определение 2. Внутренним 1-фрагментом пути длины k будем называть отрезок пути, состоящий из k следующих подряд вертикальных дуг, такой что его кодировка имеет вид $(01\dots 10)$.

Определение 3. Заключительным 1-фрагментом пути длины k будем называть его конечный отрезок, состоящий из k следующих подряд вертикальных дуг, такой что его кодировка имеет вид $(01\dots 1)$.

Определение 4. Путь на графе будем называть 2-путем, если его начальный и все внутренние 1-фрагменты имеют четную длину.

Пример 1. Кодировка (0110001111011) соответствует пути из вершины \bar{O} в вершину $(5;9)$. Этот путь является 2-путем, поскольку 1-начальный отрезок имеет длину 0, первый внутренний 1-фрагмент – 2, второй – 4, конечный – 3; (0110001111011) является кодировкой пути, ведущего из вершины \bar{O} в вершину $(5;9)$. Этот путь не является 2-путем, поскольку в кодировке начальный 1-фрагмент имеет длину, равную 0, пер-

вый внутренний 1-фрагмент – 2, второй – 5, конечный – 2. Именно нечетная длина второго внутреннего 1-фрагмента не позволяет этот путь считать 2-путем.

Решим задачу о количестве 2-путей, ведущих из вершины $\bar{O} = (0;0)$ в вершину $\bar{A} = (n-m; m)$. Рассмотрим два случая: $m = 2k$ и $m = 2k + 1$.

В первом случае в кодировке пути все его 1-фрагменты имеют четную длину. Преобразуем его двоичную кодировку следующим образом: каждые две рядом стоящие единицы (двигаясь по кодировке слева направо) заменим на одну единицу (например, кодировка (11001111011) заменится на (1001101)). Ясно, что такой переход является взаимно однозначным. В результате получим $(n-k)$ -разрядное двоичное число, содержащее k единиц. Количество таких чисел равно C_{n-k}^k . Таким образом, количество 2-путей, ведущих из вершины $\bar{O} = (0;0)$ в вершину $\bar{A} = (n-m; m)$, при $m = 2k$ равно C_{n-k}^k .

Во втором случае ($m = 2k + 1$) любой 2-путь обязательно имеет конечный 1-фрагмент нечетной длины. Это означает, что в кодировке любого 2-пути на последнем месте стоит единица, а остальные единицы образуют отрезки из четных количеств рядом стоящих единиц, разделенных отрезками из нулей. Преобразуем кодировку любого такого пути, заменяя слева направо каждые две соседние единицы одной единицей (не трогая последнюю). Например, кодировка (11001111011) преобразуется в (10011011) . Ясно, что такой переход является взаимно однозначным. В результате получим $(n-k)$ -разрядное двоичное число, содержащее $k+1$ единицу, в каждом из этих чисел на последнем месте стоит единица. Количество таких чисел равно C_{n-k-1}^k . Таким образом, количество 2-путей, ведущих из вершины $\bar{O} = (0;0)$ в вершину $\bar{A} = (n-m; m)$, при $m = 2k + 1$ равно C_{n-k-1}^k .

Случайные блуждания по 2-путям

Будем считать, что на дугах графа-решётки заданы вероятности перехода, равные на каждой из них $1/2$. Рассмотрим дискретный процесс случайного блуждания по вершинам графа-решётки частицы, находящейся в начальный момент в вершине $\bar{O} = (0;0)$. Считаем, что за один такт (временной отсчет) частица, находящаяся в вершине $(s;t)$, переходит по одной из имеющихся дуг в вершину

$(s+1;t)$ или $(s;t+1)$. При этом переходы равновероятны, если пройденный до этого 2-путь не накладывает ограничений на продвижение. В противном случае переход совершается только по вертикальной дуге. Рассматриваемый процесс в этом случае не является марковским [1, 2]. Ясно, что через n шагов частица окажется в одной из вершин вида $(n-m; m)$, $0 \leq m \leq n$. Эти вершины располагаются на гипотенузе равнобедренного треугольника с вершинами в точках $(0;0)$, $(n;0)$, $(0;n)$. Найдем вероятность $p_n(\bar{O};(n-m;m))$ попадания за n шагов из вершины \bar{O} в вершину $(n-m;m)$.

В случае, когда m чётно, т.е. $m=2k$, прохождение по каждой второй вертикальной дуге (слева направо, если смотреть на кодировку пути) является обязательным, поэтому

$$p_n(\bar{O};(n-m;m)) = \frac{C_{n-k}^k}{2^{n-k}}, \quad m=2k. \quad (1)$$

В случае, когда m нечётно, т.е. когда $m=2k+1$, прохождение по каждой второй вертикальной дуге (слева направо, если смотреть на кодировку пути) является обязательным, поэтому

$$p_n(\bar{O};(n-m;m)) = \frac{C_{n-k-1}^k}{2^{n-k}}, \quad m=2k+1. \quad (2)$$

Ясно, что попадания в такие точки являются независимыми событиями, и по формуле полной вероятности [3] получаем

$$\sum_{m=0}^{m=n} p_n(\bar{O},(n-m;m)) = 1. \quad (3)$$

Подставляя в (3) выражения для $p_n(\bar{O};(n-m;m))$ из (1) и (2), будем иметь

$$\begin{aligned} & (C_{2k}^0 + C_{2k-1}^0) \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^{2k} + (C_{2k-1}^1 + C_{2k-2}^1) \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^{2k-1} + \dots \\ & + (C_{k+1}^{k-1} + C_k^{k-1}) \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^{k+1} + C_k^k \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^k = 1, \quad n=2\hat{e}, \quad (4) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & (C_{2k+1}^0 + C_{2k}^0) \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^{2k+1} + (C_{2k}^1 + C_{2k-1}^1) \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^{2k} + \dots \\ & + (C_{k+1}^k + C_k^k) \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^k = 1, \quad n=2\hat{e}+1. \quad (4') \end{aligned}$$

Приводя (4) и (4') к целому виду, получим

$$\begin{aligned} & (C_{2k}^0 + C_{2k-1}^0) \cdot (2) + (C_{2k-1}^1 + C_{2k-2}^1) \cdot (2) + \dots \\ & + (C_{k+1}^{k-1} + C_k^{k-1}) \cdot (2)^{k-1} + C_k^k \cdot (2)^k = (2)^k, \quad (5) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & (C_{2k+1}^0 + C_{2k}^0) + (C_{2k}^1 + C_{2k-1}^1) \cdot (2) + \dots + \\ & + (C_{k+1}^k + C_k^k) \cdot (2)^k = (2)^{2k+1}. \quad (5') \end{aligned}$$

Посмотрим, как работают последние формулы для $n=6$ и $n=7$. Воспользуемся треугольником Паскаля, в котором выделены пары биномиальных коэффициентов, которые суммируются в скобках левой части формулы (5') для $n=7$ (рис. 1).

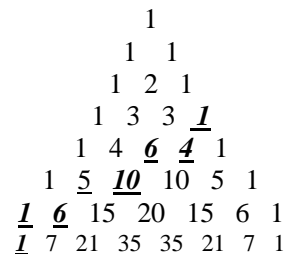


Рис. 1. Восемь слоев треугольника Паскаля /
 Fig. 1. Eight layers of Pascal's triangle

$$\begin{aligned} & (1+1) + (5+4) \cdot 2 + (6+3) \cdot 4 + 1 \cdot 8 = \\ & = 2 + 18 + 36 + 8 = 64 = 2^6. \\ & (1+1) + (6+5) \cdot 2 + (10+6) \cdot 4 + (4+1) \cdot 8 = \\ & = 2 + 22 + 64 + 40 = 128 = 2^7. \end{aligned}$$

В [2, 4] аналогичная задача рассмотрена для графа-решётки без ограничений на достижимость и для других ограничений на достижимость.

Замечание. Учитывая, что $\sum_{i=0}^n \tilde{N}_n^i = 2^n$, и тождество

Паскаля $\tilde{N}_{m+1}^{k+1} = C_m^k + C_m^{k+1}$, (5) и (5') можно было бы доказать (?) и путем громоздких преобразований, использующих метод математической индукции.

Понятно, что можно рассматривать и задачу о случайных блужданиях по 2-путям, когда вероятности перехода по горизонтальным и вертикальным дугам не равны между собой. Можно получить и в этом случае тождества, являющиеся аналогами тождеств (5) и (5').

Общая схема рассмотрения процесса случайного блуждания на графах с ограничениями на достижимость рассмотрена в [1]. Она состоит в построении развертки графа и переносе процесса на развертку. В результате удается немарковский процесс на исходном графе заменить марковским на развертке. Однако развертка графа по размеру больше исходного графа. В нашем случае мы обошлись без такого переноса процесса на развертку. Это удалось сделать благодаря регулярной структуре графа-решётки.

Граф-решётка и 3-пути на нём

Определение 4. Путь на графе-решётке будем называть 3-путем, если длины его начального

1-фрагмента и всех его внутренних 1-фрагментов кратны 3.

Пример 2. Кодировка (0111000111111011) соответствует пути из вершины \bar{O} в вершину (5;11). Этот путь является 3-путем, поскольку начальный 1-фрагмент имеет длину, равную 0, первый внутренний 1-фрагмент – 3, второй – 6, конечный – 2. Кодировка (0110001111110111) является кодировкой пути, ведущего из вершины \bar{O} в вершину (5;9). Этот путь не является 3-путем, поскольку в его кодировке начальный 1-фрагмент имеет длину, равную 0, первый внутренний – 2, второй – 6, конечный – 3. Именно длина первого внутреннего 1-фрагмента не позволяет этот путь считать 3-путем.

Решим задачу о количестве 3-путей, ведущих из вершины $\bar{O} = (0;0)$ в вершину $\bar{A} = (n-m;m)$. Рассмотрим два случая, когда m кратно 3, т.е. $m = 3k$, и когда m не кратно 3, т.е. $m = 3k + 1$ или $m = 3k + 2$.

В первом случае в кодировке пути все его 1-фрагменты имеют длину, кратную 3. Преобразуем его двоичную кодировку следующим образом: каждые три рядом стоящие единицы (двигаясь по кодировке слева направо) заменим на одну единицу (например, кодировка (11100111110111) заменится на (1001101)). Ясно, что такой переход является взаимно однозначным. В результате получим $(n-2k)$ -разрядное двоичное число, содержащее k единиц. Количество таких чисел равно C_{n-2k}^k . Таким образом, количество 3-путей, ведущих из вершины $\bar{O} = (0;0)$ в вершину $\bar{A} = (n-m;m)$, при $m = 3k$ равно C_{n-2k}^k .

Во втором случае любой 3-путь обязательно имеет конечный 1-фрагмент, длина которого не кратна 3. Преобразуем кодировку любого такого пути, заменяя слева направо каждые три соседние единицы одной. В случае $m = 3k + 1$ получим $(m-2k)$ -разрядное двоичное число, в котором на последнем месте стоит единица. Например, кодировка (11100111110111) преобразуется в (1001101). Ясно, что такой переход является взаимно однозначным. В результате получим $(n-2k)$ -разрядное двоичное число, содержащее $k+1$ единицу; в каждом из этих чисел на последнем месте стоит единица. Количество таких чисел равно C_{n-2k-1}^k . Таким образом, в этом случае количество 3-путей, ведущих из вершины $\bar{O} = (0;0)$ в вершину $\bar{A} = (n-m;m)$, равно C_{n-2k-1}^k . Аналогично в случае

$m = 3k + 2$ получим, что количество 3-путей равно C_{n-2k-2}^k .

Случайные блуждания по 3-путям

Будем считать, что на дугах графа-решётки заданы вероятности перехода, равные $1/2$. Рассмотрим дискретный процесс случайного блуждания по вершинам графа-решётки частицы, находящейся в начальный момент в вершине $\bar{O} = (0;0)$, считая, что допустимыми являются только 3-пути. За один такт (временной отсчет) частица, находящаяся в вершине $(s;t)$, переходит по одной из имеющихся дуг в вершину $(s+1;t)$ или $(s;t+1)$. При этом переходы равновероятны, если пройденный до этого 3-путь не накладывает ограничений на продвижение. В противном случае переход совершается только по вертикальной дуге. Рассматриваемый процесс в этом случае не является марковским [1, 2]. Ясно, что через n шагов частица окажется в одной из вершин вида $(n-m;m)$, $0 \leq m \leq n$. Эти вершины располагаются на гипотенузе равнобедренного треугольника с вершинами в точках $(0;0)$, $(n;0)$, $(0;n)$. Найдем вероятность $p_n(\bar{O};(n-m;m))$ попадания за n шагов из вершины \bar{O} в вершину $(n-m;m)$ по 3-путям.

В случае $m = 3k$ прохождение по каждой второй и третьей вертикальной дуге (слева направо, если смотреть на кодировку пути) является обязательным, поэтому

$$p_n(\bar{O};(n-m;m)) = \frac{C_{n-2k}^k}{2^{n-2k}}, \text{ где } m = 3k. \quad (6)$$

При $m = 3k + 1$

$$p_n(\bar{O};(n-m;m)) = \frac{C_{n-2k-1}^k}{2^{n-2k}}. \quad (7)$$

Если $m = 3k + 2$, то

$$p_n(\bar{O};(n-m;m)) = \frac{C_{n-2k-2}^k}{2^{n-2k-1}}. \quad (7')$$

Ясно, что попадания в такие точки являются независимыми событиями, и по формуле полной вероятности [3], получаем

$$\sum_{m=0}^{m=n} p_n(\bar{O};(n-m;m)) = 1. \quad (8)$$

Подставляя в (8) выражения для $p_n(\bar{O};(n-m;m))$ из (6) и (7), (7') и приводя к целому виду, получим комбинаторное тождество, которое в правой части содержит 2^n . Выпишем полученные тождества ($n = 6, 7, 8$):

$$\begin{aligned} & (C_6^0 + c_5^0) + C_4^0 \cdot 2 + (\tilde{N}_4^1 + \tilde{N}_3^1) \cdot 2^2 + \tilde{N}_2^1 \cdot 2^3 + \tilde{N}_2^2 \cdot 2^4 = \\ & = 2 + 2 + 7 \cdot 4 + 2 \cdot 8 + 1 \cdot 16 = 64 = 2^6, \quad n = 6, \\ & (C_7^0 + c_6^0) + C_5^0 \cdot 2 + (\tilde{N}_5^1 + \tilde{N}_4^1) \cdot 2^2 + \tilde{N}_3^1 \cdot 2^3 + \\ & + (\tilde{N}_3^2 + C_2^2) \cdot 2^4 = \\ & = 2 + 2 + 9 \cdot 4 + 3 \cdot 8 + 4 \cdot 16 = 128 = 2^7, \quad n = 7, \\ & (C_8^0 + c_7^0) + C_6^0 \cdot 2 + (\tilde{N}_6^1 + \tilde{N}_5^1) \cdot 2^2 + \tilde{N}_4^1 \cdot 2^3 + \end{aligned}$$

$$+ (\tilde{N}_4^2 + C_3^2) \cdot 2^4 + C_2^2 \cdot 2^5 =$$

$$= 2 + 2 + 11 \cdot 4 + 4 \cdot 8 + 9 \cdot 16 + 1 \cdot 32 = 256 = 2^8, \quad n = 8.$$

На рис. 2 отмечены элементы треугольника Паскаля, которые нужно выбирать в формулу для $n = 9$ (снизу вверх):

$$(1+1) + 1 \cdot 2 + (7+6) \cdot 4 + 5 \cdot 8 + (10+6) \cdot 16 + 3 \cdot 32 + 1 \cdot 64 = 512 = 2^9.$$

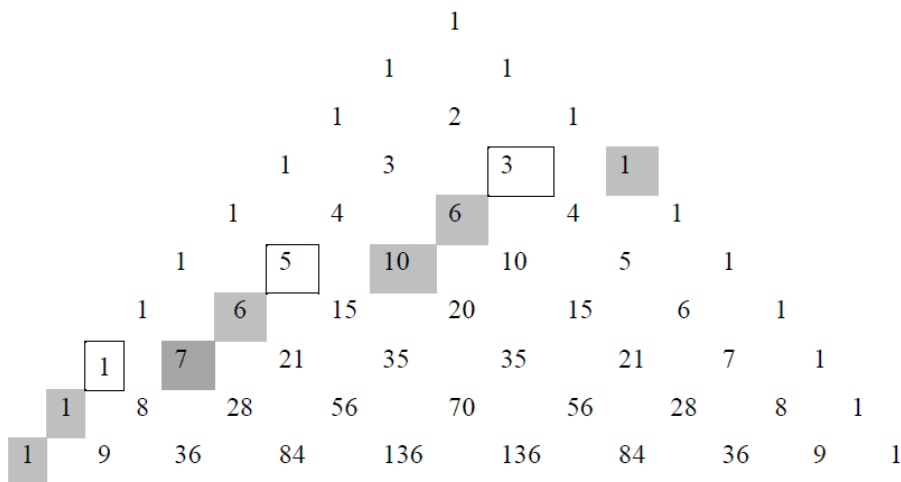


Рис. 2. Треугольник Паскаля / Fig. 2. The Pascal's triangle

Заключение

Ориентированные графы, сети и процессы на них в настоящее время широко используются в качестве математических моделей в различных науках и технике: физике, радиотехнике, телекоммуникациях, экономике, социологии, логистике и др. [2, 4–12]. В этой работе мы показали, как рассмотрение конкретной задачи о случайных блужданиях по вершинам графа-решётки позволяет получать комбинаторные тождества. Тем самым представлен пример использования графов в качестве рабочего инструмента чистой математики.

Литература

1. Ерусалимский Я.М., Скороходов В.А., Кузьмина М.В., Петросян А.Г. Графы с нестандартной достижимостью. Задачи, приложения. Ростов н/Д., 2009. 195 с.
2. Ерусалимский Я.М. Случайные блуждания по графу-решётке и комбинаторные тождества // Инженерный вестн. Дона. 2015. № 2, ч. 2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2p2y2015/2964 (дата обращения: 11.03.2016).

3. Владимирский Б.М., Горстко А.Б., Ерусалимский Я.М. Математика. Общий курс : учебник. 4-е изд., стер. СПб., 2008. 960 с.
4. Ерусалимский Я.М. Случайные блуждания по графу-решётке. Немарковский случай // Фундаментальные исследования. 2015. № 2. С. 6013–6017.
5. Ерусалимский Я.М., Скороходов В.А. Общий подход к нестандартной достижимости на ориентированных графах // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. Спец. выпуск «Псевдодифференциальные уравнения и некоторые проблемы математической физики». 2005. С. 64–67.
6. Ерусалимский Я.М., Петросян А.Г. Случайные процессы в сетях с биполярной магнитностью // Изв. вузов. Сев. Кавк. регион. Естеств. науки. 2005. Приложение. № 11. С. 10–16.
7. Ерусалимский Я.М. Графы с затуханием на дугах и усилением в вершинах и маршрутизация в информационных сетях // Инженерный вестн. Дона. 2015. № 1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2015/2782 (дата обращения: 11.03.2016).
8. Форд Л.Р., Фалкерсон Д.Р. Поток в сетях. М., 1966. 276 с.
9. Кристофидес Н. Теория графов. Алгоритмический подход. М., 1978. 432 с.

10. Боженюк А.В., Герасименко Е.М. Разработка алгоритма нахождения максимального потока минимальной стоимости в нечеткой динамической транспортной сети // Инженерный вестн. Дона. 2013. № 1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2013/1583 (дата обращения: 07.08.2014).

11. Grady L., Polimeni J. *Discrete Calculus: Applied analysis on Graphs for Computational Science*. N.Y., 2010. 366 p.

12. Жилиякова Л.Ю. Графовые динамические модели и их свойства // Автоматика и телемеханика. 2015. № 8. С. 115–139.

References

1. Erusalimskii Ya.M., Skorokhodov V.A., Kuz'minova M.V., Petrosyan A.G. *Grafy s nestandartnoi dostizhimost'yu. Zadachi, prilozheniya* [Graphs with non-standard attainability. Tasks, applications]. Rostov-on-Don, 2009, 195 p.

2. Erusalimskii Ya.M. Sluchainye bluzhdaniya po grafu-reshetke i kombinatornye tozhdestva [Random walks along a graph-lattice and combinatorial identities]. *Inzhenernyi vestn. Dona*. 2015, No. 2, ch. 2. Available at: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2p2y2015/2964 (accessed 11.03.2016).

3. Vladimirkii B.M., Gorstko A.B., Erusalimskii Ya.M. *Matematika. Obshchii kurs* [Mathematics. General course]. Textbook. 4th ed. Saint Petersburg, 2008, 960 p.

4. Erusalimskii Ya.M. Sluchainye bluzhdaniya po grafu-reshetke. Nemarkovskii sluchai [Random walks along the grid-lattice. Nemarkov case]. *Fundamental'nye issledovaniya*. 2015, No. 2, pp. 6013-6017.

5. Erusalimckii Ya.M., Skorokhodov V.A. Obshchii podkhod k nestandartnoi dostizhimosti na orientirovannykh grafakh [A general approach to nonstandard

attainability on oriented graphs]. *Izv. vuzov. Sev.-Kavk. region. Estestv. nauki*. Special Issue "Pseudo differential equations and some problems of mathematical physics". 2005, pp. 64-67.

6. Erusalimskii Ya.M., Petrosyan A.G. Sluchainye protsessy v setyakh s bipolyarnoi magnitnost'yu [Random processes in networks with bipolar magnetism]. *Izv. vuzov. Sev.-Kavk. region. Estestv. nauki*. 2005, suppl. No. 11, pp. 10-16.

7. Erusalimskii Ya.M. Grafy s zatukhaniem na dugakh i usileniem v vershinakh i marshrutizatsiya v informatsionnykh setyakh [Graphs with fading on arcs and amplification in vertices and routing in information networks]. *Inzhenernyi vestn. Dona*. 2015, No. 1. Available at: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2015/2782 (accessed 11.03.2016).

8. Ford L.R., Falkerson D.R. *Potoki v setyakh* [Streams in networks]. Moscow, 1966, 276 p.

9. Kristofides N. *Teoriya grafov. Algoritmicheskii podkhod* [The theory of graphs. Algorithmic approach]. Moscow, 1978, 432 p.

10. Bozhenyuk A.V., Gerasimenko E.M. Razrabotka algoritma nakhozhdeniya maksimal'nogo potoka minimal'noi stoimosti v nechetkoi dinamicheskoi transportnoi seti [Development of an algorithm for finding the maximum flow of the minimum value in a fuzzy dynamic transport network]. *Inzhenernyi vestn. Dona*. 2013, No. 1. Available at: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2013/1583 (accessed 07.08.2014).

11. Grady L., Polimeni J. *Discrete Calculus: Applied analysis on Graphs for Computational Science*. New York, 2010, 366 p.

12. Zhilyakova L.Yu. Grafovye dinamicheskie modeli i ikh svoistva [Graph dynamic models and their properties]. *Avtomatika i telemekhanika*. 2015, No. 8, pp. 115-139.

УДК 519.8

DOI 10.18522/0321-3005-2017-1-31-35

КОМПРОМИССНЫЕ РЕШЕНИЯ КЛАССИЧЕСКОЙ КООПЕРАТИВНОЙ ИГРЫ

© 2017 г. А.Б. Зинченко

THE COMPROMISE SOLUTIONS OF CLASSICAL COOPERATIVE GAME

A.B. Zinchenko

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

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

Предметом исследования статьи являются одноточечные решения кооперативной игры с трансферабельной полезностью, балансирующие в некотором смысле противоположные принципы распределения прибыли между партнерами. Вначале описаны известные компромиссные решения: консенсус-значение, являющееся средним арифметическим значения Шепли и равномерного распределения дополнительного дохода; τ -значение, уравнивающее верхний и нижний векторы игры; σ -значения, равные средним арифметическим пар крайних точек, одна из которых принадлежит множеству дележей, а другая – множеству двойственных дележей. Для сравнения концепций решения использовался аксиоматический подход. Из неоднозначно определенных наборов характеризующих аксиом были выбраны аксиомы Шепли и близкие к ним. Основным результатом статьи является введение нового решения кооперативной игры с трансферабельной полезностью, являющегося средним арифметическим двух наиболее популярных одноточечных решений: значения Шепли и N -ядра. Доказано, что для некоторых игр новое решение, названное NS -ядром, имеет больше желательных свойств, чем основные одноточечные решения и другие компромиссные решения. Приведен пример игры, в которой NS -ядро не совпадает ни с одним из рассмотренных компромиссных решений и является наиболее предпочтительным исходом относительно стандартного отношения доминирования. Область применения NS -ядра – игры, моделирующие экономические и социально-политические ситуации, в которых значение Шепли не удовлетворяет условию индивидуальной рациональности или не является элементом непустого S -ядра, а N -ядро дает контринтуитивное (парадоксальное, тираническое) распределение общей прибыли.

Ключевые слова: кооперативная игра, значение игры, компромиссное решение, консенсус-значение, τ -значение.

The subject of paper's investigation is the one-point solutions for transferable utility game that balance, in some sense, opposite principles of distribution of profit among the partners. First we describe known compromise solutions: the consensus value being the average of the Shapley value and the equal surplus division solution; the τ -value that balances the upper vector and the lower vector of a game; σ -values that equal the average of pairs of extreme points, one of which belongs to the imputation set whereas the other belongs to the dual imputation set. Axiomatic approach was used for the comparisons of solution concepts. Among the non-uniquely determined sets of characterizing axioms we chose the Shapley axioms and similar ones. The main result of the paper is an introducing the new solution for cooperative transferable utility game being an average of two most popular one-point solutions: the Shapley value and the nucleolus. It is proved that for some games new solution, called NS -core, possesses more desirable properties than main one-point solutions and other compromise solutions. It is given the example of game in which NS -core does not coincide with the considered one-point solutions and is the most preferred outcome with respect to standard dominance relation. The application domains of the NS -core are the games that model economic, social and political situations where the Shapley value does not satisfy an individual rationality condition or it is not an element of a nonempty core, while the nucleolus gives a contrary-intuitive (paradoxical, tyrannous) sharing the joint profit.

Keywords: cooperative game, game value, compromise solution, consensus value, τ -value.

Классическая кооперативная игра (игра с трансферабельной полезностью) (N, v) , где $N = \{1, \dots, n\}$, $n \geq 2$, $v: 2^N \rightarrow R$, $v(\emptyset) = 0$, предлагает участникам моделируемой ситуации варианты дележа об-

щей прибыли $v(N)$ (или распределения расходов). Элементы множества N называют игроками, или агентами. Значение $v(S)$ характеристической функции v называют весом коалиции $S \subseteq N$.

Множество всех функций v , определенных на 2^N , обозначается через G^N . Без ограничения общности будем рассматривать проблему дележа прибыли, а также использовать следующие сокращения и обозначения: $v(i)$, $S \setminus i$ вместо $v(\{i\})$, $S \setminus \{i\}$; $x(S) = \sum_{i \in S} x_i$, где $x \in R^n$, $S \in 2^N \setminus \{\emptyset\}$; $s = |S|$ – мощность множества S .

Игра (N, v) супераддитивна, если $v(S) + v(\emptyset) \leq v(S \cup \emptyset)$ для $S, \emptyset \in 2^N$, $S \cap \emptyset = \emptyset$. Агент $i \in N$ нулевой в (N, v) , если $v(S \cup i) = v(S)$, $S \subseteq N \setminus i$. Агенты $i, j \in N$ симметричны в (N, v) , если $v(S \cup i) = v(S \cup j)$, $S \subseteq N \setminus \{i, j\}$. Агент $i \in N$ более предпочтителен в игре (N, v) , чем агент $j \in N$ (обозначается $i \succ_v j$), если $v(S \cup i) \geq v(S \cup j)$ для всех $S \subseteq N \setminus \{i, j\}$ и по крайней мере одно из неравенств строгое.

Для игры (N, v) предложено много концепций решения, реализующих разные принципы справедливости. Есть решения-множества и одноточечные, называемые значениями игры. Наиболее популярное решение-множество, C -ядро (core)

$$C(v) = \{x \in I(v) \mid x(S) \geq v(S), S \in \Omega\},$$

является подмножеством множества дележей

$$I(v) = \{x \in R^n \mid x_i \geq v(i), i \in N, x(N) = v(N)\},$$

учитывающим возможности всех собственных коалиций $S \in \Omega = 2^N \setminus \{N, \emptyset\}$. Среди одноточечных решений наиболее известны N -ядро (nucleolus) [1], обозначаемое через $\gamma(v)$, и значение Шепли (Shapley value) [2], обозначаемое через $Sh(v)$.

В данной работе вводится новое одноточечное решение игры (N, v) , балансирующее две в некотором смысле противоположные концепции решения $\gamma(v)$ и $Sh(v)$. Новое решение $NS(v)$, названное NS -ядром, есть среднее арифметическое N -ядра и значения Шепли

$$NS(v) = \frac{\gamma(v) + Sh(v)}{2}.$$

N -ядро определено для игр, у которых $I(v) \neq \emptyset$.

Оно лексикографически минимизирует вектор упорядоченных эксцессов коалиций, т.е.

$$\gamma(v) = \arg \operatorname{lexmin}_{e(x) \in E} e(x),$$

где $E = \{e(x) \mid x \in I(v)\}$, $e(x)$ – вектор эксцессов

$$e(x, S^i) = v(S^i) - x(S^i)$$

коалиций $S^i \in \Omega$ относительно дележа x ,

$$e(x) = (e(x, S^1), e(x, S^2), \dots, e(x, S^m)),$$

$$e(x, S^1) \geq \dots \geq e(x, S^m), m = 2^n - 2.$$

N -ядро является селектором C -ядра сбалансированной игры (N, v) (достоинство) и всегда принадлежит $I(v)$ (достоинство), но не удовлетворяет аксиоме аддитивности (недостаток) и даже ослабленной аксиоме коалиционной монотонности (недостаток). Последнее свойство очень непривлекательно, так как при увеличении прибыли $v(N)$ максимальной коалиции N и сохранении весов остальных коалиций $S \in 2^N \setminus \{N\}$ индивидуальные выигрыши некоторых агентов могут стать меньше.

Согласно значению Шепли, выигрыш каждого игрока $i \in N$ равен его среднему вкладу во все коалиции

$$Sh_i(v) = \sum_{S \subseteq N \setminus i} \frac{s!(n-s-1)!}{n!} (v(S \cup i) - v(S)).$$

Значение Шепли – одно из немногих аддитивных и коалиционно монотонных одноточечных решений игры (N, v) (достоинство). Но оно может не принадлежать не только C -ядру сбалансированной игры, но даже множеству дележей (недостаток).

Известно, что при $n \geq 5$ не существует коалиционно монотонного значения игры (N, v) , которое всегда принадлежит непустому C -ядру. Поэтому представляет интерес поведение NS -ядра на всем множестве G^N и на специальных классах. Пусть $\psi(v)$ – значение игры (N, v) . NS -ядро линейно зависит от значения Шепли и от N -ядра, значит, оно удовлетворяет следующим основным аксиомам, справедливым для $\gamma(v)$ и $Sh(v)$.

1. Эффективность (efficiency, **EFF**):

$$\sum_{i \in N} \psi_i(v) = v(N) \text{ для всех } v \in G^N.$$

2. Симметричность (symmetry, **Sym**): для всех $v \in G^N$, $\psi_i(v) = \psi_j(v)$, если i и j – симметричные игроки.

3. Свойство нулевого игрока (null player property, **NP**): для всех $v \in G^N$, $\psi_i(v) = 0$, если i – нулевой игрок.

4. Ковариантность (covariance, **COV**): $\psi(av + b) = a\psi(v) + b$ для всех $v \in G^N$, $b \in R^n$, $a \in R_{++}$, где $(av + b)(S) = av(S) + b(S)$, $S \in 2^N \setminus \{\emptyset\}$.

NS -ядро не удовлетворяет некоторым аксиомам, не выполняющимся для $\gamma(v)$ и $Sh(v)$ одновременно.

5. Индивидуальная рациональность (individual rationality, **IR**): $\psi_i(v) \geq v(i)$ для всех $i \in N$ и $v \in G^N$.

6. Селектор C -ядра (core selection property, **CS**): $\psi(v) \in \tilde{N}(v)$, если $v \in G^N$ и $\tilde{N}(v) \neq \emptyset$.

7. Аддитивность (additivity, **A**): $\psi(v+w) = \psi(v) + \psi(w)$ для любых $v, w \in G^N$, где $(v+w)(S) = v(S) + w(S)$, $S \in 2^N$.

8. Коалиционная монотонность (coalition monotonicity, **CM**): $\psi_i(v) \leq \psi_i(w)$, $i \in S$, если $v, w \in G^N$, $v(\emptyset) = w(\emptyset)$ для $T \in 2^N \setminus \{S\}$ и $v(S) < w(S)$.

Однако для выпуклых и 1-выпуклых игр NS -ядро удовлетворяет **A** и **CM**. В классе супераддитивных игр NS -ядро удовлетворяет **IR**.

Положительный эксцесс отражает степень неудовлетворенности коалиции S дележом x . N -ядро старается сделать самый большой эксцесс как можно меньшим, следовательно, это решение реализует эгалитаризм для коалиций. Выигрыши ненулевых агентов в N -ядре часто не соответствуют их продуктивности, а согласно значению Шепли выигрыш любого агента определяется только его продуктивностью. Таким образом, новое решение $NS(v)$ является компромиссным. Для игры (N, v) уже предложено несколько решений компромиссного типа.

Консенсус-значение $k(v)$ [3] является средним арифметическим значения Шепли и равномерного распределения дополнительного дохода (equal surplus division solution, **ESD(v)**)

$$k(v) = \frac{Sh(v) + ESD(v)}{2},$$

где $ESD_i(v) = v(i) + \frac{\Delta}{n}$, $i \in N$, $\Delta = v(N) - \sum_{j \in N} v(j)$.

Консенсус-значение балансирует два крайних принципа формирования выигрыша нулевого игрока. Выигрыш нулевого игрока в значении Шепли равен нулю. Согласно **ESD(v)** все игроки, в том числе и нулевой, получают одинаковую долю $\frac{\Delta}{n}$ дополнительного дохода от кооперации (уравниловка). В консенсус-значении нулевой игрок может получить положительный выигрыш, но нет уравниловки. Консенсус-значение удовлетворяет **EFF**, **Sym**, **A**, **COV**, но не удовлетворяет **NP**, **IR** и **CS**.

Существует также решение, названное τ -значением [4],

$$\tau(v) = \alpha \beta + (1 - \alpha)m, \quad \tau(N) = v(N), \quad \alpha \in [0, 1],$$

которое реализует компромисс между верхним вектором $m = (m_i)_{i \in N}$, где $m_i = v(N) - v(N \setminus i)$, и нижним вектором $\beta = (\beta_i)_{i \in N}$, где

$$\beta_i = \max_{S: i \in S} R(S, i), \quad i \in N,$$

$$R(S, i) = \begin{cases} v(i), & |S| = 1, \\ v(S) - \sum_{j \in S \setminus i} m_j, & |S| \geq 2. \end{cases}$$

Это решение определено для компромиссно допустимой игры, т.е. игры, удовлетворяющей условию $\beta \leq m$, $\beta(N) \leq v(N) \leq m(N)$. (1)

Компоненты нижнего вектора – минимально возможные выигрыши агентов в дележах, принадлежащих C -ядру; компоненты верхнего вектора – максимально возможные в C -ядре выигрыши. Решение $\tau(v)$ удовлетворяет **EFF**, **Sym**, **IR**, **NP**, **COV**, но не удовлетворяет **A** и **CS**. В классах 1-выпуклых игр и игр большого босса [5] τ -значение совпадает с N -ядром и является барицентром C -ядра.

Менее известными, чем упомянутые выше, компромиссными значениями игры (N, v) являются (не имеющие специального названия) решения

$$\sigma^r(v) = \frac{f^r(v) + g^r(v)}{2}, \quad (2)$$

где $r \in N$ – фиксированный игрок; $f^r(v)$ – вершина множества дележей,

$$f_i^r(v) = \begin{cases} v(i), & i \neq r, \\ v(N) - \sum_{j \in N \setminus r} v(j), & i = r, \end{cases} \quad (3)$$

$g^r(v)$ – вершина множества двойственных дележей

$$I^*(v) = \{x \in R^n \mid x_i \leq m_i, i \in N\},$$

$$g_i^r(v) = \begin{cases} m_i, & i \neq r, \\ v(N) - \sum_{j \in N \setminus r} m_j, & i = r. \end{cases} \quad (4)$$

Согласно $f^r(v)$ выигрыши всех агентов, кроме r -го, минимально возможные в множестве дележей, а r -й игрок получает остаток распределяемой полезности $v(N)$. Согласно $g^r(v)$ выигрыши всех агентов, кроме r -го, максимально возможные в множестве двойственных дележей; а r -й игрок получает остаток $v(N)$. Подставив (3) и (4) в (2), получаем

$$\sigma_i^r(v) = \begin{cases} \frac{v(i) + m_i}{2}, & i \neq r, \\ v(N) - \frac{\sum_{j \in N \setminus r} (v(j) + m_j)}{2}, & i = r, \end{cases} \quad (5)$$

для всех $r, i \in N$.

Для сравнения дележей используются отношения доминирования. Пусть $x, y \in I(v)$. Тогда $x \succ_S y$, если $x(S) \leq v(S)$ и $x_i > y_i$, $i \in S$. Дележ x доминирует дележ y (обозначается $x \succ y$), если существует такая коалиция $S \in \Omega$, что $x \succ_S y$. В следующем примере приведена игра, для которой $NS(v)$ обладает большим набором желательных свойств, чем основные одноточечные решения

($Sh(\mathbf{v})$, $\gamma(\mathbf{v})$) и решения компромиссного типа ($\mathbf{k}(\mathbf{v})$, $\tau(\mathbf{v})$, $\sigma^r(\mathbf{v})$ для $r \in N$). Пример противоречит существующему мнению о том, что одноточечное S -ядро является наилучшим решением игры (N, ν) .

Пример 1. Дана несупераддитивная, но сбалансированная игра пяти лиц $N = \{1, 2, \dots, 5\}$ с характеристической функцией:

$$\begin{aligned} \nu(1, 2) &= \nu(1, 2, 3) = \nu(1, 2, 4) = \nu(1, 2, 3, 4) = 16, \\ \nu(1, 3) &= \nu(1, 4) = \nu(2, 3) = 8, \\ \nu(1, 3, 5) &= \nu(1, 4, 5) = \nu(2, 3, 5) = 12, \quad \nu(N) = 20, \\ \nu(S) &= 0 \text{ в остальных случаях.} \end{aligned}$$

В игре нет нулевых и симметричных агентов. При любом разбиении множества игроков на собственные коалиции

$$C = \{C_1, \dots, C_p\}, \quad \bigcup_{j=1}^p \tilde{N}_j = N, \quad C_j \in \Omega, \\ C_j \cap C_i = \emptyset, \quad j \neq i,$$

суммарная прибыль $\sum_{C_j \in \tilde{N}} \nu(C_j)$ меньше, чем при

полном объединении. Значение Шепли, N -ядро, консенсус-значение и NS -ядро имеют вид

$$Sh(\mathbf{v}) = (7\frac{6}{15}, 5\frac{11}{15}, 4\frac{11}{15}, 3\frac{1}{15}, -\frac{14}{15}),$$

$$\gamma(\mathbf{v}) = (8, 8, 0, 0, 4),$$

$$\mathbf{k}(\mathbf{v}) = (5\frac{21}{30}, 4\frac{26}{30}, 4\frac{11}{30}, 3\frac{16}{30}, 1\frac{16}{30}),$$

$$NS(\mathbf{v}) = (7\frac{21}{30}, 6\frac{26}{30}, 2\frac{11}{30}, 1\frac{16}{30}, 1\frac{16}{30}).$$

S -ядро игры – одноточечное $\tilde{N}(\mathbf{v}) = \{\gamma(\mathbf{v})\}$. Так как $\beta = (0, 0, 0, 0, 0)$ и $\mathbf{m} = (20, 20, 20, 20, 4)$, то справедливо (1), т.е. игра компромиссно допустима. Значит, $\tau(\mathbf{v}) = (4\frac{16}{21}, 4\frac{16}{21}, 4\frac{16}{21}, 4\frac{16}{21}, \frac{20}{21})$.

Согласно формуле (5), которая для данной игры становится проще

$$\sigma_i^r(\mathbf{v}) = \begin{cases} \frac{m_i}{2}, & r \neq i, \\ 20 - \frac{\sum_{j \in N \setminus r} m_j}{2}, & r = i, \end{cases}$$

получаем $\sigma^1(\mathbf{v}) = (-12, 10, 10, 10, 2)$; $\sigma^2(\mathbf{v}) = (10, -12, 10, 10, 2)$; $\sigma^3(\mathbf{v}) = (10, 10, -12, 10, 2)$; $\sigma^4(\mathbf{v}) = (10, 10, 10, -12, 2)$; $\sigma^5(\mathbf{v}) = (10, 10, 10, 10, -20)$. Значение Шепли не принадлежит $I(\mathbf{v})$. В $Sh(\mathbf{v})$ выигрыш пятого агента отрицательный, несмотря на то что без его участия достижимая прибыль не превышает $16 < \nu(N) = 20$. Векторы $\sigma^r(\mathbf{v})$, $r \in N$, не принадлежат $I(\mathbf{v})$. В $\gamma(\mathbf{v})$ выигрыши третьего и

четвертого агентов – нулевые, хотя без кооперации с ними остальные агенты не могут получить прибыль, превышающую $16 < \nu(N)$. Распределение $\nu(N)$ в $\gamma(\mathbf{v})$ и $\tau(\mathbf{v})$ не согласуется с предпочтительностью агентов. В частности, $1 \succ_{\nu} 2$, но $\gamma_1(\mathbf{v}) = \gamma_2(\mathbf{v})$, $\tau_1(\mathbf{v}) = \tau_2(\mathbf{v})$. Консенсус-значение и NS -ядро не имеют перечисленных недостатков, но $NS(\mathbf{v})$ доминирует $\mathbf{k}(\mathbf{v})$. Максимальный эксцесс

$$\max_{S \in \Omega} e(NS(\mathbf{v}), S) = e(NS(\mathbf{v}), \{1, 2\}) = 1\frac{13}{30}$$

относительно $NS(\mathbf{v})$ меньше, чем максимальные эксцессы

$$\max_{S \in \Omega} e(\mathbf{k}(\mathbf{v}), S) = e(\mathbf{k}(\mathbf{v}), \{1, 2\}) = 5\frac{13}{30},$$

$$\max_{S \in \Omega} e(\tau(\mathbf{v}), S) = e(\tau(\mathbf{v}), \{1, 2\}) = 6\frac{10}{21}$$

относительно $\mathbf{k}(\mathbf{v})$ и $\tau(\mathbf{v})$. Таким образом, в $NS(\mathbf{v})$ минимальные требования коалиций учитываются в большей степени, чем в $\mathbf{k}(\mathbf{v})$ и $\tau(\mathbf{v})$.

Следующий пример противоположен предыдущему. Он показывает, что существуют игры, для которых $\mathbf{k}(\mathbf{v})$ более соответствует интуитивному понятию справедливости, чем $NS(\mathbf{v})$.

Пример 2. Рассмотрим двухсторонний рынок с одним продавцом (игрок 1), двумя покупателями (игроки 2, 3) и одной неделимой единицей товара, стоимость которой равна 1 д.е. Нужно определить, состоится ли сделка и как ее участники распределят прибыль. Получаем игру (N, ν) с характеристической функцией $\nu(i) = 0$, $i \in N = \{1, 2, 3\}$,

$$\nu(1, 2) = \nu(1, 3) = \nu(N) = 1, \quad \nu(2, 3) = 0.$$

Это – игра большого босса с игроком 1 в качестве босса, в которой $\beta = \mathbf{m} = (1, 0, 0)$, $I(\mathbf{v}) = \text{conv}\{(1, 0, 0), (0, 1, 0), (0, 0, 1)\}$, $I^*(\mathbf{v}) = I(\mathbf{v})$, $\sigma^2(\mathbf{v}) = (0, 1, 0)$, $\sigma^3(\mathbf{v}) = (0, 0, 1)$. $\gamma(\mathbf{v}) = \tau(\mathbf{v}) = \sigma^1(\mathbf{v}) = (0, 1, 0)$, $\tilde{N}(\mathbf{v}) = \{\gamma(\mathbf{v})\}$. N -ядро является единственным элементом не только S -ядра, но также переговорного множества и k -ядра. Однако, согласно дележу $(1, 0, 0)$, всю прибыль получает продавец, несмотря на то что без кооперации хотя бы с одним из покупателей сделка невозможна. Значение Шепли $Sh(\mathbf{v}) = (\frac{2}{3}, \frac{1}{6}, \frac{1}{6})$ большую часть прибыли отдает продавцу, а суммарный выигрыш покупателей равен одной третьей стоимости товара. NS -ядро, $NS(\mathbf{v}) = (\frac{5}{6}, \frac{1}{12}, \frac{1}{12})$, увеличивает долю продавца по сравнению с $Sh(\mathbf{v})$. Сила союза покупателей равна силе продавца, а покупатели – симметричные игроки. В данной игре консенсус-

значение $k(v) = (\frac{1}{2}, \frac{1}{4}, \frac{1}{4})$ наиболее согласовано с моделируемой ситуацией (половину стоимости товара получает продавец, а остальная часть $v(N)$ поровну распределяется среди покупателей).

Если для конкретной игры какое-либо решение не принадлежит $I(v)$, то в этой игре его использовать нельзя. Приведем достаточное условие, при котором $Sh(v) \notin I(v)$, а $NS(v) \in I(v)$.

Утверждение 1. Пусть $v \in G^N$ и $Sh(v) \notin I(v)$.

Если 0-форма (N, v^0) игры (N, v) удовлетворяет условию $|Sh_i(v^0)| \leq \gamma_i(v^0)$, $i \in \{j \in N \mid Sh_j(v^0) < 0\}$, то $NS(v) \in I(v)$.

Доказательство. Игры (N, v) и (N, v^0) связаны соотношением $v^0(S) = v(S) - \sum_{i \in S} v(i)$, $S \in 2^N \setminus \{\emptyset\}$, т.е. стратегически эквивалентны. Из $\gamma(v) \in I(v)$ и аксиомы COV вытекает $\gamma(v^0) \in I(v^0)$. Значит, $\gamma_i(v^0) \geq v^0(i) = 0$ для всех $i \in N$. При выполнении условия теоремы из формулы для NS-ядра вытекает, что $NS_i(v^0) \geq 0$, $i \in N$. Следовательно, $NS(v^0) \in I(v^0)$. NS-ядро удовлетворяет COV, поэтому $NS(v) \in I(v)$.

NS-ядро может не совпадать ни с одним из рассмотренных компромиссных решений и быть предпочтительнее относительно « \succ », чем другие.

Утверждение 2. Существуют игры, в которых

$$NS(v) \neq k(v) \neq \tau(v) \neq \sigma^1(v) \neq \dots \neq \sigma^n(v) \quad (6)$$

и $NS(v)$ доминирует те компромиссные решения, которые принадлежат $I(v)$.

Доказательство. Для игры из примера 1 выполняется (6). В этой игре $k(v), \tau(v) \in I(v)$, $\sigma^r(v) \notin I(v)$ для всех $r \in N$. Нетрудно проверить, что $NS(v) \succ_{\{1,2\}} k(v)$ и $NS(v) \succ_{\{1,2\}} \tau(v)$. Следовательно, $NS(v) \succ k(v)$ и $NS(v) \succ \tau(v)$.

Область применения NS-ядра содержит игры, в которых $Sh(v) \notin I(v)$, $|\tilde{N}(v)| = 1$, а $\gamma(v)$ дает контринтуитивный исход. Однако численный эксперимент на случайно генерируемых данных показал, что в играх большого босса с одноточечным C-ядром $NS(v)$ может доминироваться консенсус-значением или коалиционным консенсус-значением [6].

Аналогично обобщенному консенсус-значению $k(v) = \lambda Sh(v) + (1-\lambda)ESD(v)$, $\lambda \in [0,1]$, можно ввести обобщенное NS-ядро – выпуклую комбинацию значения Шепли и N-ядра

$$NS(v) = \lambda Sh(v) + (1-\lambda)\gamma(v), \lambda \in [0,1].$$

Значение λ можно выбрать так, чтобы обобщенное NS-ядро принадлежало множеству дележей, если значение Шепли ему не принадлежит; C-ядру сбалансированной игры, если значение Шепли ему не принадлежит.

Литература

1. Schmeidler D. The nucleolus of a characteristic function game // SIAM J. Appl. Marh. 1969. Vol. 17. P. 1163–1170.
2. Shapley L.S. A value for n-person games // Annals of Mathematics Studies. 1953. Vol. 28. P. 307–317.
3. Ju Y., Born P., Rays P. The consensus value: a new solution concept for cooperative games // Social Choice and Welfare. 2006. Vol. 28, № 4. P. 85–703.
4. Driessen T.S. H., Tijs S.H. The τ -value, the nucleolus and the core for a subclass of games // Methods Oper. Res. 1983. Vol. 46. P. 395–406.
5. Muto S., Nakayama M., Potters J., Tijs S. On big boss games // The economic studies quarterly. 1988. Vol. 39, № 4. P. 303–321.
6. Зинченко А.Б. Аксиоматическое обоснование новых операторов значения для игр с коалиционной структурой // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2011. № 1. С. 5–8.

References

1. Schmeidler D. The nucleolus of a characteristic function game. SIAM J. Appl. Marh. 1969, vol. 17, pp. 1163-1170.
2. Shapley L.S. A value for n-person games. Annals of Mathematics Studies. 1953, vol. 28, pp. 307-317.
3. Ju Y., Born P., Rays P. The consensus value: a new solution concept for cooperative games. Social Choice and Welfare. 2006, vol. 28, No. 4, pp. 85-703.
4. Driessen T.S.H., Tijs S.H. The τ -value, the nucleolus and the core for a subclass of games. Methods Oper. Res. 1983, vol. 46, pp. 395-406.
5. Muto S., Nakayama M., Potters J., Tijs S. On big boss games. The economic studies quarterly. 1988, vol. 39, No. 4, pp. 303-321.
6. Zinchenko A.B. Aksiomaticheskoe obosnovanie novykh operatorov znacheniya dlya igr s koalitsionnoi strukturoi [Axiomatic justification of new value operators for games with a coalitional structure]. Izv. vuzov. Sev.-Kavk. region. Estestv. nauki. 2011, No. 1, pp. 5-8.

УДК 519.216.5

DOI 10.18522/0321-3005-2017-1-36-41

ЗАДАЧА О ПОЗИЦИОНИРОВАНИИ СЛУЧАЙНОГО ОБЪЕКТА ЗА СЧЕТ ОДНОКРАТНОГО ИЗМЕНЕНИЯ ПРИРАЩЕНИЙ ЕГО ТРАЕКТОРИИ

© 2017 г. Г.В. Мироненко

A PROBLEM ON POSITIONING OF A RANDOM OBJECT BY A SINGLE CHANGE OF ITS TRAJECTORY INCREMENTS

G.V. Mironenko

Мироненко Георгий Викторович – Южный федеральный университет, Институт математики, механики и компьютерных наук им. И.И. Воровича, магистр, кафедра высшей математики и исследования операций, ул. Мильчакова, 8а, г. Ростов-на-Дону, 344090, Россия, e-mail: georim89@gmail.com

Georgii V. Mironenko – Southern Federal University, Vorovich Institute of Mathematics, Mechanics and Computer Science, Master, Department of High Mathematics and Operation Research, Milchakova St., 8a, Rostov-on-Don, 344090, Russia, e-mail: georim89@gmail.com

Рассматривается одна из версий задачи позиционирования объекта, находящегося под воздействием случайных факторов. Цель работы – минимизировать отклонение терминального положения объекта от заданного положения за счет однократного изменения величины приращений соответствующего случайного процесса в выбранный момент времени. В качестве примеров можно привести изменение положения паруса лодки, находящейся под воздействием случайного ветра, и задачу хеджирования европейского опциона в среднеквадратическом при условии, что портфель может быть изменен лишь один раз.

Поставленная задача относится к теории оптимальной остановки, поскольку требуется найти лишь оптимальное время изменения приращений процесса, а величина изменения определяется автоматически. Для ее исследования применяются методы стохастического анализа (мартингалы, формула Ито), стохастического оптимального управления (уравнение Гамильтона – Якоби – Беллмана, вязкостные решения) и численные методы (разностная схема, метод итераций). В работе получены нижние оценки границы области продолжения в случаях, когда рассматриваемый процесс представляет собой броуновское движение со сносом и геометрическое броуновское движение. Приводятся результаты численных расчетов, которые сопоставляются с указанными оценками.

Ключевые слова: задачи об оптимальной остановке, теория вязкостных решений уравнений Гамильтона – Якоби – Беллмана, задачи оптимального управления, хеджирование в среднеквадратическом отклонении.

We consider a problem concerning the positioning of an object, affected by random factors. The aim is to minimize the deviation of a terminal object location from the predefined one by a single change of the increments of the corresponding stochastic process at a selected time moment. As examples, we mention the position of a sail boat, in the presence of random wind, and the problem of hedging of a European option under the assumption that the portfolio can be changed only once.

The problem is related to the theory of optimal stopping, since it is enough to find only an optimal time moment, when the increments of the stochastic process should be changed, and the magnitude of change is determined automatically. It is explored by the methods of stochastic analysis (martingales, Ito formula), stochastic optimal control (Hamilton-Jacobi-Bellman equation, viscosity solutions) and numerical methods (finite-difference scheme, iteration method). We obtain the lower bounds of the boundary of the continuation region for the cases of Brownian motion with drift and geometrical Brownian motion. The numerical results are compared with these estimates.

Keywords: optimal stopping problems, viscosity solutions of Hamilton-Jacobi-Bellman equations, optimal control problems, mean-variance rejection hedging.

Введение

Рассматривается одна из версий задачи позиционирования объекта, находящегося под воздействием случайных факторов. Цель работы – минимизировать отклонение терминального положения объекта от заданного за счет однократного измене-

ния величины приращений соответствующего случайного процесса в выбранный момент времени. При этом предполагается, что можно изменить интенсивность влияния случайных факторов, а также направление влияния. В качестве примера можно привести изменение положения паруса лодки, находящейся под воздействием случайного

ветра. Другой пример – задача хеджирования европейского опциона в среднеквадратическом отклонении при условии, что портфель может быть изменен лишь один раз (отметим, что подобная задача при n -кратном изменении портфеля рассматривалась в работах [1, 2]).

Приводится постановка задачи и указывается, что она сводится к задаче оптимальной остановки. При этом требуется определить лишь оптимальное время изменения приращений процесса, а величина изменения определяется автоматически. Далее получены нижние оценки границы области продолжения в случаях, когда рассматриваемый процесс представляет собой броуновское движение со сносом и геометрическое броуновское движение. Приводятся результаты численных расчетов, которые сопоставляются с указанными оценками.

Постановка задачи и ее сведение к задаче оптимальной остановки

Считая, что у рассматриваемого объекта нет внутренних источников энергии, отождествляем воздействующий на него случайный процесс с самим объектом. Рассмотрим диффузионный процесс

$$dS_t = \mu(t, S_t)dt + \sigma(t, S_t)dW_t, \quad S_0 = \text{const},$$

где W – стандартный винеровский процесс. Будем считать, что положение объекта имеет вид

$$X_T = X_0 + \gamma_0(S_\tau - S_0) + \gamma_\tau(S_T - S_\tau).$$

Здесь X_0, γ_0 – начальные положение и интенсивность воздействия, а стратегия изменения интенсивности воздействия представлена парой (γ_τ, τ) , где τ – момент остановки относительно естественной фильтрации $F = (F_s)_{s \in [0, T]}$ винеровского процесса; $\gamma_\tau - F_\tau$ -измеримая случайная величина (в финансовой интерпретации X – капитал игрока; γ – его портфель; S – цена рискованного актива).

Цель состоит в минимизации среднеквадратического отклонения положения объекта от заданного фиксированного уровня H_0 в терминальный момент времени T :

$$E[(X_T - H_0)^2] \rightarrow \min_{(\gamma_\tau, \tau)}.$$

Данная задача сводится к задаче оптимальной остановки. Действительно, используя представление процесса X_T и телескопическое свойство условного математического ожидания, находим

$$\begin{aligned} E[(X_T - H_0)^2] &= \\ &= E[(X_0 + \gamma_0(S_\tau - S_0) + \gamma_\tau(S_T - S_\tau) - H_0)^2] = \\ &= E[E((S_T - S_\tau)^2 | F_\tau) \gamma_\tau^2 - 2(\gamma_0(S_\tau - S_0) - H) \times \end{aligned}$$

$$\times E((S_T - S_\tau) | F_\tau) \gamma_\tau + (\gamma_0 S_\tau - H)^2], \quad (1)$$

где $H = H_0 - X_0 + \gamma_0 S_0$. Если $E((S_T - S_\tau)^2 | F_\tau) > 0$, то функция (1) имеет единственный минимум по γ_τ , который достигается в точке

$$\gamma_\tau^* = (H - \gamma_0 S_\tau) \frac{E((S_T - S_\tau) | F_\tau)}{E((S_T - S_\tau)^2 | F_\tau)}. \quad (2)$$

Подставляя (2) в (1), получаем задачу оптимальной остановки

$$E \left[(H - \gamma_0 S_\tau)^2 \left(1 - \frac{E((S_T - S_\tau) | F_\tau)^2}{E((S_T - S_\tau)^2 | F_\tau)} \right) \right] \rightarrow \min_\tau. \quad (3)$$

Заметим, что если $E((S_T - S_\tau)^2 | F_\tau) = 0$, то выражение (3) соответствует (1) с учетом обычного соглашения $0/0 = 0$.

Преобразуем выражение (3) для моделей броуновского движения со сносом и геометрического броуновского движения. В первом случае $dS_t = \mu dt + \sigma dW_t$,

$$E((S_T - S_\tau) | F_\tau) = \mu(T - \tau),$$

$$E((S_T - S_\tau)^2 | F_\tau) = (\mu(T - \tau))^2 + \sigma^2(T - \tau). \quad (4)$$

Во втором – $dS_t = \mu S_t dt + \sigma S_t dW_t$,

$$E((S_T - S_\tau) | F_\tau) = S_\tau (e^{\mu(T-\tau)} - 1),$$

$$\begin{aligned} E((S_T - S_\tau)^2 | F_\tau) &= \\ &= S_\tau^2 (e^{(2\mu + \sigma^2)(T-\tau)} - 2e^{\mu(T-\tau)} + 1). \end{aligned} \quad (5)$$

Здесь $\mu \in \mathbb{R}$ и $\sigma > 0$ – некоторые константы. В обоих случаях задача (3) принимает вид

$$E[h(S_\tau)\phi(\tau)] \rightarrow \min_\tau, \quad (6)$$

где $h(S_t) = (H - \gamma_0 S_t)^2$, $\phi(t) = \frac{\sigma^2}{\mu^2(T-t) + \sigma^2}$

для модели броуновского движения со сносом и

$$\phi(t) = \frac{e^{2\mu(T-t)}(e^{\sigma^2(T-t)} - 1)}{e^{(2\mu + \sigma^2)(T-t)} - 2e^{\mu(T-t)} + 1} \quad (7)$$

для модели геометрического броуновского движения. Заметим, что функция (7) имеет устранимую особенность в точке T .

Оценка границы области остановки

Для оценки областей остановки перейдем к интегральной форме задачи (6). Для этого применим к $h(S_\tau)\phi(\tau)$ интегральную формулу Ито в пределах от 0 до τ .

$$\begin{aligned} h(S_\tau)\phi(\tau) &= h(S_0)\phi(0) + \int_0^\tau h(S_t)\phi'(t)dt + \\ &+ \int_0^\tau h'(S_t)\phi(t)dS_t + \frac{1}{2} \int_0^\tau h''(S_t)\phi(t)\sigma^2(S_t)dt = \end{aligned}$$

$$= h(S_0)\phi(0) + \int_0^t h(S_t)\phi'(t) + h'(S_t)\phi(t)\mu(S_t) + \\ + \frac{1}{2}h''(S_t)\phi(t)\sigma^2(S_t)dt + \int_0^t h'(S_t)\phi(t)\sigma(S_t)dW_t.$$

Заметим, что $E \int_0^T (h'(S_t))^2 \sigma^2(S_t) \phi^2(t) dt < \infty$, так как $(h'(S_t))^2 \sigma^2(S_t)$ является полиномом не более чем четвертой степени от случайной величины S_t и $\phi(t)$ – непрерывная функция. Следовательно, процесс $M_t = \int_0^t h'(S_t)\sigma(S_t)\phi(t)dW_t$ является мартингалом и $EM_t = 0$.

Таким образом, задача (6) принимает вид
$$h(S_0)\phi(0) + E \left[\int_0^\tau F(t, S_t) dt \right] \rightarrow \min_\tau$$
, где

$$F(t, s) = h(s)\phi'(t) + h'(s)\phi(t)\mu(s) + \frac{1}{2}h''(s)\phi(t)\sigma^2(s).$$

Пусть τ – любой момент остановки. Положим

$$\tau^* = \inf_t \{t \geq 0 : F(t, S_t) \geq 0\} \wedge T.$$

Тогда $\int_0^\tau F(t, S_t) dt \geq \int_0^{\tau^*} F(t, S_t) dt$ на множестве $\{\tau < \tau^*\}$; справедливо неравенство

$$\int_0^{\tau \vee \tau^*} F(t, S_t) dt \leq \int_0^{\tau^*} F(t, S_t) dt.$$

Это позволяет сузить интервал поиска оптимального момента τ с $[0, T]$ до $[\tau^*, T]$.

Рассмотрим «область продолжения» $\mathcal{C} = \{(t, s) : F(t, s) \leq 0\}$, определяющую момент остановки τ^* . Сразу заметим, что если $\mu = 0$, то $\tau^* = 0$, так как $F(t, s) > 0$ для модели броуновского движения со сносом; $F(t, s) > 0$ при $s > 0$ для модели геометрического броуновского движения. Отметим также, что при этом $\gamma_\tau^* = 0$ при любом τ в силу (2), (4), (5).

Далее рассматривается случай $\mu \neq 0$.

Для исследуемых моделей функция $F(t, s)$ является квадратической: $F(t, s) = a(t)s^2 + b(t)s + c(t)$.

В случае броуновского движения со сносом

$$a(t) = \gamma_0^2 \phi'(t) > 0,$$

$$b(t) = 2\gamma_0^2 \mu \phi(t) - 2H\gamma_0 \phi'(t),$$

$$c(t) = (\gamma_0^2 \sigma^2 - 2H\gamma_0 \mu) \phi(t) + H^2 \phi'(t).$$

Вычислим дискриминант

$$D(t) = b^2(t) - 4a(t)c(t) = (2\gamma_0^2 \mu \phi(t) - 2H\gamma_0 \phi'(t))^2 - \\ - 4\gamma_0^2 \phi'(t) [(\gamma_0^2 \sigma^2 - 2H\gamma_0 \mu) \phi(t) + H^2 \phi'(t)] = \\ = 4\gamma_0^4 [\mu^2 \phi^2(t) - \sigma^2 \phi(t) \phi'(t)].$$

Заметив, что $\phi^2(t) = \frac{\sigma^2}{\mu^2} \phi'(t)$. Тогда

$$D = 4\gamma_0^4 \sigma^2 \phi'(t) [1 - \phi(t)] \geq 0.$$

Таким образом, уравнение $F(t, s) = 0$ имеет два вещественных корня $s_1(t) < s_2(t)$, $t < T$; $s_1(T) = s_2(T)$, а область продолжения, определяющая момент τ^* , имеет вид

$$\mathcal{C} = \{(t, s) : F(t, s) \leq 0\} = \{(t, s) : s_1(t) \leq s \leq s_2(t)\}.$$

Функции $s_1(t), s_2(t)$ монотонны на всем интервале $[0, T]$. Действительно,

$$s_{1,2}(t) = \frac{-b(t) \pm \sqrt{D}(t)}{2a(t)} = \frac{H}{\gamma_0} - \frac{\mu \phi(t)}{\phi'(t)} \pm \sigma \sqrt{\frac{1 - \phi(t)}{\phi'(t)}} = \\ = \frac{H_0}{\gamma_0} - \frac{\sigma^2}{\mu} - \mu(T-t) \pm \sqrt{\mu^2(T-t)^2 + \sigma^2(T-t)}.$$

Следовательно,

$$s'_{1,2}(t) = \mu \mp \frac{1}{2} \frac{2\mu^2(T-t) + \sigma^2}{\sqrt{\mu^2(T-t)^2 + \sigma^2(T-t)}}.$$

Из неравенства

$$(\mu(T-t) + \frac{\sigma^2}{2\mu})^2 = \mu^2(T-t)^2 + \sigma^2(T-t) + \\ + \frac{\sigma^4}{4\mu^2} > \mu^2(T-t)^2 + \sigma^2(T-t)$$

вытекает, что $s'_1(t) < 0, s'_2(t) > 0$ при $\mu > 0$ и $s'_1(t) > 0, s'_2(t) < 0$ при $\mu < 0$.

Для геометрического броуновского движения со сносом

$$a(t) = \gamma_0^2 ((\sigma^2 + 2\mu)\phi(t) + \phi'(t)),$$

$$b(t) = -2H\gamma_0(\mu\phi(t) + \phi'(t)), \quad c(t) = H^2 \phi'(t).$$

Рассмотрим дискриминант

$$D(t) = b^2(t) - 4a(t)c(t) = 4H^2 \gamma_0^2 \phi(t) [\mu^2 \phi(t) - \sigma^2 \phi'(t)].$$

Границы области X имеют вид

$$s_{1,2}(t) = \frac{H_0}{\gamma_0} \frac{\mu\phi(t) + \phi'(t) \pm \sqrt{\mu^2 \phi^2(t) - \sigma^2 \phi(t) \phi'(t)}}{(\sigma^2 + 2\mu)\phi(t) + \phi'(t)}.$$

С использованием правила Лопиталья после простых, но громоздких вычислений находим, что $D(T) = \lim_{t \rightarrow T} D(t) = 0$. Таким образом, $s_1(T) = s_2(T)$. Численные эксперименты показывают, что, как и в случае броуновского движения со сносом, верхняя граница области X является графиком монотонно убывающей функции, нижняя – монотонно возрастающей.

Разностная схема

Введем функцию Беллмана

$$v(t, s) = \inf_{\tau \in T_t} E[h(S_\tau^{t,s})\phi(\tau)], \quad (8)$$

где T_t – множество моментов остановки со значениями на интервале $[t, T]$; $S^{t,s}$ удовлетворяет условию $S_t^{t,s} = s$. Согласно общей теории оптимальной остановки, v является вязкостным решением уравнения Гамильтона – Якоби – Беллмана

$$\min \left\{ v_t - [\mu(x)v_s + \frac{1}{2}\sigma^2(s)v_{ss}], h(s)\phi(t) - v \right\} = 0, \quad (t, s) \in G, \quad (9)$$

см., напр., [3, теорема 7.7]. Кроме того, очевидно, что v удовлетворяет граничному условию

$$v(T, s) = h(s)\phi(T). \quad (10)$$

Используемые здесь и далее понятия теории вязкостных решений являются стандартными и изложены во многих источниках (см., в частности, [3–5]).

Для модели броуновского движения со сносом $G = [0, T] \times \mathbb{R}$, μ, σ – константы. В модели геометрического броуновского движения $G = [0, T] \times [0, +\infty)$, $\mu(s) = \mu s, \sigma(s) = \sigma s$. Используя (8), нетрудно показать, что функция v , как и h , имеет квадратичный рост: $v(t, s) \leq c(1 + s^2)$.

Напомним, что если для любых вязкостного субрешения u (полунепрерывного сверху) и вязкостного суперрешения v (полунепрерывного снизу), удовлетворяющих условию полиномиального роста и таких, что $u(T, s) \leq v(T, s)$, справедливо неравенство $u(t, s) \leq v(t, s)$, $(t, s) \in G$, то говорят, что имеет место теорема сравнения. Для задачи (9), (10) теорема сравнения может быть доказана с использованием методов [3, теорема 7.8].

Как известно [6], наличие теоремы сравнения гарантирует сходимость разностной схемы при условии, что последняя обладает свойствами аппроксимации, монотонности и устойчивости. Не вдаваясь в подробности, отметим лишь, что приводимая ниже схема (относящаяся к известному классу схем [7]) обладает указанными свойствами. Проверка этого утверждения осуществляется стандартными средствами.

Рассмотрим прямоугольную сетку

$$\bar{G}_h = \{(ih_1, jh_2) : 0 \leq i \leq I, J_{\min} \leq j \leq J_{\max}\},$$

$$Ih_1 = T, \quad h_2 J_{\min} = S_{\min}, \quad h_2 J_{\max} = S_{\max}.$$

Здесь I, J, i, j – целые числа; $h = (h_1, h_2)$ – шаг сетки. Узлы

$$z_{ij} = (ih_1, jh_2), \quad 0 \leq i < I, \quad J_{\min} < j < J_{\max}$$

назовем внутренними, остальные – граничными. Множества внутренних и граничных узлов обозначим через G_h и ∂G_h . Каждому внутреннему узлу поставим в соответствие уравнение для сеточной функции $v_{ij} = v(z_{ij})$:

$$0 = \min \left\{ \frac{v_{i+1,j} - v_{i,j}}{h_1} + \mu(s_j) \frac{v_{i+1,j+1} - v_{i+1,j}}{h_2} + \frac{\sigma^2(s_j)}{2} \frac{v_{i+1,j+1} - 2v_{i+1,j} + v_{i+1,j-1}}{h_2^2}, h(s_j)\phi(ih_1) - v_{i,j} \right\}.$$

Здесь $s_j = jh_2$, а уравнение справедливо для случая как броуновского движения со сносом, так и геометрического броуновского движения. Отметим, что выбранный способ аппроксимации первой производной по пространственной переменной обеспечивает монотонность данной (явной) схемы. В граничных узлах ставится условие Дирихле:

$$v_{ij} = h(s_j)\phi(ih_1), \quad z_{ij} = (ih_1, jh_2) \in \partial G_h.$$

Перейдем к описанию численных экспериментов. Для модели броуновского движения со сносом задача решалась при следующих входных данных: $T = 10$, $H = 4$, $X_0 = 1$, $S_0 = 10$, $\gamma_0 = 2$, $\mu = 0,1$, $\sigma = 0,4$. Граница области остановки (пунктирная линия) и её нижняя оценка (сплошная линия) представлены на рис. 1а.

Можно отметить, что полученная в результате численных расчетов граница качественно ведет себя так же, как и её нижняя оценка. Величина погрешности зависит от параметров, но приведенная на рис. 1а картина является типичной. Отметим, что выражения

$$s_{1,2}(0) - S_0 = \frac{H - X_0}{\gamma_0} - \frac{\sigma^2}{\mu} - \mu T \pm \sqrt{\mu^2 T^2 + \sigma^2 T}$$

имеют при малых $\mu \neq 0$ одинаковый знак, т.е. S_0 не попадает в область продолжения \mathcal{C} . Данный вывод подтверждается численными расчетами.

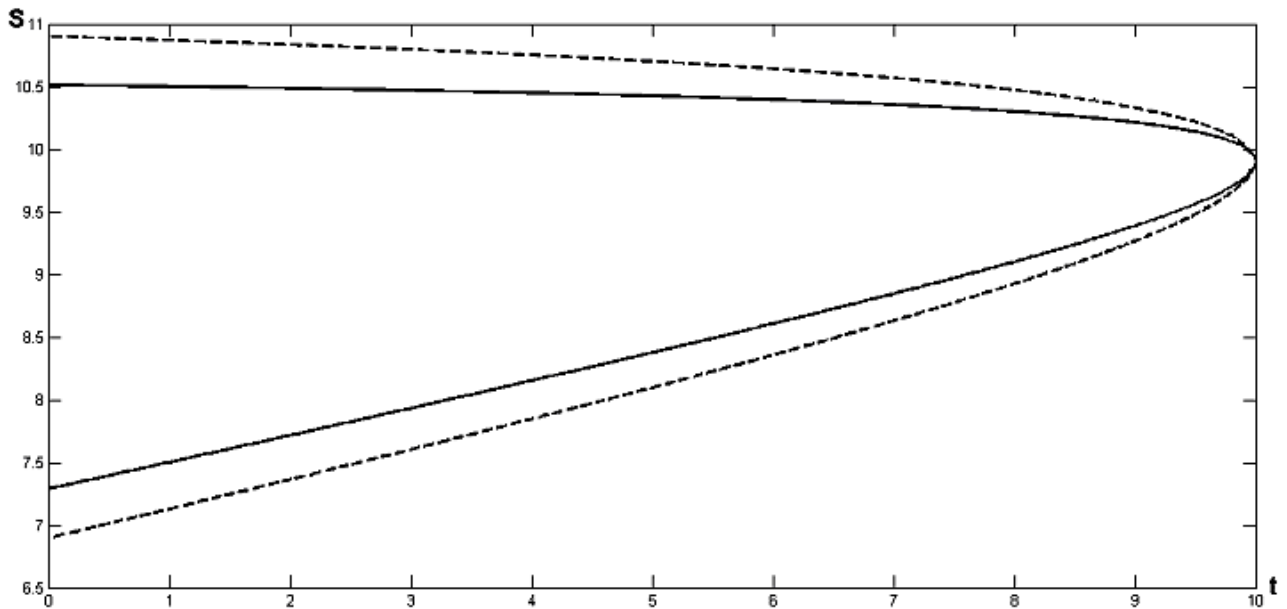
Для модели геометрического броуновского движения картина несимметрична. В типичном

случае верхняя граница области остановки оценивается менее точно, чем нижняя.

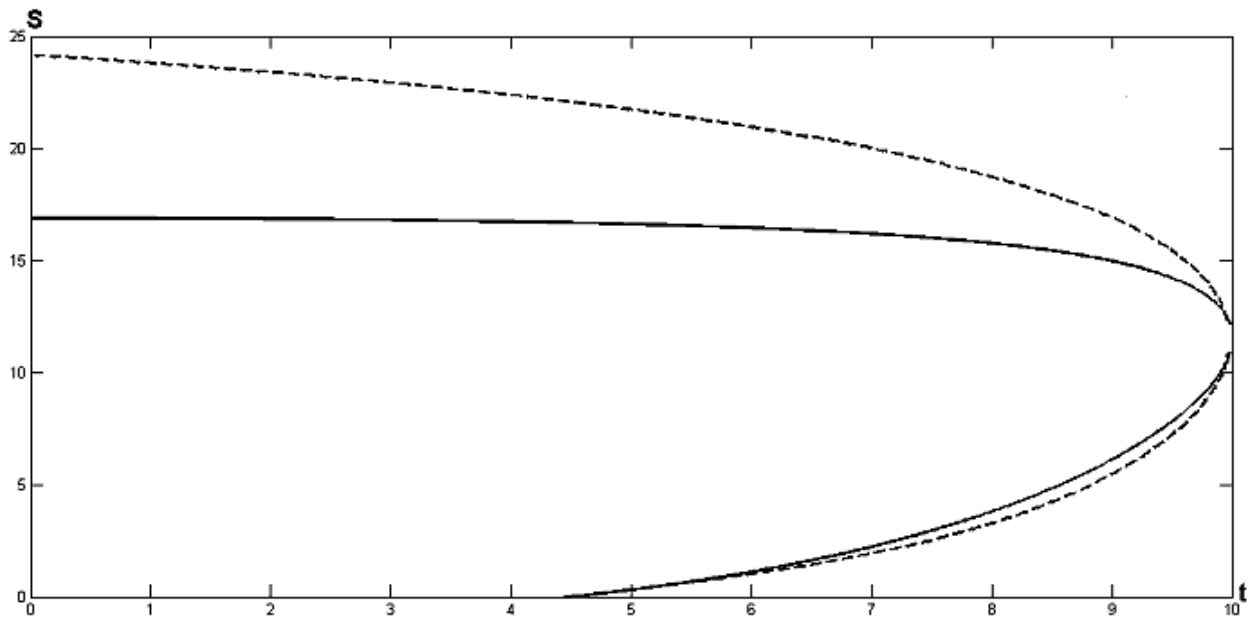
Соответствующие графики для входных данных: $T = 10$, $H = 4$, $X_0 = 1$, $S_0 = 15$, $\gamma_0 = 0,2$, $\mu = 0,1$, $\sigma = 0,4$ представлены на рис. 1б.

Отметим, что область остановки определяется лишь той частью границы, которая находится выше оси абсцисс.

Таким образом, проведенные эксперименты позволяют сделать вывод о том, что полученные оценки дают удовлетворительное качественное описание оптимальных областей остановки.



а / а



б / б

Рис. 1. Граница области остановки и её нижняя оценка для модели броуновского движения со сносом – а; геометрического броуновского движения – б / Fig. 1. The boundary of the stop and its lower bound for the model of Brownian motion with drift - a; for geometric Brownian motion - b

Литература

1. Martini C., Party C. Variance optimal hedging in the Black-Scholes model for a given number of transactions: Rapport de recherche № 3767. 1999. 31 p.
2. Trabelsi F., Trad A. L 2-discrete hedging in a continuous-time model // Applied Mathematical Finance. 2002. Vol. 9, № 3. P. 189–217.
3. Touzi N. Optimal Stochastic Control, Stochastic Target Problems, and Backward SDE. N.Y., 2013. 214 p.
4. Crandall M.G., Ishii H., Lions P.L. User's guide to viscosity solutions of second order partial differential equations // Bulletin of the American Mathematical Society. 1992. Vol. 27, № 1. P. 1–67.
5. Pham H. Continuous-time stochastic control and optimization with financial applications. Berlin, 2009. Vol. 61.
6. Barles G., Souganidis P.E. Convergence of approximation schemes for fully nonlinear second order equations. Asymptot. Anal. 1991. Vol. 66, № 4. P. 271–283.
7. Oberman A.M. Convergent difference schemes for degenerate elliptic and parabolic equations: Hamilton-Jacobi equations and free boundary problems. // SIAM J. on Numerical Analysis. 2006. Vol. 66, № 44. P. 879–895.

References

1. Martini C., Party C. Variance optimal hedging in the Black-Scholes model for a given number of transactions. Rapport de recherche № 3767, 1999, 31 p.
2. Trabelsi F., Trad A. L 2-discrete hedging in a continuous-time model. Applied Mathematical Finance. 2002, vol. 9, No. 3, pp. 189-217.
3. Touzi N. Optimal Stochastic Control, Stochastic Target Problems, and Backward SDE. New York, 2013, 214 p.
4. Crandall M.G., Ishii H., Lions P.L. User's guide to viscosity solutions of second order partial differential equations. Bulletin of the American Mathematical Society. 1992, vol. 27, No. 1, pp. 1-67.
5. Pham H. Continuous-time stochastic control and optimization with financial applications. Berlin, 2009, vol. 61.
6. Barles G., Souganidis P.E. Convergence of approximation schemes for fully nonlinear second order equations. Asymptot. Anal. 1991, vol. 66, No. 4, pp. 271-283.
7. Oberman A.M. Convergent difference schemes for degenerate elliptic and parabolic equations: Hamilton-Jacobi equations and free boundary problems. SIAM J. on Numerical Analysis. 2006, vol. 66, No. 44, pp. 879-895.

УДК 519.634

DOI 10.18522/0321-3005-2017-1-42-46

ОТРЫВНОЙ УДАР И КАВИТАЦИОННОЕ ТОРМОЖЕНИЕ ЦИЛИНДРА ПОД СВОБОДНОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ ТЯЖЕЛОЙ ЖИДКОСТИ

© 2017 г. М.В. Норкин

SEPARATION IMPACT AND CAVITATIONAL BRAKING OF THE CYLINDER UNDER THE FREE SURFACE OF HEAVY LIQUID

M.V. Norkin

Норкин Михаил Викторович – Южный федеральный университет, Институт математики, механики и компьютерных наук имени И.И. Воровича, доктор физико-математических наук, доцент, профессор, кафедра вычислительной математики и математической физики, ул. Мильчакова, 8а, г. Ростов н/Д, 344090, Россия, e-mail: norkinmi@mail.ru

Michail V. Norkin – Southern Federal University, Vorovich Institute of Mathematics, Mechanics and Computer Science, Doctor of Physics and Mathematics, Associate Professor, Professor, Department of Mathematics and Mathematical Physics, Milchakova St., 8a, Rostov-on-Don, 344090, Russia, e-mail: norkinmi@mail.ru

В плоской постановке исследуется задача удара и последующего торможения твердого тела в идеальной и несжимаемой жидкости. Особенностью этой задачи является то, что удар цилиндра, полностью погруженного в жидкость, приводит к отрыву частиц жидкости от его поверхности и образованию растущей присоединенной каверны за телом. После удара могут возникнуть дополнительные кавитационные зоны, обусловленные законом движения цилиндра и физическими параметрами задачи. Для определения новых зон отрыва формулируется специальная задача с односторонними ограничениями, аналогичная классической задаче об ударе с отрывом. Так как зоны отрыва заранее неизвестны, то данная задача является нелинейной и относится к классу задач со свободными границами. Для нахождения ее приближенного решения применяется специальный итерационный метод, сводящий исходную нелинейную задачу к последовательному решению линейных краевых задач с фиксированными точками отрыва. Последние задачи решаются численно, с применением метода конечных элементов. В качестве конкретного примера рассматривается задача для эллиптического цилиндра. Показано, что безразмерное ускорение цилиндра оказывает существенное влияние на расположение дополнительных зон отрыва и их связность. Предложенная математическая модель может быть использована для решения практических задач корабельной гидродинамики.

Ключевые слова: идеальная несжимаемая жидкость, кавитационное торможение, асимптотика, свободная граница, каверна, малые времена, число Фруда, число кавитации, дополнительные кавитационные зоны.

The two-dimensional problem of hydrodynamic impact and the subsequent braking of a solid body in ideal and incompressible liquid is investigated. Feature of this problem is that the impact of the cylinder which is completely shipped in liquid leads to a separation of particles of liquid from its surface and to formation of the growing attached cavity behind a body. Besides after impact there can be additional cavitation zones caused by the law of movement of the cylinder and physical parameters of a problem. For determination of new cavitation zones the special problem with unilateral restrictions, similar to a classical problem about impact with a separation is formulated. As zones of a separation are in advance unknown, this problem is nonlinear and belongs to the class of problem with free borders. The special iterative method reducing an initial nonlinear problem to the consecutive solution of linear regional problems with the fixed separation points is applied to finding of her approximate decision. The last problems are solved in number, using a finite-element method. As a specific example the problem for the elliptic cylinder is considered. It is shown that dimensionless acceleration of the cylinder has significant effect on an arrangement of additional zones of a separation and their connectivity. The offered mathematical model can be used for the solution of practical problems of ship hydrodynamics.

Keywords: ideal incompressible liquid, cavitation braking, asymptotics, free border, cavity, small times, Froude's number, cavitation number, additional cavitation zones.

В статьях [1–4] рассматривалась задача о движении кругового цилиндра в жидкости после отрывного удара на малых временах с постоянной скоростью. Ее решение строилось с учетом двух важных физических условий – конечности скорости жидкости в точках отрыва (условие Кутта – Жуковского) и положительности давления на смо-

ченной поверхности тела. Было показано, что первому условию можно удовлетворить, если учесть динамику точек отрыва внутренней свободной границы жидкости. При этом второе условие выполняется не во всех случаях. Может возникнуть ситуация, когда после удара образуется каверна и вместе с ней появляются области отрицательных

давлений на смоченной поверхности тела. Таким образом, возникают два типа кавитационных зон. Одни из них вызваны ударом, а вторые обусловлены законом движения цилиндра после удара и физическими параметрами задачи. Основные трудности, возникающие при решении таких задач, связаны с тем, что при построении регулярного решения задачи необходимо учитывать динамику точек отрыва основной кавитационной зоны, образованной в результате удара. Вместе с тем анализ решения задачи для кругового цилиндра, проведенный в [1–4], показывает, что главное приближение для давления не зависит от динамики точек отрыва и, следовательно, дополнительные зоны отрыва можно определить независимо от условия Кутта – Жуковского. Проведенные рассуждения справедливы и для более общего случая – движения цилиндра после удара с постоянным ускорением (разгон или торможение). Отметим, что торможение тела в жидкости способствует образованию дополнительных кавитационных зон. В настоящей работе для произвольного плоского тела с гладкой границей определяются первоначальные зоны отрыва, соответствующие двум типам кавитационных зон. В математическом плане дело сводится к последовательному решению двух смешанных краевых задач теории потенциала с односторонними ограничениями на поверхности тела. Первая из них – классическая задача об ударе с отрывом [5]. С ее помощью находится основная кавитационная зона, вызванная ударом. Вторая задача, совпадающая по своей структуре с первой, служит для определения дополнительных кавитационных зон. В качестве конкретного примера рассматривается задача о кавитационном торможении эллиптического цилиндра после отрывного удара. Обзор работ по близкой проблеме проникания тела в жидкость с образованием кавитационной зоны впереди тела приводится в [6].

Общая постановка задачи

Рассматривается плоская задача о горизонтальном отрывном ударе твердого тела под свободной поверхностью идеальной, несжимаемой, тяжелой жидкости. Предполагается, что после удара скорость тела уменьшается по линейному закону (происходит торможение тела в жидкости). При определенных условиях наряду с основной зоной отрыва, вызванной ударом, образуются дополнительные кавитационные зоны, обусловленные законом движения цилиндра после удара и физическими параметрами задачи (числами Фруда и кавитации). В общем случае зона отрыва представляет собой несвязное множество. Математическая постановка задачи, записанная в безразмерных переменных в

подвижной системе координат, связанной с телом, имеет вид

$$\Delta\Phi = 0, \quad R \in \Omega(t), \quad (1)$$

$$\frac{\partial\Phi}{\partial n} = \dot{h}(t)n_x, \quad R \in S_{11}(t), \quad (2)$$

$$\frac{\partial\Phi}{\partial t} - \dot{h}(t)\frac{\partial\Phi}{\partial x} + \frac{1}{2}(\nabla\Phi)^2 + Fr^{-2}(y-H) - \zeta = 0, \\ \zeta = 0, 5\chi, \quad R \in S_{12}(t); \quad \zeta = p_0, \quad R \in S_{13}(t), \quad (3)$$

$$\frac{(\Phi_x - \dot{h}(t))x + \Phi_y y}{\sqrt{x^2 + y^2}} = \left[R'_0(\theta) + \frac{\partial\eta}{\partial\theta} \right] \dot{\theta}(t) + \frac{\partial\eta}{\partial t}, \quad (4)$$

$$\dot{\theta}(t) = R^{-2} [\Phi_{y,x} - (\Phi_x - \dot{h}(t))y], \quad R \in S_{12}(t) \cup S_{13}(t),$$

$$\frac{\partial\Phi}{\partial t} - \dot{h}(t)\frac{\partial\Phi}{\partial x} + \frac{1}{2}(\nabla\Phi)^2 + Fr^{-2}\xi(x,t) = 0, \quad (5) \\ R \in S_2(t),$$

$$\frac{\partial\Phi}{\partial y} = \frac{\partial\xi}{\partial x} \left[\frac{\partial\Phi}{\partial x} - \dot{h}(t) \right] + \frac{\partial\xi}{\partial t}, \quad R \in S_2(t), \quad (6)$$

$$\nabla\Phi \rightarrow 0, \quad R \rightarrow \infty, \quad (7)$$

$$\Phi(x, y, 0) = \Phi_0(x, y), \quad \xi(x, 0) = 0, \quad \eta(\theta, 0) = 0, \quad (8)$$

$$\dot{h}(t) = 1 - \omega t. \quad (9)$$

Течение жидкости в момент, непосредственно следующий после удара (в начальный момент времени), определяется решением следующей смешанной краевой задачи теории потенциала с неизвестным априори разбиением границы тела на зоны отрыва и контакта [5]:

$$\Delta\Phi_0 = 0, \quad R \in \Omega(0),$$

$$\frac{\partial\Phi_0}{\partial n} = n_x, \quad \Phi_0 \leq 0, \quad R \in S_{11}(0),$$

$$\frac{\partial\Phi_0}{\partial n} \geq n_x, \quad \Phi_0 = 0, \quad R \in S_{12}(0), \quad (10)$$

$$\Phi_0 = 0, \quad R \in S_2(0),$$

$$\nabla\Phi_0 \rightarrow 0, \quad R \rightarrow \infty.$$

Переход к безразмерным переменным осуществляется по формулам

$$t' = \frac{a}{V_0}t, \quad x' = ax, \quad y' = ay, \quad \Phi' = aV_0\Phi, \quad p' = \rho V_0^2 p,$$

где штрихами помечаются размерные величины.

Неподвижные координаты X, Y связаны с подвижными x, y соотношениями $X = x + h(t), Y = y$.

Здесь и далее используются следующие обозначения: $\Phi(x, y, t)$ – потенциал скоростей абсолютного движения жидкости, записанный относительно подвижной системы координат; $\Omega(t)$ – область, занятая жидкостью; $S_{11}(t)$ – часть поверхности цилиндра, на которой не происходит отрыва частиц жидкости; $S_{12}(t), S_{13}(t)$ – оторвавшиеся от поверхности цилиндра внутренние свободные границы жидкости ($S_{12}(t)$ – основная, а $S_{13}(t)$ – допол-

нительная); $S_2(t)$ – внешняя свободная поверхность жидкости; $\rho = const$ – плотность жидкости; V_0 – скорость, приобретенная телом в результате удара (скорость тела в начальный момент времени); a – радиус цилиндра; H – глубина его погружения; R – радиус-вектор с координатами (x, y) .

Задача (1)–(9) содержит безразмерные параметры

$$Fr = \frac{V_0}{\sqrt{ga}}, \quad \chi = 2 \frac{p_a - p_c}{\rho V_0^2}, \quad \omega = \frac{\omega_0 a}{V_0^2}, \quad p_0 = \frac{p_a}{\rho V_0^2},$$

где Fr – число Фруда; χ – число кавитации (безразмерная разность давлений на внешней свободной поверхности жидкости и в основной каверне); p_a – атмосферное давление; p_c – давление в основной каверне; g – ускорение свободного падения; ω_0 – ускорение тела. Через ω и p_0 обозначены безразмерные величины ω_0 и p_a .

На внешней и внутренних свободных границах ставятся динамические и кинематические условия (3)–(6). Предполагается, что на внешней свободной границе $S_2(t)$ действует атмосферное давление ($p = p_a$). На внутренней свободной границе $S_{12}(t)$ – давление $p = p_c$, где p_c – давление насыщенных паров жидкости или газа ($p_c \approx 0$), либо давление газа в каверне при искусственной кавитации (в естественной ситуации, когда $p_c \approx 0$, справедливо равенство $\chi = 2p_0$). На дополнительных свободных границах $S_{13}(t)$ давление совпадает с давлением насыщенных паров ($p \approx 0$).

Кинематическое условие на $S_{12}(t)$ и $S_{13}(t)$ записывается в полярных координатах r, θ ($x = r \cos \theta$, $y = r \sin \theta$). Уравнения внешней и внутренних свободных границ относительно подвижной системы координат имеют вид

$$y = H + \xi(x, t); \quad r = R_0(\theta) + \eta(\theta, t),$$

где $r = R_0(\theta)$ – параметрическое уравнение границы тела.

В точках пересечения внутренних свободных границ с поверхностью цилиндра (в точках отрыва) ставится условие Кутта – Жуковского, означающее, что скорость жидкости в этих точках должна быть конечной.

После нахождения потенциала скоростей Φ давление в жидкости определяется на основании интеграла Коши – Лагранжа:

$$p = p_0 - \left[\frac{\partial \Phi}{\partial t} - \dot{h}(t) \frac{\partial \Phi}{\partial x} + \frac{1}{2} (\nabla \Phi)^2 + Fr^{-2} (y - H) \right].$$

Определение дополнительных кавитационных зон

Образование новых зон отрыва происходит сразу по конечным и в большинстве случаев небольшим участкам поверхности тела (аналогия с [7]). При этом важную роль играют первоначальные зоны отрыва $S_{13}(0)$, которые получают предельным переходом при $t \rightarrow 0$ границ $S_{13}(t)$. Для их определения необходимо сформулировать дополнительные динамическое и кинематическое условия типа неравенств.

Решение поставленной задачи на малых временах будем разыскивать в виде следующих асимптотических разложений ($t \rightarrow 0$):

$$\Phi(x, y, t) = \Phi_0(x, y) + t\Phi_1(x, y) + o(t), \quad (11)$$

$$\xi(x, t) = t\xi_0(x) + t^2\xi_1(x) + o(t^2), \quad (12)$$

$$\eta(\theta, t) = t\eta_0(\theta) + t^2\eta_1(\theta) + o(t^2). \quad (13)$$

Подставляя (11)–(13) в (1)–(9), осуществляя снос краевых условий с возмущенных участков границы области $\Omega(t)$ на первоначально невозмущенный уровень и учитывая дополнительные условия в виде неравенств, приходим для определения функции Φ_1 к смешанной краевой задаче теории потенциала с односторонними ограничениями на поверхности тела:

$$\Delta \Phi_1 = 0, \quad R \in \Omega(0), \quad \Phi_1 = f(\Phi_0), \quad R \in S_2(0), \quad (14)$$

$$\frac{\partial \Phi_1}{\partial n} = -\omega n_x, \quad p_0 - \Phi_1 + f(\Phi_0) - Fr^{-2}(y - H) \geq 0, \\ R \in S_{11}(0), \quad (15)$$

$$\frac{\partial \Phi_1}{\partial n} \geq -\omega n_x, \quad p_0 - \Phi_1 + f(\Phi_0) - Fr^{-2}(y - H) = 0, \\ R \in S_{13}(0), \quad (16)$$

$$\Phi_1 - f(\Phi_0) + Fr^{-2}(y - H) - 0,5\chi = 0, \\ R \in S_{12}(0), \quad (17)$$

$$\nabla \Phi_1 \rightarrow 0, \quad R \rightarrow \infty, \quad (18)$$

$$f(\Phi_0) = \frac{\partial \Phi_0}{\partial x} - \frac{1}{2} (\nabla \Phi_0)^2.$$

Неравенство в (15) означает, что давление на смоченной поверхности тела (в главном приближении по времени) должно быть неотрицательным. Для его получения нужно подставить разложение (11) в выражение для давления и ограничиться старшими членами. Неравенство в (16) говорит о том, что жидкие частицы не могут входить внутрь твердого тела, хотя им разрешается отрываться от твердой границы. Обоснование этого неравенства проводится по аналогии с [4]. Подставляя разложение (11)–(13) в кинематическое уравнение внутренней свободной границы жидкости (4) и осуще-

ствляя процедуру сноса, получим для определения коэффициента $\eta_0(\theta)$ равенство

$$\eta_0(\theta) = R_0^{-1}(\theta) \sqrt{R_0'(\theta)^2 + R_0(\theta)^2} \left[\frac{\partial \Phi_0}{\partial n} - n_x \right].$$

Так как при ударе в зоне $S_{13}(0)$ отрыва не происходит, то потенциал Φ_0 , определяющий течение жидкости в начальный момент времени, должен удовлетворять условию безотрывного обтекания в этой зоне. Следовательно, выражение в квадратных скобках равно нулю. Таким образом, коэффициент $\eta_0(\theta) = 0$ и возмущение дополнительных внутренних свободных границ жидкости на малых временах представимо в виде ($t \rightarrow 0$)

$$\eta(\theta, t) = t^2 \eta_1(\theta) + o(t^2). \quad (19)$$

Повторяя указанную выше процедуру, получим для определения коэффициента $\eta_1(\theta)$ равенство

$$\eta_1(\theta) = 0,5 R_0^{-1}(\theta) \sqrt{R_0'(\theta)^2 + R_0(\theta)^2} \left[\frac{\partial \Phi_1}{\partial n} + \omega n_x \right].$$

Из асимптотической формулы (19) вытекает, что функция $\eta_1(\theta)$ должна быть неотрицательной. Действительно, нарушение этого условия означало бы, что при малых t часть внутренней свободной границы находится внутри цилиндра, что невозможно. Из неотрицательности функции $\eta_1(\theta)$ следует выполнение кинематического условия типа неравенства в (16).

Численная реализация и анализ результатов

Для определения дополнительных кавитационных зон возникает задача с односторонними ограничениями (14)–(18), совпадающая по своей структуре с классической задачей об ударе с отрывом (10). Отсюда следует регулярность решения этой задачи в точках отрыва и возможность применения для ее решения известных численных методов. В настоящей работе для решения задачи (14)–(18) используется специальный итерационный метод, в котором последовательно уточняются неизвестные заранее зоны отрыва и контакта частиц жидкости [1–4]. Исходная нелинейная задача (с неизвестной дополнительной зоной отрыва) сводится к последовательному решению линейных краевых задач с фиксированным разбиением границы тела на области задания краевых условий типа Дирихле – Неймана. На каждом шаге итерационного процесса новые приближения к точкам отрыва дополнительных кавитационных зон определяются из условия локального отрицательного минимума давления на смоченной поверхности тела. Процесс заканчивается, когда зоны отрицательных давлений исчеза-

ют. Отметим также, что указанные линейные задачи решаются численно методом конечных элементов с применением пакета FreeFem++.

В качестве конкретного примера рассматривается задача о кавитационном торможении эллиптического цилиндра под свободной поверхностью идеальной, несжимаемой, тяжелой жидкости после его отрывного удара. Исследование задачи проводится при следующих фиксированных значениях параметров: $Fr = 3$, $\chi = 0,7$, $p_0 = 0,35$ (естественная ситуация), $H = 1,3$, $\varepsilon = 0,5$, где $\varepsilon = b/a$; a и b – полуоси эллипса. При этом рассматриваются случаи, соответствующие различным ускорениям цилиндра. При $\omega = 2$ образуются две дополнительные кавитационные зоны (рис. 1). Увеличение ω приводит к слиянию этих зон и образованию одной большой кавитационной зоны в передней части тела. На рис. 2 ($\omega = 3,8$) дополнительные зоны отрыва расположены уже достаточно близко друг к другу. Интересно отметить, что при уменьшении ω эти зоны уменьшаются, но сразу не исчезают.

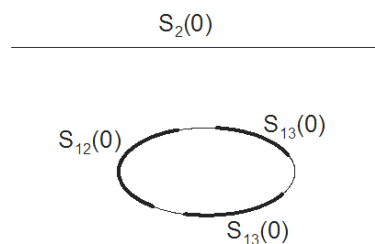


Рис. 1. Образование двух дополнительных зон отрыва: $Fr = 3$, $\omega = 2$ / Fig.1. The formation of two additional separation zones: $Fr = 3$, $\omega = 2$



Рис. 2. Зоны отрыва при увеличении ω : $Fr = 3$, $\omega = 3,8$ / Fig. 2. Separation zones with increasing of the ω : $Fr = 3$, $\omega = 3,8$

На рис. 3 изображены зоны отрыва, соответствующие случаю, когда после удара цилиндр движется с постоянной скоростью ($\omega = 0$). Хорошо видно, что верхняя зона отрыва сильно уменьшилась, а нижняя зона практически соединилась с основной кавитационной зоной (между ними имеется очень маленький зазор).

В предыдущих рассуждениях менялось только ускорение цилиндра, а остальные параметры были фиксированы. Однако другие параметры также влияют на формирование дополнительных кавитационных зон. Если, например, зафиксировать все параметры задачи, за исключением числа Фруда, то

при уменьшении этого числа дополнительные кавитационные зоны будут исчезать.

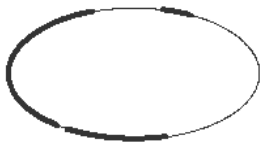


Рис. 3. Зоны отрыва при уменьшении ω : $Fr = 3$, $\omega = 0$ /
Fig. 3. Separation zones with decreasing of the ω : $Fr = 3$, $\omega = 0$

На рис. 4 показаны первоначальные зоны отрыва при $Fr = 1,5$, $\omega = 2$ (остальные параметры не меняются). Отметим также, что при искусственной подаче газа в основную каверну (при уменьшении числа χ) дополнительные зоны отрыва исчезают.



Рис. 4. Зоны отрыва при изменении числа Фруда: $Fr = 1,5$,
 $\omega = 2$ / Fig. 4. Separation zone when change the Froude's
number: $Fr = 1,5$, $\omega = 2$

Заключение

В работе предложен эффективный метод определения дополнительных кавитационных зон, возникающих при торможении цилиндра в идеальной несжимаемой жидкости после его отрывного удара. Показано, что для нахождения новых зон отрыва нужно последовательно решить две смешанные краевые задачи теории потенциала с односторонними ограничениями на поверхности тела. Преимущество предлагаемого подхода состоит в том, что он позволяет определять первоначальные зоны отрыва частиц жидкости, соответствующие двум видам кавитационных зон, для произвольного плоского тела с гладкой границей. В качестве конкретного примера рассмотрена задача для эллиптического цилиндра.

Литература

1. Norkin M., Korobrin A. The motion of the free-surface separation point during the initial stage of horizontal impulsive displacement of a floating circular cylinder // *J. of Engineering Mathematics*. 2011. Vol. 70. P. 239–254.
2. Норкин М.В. Движение кругового цилиндра в жидкости после удара на малых временах с образованием каверны // *Изв. РАН. МЖГ*. 2012. № 3. С. 101–112.
3. Норкин М.В. Динамика внутренней свободной границы жидкости на малых временах при вертикальном ударе кругового цилиндра, полностью погружен-

ного в жидкость // *Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки*. 2015. № 1. С. 30–35.

4. Норкин М.В. Образование каверны при наклонном отрывном ударе кругового цилиндра под свободной поверхностью тяжелой жидкости // *Сиб. журн. индустриальной математики*. 2016. Т. 19, № 4. С. 81–92.

5. Седов Л.И. Плоские задачи гидродинамики и аэродинамики. М., 1966. 448 с.

6. Reinhard M., Korobkin A.A., Cooker M.J. Cavity formation on the surface of a body entering water with deceleration // *J. of Engineering Mathematics*. 2016. Vol. 96, № 1. P. 155–174.

7. Норкин М.В. Образование каверны на начальном этапе движения кругового цилиндра в жидкости с постоянным ускорением // *ПМТФ*. 2012. Т. 53, № 4. С. 74–82.

References

1. Norkin M., Korobrin A. The motion of the free-surface separation point during the initial stage of horizontal impulsive displacement of a floating circular cylinder. *J. of Engineering Mathematics*. 2011, vol. 70, pp. 239-254.
2. Norkin M.V. Dvizhenie krugovogo tsilindra v zhidkosti posle udara na malykh vremenakh s obrazovaniem kaverny [The motion of a circular cylinder in a liquid after a shock at short times with the formation of a cavity]. *Izv. RAN. MZhG*. 2012, No. 3, pp. 101-112.
3. Norkin M.V. Dinamika vnutrennei svobodnoi granitsy zhidkosti na malykh vremenakh pri vertikal'nom udare krugovogo tsilindra, polnost'yu pogruzhennogo v zhidkost' [Dynamics of the internal free boundary of a liquid at small times with a vertical impact of a circular cylinder completely immersed in a liquid]. *Izv. vuzov. Sev.-Kavk. region. Estestv. nauki*. 2015, No. 1, pp. 30-35.
4. Norkin M.V. Obrazovanie kaverny pri naklonnom otrivnom udare krugovogo tsilindra pod svobodnoi poverkhnost'yu tyazheloi zhidkosti [Formation of a cavern with an oblique tear-off impact of a circular cylinder under the free surface of a heavy liquid]. *Sib. zhurn. industrial'noi matematiki*. 2016, vol. 19, No. 4, pp. 81-92.
5. Sedov L.I. *Ploskie zadachi gidrodinamiki i aerodinamiki* [Flat problems of hydrodynamics and aerodynamics]. Moscow, 1966, 448 p.
6. Reinhard M., Korobkin A.A., Cooker M.J. Cavity formation on the surface of a body entering water with deceleration. *J. of Engineering Mathematics*. 2016, vol. 96, No. 1, pp. 155-174.
7. Norkin M.V. Obrazovanie kaverny na nachal'nom etape dvizheniya krugovogo tsilindra v zhidkosti s postoyannym uskoreniem [The formation of a cavity at the initial stage of the motion of a circular cylinder in a liquid with a constant acceleration]. *PMTF*. 2012, vol. 53, No. 4, pp. 74-82.

УДК 517.9

DOI 10.18522/0321-3005-2017-1-47-51

ОБ ОБРАТИМОСТИ ОПЕРАТОРОВ ЛИНЕЙНОГО СОПРЯЖЕНИЯ С ПОТОЧЕЧНО КОММУТИРУЮЩИМИ КОЭФФИЦИЕНТАМИ В СЧЕТНО-НОРМИРОВАННЫХ ПРОСТРАНСТВАХ ГЛАДКИХ ФУНКЦИЙ

© 2017 г. А.Э. Пасенчук

ON THE REVERSIBILITY OF LINEAR CONJUGATION OPERATORS WITH POINTWISE SWITCHING COEFFICIENTS IN COUNTABLY NORMED SPACES OF SMOOTH FUNCTIONS

A.E. Pasenchuk

Пасенчук Александр Эдуардович – Южный федеральный университет, Институт математики, механики и компьютерных наук имени И.И. Воровича, доктор физико-математических наук, профессор, кафедра алгебры и дискретной математики, ул. Мильчакова, 8а, г. Ростов н/Д, 344090, Россия, e-mail: pasenchuk@mail.ru

Alexander E. Pasenchuk – Southern Federal University, Vorovich Institute of Mathematics, Mechanics and Computer Science, Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Department of Algebra and Discrete Mathematics, Milchakova St., 8a, Rostov-on-Don, 344090, Russia, e-mail: pasenchuk@mail.ru

В счетно-нормированном пространстве гладких функций, принимающих значения в банаховом пространстве, рассматривается оператор линейного сопряжения с поточечно коммутирующими коэффициентами. Этот оператор является обобщением классического оператора краевой задачи Римана. Развитие теории оператора Римана и родственных операторов нашло отражение в известных монографиях Ф.Д. Гахова, Н.И. Мухелишвили, И.Н. Векуа, М.Г. Крейна, И.Ц. Гохберга, Н.Я. Крупника, И.Б. Симоненко, З. Пресдорфа, А.П. Солдатова и др. Несмотря на такое обилие публикаций, задача Римана с вырождающимися коэффициентами к настоящему времени изучена недостаточно полно. В частности, отсутствуют критерии обратимости и конструкции обратных операторов в счетно-нормированных пространствах даже в самых простых случаях. В работе применена методика изучения оператора, предложенная И.Б. Симоненко, согласно которой нетеровость (обратимость) оператора Римана равносильна некоторой факторизации его коэффициентов. Последняя определяется пространством, в котором рассматривается оператор, и классом коэффициентов. В связи с этим в работе вводится и изучается понятие гладкой вырожденной факторизации функций со значениями в коммутативных банаховых алгебрах. Кроме того, вводится понятие взаимной простоты функций со значениями в банаховых алгебрах. Даются описания этих понятий в терминах поведения их преобразований Гельфанда. Приводятся критерии обратимости и указывается конструкция обратного оператора к оператору линейного сопряжения.

Ключевые слова: оператор, линейный, сопряжение, вырожденная, факторизация, обратимость, критерий, конструкция.

In countably normed space of smooth functions with values in a Banach space, we consider the operator interface with linear pointwise switching coefficients. This statement is a generalization of the classical operator Riemann boundary value problem. Development of the theory of Riemann operator and related operators is reflected in the well-known monographs by F.D. Gakhov, N.I. Muskhelishvili, I.N. Vekua, M.G. Kreyn, I.Ts. Gohberg, N.Y. Krupnik, I.B. Simonenko, S. Presdorf, A.P. Soldatov and others. Despite this abundance of publications, the Riemann problem with a degenerate coefficients have been studied insufficiently. In particular, there are no criteria of reversibility and construction of inverse operators in the countably normed space, even in the simplest cases. The paper used the method of studying the operator proposed I.B. Simonenko whereby Noether (of invertibility), the operator of Riemann is equivalent to a factorization of its coefficients. The latter is determined by the space in which the operator is considered and class factors. In this regard, the work is introduced and studied the concept of smooth singular factorization of functions with values in a commutative Banach algebras. In addition, the concept of mutual simplicity of functions with values in Banach algebras. Give a description of these concepts in terms of the behavior of the Gelfand transformation. Criteria of of invertibility, and points back to the operator to operator construction of linear conjugation.

Keywords: operator, line, pair, degenerate, factorization, invertibility, criterion, construction.

Введение

Будем пользоваться стандартными обозначениями Z, R, C для множеств целых, вещественных, комплексных чисел соответственно. Введем также следующие подмножества этих множеств: $Z_+ = \{j \in Z : j \geq 0\}, Z_- = Z \setminus Z_+; \Gamma = \{\xi \in C : |\xi| = 1\}; D^+ = \{\xi \in C : |\xi| < 1\}, D^- = C \setminus D^+, D^\pm = D^\pm \cup \Gamma$.

Пусть L – банахово пространство, $m \in Z_+$. Через $W_m(\Gamma, L)$ обозначим множество B -значных функций вида

$$W_m(\Gamma, L) = \left\{ A(\xi) = \sum_j a_j \xi^j : a_j \in L, \sum_j (|j|+1)^m \|a_j\|_{\mathfrak{A}} < \infty \right\}.$$

Будем считать, что в $W_m(\Gamma, L)$ определены поточечные линейные операции, а топология порождается нормой $\left\| \sum_j a_j \xi^j \right\|_m = \sum_j (|j|+1)^m \|a_j\|_{\mathfrak{A}}$. Относительно введенных операций и топологии $W_m(\Gamma, L)$ является банаховым пространством. Положим $W_\infty(\Gamma, L) = \bigcap_{m \in Z_+} W_m(\Gamma, L)$ и введем в $W_\infty(\Gamma, L)$ счетно-нормированную топологию, порождаемую полным монотонным набором норм $\|\bullet\|_m, m \in Z_+$.

Рассмотрим следующие подалгебры топологической алгебры $W_m(\Gamma, L)$:

$$W_m^+(\Gamma, L) = \left\{ \sum_j a_j \xi^j : a_j = 0, j \in Z_- \right\},$$

$$W_m^-(\Gamma, L) = \left\{ \sum_j a_j \xi^j : a_j = 0, j = 1, 2, \dots \right\}, \text{ где}$$

$m \in Z_+ \cup \{\infty\}$. Ясно, что $W^+(\Gamma, L) \cap W^-(\Gamma, L) = L$.

Пусть $P^+ : W_m(\Gamma, L) \rightarrow W_m^+(\Gamma, L)$ – оператор проектирования, действующий по формуле $P^+ \left(\sum_{j \in Z} a_j \xi^j \right) = \sum_{j \in Z_+} a_j \xi^j$. Через P^- обозначим дополнительный к оператору P^+ проектор $P^- = I - P^+$, где I – тождественный оператор, действующий в пространстве $W_m(\Gamma, L)$.

Отметим, что если $L = \mathfrak{A}$ – банахова алгебра с единицей, то $W_m(\Gamma, \mathfrak{A}), m \in Z_+ \cup \{\infty\}$, есть топологическая алгебра относительно поточечных операций и описанной выше топологии с той же единицей. Ясно, что $W_m^\pm(\Gamma, \mathfrak{A})$ есть подалгебры этой алгебры. Очевидно, что если \mathfrak{A} – коммутативная ба-

нахова алгебра (КБА), то и $W_m(\Gamma, \mathfrak{A}), m \in Z_+$, также является КБА.

Пусть L – банахово пространство; $\text{End } L$ – банахова алгебра всех линейных ограниченных операторов, действующих в пространстве $L, I \in \text{End } L$ – тождественный оператор.

В настоящей работе рассматривается оператор линейного сопряжения $R_{a,b} = a(\xi)P^+ + b(\xi)P^- : W_\infty(\Gamma, L) \rightarrow W_\infty(\Gamma, L)$, где $a(\xi), b(\xi) \in W_\infty(\Gamma, \mathfrak{A})$, а $\mathfrak{A} \subseteq \text{End } L$ – банахова алгебра с единицей I .

Оператор $R_{a,b}$ и родственные ему операторы при различных предположениях изучались в огромном количестве оригинальных работ, ссылки на которые можно найти в монографиях [1–11]. Отметим, что наиболее полные результаты для этих операторов получены в банаховых пространствах. Некоторые частные операторы $R_{a,b} : W_\infty(\Gamma, L) \rightarrow W_\infty(\Gamma, L)$ рассмотрены в монографиях [8, 11], где имеются указания на оригинальные работы. Особо отметим результат Б. Зильберманна [12], получившего необходимость критерия нетеровости оператора $R_{a,b}$ в случае $L = C^n$. Однако даже в простейшем случае $L = C$ не указан критерий обратимости оператора $R_{a,b}$ и не построен оператор $(R_{a,b})^{-1}$.

Ниже дается критерий обратимости оператора $R_{a,b} : W_\infty(\Gamma, L) \rightarrow W_\infty(\Gamma, L)$ с поточечно коммутирующими коэффициентами для произвольного пространства L и приводится конструкция обратного оператора.

Вспомогательные результаты

Пусть \mathfrak{MA} – пространство максимальных идеалов КБА $\mathfrak{A}, m \in Z_+$. Для $\chi \in \mathfrak{MA}, \xi_0 \in \Gamma$ и $a(\xi) = \sum_{j \in Z} a_j \xi^j \in W_m(\Gamma, \mathfrak{A})$ построим функционал $\chi_{\xi_0}(a(\xi)) = a(\xi_0, \chi) = \sum_{j \in Z} \chi(a_j) \xi_0^j$. Нетрудно видеть, что χ_{ξ_0} есть линейный ограниченный мультипликативный функционал на КБА $W_m(\Gamma, \mathfrak{A})$. Если $a(\xi) \in W_m^\pm(\Gamma, \mathfrak{A})$, то аналогичным образом функционал χ_{ξ_0} может быть определен для $\chi \in \mathfrak{MA}$ и $\xi_0 \in D^\pm$.

Лемма 1. Пространство максимальных идеалов КБА $W_m(\Gamma, \mathfrak{A})$ имеет вид $\mathfrak{M}W_m(\Gamma, \mathfrak{A}) = \{\chi_{\xi_0} : \xi_0 \in \Gamma, \chi \in \mathfrak{MA}\}$.

Лемма 2. Пространство максимальных идеалов КБА $W_m^\pm(\Gamma, \mathfrak{A})$ имеет вид $\mathfrak{M}W_m^\pm(\Gamma, \mathfrak{A}) = \{\chi_{\xi_0} : \xi_0 \in \overline{D^\pm}, \chi \in \mathfrak{M}\mathfrak{A}\}$.

Следствие 1. Преобразованием Гельфанда элемента $a(\xi) \in W_m(\Gamma, \mathfrak{A})$ ($a(\xi) \in W_m^\pm(\Gamma, \mathfrak{A})$) является функция $a(\xi, \chi) = \sum_{j \in Z} \chi(a_j) \xi^j$, $(\xi, \chi) \in \Gamma \times \mathfrak{M}\mathfrak{A}$ $(\xi, \chi) \in \overline{D^\pm} \times \mathfrak{M}\mathfrak{A}$.

Следствие 2. Элемент $a(\xi) \in W_m(\Gamma, \mathfrak{A})$ ($a(\xi) \in W_m^\pm(\Gamma, \mathfrak{A})$) обратим в $W_m(\Gamma, \mathfrak{A})$ ($W_m^\pm(\Gamma, \mathfrak{A})$) тогда и только тогда, когда его преобразование Гельфанда удовлетворяет условиям $a(\xi, \chi) \neq 0$, $(\xi, \chi) \in \Gamma \times \mathfrak{M}\mathfrak{A}$ $(a(\xi, \chi) \neq 0, (\xi, \chi) \in \Gamma \times \mathfrak{M}\mathfrak{A}; \text{ind } a(\xi, \chi) = 0, \chi \in \mathfrak{M}\mathfrak{A})$.

Лемма 3. Радикал КБА $W_m(\Gamma, \mathfrak{A})$ имеет вид $\text{Rad } W_m(\Gamma, \mathfrak{A}) = \left\{ \sum_j a_j \xi^j \in W_m(\Gamma, \mathfrak{A}) : a_j \in \text{Rad } \mathfrak{A} \forall j \right\}$.

Следствие 3. КБА $W_m(\Gamma, \mathfrak{A})$ полупроста тогда и только тогда, когда КБА \mathfrak{A} является полупростой.

Пусть \mathfrak{A} – КБА с единицей; $a(\xi) \in W_m(\Gamma, \mathfrak{A})$; $m \in Z_+ \cup \{\infty\}$; $\chi \in \mathfrak{M}\mathfrak{A}$. Положим $Z_a(\chi) = \{\xi \in \Gamma : a(\xi, \chi) = 0\}$ и обозначим через $n_a(\chi)$ число нулей функции $a(\xi, \chi)$ с учетом кратностей. Если $n_a(\chi) < \infty$, то для элементов из $W_\infty(\Gamma, \mathfrak{A})$ определен функционал $\kappa_a(\chi) = v.p. \frac{1}{\pi i} \int_\Gamma \frac{a'_\xi(\xi, \chi)}{a(\xi, \chi)} d\xi$, который будем называть сингулярным индексом функции $a(\xi, \chi)$.

Пусть \mathfrak{A} – алгебра. Элементы $a, b \in \mathfrak{A}$ будем называть взаимно простыми слева (справа) в алгебре \mathfrak{A} , если найдутся такие $c, d \in \mathfrak{A}$, что $ac + bd = e$ ($ca + db = e$). Разумеется, в случае коммутативной алгебры понятия взаимной простоты слева и справа совпадают. В этом случае будем говорить о взаимной простоте элементов $a, b \in \mathfrak{A}$.

Лемма 4. Если элементы $a(\xi), b(\xi) \in W_m(\Gamma, \mathfrak{A})$, $m \in Z_+ \cup \{\infty\}$, взаимно просты в алгебре $W_m(\Gamma, \mathfrak{A})$, то для любого $\chi \in \mathfrak{M}\mathfrak{A}$ $Z_a(\chi) \cap Z_b(\chi) = \emptyset$. Если \mathfrak{A} – C^* -алгебра, то последнего условия достаточно

для взаимной простоты элементов $a(\xi), b(\xi)$ в алгебре $W_m(\Gamma, \mathfrak{A})$.

Отметим, что условий леммы 4 достаточно для взаимной простоты элементов не только в случае, когда \mathfrak{A} является C^* -алгеброй, но и для некоторых других алгебр. Например, это свойство имеет место для коммутативных матричных алгебр [11].

Предположим, что пространство максимальных идеалов КБА \mathfrak{A} представимо в виде дизъюнктного объединения конечного числа компонент $\mathfrak{M}\mathfrak{A} = \bigcup_{j=1}^r \mathfrak{M}_j$, а $P_j, j=1, 2, \dots, r$, – набор идемпотентов, соответствующий этому разложению [13].

Определение. Будем говорить, что функция $a(\xi) \in W_\infty(\Gamma, \mathfrak{A})$ допускает вырожденную факторизацию типа «минус» в алгебре $W_\infty(\Gamma, \mathfrak{A})$ с частными индексами $\kappa_j, j=1, 2, \dots, r$, и записывать $a(\xi) \in \text{Fact}_-(\kappa, W_\infty(\Gamma, \mathfrak{A}))$, $\kappa = (\kappa_1, \kappa_2, \dots, \kappa_r)$, если $a(\xi) = a^-(\xi) \sum_{j=1}^r \xi^{\kappa_j} P_j a^+(\xi)$, где $a^+(\xi) \in GW_\infty^+(\Gamma, \mathfrak{A})$, а

$a^-(\xi) \in W_\infty^-(\Gamma, \mathfrak{A})$, при любом фиксированном $\xi_0 \in D^-$, $a^-(\xi_0) \in G\mathfrak{A}$ и, если $(a^-(\xi))^{-1} = \sum_{j \in Z_+} b_j \xi^j$, $\xi \rightarrow \infty$, то $\|b_j\| \leq c(j+1)^m$ для некоторых $c > 0$ и $m \in Z_+$.

Аналогичным образом определяется вырожденная факторизация типа «плюс» в алгебре $W_\infty(\Gamma, \mathfrak{A})$ и вводится обозначение $a(\xi) \in \text{Fact}_+(\kappa, W_\infty(\Gamma, \mathfrak{A}))$. Впрочем, свойство $a(\xi) \in \text{Fact}_+(\kappa, W_\infty(\Gamma, \mathfrak{A}))$ тогда и только тогда, когда $a(\xi^{-1}) \in \text{Fact}_-(\kappa, W_\infty(\Gamma, \mathfrak{A}))$ может быть использовано в качестве определения вырожденной факторизации типа «плюс» в алгебре $W_\infty(\Gamma, \mathfrak{A})$.

Теорема 1. Если $a(\xi) \in \text{Fact}_\pm(\kappa, W_\infty(\Gamma, \mathfrak{A}))$, то:

- 1) при любом фиксированном $\chi \in \mathfrak{M}\mathfrak{A}$ число нулей преобразования Гельфанда факторизируемой функции конечно: $n_a(\chi) < \infty$;
- 2) число нулей, сингулярный индекс и частные индексы факторизации на каждой компоненте связности пространства максимальных идеалов КБА \mathfrak{A} связаны соотношением $n_a(\chi) \pm \kappa_c(a) = 2\kappa_j$, $\chi \in \mathfrak{M}_j, j=1, 2, \dots, r$.

Если КБА \mathfrak{A} такова, что $\|a\| \leq c \max_{\chi \in \mathfrak{M}\mathfrak{A}} |\chi(a)|$, то выполнения условий 1), 2) достаточно для того, чтобы $a(\xi) \in \text{Fact}_{\pm}(\bar{\kappa}, W_{\infty}(\Gamma, \mathfrak{A}))$.

Замечание 1. Если \mathfrak{A} – коммутативная C^* -алгебра, то условия 1), 2) необходимы и достаточны для существования вырожденной факторизации типов «плюс» и «минус», а условие 2) можно рассматривать как средство вычисления частных индексов соответствующей факторизации.

Лемма 5. Пусть $a(\xi) = a_1(\xi)a^+(\xi)$, $b(\xi) = b_1(\xi)b^-(\xi)$, где $a_1(\xi), b_1(\xi) \in W_{\infty}(\Gamma, \mathfrak{A})$, $a^+(\xi) \in W_{\infty}^+(\Gamma, \mathfrak{A})$, $b^-(\xi) \in W_{\infty}^-(\Gamma, \mathfrak{A})$. Тогда имеет место равенство $R_{a,b} = R_{a_1, b_1} R_{a^+, b^-}$.

Обратимость оператора линейного сопряжения

Пусть $\text{End}L$ – банахова алгебра всех линейных ограниченных операторов, действующих в банаховом пространстве L .

Рассмотрим оператор линейного сопряжения $R_{a,b} = a(\xi)P^+ + b(\xi)P^- : W_{\infty}(\Gamma, L) \rightarrow W_{\infty}(\Gamma, L)$, предполагая, что $a(\xi), b(\xi) \in W_{\infty}(\Gamma, \text{End}L)$.

Очевидно, что обратимость оператора $R_{a,b}$ влечет за собой взаимную простоту слева операторов умножения $a(\xi)I, b(\xi)I$ в алгебре $W_{\infty}(\Gamma, \text{End}L)$. Этот простой факт уточняет в случае, когда $\mathfrak{A} \subseteq \text{End}L$ – КБА, следующее утверждение.

Теорема 2. Пусть $a(\xi), b(\xi) \in W_{\infty}(\Gamma, \mathfrak{A})$, где $\mathfrak{A} \subseteq \text{End}L$ – КБА с единицей I . Оператор $R_{a,b} : W_{\infty}(\Gamma, L) \rightarrow W_{\infty}(\Gamma, L)$ обратим тогда и только тогда, когда найдется такая КБА $\tilde{\mathfrak{A}} : \mathfrak{A} \subseteq \tilde{\mathfrak{A}} \subseteq \text{End}L$, что выполнены условия:

1) коэффициенты $a(\xi), b(\xi)$ взаимно просты в алгебре $W_{\infty}(\Gamma, \tilde{\mathfrak{A}})$;

2) найдется вектор $\kappa = (\kappa_1, \kappa_2, \dots, \kappa_r) \in Z^r$ такой, что

$$\begin{aligned} a(\xi) &\in \text{Fact}_{-}(\kappa, W_{\infty}(\Gamma, \tilde{\mathfrak{A}})), \\ b(\xi) &\in \text{Fact}_{+}(\kappa, W_{\infty}(\Gamma, \tilde{\mathfrak{A}})). \end{aligned}$$

Если при этом \mathfrak{A} – C^* -алгебра, то $\tilde{\mathfrak{A}} = \mathfrak{A}$.

Следствие 4. Пусть \mathfrak{A} – C^* -алгебра, $a(\xi), b(\xi) \in W_{\infty}(\Gamma, \mathfrak{A})$. Оператор $R_{a,b} : W_{\infty}(\Gamma, L) \rightarrow W_{\infty}(\Gamma, L)$ обратим тогда и только тогда, когда выполнены условия:

1) для любого $\chi \in \mathfrak{M}\mathfrak{A}$ каждая из функций $a(\xi, \chi), b(\xi, \chi)$ имеет на Γ не более чем конечное множество нулей конечных кратностей;

2) $Z_a(\chi) \cap Z_b(\chi) = \emptyset$, $\chi \in \mathfrak{M}\mathfrak{A}$;

3) $n_a(\chi) + \kappa_c(a) = n_b(\chi) - \kappa_c(b)$, $\chi \in \mathfrak{M}\mathfrak{A}$.

Предположим, что условия теоремы 2 выполнены и $a(\xi) = a^-(\xi) \sum_{j=1}^r \xi^{\kappa_j} P_j a^+(\xi)$, $b(\xi) = b^-(\xi) \sum_{j=1}^r \xi^{\kappa_j} P_j b^+(\xi)$ –

соответствующие факторизации коэффициентов оператора $R_{a,b}$. Тогда, ввиду леммы 5, имеет место

равенство $R_{a,b} = \left(\sum_{j=1}^r \xi^{\kappa_j} P_j \right) R_{a^-, b^+} R_{a^+, b^-}$. Из определения вырожденной факторизации вытекает, что

в этом равенстве операторы $\sum_{j=1}^r \xi^{\kappa_j} P_j, R_{a^+, b^-}$ обратимы, и при этом нетрудно убедиться в том, что

$$\left(\sum_{j=1}^r \xi^{\kappa_j} P_j \right)^{-1} = \sum_{j=1}^r \xi^{-\kappa_j} P_j, \quad \left(R_{a^+, b^-} \right)^{-1} = R_{(a^+)^{-1}, (b^-)^{-1}}.$$

Следовательно, обратимым является и оператор R_{a^-, b^+} . В связи с этим нашей целью является построение оператора $\left(R_{a^-, b^+} \right)^{-1}$.

Проблема заключается в том, что коэффициенты этого оператора $a^-(\xi), b^+(\xi)$, вообще говоря, необратимы в алгебре $W(\Gamma, \mathfrak{A})$. Тем не менее имеет место следующее утверждение.

Теорема 3. Пусть выполнены условия 1), 2) теоремы 2 и $a^-(\xi), b^+(\xi)$ – компоненты соответствующих факторизаций функций $a(\xi), b(\xi)$. Тогда оператор $\left(R_{a^-, b^+} \right)^{-1} = a^+(\xi)P^+ \left(a^+(\xi) \right)^{-1} \left(b^-(\xi) \right)^{-1} I + b^-(\xi)P^- \left(a^+(\xi) \right)^{-1} \left(b^-(\xi) \right)^{-1} I$ ограничен в пространстве $W_{\infty}(\Gamma, L)$ и является обратным к оператору R_{a^-, b^+} .

Замечание 2. Операторы умножения на функции $\left(a^+(\xi) \right)^{-1}, \left(b^-(\xi) \right)^{-1}$, вообще говоря, не определены и (или) не ограничены в пространстве $W_{\infty}(\Gamma, L)$. Слагаемые в выражении для оператора $\left(R_{a^-, b^+} \right)^{-1}$ определяются корректно с использованием условия 1) теоремы 2 [11].

Литература

1. Гахов Ф.Д. Краевые задачи. М., 1977. 640 с.
2. Мухелишвили Н.И. Сингулярные интегральные уравнения. М., 1962. 599 с.

3. Гохберг И.Ц., Фельдман И.А. Уравнения в свертках и проекционные методы их решения. М., 1971. 352 с.

4. Гохберг И.Ц., Крупник Н.Я. Введение в теорию одномерных сингулярных интегральных операторов. Кишинев, 1973. 426 с.

5. Малышев В.А. Случайные блуждания. Уравнения Винера – Хопфа. Автоморфизмы Галуа. М., 1970. 201 с.

6. Крупник Н.Я. Банаховы алгебры с символом и сингулярные интегральные операторы. Кишинев, 1984. 138 с.

7. Монахов В.Н. Краевые задачи со свободными границами для эллиптических систем уравнений. Новосибирск, 1977. 424 с.

8. Пресдорф З. Некоторые классы сингулярных уравнений. М., 1979. 493 с.

9. Солдатов А.П. Одномерные сингулярные операторы и краевые задачи теории функций. М., 1991. 207 с.

10. Симоненко И.Б. Локальный метод в теории инвариантных относительно сдвига операторов и их огибающих. Ростов н/Д., 2007. 120 с.

11. Пасенчук А.Э. Дискретные операторы типа свертки в классах последовательностей со степенным характером поведения на бесконечности. Ростов н/Д., 2013. 280 с.

12. Зильберманн Б.О. сингулярных операторах в пространствах бесконечно дифференцируемых и обобщенных функций // Мат. исследования. 1971. Т. 6, № 3. С. 168–179.

13. Шилов Г.Е. О разложении коммутативного нормированного кольца в прямую сумму идеалов // Мат. сб. 1953. Вып. 32. С. 353–364.

References

1. Gakhov F.D. *Kraevye zadachi* [Boundary-value problems]. Moscow, 1977, 640 p.

2. Muskhelishvili N.I. *Singulyarnye integral'nye uravneniya* [Singular integral equations]. Moscow, 1962, 599 p.

3. Gokhberg I.Ts., Fel'dman I.A. *Uravneniya v svertkakh i proektsionnye metody ikh resheniya* [Convolution equations and projection methods for their solution].

Moscow, 1971, 352 p.

4. Gokhberg I.Ts., Krupnik N.Ya. *Vvedenie v teoriyu odnomernykh singulyarnykh integral'nykh operatorov* [Introduction to the theory of one-dimensional singular integral operators]. Chisinau, 1973, 426 p.

5. Malyshev V.A. *Sluchainye bluzhdaniya. Uravneniya Vinera - Khopfa. Avtomorfizmy Galua* [Random walks. The Wiener-Hopf equations. Galois automorphisms]. Moscow, 1970, 201 p.

6. Krupnik N.Ya. *Banakhovy algebrы s simvolom i singulyarnye integral'nye operatory* [Banach algebras with symbol and singular integral operators]. Chisinau, 1984, 138 p.

7. Monakhov V.N. *Kraevye zadachi so svobodnymi granitsami dlya ellipticheskikh sistem uravnenii* [Boundary value problems with free boundaries for elliptic systems of equations]. Novosibirsk, 1977, 424 p.

8. Presdorf Z. *Nekotorye klassy singulyarnykh uravnenii* [Some classes of singular equations]. Moscow, 1979, 493 p.

9. Soldatov A.P. *Odnomernye singulyarnye operatory i kraevye zadachi teorii funktsii* [One-dimensional singular operators and boundary value problems of function theory]. Moscow, 1991, 207 p.

10. Simonenko I.B. *Lokal'nyi metod v teorii invariantnykh otositel'no sdviga operatorov i ikh ogibayushchikh* [Local method in the theory of operators invariant with respect to translation and their envelopes]. Rostov-on-Don, 2007, 120 p.

11. Pasenchuk A.E. *Diskretnye operatory tipa svertki v klassakh posledovatel'nostei so stepennym kharakterom povedeniya na beskonechnosti* [Discrete operators of convolution type in classes of sequences with power-law behavior at infinity]. Rostov-on-Don, 2013, 280 p.

12. Zil'bermann B. O singulyarnykh operatorakh v prostranstvakh beskonechno differentsiruemykh i obobshchennykh funktsii [On singular operators in spaces of infinitely differentiable and generalized functions]. *Mat. issledovaniya*. 1971, vol. 6, No. 3, pp. 168-179.

13. Shilov G.E. O razlozhenii kommutativnogo normirovannogo kol'tsa v pryamuyu summu idealov [On the decomposition of a commutative normed ring into a direct sum of ideals]. *Mat. sb.* 1953, iss. 32, pp. 353-364.

УДК 004.4'42

DOI 10.18522/0321-3005-2017-1-52-58

КЛАССИФИКАЦИЯ ПРОГРАММНЫХ ЦИКЛОВ С ОДНИМ ОПЕРАТОРОМ ПРИСВАИВАНИЯ*

© 2017 г. О.Б. Штейнберг

CLASSIFICATION OF A PROGRAMMING LOOPS WITH ONE ASSIGNMENT STATEMENT

O.B. Steinberg

Штейнберг Олег Борисович – Южный федеральный университет, Институт математики, механики и компьютерных наук им. И.И. Воровича, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, ул. Милчакова, 8а, г. Ростов-на-Дону, 344090, Россия, e-mail: olegsteinb@gmail.com

Oleg B. Steinberg – Southern Federal University, Vorovich Institute of Mathematics, Mechanics and Computer Science, Candidate of Physics and Mathematics, Senior Researcher, Milchakova St., 8a, Rostov-on-Don, 344090, Russia, e-mail: olegsteinb@gmail.com

Важным требованием к работе программы является быстрдействие. Для его достижения создаются различные компьютерные архитектуры, в большинстве своем – параллельные. Но для того чтобы использовать потенциал параллельной архитектуры, к последовательным программам применяются распараллеливающие преобразования. Особое внимание уделяется программным циклам – небольшим по количеству текста участкам программы, требующим большого объема вычислений. Некоторые циклы могут хорошо параллельно выполняться на одной архитектуре и при этом быть пригодными лишь для последовательного исполнения на другой. Ранее Л. Лэмпорт и М. Вольфом были описаны классификации способов параллельных выполнений циклов. При этом основными видами параллельных архитектур являются SIMD и MIMD. В данной статье предлагается классификация циклов, в основе которой лежит граф информационных связей. Вершинами этого графа являются вхождения переменных, а дуги связывают две вершины в случае наличия между соответствующими вхождениями информационной зависимости. Далее устанавливается соответствие этих классов известным видам параллельных выполнений циклов. Некоторым классам соответствуют рекуррентные циклы, для распараллеливания которых могут быть использованы соответствующие специальные вспомогательные алгоритмы. Полученная классификация может быть использована, например, при создании распараллеливающих компиляторов.

Ключевые слова: параллельные вычисления, разбиение цикла, граф зависимости.

To use the potential of parallel architectures one should apply parallelizing transformations to serial programs. When program is being parallelized most of attention is focused on programming loops. They are small code fragments, which demand a huge amount of computations. Some loops are well executed in parallel on a single architecture and at the same time be suitable only for sequential execution on another. L. Lamport and M. Wolfe described the methods classifications of loops parallel execution earlier. It should be noted that the main types of parallel architectures are SIMD and MIMD. A classification of programming loops, which is based on the dependence graph, is proposed in this paper. The vertices of this graph are the occurrences of variables and the edges connect two vertices in the case of information dependence between the respective occurrences are exist. Further, a match of these classes to known types of loops parallel executions is described also. Some classes correspond to recurrent loops, which can be parallelized using special auxiliary algorithms. The resulting classification can be used, for example, when you create a parallelizing compilers.

Keywords: parallel computations, loop distribution, dependence graph.

Введение

При распараллеливании программ особое внимание уделяется циклам. Некоторые из них могут хорошо параллельно выполняться на одной архитектуре и при этом быть пригодными лишь для последовательного исполнения на другой. Поэтому в различных работах предпринимались попытки описать различные схемы параллельного выполнения циклов [1–3]. В данной статье предлагается новая классификация стандартных циклов (например,

цикла for языка С или цикл DO языка Fortran). В основе приведенной классификации лежит граф информационных связей. Циклы делятся на различные типы исходя из того, какие зависимости в них присутствуют.

Иногда распараллеливание циклов, в теле которых много операторов присваивания, с помощью преобразования «разбиение цикла» [4, 5] можно свести к распараллеливанию циклов, в теле которых мало операторов. Поэтому интересен вопрос о распараллеливании циклов, не допускающих раз-

* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-31-60055 мол_а_дк.

бления, в частности, с одним оператором присваивания. Этот вопрос рассмотрен в данной статье. Понятие «распараллеливание цикла» неоднозначно. Оно может толковаться по-разному. Рассматриваются разные виды параллельного выполнения циклов. Показано, что для циклов с одним оператором присваивания не любые комбинации информационных зависимостей возможны.

Используемые понятия

В данной статье будут рассматриваться циклы

```
for(i = M; i<N; i++)  
{  
  LoopBody(i);  
}
```

содержащие счетчик (i), верхнюю (N) и нижнюю (M) границу. При этом $N-M>0$.

Считается, что переменные с разными именами не обращаются к одной и той же ячейке памяти (т.е. нет алиасов). Еще присутствует ограничение на индексные выражения вхождений массивов: они должны аффинно зависеть от счетчика цикла.

Определение 1. Вхождение переменной (occurrence) – это имя переменной в совокупности с тем местом в программе, в котором эта переменная появилась. Всякому вхождению (а для массивов – при конкретном значении индексного выражения) соответствует обращение к некоторой ячейке памяти. Если при обращении к ячейке памяти происходило чтение, то такое вхождение называется использованием (in), а если запись – генератором (out).

Определение 2. Говорят, что два вхождения порождают информационную зависимость (information dependence), если они обращаются к одной и той же ячейке памяти. От того, какого типа вхождения образуют дугу зависимости, дуги подразделяются на четыре типа: 1) если оба вхождения являются генераторами (out→out), зависимость называется выходной (output); 2) если вхождение, обращающееся первым к общей ячейке памяти, является генератором, а второе – использованием (out→in), зависимость называется потоковой или истинной (flow or true); 3) если вхождение, обращающееся первым к общей ячейке памяти, является использованием, а второе – генератором (in→out), зависимость называется антизависимостью (antidependence); 4) если оба вхождения являются использованиями (in→in), зависимость называется входной (input).

Определение 3. Информационная зависимость между вхождениями называется циклически независимой (loop independent dependence), если эти вхождения обращаются к одной и той же ячейке

памяти на одной и той же итерации цикла. Иначе зависимость называется циклически порожденной (loop carried dependence) [6, с. 96; 7, с. 14].

Пример 1. Рассмотрим цикл, содержащий циклически порожденные зависимости:

```
for (i = 0; i<N; i++)  
{  
  X[i] = X[i-1] + Y;  
  Y = I*2;  
}
```

В данном цикле оба вхождения массива X и оба вхождения переменной Y образуют циклически порожденные истинные информационные зависимости. Они возникают потому, что первое вхождение массива X и второе вхождение переменной Y на итерации k обращаются к тем же ячейкам памяти, что и второе вхождение массива X и первое вхождение переменной Y на итерации $k+1$, где $0 \leq k < N-1$. При этом вхождения переменной Y образуют еще и циклически независимую антизависимость.

Определение 4. В решении задачи преобразования программ ключевую роль играет граф информационных связей (dependence graph) [7–11]. Его вершинами являются вхождения переменных. Дуга (i, j) идет из i -й вершины в j -ю, если вхождения, соответствующие этим вершинам, порождают истинную, выходную или антизависимость. При этом к одной и той же ячейке памяти сначала обращается вхождение, соответствующее i -й вершине, а затем – j -й.

Иногда определение того, существует ли информационная зависимость между парой вхождений, оказывается сложной задачей. При преобразованиях программ в таких случаях предполагают худшее. То есть считают, что такая зависимость существует. На графе информационных связей такие вершины соединяют дугой.

Определение 5. Зависимость будем называть неопределенной, если на момент построения графа информационных связей нет возможности определить, обращаются ли два вхождения к одной и той же ячейке памяти, или если обращаются, то какое из вхождений было раньше.

Пример 2. Рассмотрим следующий цикл, содержащий вхождения массива, возможно, порождающие информационную зависимость:

```
for(i = 0; i<N; i++)  
{  
  X[i] = B[i] + 8;  
  C = X[i+k] + B[i];  
}
```

В данном примере на этапе компиляции неизвестно, будет ли присутствовать дуга информационной зависимости, связывающая вхождения массива X . Действительно, если, например, $k = -1$, то при-

сутствует дуга истинной зависимости, если $k = 1$ – антизависимости. Если $k = N$, то дуги зависимости вообще нет.

Немаловажную роль в процессе распараллеливания программ играет преобразование «разбиение цикла».

Суть разбиения цикла (loop distribution) состоит в том, чтобы заменить цикл, в теле которого много операторов, на эквивалентный фрагмент программы из нескольких циклов, в телах которых меньше операторов [5].

Способы параллельного выполнения циклов

Классификация циклов, описанная Лэмпортом.

Основными видами параллельных архитектур являются MIMD (many instructions, multiple data) и SIMD (single instructions, multiple data).

Распараллеливание на данные виды архитектур описано в 1974 г. в работе Л. Лэмпорта [1], который рассматривает параллельное выполнение программных циклов языка Fortran. Под распараллеливанием циклов понимается одновременное выполнение его итераций. В работе предложено два способа параллельного выполнения цикла: DoConc (Conc – сокращение от Concurrently) и DoSim (Sim – сокращение от Simultaneously).

Для первого способа выполнения цикла используется обозначение:

```
DO 99 CONC FOR ALL I ∈ S
99 LoopBody(I)
```

При таком выполнении цикла его тело для всех итераций исполняется независимо различными вычислительными устройствами (например, ядрами процессора). Это соответствует современному выполнению на MIMD-архитектуре, в частности, на многоядерных процессорах или высокопроизводительных кластерах. Одним из необходимых условий MIMD-выполнения является отсутствие в теле цикла циклически порожденных зависимостей.

Для второго способа выполнения цикла используется обозначение:

```
DO 99 SIM FOR ALL I ∈ S
99 LoopBody(I)
```

При таком выполнении цикла все инструкции тела цикла выполняются в порядке следования. При этом каждая инструкция выполняется сразу для всех итераций одновременно. SIMD-выполнению циклов соответствует выполнение на SIMD-архитектуре, в частности, на SIMD-устройствах современных процессоров, поддерживающих векторные команды. К успешным компьютерам прошлых лет с архитектурой SIMD относятся ILLIAC IV, Cray 1 и отечественный суперкомпьютер ПС-

2000. SIMD-выполнение используется в современных графических ускорителях [12]. Для корректного SIMD-выполнения цикла необходимо, чтобы в теле цикла были только операторы присваивания и не было дуг графа информационных связей, идущих снизу вверх или слева направо. Следует отметить, что такие дуги могут быть только циклически порожденными.

Пример 3. Цикл, содержащий дугу, идущую снизу вверх.

```
for(i = 0; i < N; i++)
{
  A[i] = B[i] + C[i];
  D[i] = E[i]*A[i+1];
}
```

Дуга снизу вверх связывает два вхождения переменной A.

Пример 4. Цикл, содержащий дугу, идущую снизу вверх.

```
for(i = 0; i < N; i++)
{
  A[i] = B[i] + A[i-1]*C[i];
}
```

Дуга слева направо связывает два вхождения переменной A.

В настоящее время многие вычислительные системы имеют гибридные архитектуры, поддерживая и MIMD- и SIMD-параллельные вычисления.

Для циклов, которые непосредственно не допускают параллельного выполнения, Л. Лэмпортом разработаны преобразования, которые могут привести к циклам, допускающим параллельное выполнение: методы гиперплоскостей и координат. Стоит отметить, что у Л. Лэмпорта было рассмотрено понятие информационной зависимости, но не было понятия графа информационных связей.

Классификация циклов, описанная Вольфом.

В [2] М. Вольф предлагает более обширную классификацию параллельных выполнений циклов, чем это сделал в своих работах Л. Лэмпорт. При этом М. Вольф, как и Л. Лэмпорт, не дает четкого определения, например, тому, что может содержаться в телах описываемых параллельных циклов. В целом речь идет о циклах, содержащих только операторы присваивания.

Первым из описываемых типов является forall, который соответствует DoSim из классификации Л. Лэмпорта.

Вторым – dpar, соответствующий DoConc Л. Лэмпорта.

Также описывается doall, который является частным случаем dpar, возникающим при отсутствии циклически порожденных зависимостей. Но М. Вольф не считает doall отдельным типом.

Далее упоминается doacross, который М. Вольф причисляет к параллельному типу выполнения цикла. Doacross-выполнение состоит в том, что группа итераций выполняется на нескольких процессорах. При этом исполнение одних итераций зависит от результата выполнения других. Стоит отметить, что в некоторых других источниках [3] этот термин используется именно для описания параллельно выполняемых циклов. В частности, к такому виду циклов можно отнести следующий:

```
for (i = 0; i < N; i++)  
{  
    X[i] = X[i-4]*A[i] + B[i];  
}
```

где параллельно можно выполнять по четыре подряд идущие итерации.

Приводится и третий тип dosingle, для которого должно выполняться правило однократного присваивания. Этот тип параллельного выполнения подразумевает, что все использования переменной или элемента массива должны извлекать значение, уже присвоенное данной ячейке памяти. Четкого описания последовательности действий, необходимой для параллельного выполнения цикла dosingle, М. Вольфом не приводится. Ввиду этого и строгости условий на циклы применение данного типа распараллеливания на практике не используется.

Классификация циклов, содержащих один оператор

Приведем классификацию циклов, в теле которых присутствует лишь один оператор, который является оператором присваивания. Классификация основана на наличии или отсутствии в этом операторе каких-либо видов информационных зависимостей.

Определение 6. Под Loop_k будем понимать множество всех циклов, содержащих k операторов, которые являются операторами присваивания, не содержащими вызовов функций.

Определение 7. Классом $\text{Loop}(\text{None})$ будем называть множество всех циклов, не содержащих антизависимостей, а также выходных и потоковых зависимостей.

Определение 8. Классом $\text{Loop}(\text{Unknown})$ будем называть множество всех циклов, в которых присутствуют неопределенные зависимости.

Для других классов циклов будем использовать обозначение $\text{Loop}(\dots)$, где в скобках через запятую будут указываться типы присутствующих или отсутствующих зависимостей. Например, $\text{Loop}(\bar{A}, O, F)$

описывает множество циклов в которых нет антизависимостей, зато присутствуют входные и потоковые зависимости.

Теорема 1. Не существует циклов из множества Loop_1 , в которых присутствуют дуги выходной и потоковой зависимостей, а дуг антизависимости нет.

Доказательство. Рассмотрим произвольный цикл, принадлежащий множеству Loop_1 , содержащий выходную зависимость. Так как она образуется генераторами, а он во всех циклах рассматриваемого множества всего один, то получаем, что выходная зависимость является циклически порожденной и образуется генератором, расположенным в левой части единственного оператора присваивания.

Возникают два варианта: генератор зависит от счетчика цикла; генератор не зависит от счетчика цикла.

Вариант 1. Рассмотрим случай одномерного массива. Ввиду условия аффинной зависимости индексных выражений получаем, что индексное выражение генератора имеет вид $a*i+b$ (где a, b – целые, i – счетчик цикла). Стоит отметить, что $a \neq 0$, иначе генератор бы не зависел от счетчика цикла, что относится к варианту 2.

```
for(i = 0; i < N; i++)  
{  
    X[a*i+b] = ... ;  
}
```

Обозначим через i_1 и i_2 две разные итерации, на которых генератор обращается к одной и той же ячейке памяти. В этом случае его индексные выражения будут равны $a*i_1+b = a*i_2+b$. Отсюда получаем $i_1=i_2$, что приводит к противоречию.

В случае многомерного массива следует взять первую размерность, в которой присутствует счетчик цикла с ненулевым коэффициентом. После чего доказательство повторяет случай одномерного массива.

Таким образом, получаем, что вариант 1 невозможен.

Вариант 2. Для того чтобы присутствовала потоковая зависимость, необходимо наличие использования той же переменной, что и генератор.

```
for(i = 0; i < N; i++)  
{  
    X = ... X... ;  
}
```

Но в этом случае цикл будет принадлежать множеству $\text{Loop}(A, O, F)$.

Пример 5. Цикл, содержащий выходную зависимость, образованную вхождением индексной переменной.

```
for(i = 0; i < N; i++)
{
    A[i mod 2] = B[i] + C[i] * D[i];
}
```

Такая зависимость возникла ввиду отсутствия ограничения на аффинность индексных выражений.

Теорема 2. Не существует циклов из множества $Loop_1$, в которых присутствуют дуги выходной и антизависимости, а дуг потоковой зависимости нет.

Доказательство. Доказательство теоремы строится по аналогии с доказательством теоремы 1.

Теорема 3. Множества циклов $Loop(\text{None})$, $Loop(\bar{A}, O, \bar{F})$, $Loop(A, \bar{O}, \bar{F})$, $Loop(\bar{A}, \bar{O}, F)$, $Loop(A, O, F)$, $Loop(A, \bar{O}, F)$ и $Loop(\text{Unknown})$ не пересекаются.

Доказательство. Доказательство данной теоремы вытекает из определений соответствующих классов.

Теорема 4. Если цикл принадлежит множеству циклов $Loop_1$, то он относится к одному из классов: $Loop(\text{None})$, $Loop(\text{Unknown})$, $Loop(\bar{A}, O, \bar{F})$, $Loop(A, \bar{O}, \bar{F})$, $Loop(\bar{A}, \bar{O}, F)$, $Loop(A, \bar{O}, F)$ или $Loop(A, O, F)$.

Доказательство. Рассмотрим произвольный цикл.

```
for(i = 0; i < N; i++)
{
    ... = ... ;
}
```

Если в нем не присутствует ни одной зависимости, то он принадлежит множеству циклов $Loop(\text{None})$ и не принадлежит ни одному другому из рассматриваемых в теореме множеств.

Если в нем присутствует неопределенная зависимость, то он принадлежит множеству циклов $Loop(\text{Unknown})$ и не принадлежит ни одному другому из рассматриваемых в теореме множеств.

Нерассмотренными остались только циклы, в которых есть информационные зависимости и при этом нет неопределенных зависимостей. Эти циклы принадлежат оставшимся непересекающимся множествам $Loop(\bar{A}, O, \bar{F})$, $Loop(A, \bar{O}, \bar{F})$, $Loop(\bar{A}, \bar{O}, F)$, $Loop(A, \bar{O}, F)$ и $Loop(A, O, F)$.

Способы распараллеливания циклов, принадлежащих $Loop_1$

В данном разделе будут рассматриваться только циклы, принадлежащие $Loop_1$. При этом для каж-

дого класса будет рассмотрена возможность параллельного выполнения принадлежащих ему циклов.

$Loop_1(\text{None})$.

Циклы, принадлежащие $Loop_1(\text{None})$, пригодны как для SIMD-выполнения, так и MIMD-выполнения ввиду отсутствия каких-либо зависимостей.

$Loop_1(\bar{A}, O, \bar{F})$.

Цикл, принадлежащий $Loop_1(\bar{A}, O, \bar{F})$, можно заменить на оператор присваивания, являющийся телом цикла, при этом вместо счетчика цикла следует поставить его последнее значение.

Пример 6. Цикл, принадлежащий $Loop_1(\bar{A}, O, \bar{F})$,

```
for(i = 0; i < N; i++)
{
    A = B[i] + C[i];
}
```

может быть заменен одним оператором (считается, что значение счетчика цикла не используется за его пределами)

$A = B[N-1] + C[N-1];$
 $Loop_1(\bar{A}, \bar{O}, F)$.

Циклы, принадлежащие $Loop_1(\bar{A}, \bar{O}, F)$, непригодны ни для SIMD-выполнения, ни для MIMD-выполнения ввиду присутствия циклически порожденной зависимости, идущей слева направо. При этом в случаях, когда зависимость является аффинной или дробно-линейной, к циклу можно применить распараллеливающие преобразования, описанные в [13, 14].

$Loop_1(\text{Unknown})$.

Циклы, принадлежащие $Loop_1(\text{Unknown})$, непригодны ни для SIMD-выполнения ни для MIMD-выполнения ввиду того, что зависимость может оказаться потоковой.

$Loop_1(A, \bar{O}, F)$.

Циклы, принадлежащие $Loop_1(A, \bar{O}, F)$, непригодны ни для SIMD-выполнения, ни для MIMD-выполнения ввиду присутствия циклически порожденной зависимости, идущей слева направо.

$Loop_1(A, O, F)$.

Циклы, принадлежащие $Loop_1(A, O, F)$, непригодны ни для SIMD-выполнения, ни для MIMD-выполнения ввиду присутствия циклически порожденной зависимости, идущей слева направо.

$Loop_1(A, \bar{O}, \bar{F})$.

Циклы, принадлежащие $Loop_1(A, \bar{O}, \bar{F})$, пригодны для SIMD-выполнения, MIMD-выполнение может привести к некорректному результату, так как итерации выполняются не в порядке следования.

Пример 7. Рассмотрим цикл, принадлежащий классу $\text{Loop}_1(A, \bar{O}, \bar{F})$.

```
for(i = 0; i < N; i++)  
{  
  A[i] = B[i] + A[i+1]*D[i];  
}
```

Если при MIMD-выполнении запись в ячейку A [3] на итерации 3 будет выполнена раньше, чем чтение из A [3] на итерации 2, то при выполнении итерации 2 будет использоваться неверное (новое) значение A [3].

Заключение

Из всех циклов, тело которых содержит более одного оператора присваивания на предмет распараллеливания, следует рассматривать неразбиваемые. Иначе, на предмет распараллеливания нужно проверять циклы, получаемые в результате разбиения.

Следует отметить, что если в теле цикла присутствует условный оператор, то цикл непригоден для SIMD-вычисления.

Циклы, принадлежащие классу $\text{Loop}(\text{None})$, пригодны как для SIMD-выполнения, так и MIMD-выполнения ввиду отсутствия каких-либо зависимостей.

Некоторые циклы, которые в данной статье отнесены к нераспараллеливаемым как для SIMD-выполнения, так и MIMD-выполнения, на самом деле имеют перспективу аппаратной поддержки ускорения на других архитектурах, например, конвейерных. В последние годы набирают популярность системы на кристалле, сочетающие универсальные вычислительные ядра и программируемый ускоритель (<http://www.xilinx.com/>). Ведутся работы по созданию компиляторов с высокоуровневых языков на такие программируемые архитектуры [15]. Приведенная в данной статье классификация может быть использована в таких компиляторах, которые должны иметь библиотеку описаний электронных схем, соответствующих представленным в статье классам циклов.

Литература

1. Lamport L. The parallel execution of DO loops // Commun. ACM. 1974. Vol. 17, № 2. P. 83–93.
2. Wolfe M. High performance compilers for parallel computing. Redwood City, 1996. 570 p.
3. Duo Liu, Yi Wang, Zili Shao, MinyiGuo, Jingling Xue Optimally Maximizing Iteration-Level Loop Parallelism // IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems (TPDS). 2012. Vol. 23, № 3. P. 564–572.

4. Allen R., Kennedy K. Optimizing compilers for modern architectures. San Francisco; San Diego; New York; Boston; London; Sidney; Tokyo, 2002. 790 p.

5. Штейнберг О.Б. Минимизация количества временных массивов в задаче разбиения циклов // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2011. № 5. С. 31–35.

6. Векторизация программ // Векторизация программ: теория, методы, реализация: сб. переводов ст. М., 1991. С. 246–267.

7. Штейнберг Б.Я. Математические методы распараллеливания рекуррентных программных циклов на суперкомпьютеры с параллельной памятью. Ростов н/Д., 2004, 192 с.

8. Араббаев Р.Н. Анализ зависимостей по данным: тесты на зависимость и стратегии тестирования : дис. ... канд. физ.-мат. наук. Новосибирск, 2008. 116 с.

9. Бабичев А.В., Лебедев В.Г. Распараллеливание программных циклов // Программирование. 1983. № 5. С. 52–63.

10. Шульженко А.М. Исследование информационных зависимостей программ для анализа распараллеливающих преобразований : дис. ... канд. техн. наук. Ростов н/Д., 2006. 200 с.

11. Шульженко А.М. Автоматическое определение циклов ParDo в программе // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2011. Приложение. № 5. С. 77–88.

12. Линева А.В., Боголюбов Д.К., Бастраков С.И. Технологии параллельного программирования для процессоров новых архитектур: учебник / под ред. В.П. Гергея. М., 2010. 160 с.

13. Штейнберг О.Б. Распараллеливание рекуррентных циклов с нерегулярным вычислением суперпозиций // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2009. № 2. С. 18–21.

14. Штейнберг О.Б., Суховерхов С.Е. Автоматическое распараллеливание рекуррентных циклов с проверкой устойчивости // Информационные технологии. 2010. № 1. С. 40–45.

15. Steinberg B.Y., Dubrov D.V., Mikhailuts Y.V., Roshal A.S., Steinberg R.B. Automatic High-Level Programs Mapping onto Programmable Architectures // Proceedings of the 13th International Conference on Parallel Computing Technologies, August 31 – September 4, 2015. Petrozavodsk, 2015. Vol. 9251. P. 474–485.

References

1. Lamport L. The parallel execution of DO loops. Commun. ACM. 1974, vol. 17, No. 2, pp. 83-93.
2. Wolfe M. High performance compilers for parallel computing. Redwood City, 1996, 570 p.
3. Duo Liu, Yi Wang, Zili Shao, MinyiGuo, and Jingling Xue. Optimally Maximizing Iteration-Level Loop

Parallelism. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems (TPDS)*. 2012, vol. 23, No. 3, pp. 564-572.

4. Allen R., Kennedy K. *Optimizing compilers for modern architectures*. San Francisco, San Diego, New York, Boston, London, Sidney, Tokyo, 2002, 790 p.

5. Shteinberg O.B. Minimizatsiya kolichestva vremennykh massivov v zadache razbieniya tsiklov [Minimizing the number of temporary arrays in the task of partitioning cycles]. *Izv. vuzov. Sev.-Kavk. region. Estestv. nauki*. 2011, No. 5, pp. 31-35.

6. [Vectorization of programs]. *Vektorizatsiya programm: teoriya, metody, realizatsiya* [Vectorization of programs: theory, methods, implementation]. Collection of translations of articles. Moscow, 1991, pp. 246-267.

7. Shteinberg B.Ya. *Matematicheskie metody rasparallelivaniya rekurrentnykh programmnykh tsiklov na superkomp'yutery s parallel'noi pamyat'yu* [Mathematical methods for parallelizing recurrent program cycles on supercomputers with parallel memory]. Rostov-on-Don, 2004, 192 p.

8. Arapbaev R.N. *Analiz zavisimosti po dannym: testy na zavisimost' i strategii testirovaniya* : dis. ... kand. fiz.-mat. nauk [Analysis of data dependencies: dependency tests and testing strategies]. Novosibirsk, 2008, 116 p.

9. Babichev A.V., Lebedev V.G. Rasparallelivanie programmnykh tsiklov [Parallelization of program cycles]. *Programmirovaniye*. 1983, No. 5, pp. 52-63.

10. Shul'zhenko A.M. *Issledovanie informatsionnykh zavisimosti programm dlya analiza rasparallelivayu-*

shchikh preobrazovaniy : dis. ... kand. tekhn. nauk [Investigation of information dependencies of programs for analysis of parallelizing transformations]. Rostov-on-Don, 2006, 200 p.

11. Shul'zhenko A.M. Avtomaticheskoe opredelenie tsiklov ParDo v programme [The automatic detection of ParDo cycles in a program]. *Izv. vuzov. Sev.-Kavk. region. Estestv. nauki*. 2011, suppl. No. 5, pp. 77-88.

12. Linev A.V., Bogolyubov D.K., Bastrakov S.I. *Tekhnologii parallel'nogo programmirovaniya dlya protsessorov novykh arkhitektur* [Technologies of parallel programming for processors of new architectures]. Textbook. Ed. V.P. Gergel. Moscow, 2010, 160 p.

13. Shteinberg O.B. Rasparallelivanie rekurrentnykh tsiklov s neregulyarnym vychisleniem superpozitsii [Parallelization of recurrent cycles with an irregular computation of superpositions]. *Izv. vuzov. Sev.-Kavk. region. Estestv. nauki*. 2009, No. 2, pp. 18-21.

14. Shteinberg O.B., Sukhoverkhov S.E. Avtomaticheskoe rasparallelivanie rekurrentnykh tsiklov s proverkoj ustoychivosti [Automatic parallelization of recurrent cycles with stability testing]. *Informatsionnye tekhnologii*. 2010, No. 1, pp. 40-45.

15. Steinberg B.Y., Dubrov D.V., Mikhailuts Y.V., Roshal A.S., Steinberg R.B. Automatic High-Level Programs Mapping onto Programmable Architectures. Proceedings of the 13th International Conference on Parallel Computing Technologies, August 31 – September 4, 2015. Petrozavodsk, 2015, vol. 9251, pp. 474-485.

БИОЛОГИЧЕСКИЕ НАУКИ

BIOLOGICAL SCIENCE

УДК 577.344+577.359+537.86.029+615.8

DOI 10.18522/0321-3005-2017-1-59-66

БИОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПРИМЕНЕНИЯ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В КОРРЕКЦИИ ЭКОЛОГИЧЕСКИ ОБУСЛОВЛЕННЫХ ПАТОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

© 2017 г. В.В. Жуков, А.А. Кожин, В.В. Мрыхин, В.А. Попова

BIOLOGICAL ASPECTS FOR APPLICATION OF LASER RADIATION WHEN MANAGING ECOLOGICALLY DETERMINED PATHOLOGICAL PROCESSES

V.V. Zhukov, A.A. Kozhin, V.V. Mrykhin, V.A. Popova

Жуков Владимир Валентинович – Южный федеральный университет, кандидат физико-математических наук, доцент, кафедра квантовой радиофизики, физический факультет, ул. Зорге, 5, г. Ростов н/Д, 344090, Россия, e-mail: zhukov@sfedu.ru

Vladimir V. Zhukov – Southern Federal University, Candidate of Physics and Mathematics, Associate Professor, Quantum Radiophysics Department, Faculty of Physics, Zorge St., 5, Rostov-on-Don, 34409, Russia, e-mail: zhukov@sfedu.ru

Кожин Александр Алексеевич – Ростовский научно-исследовательский институт акушерства и педиатрии, доктор медицинских наук, профессор, ведущий научный сотрудник, отдел медико-биологических проблем, ул. Мечникова, 43, г. Ростов н/Д, 344012, Россия, e-mail: kozhin.1945@mail.ru

Aleksandr A. Kozhin – Rostov Research Institute of Obstetrics and Pediatrics, Doctor of Medicine, Professor, Leading Researcher, Department of Bio-Medical Problems, Mechnikova St., 43, Rostov-on-Don, 344012, Russia, e-mail: kozhin.1945@mail.ru

Мрыхин Владимир Валерьевич – Ростовский государственный медицинский университет, кандидат медицинских наук, доцент, кафедра психиатрии и наркологии, факультет повышения квалификации и профессиональной переподготовки специалистов, ул. Суворова, 119, г. Ростов н/Д, 344022; Россия, e-mail: 2793665@mail.ru

Vladimir V. Mrykhin – Rostov State Medical University, Candidate of Medicine, Associate Professor, Department of Psychiatry and Narcology, Faculty of Professional Development and Professional Retraining of Experts, Suvarova St., 119, Rostov-on-Don, 344022, Russia, e-mail: 2793665@mail.ru

Попова Виктория Александровна – Ростовский научно-исследовательский институт акушерства и педиатрии, доктор медицинских наук, главный научный сотрудник, педиатрический отдел, ул. Мечникова, 43, г. Ростов н/Д, 344012, Россия, e-mail: Nataly-zar@mail.ru

Viktoria A. Popova – Rostov Research Institute of Obstetrics and Pediatrics, Doctor of Medicine, Main Researcher, Department of Obstetrics, Mechnikova St., 43, Rostov-on-Don, 344012, Russia, e-mail: Nataly-zar@mail.ru

Цель: обзор и анализ собственных оригинальных исследований по изучению особенностей биологической активности низкоинтенсивного лазерного излучения (НИЛИ), приходящегося на фиолетовую, синюю, оранжевую, красную и ИК области спектра, в экспериментально-клинических условиях. Материалы и методы исследования: в экспериментальной части исследований использовались как промышленные лазеры (гелий-неоновый, гелий-кадмиевый, полупроводниковый на арсениде галлия), так и лазеры, созданные в Южном федеральном университете (гелий-стронциевый, гелий-ртутный); объектом изучения были крысы, находящиеся как в интактном состоянии, так и в моделируемых условиях, индуцирующих у них патологические процессы. Клиническая апробация НИЛИ осуществлялась на базе Ростовского НИИ акушерства и педиатрии и клиники психиатрии Ростовского государственного медицинского университета. Анализ лазерного воздействия в экспериментальной части работы осуществлялся с помощью цитофотометрических и гистохимических методов. Оценка результатов лечения, осуществляемого излучением гелий-неонового и ИК-лазеров, проводилась с помощью гормональных, психофизиологических, электрофизиологических и биохимических методик. Результаты и выводы: в экспериментально-

клинических исследованиях выяснены особенности реакций нейроэндокринной системы на НИЛИ в зависимости от исходного состояния организма. Показано, что реограмма в зоне облучения может служить индикатором эффективности лазерного воздействия, применяемого в целях коррекции нарушений репродуктивной системы. Продемонстрирована возможность применения НИЛИ для повышения адаптированности организма к стрессовым воздействиям.

Ключевые слова: биологическая активность, низкоэнергетическое лазерное излучение, нейроэндокринная система, электрофизиологические показатели.

Purpose: review and analysis of our own original research on biological activity of low-level laser radiation which falls on violet, blue, orange, red and infra-red area of spectrum in experimental and clinical setting. Method and materials: during the experimental stage of the research there were used industrial lasers (He-Ne, He-Cd, semiconductor Ga-As) as well as lasers made at Southern Federal University (He-Sr⁺, He-Hg⁺); the object of study were rats both in intact state and simulated conditions indicating pathological processes. Clinical testing of low-level laser radiation was implemented under Rostov Research Institute of Obstetrics and Pediatrics and Psychiatric Clinic of Rostov State Medical University. Analysis of laser exposure during the experimental stage is done due to cytophotometric and histochemical methods. Outcome assessment by means of He-Ne and IR lasers was carried out using hormonal, psychophysiological, electrophysiological and biochemical methods. Results and conclusions: experimental and clinical research allowed explaining specific features of neuroendocrine system response to low-level laser radiation depending on initial state of the human. It was shown that rheogram in the exposure area can indicate efficiency of the laser used for managing reproductive system disorders. Low-level laser radiation demonstrated ability to be used to increase body's adaptation to stress.

Keywords: biological activity, low-energy laser radiation, neuroendocrine system, electrophysiological performance.

Прогрессирующие невротизация и астенизация общества детерминируют рост психосоматической заболеваемости, ослабление репродуктивного потенциала. Высокий удельный вес в её структуре занимают патологические процессы, проявляющиеся эндокринной и астенодепрессивной симптоматикой [1]. Актуальность этой проблемы индуцировала возникновение нового направления биомедицины – экологической репродуктологии. Она имеет междисциплинарную направленность, в ее задачи входит разработка методов диагностики, лечения и профилактики нарушений репродукции, обусловленных воздействием факторов среды, ксеноинтоксикацией организма [2]. Повышение резистентности к фармакотерапии, возрастание риска хронизации процесса побуждают разнопрофильных специалистов искать более эффективные приемы коррекции указанных нозологий. Повышенное внимание привлекают немедикаментозные приемы коррекции, что связано с ростом аллергизации населения, ограничивающим возможности использования лекарственных средств. В значительной степени последнее обстоятельство обусловлено нарастающей ксеноинтоксикацией населения [3].

В настоящее время во многих отраслях медицины успешно применяется низкоинтенсивное лазерное излучение (НИЛИ) [4, 5]. Внедрению НИЛИ в клинику предшествовали масштабные исследования его биологического действия, реализованные в нашей стране и за рубежом. Работы в этом направлении проводились также ростовскими специалистами (Южный федеральный университет, Ростовский НИИ акушерства и педиатрии и Ростовский государственный медицинский университет). Ими была показана перспективность использования раз-

личных видов НИЛИ в решении ряда биомедицинских проблем.

Цель настоящей работы – анализ собственных оригинальных исследований по изучению биологических эффектов НИЛИ различного спектрального диапазона и его клинической апробации. Материалы собраны главным образом при изучении возможностей применения НИЛИ для коррекции нарушений нейроэндокринной системы, функциональной интеграции, резко реагирующей на стрессы и агрессию факторов окружающей среды, индуцирующих дезадаптированность организма.

В первую очередь проводилось изучение биологической активности излучения гелий-стронциевого лазера (ГСЛ) с длиной волны 430,5 нм [6–8] и гелий-ртутного лазера (ГРЛ) с длиной волны 615,0 нм [9, 10], созданных в ЮФУ, в сопоставлении с активностью излучения гелий-неонового лазера (ГНЛ) с длиной волны 632,8 нм и гелий-кадмиевого лазера (ГКЛ) с длиной волны 441,6 нм [11]. Выбор такого сочетания групп лазеров обусловлен сопоставимостью спектрального диапазона их излучения и различием характера генерации (первые два лазера работали в импульсном режиме, а последние два – в непрерывном). Изучение биологической активности излучения ГРЛ представляло интерес еще и потому, что максимум световой восприимчивости молекулы РНК лежит в области 615,0 нм и точно совпадает с длиной волны генерации ГРЛ. Кроме того, импульсное излучение может вызывать специфическое действие по сравнению с непрерывным, ускоряя синтез РНК [12].

Объектом исследования была репродуктивная система крыс. Облучение зоны входа во влагалище осуществлялось с помощью оптико-механи-

ческого устройства. Во всех экспериментах длительность разового облучения составляла 3 мин, общего курса – 5 сеансов. Мощность непрерывного излучения составляла 50 мВт, в случае применения импульсного излучения частота следования импульсов составляла 6 кГц при средней мощности генерации 50 мВт.

Было установлено, что облучение ГНЛ приводило к активации пролиферативных процессов в яичниках и матке, возрастанию числа примордиальных фолликулов, содержания НК в эндометрии. В аденогипофизе имели место признаки умеренной акселерации выведения нейросекрета в систему циркуляции, объемы нейронов возрастали. Облучение ГРЛ приводило к вакуолизации нейросекреторных клеток аденогипофиза, возрастанию их в размерах. Это указывало на резкий выброс нейросекрета в кровяное русло. В яичниках были расширены сосуды, количество фолликулов увеличивалось, уровень концентрации НК в яичниках и эндометрии значительно возрастал. Можно считать, что излучение ГРЛ значительно биологически активнее излучения ГНЛ.

Установленные факты имеют значение в раскрытии механизма биологического действия монохроматических участков диапазона спектра, лежащих рядом с длиной волны излучения ГНЛ. Наблюдаемая большая эффективность должна быть основанием для проведения дальнейших исследований по выяснению возможностей применения ГРЛ в клинической практике.

В случае использования ГКЛ в эпителии репродуктивных органов отмечался стаз форменных элементов крови, гипертрофия клеток. Цитофотометрически идентифицировалась гипергормональная реакция, в эндометрии возникала железистокистозная гиперплазия. Содержание НК имело тенденцию к снижению. В случае использования ГСЛ в половой системе крыс развивались структурно-функциональные изменения, расцениваемые как дистрофические явления, указывающие на угнетение активности органа.

Очевидно, что излучение применявшихся лазеров оказывало неоднородное воздействие на репродуктивную систему. Излучение ГНЛ оказывало мягкий физиологический эффект, стимулирующий гормонотропную продукцию, в то время как излучение других лазеров вызывало резкие морфофункциональные сдвиги, в ряде случаев имеющие патологический характер.

Таким образом, экспериментальные исследования [13, 14] позволили выявить некоторые особенности биологической активности лазерного излучения, приходящегося на фиолетовую, синюю и оранжевую области спектра, и сравнить её по биологическим изменениям с активностью наиболее

широко применяемого в терапевтических целях излучения ГНЛ.

В дальнейшем была поставлена задача выяснения закономерностей реакции нейроэндокринных комплексов на излучение ГНЛ в зависимости от исходного состояния организма. Как уже отмечалось, у интактных животных излучение ГНЛ приводило к активации овариального гормонопоза, о чем можно было судить по значительному возрастанию содержания НК в структурах эндометрия и яичников. В то же время лазерное воздействие на фоне искусственно вызванной активации функционального состояния репродуктивной системы индуцировало гиперпластические процессы в эндометрии, указывающие на гиперэстрогенизацию организма животных. Применение же излучения ГНЛ на фоне моделируемого гипозэстрогенного состояния оказывало репаративный эффект. Прослеживалась тенденция к восстановлению функционального состояния яичников, ранее сниженного стрессовыми условиями содержания экспериментальных животных.

Стало очевидным, что использование излучения ГНЛ в лечебных целях возможно только в определенных случаях [14]. Состояния, сопровождающиеся эстрогенией, пролиферативными изменениями в эндометрии, следует считать противопоказанием к применению излучения ГНЛ и тем более коротковолновых лазеров. Их использование может усугубить морфологические перестройки в гормонозависимых тканях. Эти наблюдения подтверждают известные положения о том, что биостимулирующие физиотерапевтические воздействия противопоказаны при гиперпластических процессах в функциональных системах организма [15].

Использование излучения ГНЛ в физиотерапевтических целях диктует необходимость изучения его влияния на функциональное состояние различных нейроэндокринных комплексов, участвующих в регуляции функции яичников. Поэтому значительный интерес представляло изучение реакции эпифиза как координирующего гонадотропную активность гипоталамуса-гипофиза органа на применяемое воздействие. Функциональная активность эпифиза в условиях эксперимента рассматривалась нами с помощью методов оптико-структурного анализа [16]. Критериями активности пинеальной железы служили наполнение цитоплазмы пинеалоцитов нуклеиновыми кислотами, а также количество вакуолей, отражающих интенсивность выведения этих веществ из клеток. Метаболическая активность ядер пинеалоцитов оценивалась по изменениям их объемов, концентраций в них ДНК.

Было установлено, что отчетливые изменения в цитофотометрических показателях возникали после

5 сеансов облучения. Количество вакуолей уменьшалось, объемы ядер и клеток достоверно не изменялись. Концентрация НК в структурах эпифиза возрастала, что указывало на их депонирование. Такая гистохимическая картина идентифицировалась как угнетение секреторной активности эпифиза. Полученные данные коррелируют с результатами работы [17], в которой показано, что лазерная терапия, используемая при дисфункциональных маточных кровотечениях у женщин, в течение 6–8 дней обеспечивает снижение продукции мелатонина эпифиза. Это способствует восстановлению продукции гипоталамических нейрогормонов, нормализуя тем самым нарушенную менструальную функцию.

Так как в дальнейших клинических исследованиях предполагалось использовать излучение ГНЛ в терапии гинекологических заболеваний женщин с краурозом, были изучены патофизиологические аспекты экспериментальной терапии гипотрофии половых органов крыс. С учетом специфики возникновения этого заболевания избран способ моделирования путем содержания самок в условиях временной гипокинезии в сочетании с безводной диетой (0,5 дозы от суточного рациона). Длительность эксперимента составляла 1 мес. Эффективность этого способа моделирования была показана нами ранее, а также известна по данным [18, 19].

Было показано, что после месяца содержания самок крыс в неблагоприятных экологических условиях имело место уменьшение количества маточных крипт и размеров трубчатых желез в эндометрии. В фолликулах цитоплазма многих яйцеклеток была лизирована, ядра сморщивались. Наблюдалось появление атрофических изменений покровного эпителия, размеры матки уменьшались. Описываемая морфологическая картина демонстрировала начальные атрофические изменения в овариально-маточном комплексе, снижение гормональной продукции яичников крыс. Аналогичная картина описана при характеристике гипотрофии половых органов у женщин климактерического возраста [20]. Полученная экспериментальная модель гипотрофии половых органов крыс использовалась при разработке способа ее терапии с помощью излучения ГНЛ.

Излучение ГНЛ мощностью 50 мВт направлялось в зону входа во влагалище. Курс составлял 10 дней при экспозиции одной процедуры 3 мин. Контролем служили животные с индуцированной моделью заболевания, которым лазерное воздействие не проводили. После экспериментальной терапии можно было заметить тенденцию к возрастанию количества примордиальных и созревающих фолликулов. В ткани яичников обнаруживались молодые желтые тела, в эндометрии появлялись маточные

крипты, заполненные секретом. Гистохимический анализ содержания НК показал тенденцию к возрастанию этих веществ в клетках эндометрия. При морфологических исследованиях влагалища ранее наблюдаемые деструктивные поражения слизистой не выявлялись. Перечисленные явления демонстрировали наличие биосинтетической активности в эпителии влагалища как за счет местного влияния лазерного излучения, так, по-видимому, и в результате гормональных перестроек, сопровождающихся структурно-функциональными изменениями в периферических гормонозависимых органах. В яичниках и матке крыс контрольной группы восстановление функционально-морфологических характеристик происходило по той же схеме, но значительно медленнее.

Полученные сведения послужили основанием для внедрения разработанного способа лазерной терапии в клиническую схему лечения крауроза вульвы на разных этапах его развития [14, 21]. Лазерная терапия использовалась при лечении больных после исключения у них признаков малигнизации процесса. В ходе сеанса луч сканировался по пораженной поверхности с фиксацией по 5 мин в отдельных точках слизистой. Таким образом, общая длительность сеанса зависела от площади поражения. Плотность мощности лазерного излучения составляла 200 мВт/см²; продолжительность курса – 12÷15 сеансов. Объективное улучшение, заключающееся в уменьшении отека, гиперемии, активной эпителизации пораженных участков, частичном рассасывании лейкоплакических бляшек, начиналось через 5÷7 процедур. Существенно улучшалось функциональное состояние ЦНС больных, что подтверждалось положительной динамикой ЭЭГ [22]. После проведения курса лечения сопротивление кожи в облучаемых участках снижалось в среднем в 1,5 раза. Наблюдаемые колебания сопротивления кожи в процессе сеанса лазерной терапии и устойчивое снижение импеданса после окончания курса могут быть следствием особенностей гемодинамики. Вероятно, вазоконстрикторная реакция, имеющая место при данных параметрах лазерного облучения и приводящая к изменениям электрических свойств кожи в результате снижения кровенаполнения, в дальнейшем сменяется компенсаторным расширением сосудов. Такая «гимнастика» сосудов приводит к улучшению трофики тканей, повышению окислительно-восстановительных процессов, обуславливая анальгизирующий и антизудный эффекты. Наблюдаемые явления наводят на мысль, что биофизические характеристики ткани могут служить индикаторами эффективности влияния НИЛИ на биологические объекты. Позитивное влияние НИЛИ на обмен веществ в тканях

показали и гистохимические исследования, проведенные после курса лечения и через несколько недель после его завершения [14].

В дальнейшем с учетом данных [17] был разработан модифицированный способ немедикаментозной терапии дисфункциональных маточных кровотечений (ДМК) [14]. Как известно, лазерное излучение в точке своего воздействия вызывает метаболические изменения, обуславливающие колебания биофизических констант, имеющих значение для определения пороговых доз лазерного излучения. Проведенный анализ продемонстрировал, что реограмма (РГ) является чувствительным индикатором региональных изменений гемодинамики под влиянием лазерного излучения. У женщин с ДМК для получения стабильного феномена сужения сосудов шейки матки при направлении лазерного луча на отверстие цервикального канала необходимо было применять высокую плотность мощности (200 мВт/см^2) и экспозицию 12 мин. В тех случаях, когда РГ демонстрировала четкую вазоконстрикторную реакцию, остановка кровотечения наступала через 2–3 процедуры. Отмеченные особенности гемодинамической реакции указывали на необходимость дифференцированного подхода к использованию излучения ГНЛ в клинике. В тех случаях, когда необходимо улучшать регенерацию тканей (например, при эрозии шейки матки), можно применять малые дозы облучения, чтобы не развивался вазоконстрикторный эффект. При кровотечениях показаны большие мощность и экспозиция облучения, вызывающие вазоконстрикцию и, следовательно, гемостаз. Полученные результаты коррелируют с экспериментальными исследованиями [23], в которых обнаружены подобные закономерности РГ в реакциях сосудов языка. Очевидно, что регистрируемый феномен носит универсальный характер и может являться тестом для оценки эффективности дозы лазерного облучения. В этой связи была предложена биотехническая система, в схему которой для регистрации гемореакции на лазерное воздействие и автоматизации процесса облучения было включено устройство биологической обратной связи, базирующееся на регистрации кровенаполнения в динамике сеанса, реализуемое посредством идентификации и анализа РГ [24]. Кроме того, был рекомендован способ лазерной терапии ДМК у женщин со склонностью к гипертензии, длительность экспозиции при этом определялась по показателям РГ [25].

Экспериментальные исследования послужили основанием для разработки способов применения НИЛИ в физиотерапии нарушений менструальной функции женщин, отличающихся недостаточностью лютеиновой фазы цикла [25]. В основе лежало применение излучения ГНЛ как фактора рефлексотерапии,

позволяющего активизировать секрецию гонадотропных гормонов аденогипофиза путем стимуляции шейного рефлекса.

Для лечения женщин с нарушениями менструального цикла вследствие хронического воспалительного процесса в яичниках был разработан способ, заключающийся в сочетанном применении электростимуляции шейки матки и чрескожного облучения проекции локтевой вены лазерным излучением ИК-спектрального диапазона [26]. В этих целях для облучения крови применялось НИЛИ (длина волны – $850,0 \text{ нм}$; мощность импульса – $2,5 \text{ мВт}$; экспозиция – 5 мин), что обусловлено известными данными о его противовоспалительном, иммунокорректирующем действии [5].

После предварительных экспериментальных исследований [27] в клинических условиях была показана возможность применения НИЛИ для профилактики первичной слабости родовой деятельности (СРД) у женщин из групп акушерского риска. Как известно, этот патологический процесс обусловлен дезадаптированностью организма женщин вследствие хронической патологии дисрегуляторного характера. С целью профилактики СРД применялся способ эндоназального лазерного воздействия [28].

Указанный способ показал свою эффективность и в коррекции астенодепрессивных состояний (АДС) [29, 30]. В экспериментальной терапии астенического состояния, моделируемого экологическими факторами, в целях сравнения были применены ГНЛ и полупроводниковый лазер на арсениде галлия (аппарат «Узор») с длиной волны $890,0 \text{ нм}$. На основании ранее полученных результатов по стимуляции нейроэндокринной системы были избраны следующие параметры излучения: для ГНЛ плотность мощности – 100 мВт/см^2 ; экспозиция – 2 мин; для «Узора» частота следования импульсов – $3,0 \text{ кГц}$, мощность одного импульса – $2,5 \text{ Вт}$; экспозиция – 2 мин. Курс экспериментальной терапии состоял из 5 сеансов, проводимых ежедневно. Полученные результаты исследований [31] стали основанием для внедрения разработанного метода в клиническую практику лечения депрессивных состояний [32]. Как оказалось, в этом случае излучение ИК-лазера аппарата «Узор» обладает более выраженным биологическим влиянием, чем излучение ГНЛ [33].

Как известно, НИЛИ отличается способностью оказывать полиморфное биостимулирующее действие, особенно при внутривенном облучении крови. С учетом этого обстоятельства был разработан способ лечения железодефицитных анемий у детей, включающий в себя применение излучения ГНЛ (мощность – 15 мВт ; экспозиция – 5 мин), направленного на проекцию локтевой вены (метод чрескожного облучения). Излучением ГНЛ проводилась

и обработка стимулятора усвояемости железа – 1%-го раствора аскорбиновой кислоты, вводимого в организм перорально (30 мл) непосредственно перед употреблением [34].

Чрескожный способ облучения НИЛИ успешно применялся и для улучшения периферического кровообращения при сахарном диабете у детей [35]. Использовалось излучение ГНЛ при плотности мощности генерации 200 мВт/см² и продолжительности сеанса 2 мин ежедневно в течение 10 дней.

Таким образом, проведенные исследования продемонстрировали важность изучения биологической активности лазерного излучения в экспериментальных условиях как патогенетического обоснования принципов его клинического использования. Актуально также изучение перспектив применения НИЛИ в коррекции экологически обусловленных патологических процессов, так как в большинстве случаев они представлены нейроэндокринными нарушениями.

Литература

1. *Смулевич А.Б.* Депрессии при соматических и психических заболеваниях. М., 2003. 432 с.
2. *Айламазян Э.К.* Основные проблемы и прикладное значение экологической репродуктологии // Журн. акушерства и женских болезней. 2005. № 1. С. 7–13.
3. *Орлов В.И., Кожин А.А., Сивочалова О.В., Владимирский Б.М., Афонин А.А.* Экология и репродуктивное здоровье женщин. Ростов н/Д., 2000. 479 с.
4. Лазерная терапия и профилактика / под ред. А.В. Картелишева, А.Г. Румянцева, А.Р. Евстигнеева, А.В. Гейница, С.В. Усова. М., 2012. 400 с.
5. *Москвин С.В.* Основы лазерной терапии. М.; Тверь, 2016. Т. 1. 896 с.
6. *Латуш Е.Л., Сэм М.Ф.* Генерация на ионных переходах щелочно-земельных металлов // Квантовая электроника. 1973. № 3 (15). С. 66–71.
7. *Жуков В.В., Кучеров В.С., Латуш Е.Л., Сэм М.Ф.* Рекомбинационные лазеры на парах химических элементов. II. Генерация на ионных переходах металлов // Квантовая электроника. 1977. Вып. 24, № 6. С. 1257–1267.
8. *Zhukov V.V., Latush E.L., Michalevski W.S., Sem M.F.* Metal vapor recombination laser research // Proceeding of the Int. Conf. on Lasers 81. USA, 1981. P. 1121–1128.
9. *Иванов И.Г., Латуш Е.Л., Сэм М.Ф.* Ионные лазеры на парах металлов. М., 1990. 255 с.
10. *Жуков В.В., Иванов И.Г., Сэм М.Ф.* Импульсная генерация при разряде в парах кадмия и ртути // Журн. прикладной спектроскопии. 1977. Вып. 26, № 3. С. 544–547.

11. *Ivanov I.G., Latush E.L., Sem M.F.* Metal Vapour Ion Lasers: Kinetic Processes and Gas Discharges. Chichester; N.Y.; Brisbane; Toronto; Singapore, 1996. 285 p.

12. *Кару Т.Й., Календо Г.С., Летохов В.С., Лобко В.В.* Зависимость биологического действия низкоэнергетического видимого света на клетки HeLa от когерентности, дозы, длины волны и режима облучения // Квантовая электроника. 1982. Вып. 9, № 9. С. 1761–1767.

13. *Жуков В.В., Кожин А.А., Хусаинова И.С.* Сравнительное исследование биологической активности красного и фиолетового лазерных излучений // Радиобиология. 1983. Вып. 22, № 5. С. 706–709.

14. *Серов В.Н., Кожин А.А., Жуков В.В., Хусаинова И.С.* Лазерная терапия в эндокринологической гинекологии. Ростов н/Д., 1988. 120 с.

15. *Пономаренко Г.Н.* Физические методы лечения. СПб., 2006. 336 с.

16. *Жуков В.В., Хусаинова И.С., Кожин А.А.* Гистоструктура эпифиза при воздействии лазерного излучения на репродуктивную систему // Изв. СКНЦ ВШ. Естеств. науки. 1987. № 3. С. 120–123.

17. *Грищенко В.Р.* Роль эпифиза в физиологии и патологии женской половой системы. Харьков, 1979. 247 с.

18. *Кожин А.А.* Патогенетические механизмы нарушений функции яичников, индуцированные длительным освещением : автореф. дис. ... д-ра мед. наук. М., 1985. 42 с.

19. *Коваленко Е.А., Гуровский Н.Н.* Гипокинезия. М., 1980. 320 с.

20. *Штемберг М.И.* Крауроз и лейкоплакия вульвы. Кишинев, 1980. 198 с.

21. *Жуков В.В., Кожин А.А., Рымашевский В.К., Поляков В.В., Серов В.Н.* Лазерная терапия дистрофических процессов вульвы : метод. рекомендации. М., 1985. 13 с.

22. *Жуков В.В., Горчакова Л.А., Поляков В.В., Кожин А.А.* Электрофизиологические исследования нервной системы у больных краурозом вульвы при лазерной терапии // Акушерство и гинекология. 1984. № 11. С. 65–66.

23. *Александров М.Т., Прохончуков А.А.* Лазеры в стоматологии // Лазеры в клинической медицине. М., 1981. С. 331–352.

24. *Жуков В.В., Кожин А.А., Орлов В.И., Поляков В.В.* Биотехническая система для коррекции нарушений функции яичников центрального генеза // Приборы и устройства для курортно-лечебных учреждений. Новочеркасск, 1984. С. 89–93.

25. *Серов В.Н., Кожин А.А., Прилепская В.Н.* Клинико-физиологические основы гинекологической эндокринологии. Ростов н/Д., 1998. 368 с.

26. *Волошина Е.И.* Патогенез нарушений функции яичников ксеногенной этиологии у женщин и их восстановительная терапия : автореф. дис. ... канд. мед. наук. М., 2006. 22 с.

27. Гулянци Э.С., Хусаинова И.С., Рамдоля С., Кожин А.А. Гистофизиология нейросекреторной системы гипоталамуса, эпифиза и миометрия беременных крыс при воздействии гелий-неонового лазера / Акушерство и гинекология. 1989. № 4. С. 52–55.

28. Пат. № 2324510 РФ. Способ подготовки к родам беременных женщин с высоким риском развития первичной слабости родовой деятельности / Г.С. Грошилина, А.А. Кожин. № А61N5/06; заявл. 02.05.06; опубл. 27.11.07.

29. Пат. № 2123868 РФ. Способ лечения астенических и депрессивных состояний / В.В. Мрыхин, В.М. Коваленко, А.А. Кожин. № А61N5/06; заявл. 28.01.94; опубл. 27.12.98.

30. Мрыхин В.В. Экспериментально-клиническое обоснование лазерной терапии астенодепрессивного синдрома : автореф. дис. ... канд. мед. наук. Ростов н/Д., 1995. 19 с.

31. Жуков В.В., Кожин А.А., Мрыхин В.В. Биологическая активность красного и инфракрасного лазерного излучения в экспериментальных моделируемых условиях // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2016. № 1. С. 54–60.

32. Жуков В.В., Кожин А.А., Мрыхин В.В. Низкоинтенсивная лазерная терапия больных с астенодепрессивным синдромом // Лазерная медицина. 2016. Вып. 2, № 20. С. 28–31.

33. Жуков В.В., Кожин А.А., Мрыхин В.В. Лазерная терапия нарушений психического здоровья. Ростов н/Д., 2016. 146 с.

34. Пат. № 2053940 РФ. Способ лечения железодефицитных анемий у детей / А.А. Кожин, В.А. Попова. № А61N5/06; заявл. 01.03.93; опубл. 10.01.98.

35. Пат. № 2018329 РФ. Способ лечения сахарного диабета / А.А. Кожин, В.А. Попова. № А61N5/06; заявл. 02.07.91; опубл. 30.08.94.

References

1. Smulevich A.B. *Depressii pri somaticheskikh i psikhicheskikh zabollevaniyakh* [Depression in somatic and mental illness]. Moscow, 2003, 432 p.

2. Ailamazyan E.K. *Osnovnye problemy i prikladnoe znachenie ekologicheskoi reproduktologii* [The main problems and applied importance of ecological reproductology]. *Zhurn. akusherstva i zhenskikh boleznei*. 2005, No. 1, pp. 7-13.

3. Orlov V.I., Kozhin A.A., Sivochalova O.V., Vladimirskii B.M., Afonin A.A. *Ekologiya i reproduktivnoe zdorov'e zhenshchin* [Ecology and reproductive health of women]. Rostov-on-Don, 2000, 479 p.

4. *Lazernaya terapiya i profilaktika* [Laser therapy and prevention]. Eds. A.V. Kartelishev, A.G. Rumyantsev, A.R. Evstigneev, A.V. Geinits, S.V. Usov. Moscow, 2012, 400 p.

5. Moskvina S.V. *Osnovy lazernoi terapii* [Fundamentals of laser therapy]. Moscow, 2016, vol. 1, 896 p.

6. Latush E.L., Sem M.F. *Generatsiya na ionnykh perekhodakh shchelochno-zemel'nykh metallov* [Generation on ionic transitions of alkaline-earth metals]. *Kvantovaya elektronika*. 1973, No. 3 (15), pp. 66-71.

7. Zhukov V.V., Kucherov V.S., Latush E.L., Sem M.F. *Rekombinatsionnye lazery na parakh khimicheskikh elementov. II. Generatsiya na ionnykh perekhodakh metallov* [Recombination lasers on the vapor of chemical elements. II. Generation on ionic metal transitions]. *Kvantovaya elektronika*. 1977, iss. 24, No. 6, pp. 1257-1267.

8. Zhukov V.V., Latush E.L., Michalevski W.S., Sem M.F. *Metal vapor recombination laser research. Proceeding of the Int. Conf. on Lasers 81. USA, 1981*, pp. 1121-1128.

9. Ivanov I.G., Latush E.L., Sem M.F. *Ionnye lazery na parakh metallov* [Ion metal vapor lasers]. Moscow, 1990, 255 p.

10. Zhukov V.V., Ivanov I.G., Sem M.F. *Impul'snaya generatsiya pri razryade v parakh kadmiya i rtuti* [Pulsed generation at a discharge in cadmium and mercury vapor]. *Zhurn. prikladnoi spektroskopii*. 1977, iss. 26, No. 3, pp. 544-547.

11. Ivanov I.G., Latush E.L., Sem M.F. *Metal Vapour Ion Lasers: Kinetic Processes and Gas Discharges*. Chichester, New York, Brisbane, Toronto, Singapore, 1996, 285 p.

12. Karu T.I., Kalendo G.S., Letokhov V.S., Lobko V.V. *Zavisimost' biologicheskogo deistviya nizkoenergeticheskogo vidimogo sveta na kletki HeLa ot kogerentnosti, dozy, dliny volny i rezhima oblucheniya* [Dependence of the biological effect of low-energy visible light on He-La cells on coherence, dose, wavelength, and irradiation regime]. *Kvantovaya elektronika*. 1982, iss. 9, No. 9, pp. 1761-1767.

13. Zhukov V.V., Kozhin A.A., Khusainova I.S. *Sravnitel'noe issledovanie biologicheskoi aktivnosti krasnogo i fioletovego lazernykh izluchenii* [A comparative study of the biological activity of red and violet laser radiation]. *Radiobiologiya*. 1983, iss. 22, No. 5, pp. 706-709.

14. Serov V.N., Kozhin A.A., Zhukov V.V., Khusainova I.S. *Lazernaya terapiya v endokrinologicheskoi ginekologii* [Laser therapy in endocrinological gynecology]. Rostov-on-Don, 1988, 120 p.

15. Ponomarenko G.N. *Fizicheskie metody lecheniya* [Physical methods of treatment]. Saint Petersburg, 2006, 336 p.

16. Zhukov V.V., Khusainova I.S., Kozhin A.A. *Gistostruktura epifiza pri vozdeistvii lazernogo izlucheniya na reproduktivnyuyu sistemu* [Histology of the epiphysis under the influence of laser radiation on the reproductive system]. *Izv. SKNTs VSh. Estestv. nauki*. 1987, No. 3, pp. 120-123.

17. Grishchenko V.R. *Rol' epifiza v fiziologii i patologii zhenskoi polovoi sistemy* [The role of the epiphysis in the physiology and pathology of the female reproductive system]. Kharkov, 1979, 247 p.

18. Kozhin A.A. *Patogeneticheskie mekhanizmy narushenii funktsii yaichnikov, induktivirovannye dlitel'nyim osveshcheniem* : avtoref. dis. ... d-ra med. nauk [Pathogenetic mechanisms of disturbances of ovarian function, induced by prolonged illumination]. Moscow, 1985, 42 p.
19. Kovalenko E.A., Gurovskii N.N. *Gipokineziya* [Hypokinesia]. Moscow, 1980, 320 p.
20. Shtemberg M.I. *Krauroz i leukoplakiya vul'vy* [Kraurosis and leukoplakia of the vulva]. Chisinau, 1980, 198 p.
21. Zhukov V.V., Kozhin A.A., Rymashevskii V.K., Polyakov V.V., Serov V.N. *Lazernaya terapiya distroficheskikh protsessov vul'vy* [Laser therapy of the dystrophic processes of the vulva]. Methodological recommendations. Moscow, 1985, 13 p.
22. Zhukov V.V., Gorchakova L.A., Polyakov V.V., Kozhin A.A. *Elektrofiziologicheskie issledovaniya nervnoi sistemy u bol'nykh kraurozom vul'vy pri lazernoi terapii* [Electrophysiological investigation of the nervous system in patients with crouluses of the vulva with laser therapy]. *Akusherstvo i ginekologiya*. 1984, No. 11, pp. 65-66.
23. Aleksandrov M.T., Prokhonchukov A.A. [Lasers in dentistry]. *Lazery v klinicheskoi meditsine* [Lasers in clinical medicine]. Moscow, 1981, pp. 331-352.
24. Zhukov V.V., Kozhin A.A., Orlov V.I., Polyakov V.V. [Biotechnical system for correction of ovarian functions of central genesis]. *Pribory i ustroystva dlya kurortno-lechebnykh uchrezhdenii*. Novocheerkassk, 1984, pp. 89-93.
25. Serov V.N., Kozhin A.A., Prilepskaya V.N. *Kliniko-fiziologicheskie osnovy ginekologicheskoi endokrinologii* [Clinical and physiological basis of gynecological endocrinology]. Rostov-on-Don, 1998, 368 p.
26. Voloshina E.I. *Patogenez narushenii funktsii yaichnikov ksenogennoi etiologii u zhenshchin i ikh vosstanovitel'naya terapiya* : avtoref. dis. ... kand. med. nauk [Pathogenesis of abnormalities in ovarian function of xenogeneic etiology in women and their restorative therapy]. Moscow, 2006, 22 p.
27. Gul'yants E.S., Khusainova I.S., Ramdoyal S., Kozhin A.A. *Gistofiziologiya neurosekretornoj sistemy gipotalamusa, epifiza i miometriya beremennykh krysp pri vozdeistvii gelii-neonovogo lazera* [Histophysiology of the neurosecretory system of the hypothalamus, epiphysis and myometrium of pregnant rats under the action of a helium-neon laser]. *Akusherstvo i ginekologiya*. 1989, No. 4, pp. 52-55.
28. Groshilina G.S., Kozhin A.A. *Sposob podgotovki k rodam beremennykh zhenshchin s vysokim riskom razvitiya pervichnoi slabosti rodovoi deyatelnosti* [The way of preparing for delivery of pregnant women with a high risk of developing primary weakness of labor]. Certificate, No. 2324510, 27.11.2007.
29. Mrykhin V.V., Kovalenko V.M., Kozhin A.A. *Sposob lecheniya astenicheskikh i depressivnykh sostoyanii* [Method of treatment of asthenic and depressive states]. Certificate, No. 2123868, 27.12.1998.
30. Mrykhin V.V. *Eksperimental'no-klinicheskoe obosnovanie lazernoi terapii astenodepressivnogo sindroma* : avtoref. dis. ... kand. med. nauk [Experimental and clinical substantiation of laser therapy of asthenodepressive syndrome]. Rostov-on-Don, 1995, 19 p.
31. Zhukov V.V., Kozhin A.A., Mrykhin V.V. *Biologicheskaya aktivnost' krasnogo i infrakrasnogo lazernogo izlucheniya v eksperimental'nykh modeliruemyykh usloviyakh* [Biological activity of red and infrared laser radiation in experimental simulated conditions]. *Izv. vuzov. Sev.-Kavk. region. Estestv. nauki*. 2016, No. 1, pp. 54-60.
32. Zhukov V.V., Kozhin A.A., Mrykhin V.V. *Nizkointensivnaya lazernaya terapiya bol'nykh s astenodepressivnym sindromom* [Low-intensity laser therapy of patients with asthenodepressive syndrome]. *Lazernaya meditsina*. 2016, iss. 2, No. 20, pp. 28-31.
33. Zhukov V.V., Kozhin A.A., Mrykhin V.V. *Lazernaya terapiya narushenii psikhicheskogo zdorov'ya* [Laser therapy for mental health problems]. Rostov-on-Don, 2016, 146 p.
34. Kozhin A.A., Popova V.A. *Sposob lecheniya zhelezodefitsitnykh anemii u detei* [A method for the treatment of iron deficiency anemia in children]. Certificate, No. 2053940, 10.01.1998.
35. Kozhin A.A., Popova V.A. *Sposob lecheniya sakharnogo diabeta* [Method of treatment of diabetes mellitus]. Certificate, No. 2018329, 30.08.1994.

УДК 598.434

DOI 10.18522/0321-3005-2017-1-67-72

БОЛЬШОЙ БАКЛАН (*PHALACROCORAX CARBO L.*) В ДЕЛЬТЕ ДОНА И СВЯЗАННЫЕ С НИМ ПРОБЛЕМЫ

© 2017 г. В.А. Миноранский, В.И. Даньков, А.В. Тихонов

THE GREAT CORMORANT (*PHALACROCORAX CARBO L.*) IN THE DON DELTA AND THE PROBLEMS OF ITS EXISTENCE

V.A. Minoranskiy, V.I. Dankov, A.V. Tikhonov

Миноранский Виктор Аркадьевич – Южный федеральный университет, доктор сельскохозяйственных наук, профессор, кафедра зоологии, пр. Стачки, 194/1, г. Ростов н/Д, 344090; заместитель директора по науке, ассоциация «Живая природа степи», ул. Тельмана, 10, г. Ростов н/Д, 344011, Россия, e-mail: eco@aanet.ru

Victor A. Minoranskiy – Southern Federal University, Doctor of Agricultural Sciences, Professor, Zoology Department, Stachki Ave, 194/1, Rostov-on-Don, 344006, Russia; Deputy Director for Science, Association «Living Steppe Nature», Telmana St., 10, Rostov-on-Don, 344011, Russia, e-mail: eco@aanet.ru

Даньков Василий Иванович – ассоциация «Живая природа степи», председатель, ул. Тельмана, 10, г. Ростов н/Д, 344011, Россия, e-mail: eco@aanet.ru

Vasily I. Dankov – Association «Living Steppe Nature», Head, Telmana St., 10, Rostov-on-Don, 344011, Russia, e-mail: eco@aanet.ru

Тихонов Алексей Владимирович – Южный федеральный университет, кандидат биологических наук, доцент, кафедра зоологии, пр. Стачки, 194/1, г. Ростов н/Д, 344090, Россия, e-mail: shtirl@gmail.com

Alexey V. Tikhonov – Southern Federal University, Candidate of Biology, Associate Professor, Department of Zoology, Stachki Ave, 194/1, Rostov-on-Don, 344090, Russia, e-mail: shtirl@gmail.com

Цель. В дельте Дона большой баклан (*Phalacrocorax carbo L.*) является многочисленным видом. Целью статьи являются выяснение причин появления бакланов на Дону, анализ их численности, определение наносимого рыбным ресурсам ущерба и рекомендации по сокращению количества птиц.

Методы. Приводимый материал является результатом анализа собственных наблюдений за большим бакланом на Дону во время его миграций, в гнездовой и послегнездовой периоды, а также имеющихся литературных данных по данному виду в XX–XXI вв.

Результаты. Впервые на Дону гнездовая колония большого баклана из 32 гнезд отмечена на острове Малый Дворян в 1975 г. С годами его количество возрастало, и он начал расселяться сначала по дельте, а позднее по Нижнему Дону и Манычу. Приводятся материалы по динамике численности бакланов в дельте с 1975 по 2016 г., причинам резкого увеличения их количества. В 2015–2016 гг. в дельте размножилось около 4–5 тыс. пар. Птицы наносят большой ущерб рыбным ресурсам. Рассматриваются меры по сокращению поголовья этого вида.

Выводы. Появление бакланов и увеличение их численности на Дону обусловлены зарегулированием стока Дона, развитием прудового рыбоводства, загрязнением водоемов, формированием в дельте и пойме древесной растительности. Апробирование имеющегося опыта регуляции количества бакланов в условиях Дона позволяет внедрить эффективный комплекс мероприятий по снижению численности бакланов.

Ключевые слова: дельта Дона, большой баклан, *Phalacrocorax carbo*, количество, мониторинг, гнездовые колонии, расселение, ущерб, рыбные ресурсы, регулирование численности.

Purpose. The cormorant (*Phalacrocorax carbo L.*) is an abundant species in the Don delta. The aim of the article is to clarify the causes of cormorants dwelling in the Don delta. The authors analyzed cormorant numbers, determined the damage to fishery resources damages and made recommendations to reduce the number of these birds.

Methods. The material for this article is the result of the analysis of author's observations for cormorants in the Don delta during their breeding and post-breeding migrations periods, as well as the available data in the literature on this species in the 20-21 centuries.

Results. The first breeding colonies of cormorants from 32 nests were observed on island Malyi Dvoryan the Don delta in 1975. Over the years, the numbers of the birds grew up, and began to settle in the delta of the first, and then on the Lower Don and Manych. This article contains material on the number of cormorants' dynamics in the delta from 1975 to 2016. The authors consider

the reasons of the sharp increase in the number of these birds. About 5 thousand pairs of cormorants bred in the Don delta in the 2015-2016. Birds cause extensive damage to fish resources. The authors discussed measures to reduce the population of this species.

Conclusion. Appearance of cormorants and increase in their number is caused by control of a Don drain, development of pond fish breeding, pollution of reservoirs, forming of wood vegetation in the delta and the floodplain. Approbation of the available experience of cormorants quantity regulation in the conditions of Don allows implementing an effective complex of actions for decrease in number of cormorants.

Keywords: Don delta, the great cormorant, *Phalacrocorax carbo*, quantity, monitoring, breeding colonies, resettlement, damage, fish resources, population control.

Дельты крупных южных рек являются уникальными в природно-историческом отношении территориями. Не является исключением и дельта Дона, характеризующаяся богатым растительным и животным миром, большими запасами пресной воды, плодородными землями и другими ресурсами. Необходимость их сохранения и рационального использования заставила еще в XIX в. Правительствующий сенат России издать указ от 20.02.1819 г. о создании в дельте Дона рыбного заповедника. В послереволюционные годы XX в. эта территория трансформировалась в Донское запретное рыбное пространство и потеряла статус особо охраняемых природных территорий (ООПТ). В 80–90-х гг. XX в. зоологи РГУ при активном участии сотрудников Ростоблкомприроды, АзНИИРХа, Азоврыбвода, Госохотуправления, археологического музея-заповедника «Танаис» и других структур подготовили материалы для организации Донского дельтового природно-исторического федерального заказника, которые вошли в «Программу неотложных мер по оздоровлению окружающей среды Ростовской области (РО) на 1994–1996 гг.» в качестве первоочередной задачи. Администрация РО одобрила пакет подготовленных документов; вышло постановление губернатора РО № 176 от 14.07.1995 г. «Об организации государственного комплексного заказника федерального значения “Дельта Дона”». Проходившее в то время реформирование правительства России, финансовые и другие трудности привели к тому, что документы были похоронены в столах чиновников. Природным ресурсам Дона этим был нанесен огромный и во многих случаях непоправимый ущерб. Достаточно сравнить состояние воздуха, воды, почвы, лугов, рыбы, здоровья населения и многих других показателей на Нижнем Дону в 80–90-е гг. XX в. и в наше время. Это серьезно беспокоит жителей; возникшими проблемами занимаются Минприроды РО и РФ, природоохранная прокуратура, Донское бассейновое водное управление, МЧС, минздрав РО и многие другие областные и федеральные структуры. Одной из таких проблем является регуляция численности большого баклана (*Phalacrocorax carbo* L.).

Расселение большого баклана на юге СССР началось в середине 70-х гг. XX в. По данным С.Н. Алфераки [1], в конце XIX – начале XX в. на Дону и в Восточном Приазовье бакланы появлялись случайно и размножение их не отмечено. Первые их 32 гнезда на острове Малый (далее М.) Дворян в дельте были отмечены в 1975 г. С годами количество птиц возрастало, и они начали расселяться в других районах Нижнего Дона, Маныча. Долгое время основные гнездовые колонии в дельте Дона располагались на островах М. и Большой (Б.) Дворян, где вместе с бакланами размножались серая (*Ardea cinerea* L.), желтая (*Ardeola ralloides* Scop.) и малая белая (*Egretta garzetta* L.) цапли, кваква (*Nycticorax nycticorax* L.). Наблюдения за этими колониями в разные годы выполнялись Б.А. Казаковым, Н.Х. Ломадзе, А.В. Добриновым, А.В. Тихоновым, Н.В. Морозовой, Н.В. Лебедевой, В.П. Беликом и другими зоологами [2–11]. В их публикациях рассмотрены составы колоний, динамика численности птиц по годам, причины их колебаний, гнездовое поведение, питание, взаимоотношения пернатых и многие другие вопросы. Состав околородных колониальных птиц и их количество в дельте в 1978–2003 гг. показаны в таблице.

Причины появления, быстрого увеличения численности и расселения бакланов на Дону связаны с антропогенными факторами и экологическими изменениями в природе. Строительство Цимлянской и других плотин, зарегулирование стока Дона негативно отразилось на рыбных ресурсах и привели к интенсивному развитию прудового рыбководства, рыбопитомников и рыбопроизводных заводов. В 60–80-х гг. XX в. была сооружена широкая сеть относительно мелководных прудов с прудовой, легкодоступной для рыбоядных птиц рыбой (карпом, белым и пестрым толстолобиками, белым амуром, др.). Это создало благоприятные кормовые условия для бакланов. Интенсивное развитие сельского хозяйства и промышленности в условиях отсутствия регулярных разливов и промывания рек весенними водами вызвало загрязнение водоемов вредными веществами и привело к появлению большого количества больной и ослабленной (т.е. легкодоступной для птиц) рыбы.

**Количество гнезд околоводных птиц в колониях в дельте Дона /
 The number of wading birds nests in colonies of the Don delta**

Год	Большой Баклан	Кваква	Цапли		
			Серая	Малая белая	Желтая
1978	220	194	148	54	2
1979	107	210	193	70	30
1980	154	335	236	130	10
1981	116	345	454	459	10
1982	579	588	428	399	32
1983	1570	556	216	198	18
1986	265	?	?	?	?
1987	850	80	50	70	2
1988	1050	181	54	123	–
1989	745	280	70	210	7
1990	930	236	57	55	7
1991	729	141	91	110	5
1993	704	154	94	224	2
1995	892	148	25	14	0
1996	500	50	12	6	0
1997	883	22	25	14	0
1998	840	70	40	35	0
1999	810	200	30	60	0
2000	850	120	35	60	0
2001	1240	150	42	70	0
2002	1420	45	60	30	0
2003	1800	145	82	38	0

Ограничивающим фактором для бакланов в прошлом являлся недостаток мест для гнездования. Дельта, как и значительная часть поймы, при разливах Дона регулярно на длительный срок заливалась водой, и здесь господствовали луга, тростниковые заросли, различные водоемы. Деревья встречались редко, только на возвышенных участках, около населенных пунктов. Прекращение разливов привело к остепнению лугов, появлению древесной растительности.

В 60–70-е гг. на заросшем тростником острове М. Дворян появились молодые ивы. В первые десятилетия существования колонии птицы заселяли небольшой южный участок острова с наиболее крупными деревьями. Много их в колонии отмечено в 1981–1983 гг., и уже в те годы наблюдались значительная гибель деревьев, их суховершинность, отмирание веток. Процесс гибели деревьев усилился в 1987, 1988 гг., когда количество бакланов резко возросло. Птицы оставили южный участок острова и заселили сначала центральную и северную, а позднее и западную части; значительное количество бакланов выселилось за пределы дельты; число птиц и их гнезд на острове уменьшилось. Количество гнезд других видов птиц в колонии в 1989 г. увеличилось, что связано с гнездованием их в средних и нижних ярусах древостоя, отращиванием поросли ив, а также с ослаблением конкуренции со стороны бакланов.

К концу 80-х гг. зрелые деревья, способные выдержать гнезда бакланов, появились на острове Б. Дворян. В 1989 г. 250 пар переселились на этот остров, сформировав новую микроколонию. С этого времени бакланы живут на обоих островах. Ежегодно на каждом из них происходит перераспределение части гнезд разных видов на отдельных деревьях и их группах, что обусловлено многими факторами: погодными условиями, количеством мест для гнезд, отстрелами птиц, разорением гнезд и др. [10].

Заращение дельты и поймы Дона древесной растительностью, их облесение, интенсивное использование этих земель под промышленные и другие сооружения, поселения людей с высадкой деревьев, искусственное облесение больших территорий (появилась Кумжинская роща, древесные насаждения по берегам от Азова до Аксая и далее, др.) привели к изменению экологических условий. К 80–90-м гг. XX в. деревья приобрели зрелый возраст и фактор ограниченности мест для гнездовых бакланов перестал существовать. Их колонии, как правило, находятся на участках, где птицы редко подвергаются беспокойству со стороны человека.

По мере увеличения количества бакланов на островах Б. и М. Дворян часть особей с них выселялась. Создавались новые колонии в дельте и за её пределами по Н. Дону, Маньчу, на островах Азов-

ского моря. В 1994 г. колония бакланов появилась в тополиной роще восточнее островов. К 02.05.1996 г. здесь размножились 340 пар бакланов, 19.05.1997 г. – 19; в последующие годы они здесь не отмечались. Отстрел бакланов на М. и Б. Дворянах в 2001–2003 гг. и в начале мая 2004 г. привел к сохранению основной колонии на этих островах и появлению новой моновидовой колонии бакланов у ерика Бирючьего. К 26 июня 2004 г. здесь было около 700 гнезд. Общее количество бакланов в дельте возросло (2149 гнезд), кваквы – относительно стабилизировалось, а серой и малой белой цапель – снизилось. По сравнению с 80-ми гг. численность большинства этих видов птиц в среднем снизилась. По данным специалистов природного парка и Ростоблкомприроды, в 2008 г. количество гнезд бакланов на островах М. и Б. Дворян и в районе ерика составило 2026 и 2300, т.е. численность птиц продолжала возрастать. По нашим наблюдениям (08.06.2016 г.) на М. Дворяне было около 850 гнезд бакланов, 36 – серой цапли, 74 – хохотуньи; на Б. Дворяне – бакланов – 1240, малой белой цапли – 38, кваквы – 78; на ерике Бирючьем отмечено 1950 гнезд бакланов, 26 – особей кваквы, 19 – серой цапли. Всего в дельте размножалось около 4000 пар.

Дельта Дона стала основным резерватом бакланов в Ростовской области. Весной, в период перелета, они собираются здесь для отдыха и кормления. Этому способствуют мелководье, обилие пищи (одновременный проход рыбы на нерест, зарыбление прудов), безопасность. Отсюда птицы распределяются по местам размножения. После вылета птенцов бакланы с Н. Дона и соседних районов опять концентрируются в дельте (в том числе и на рыбоводных прудах) и Таганрогском заливе, где имеются достаток кормов, относительная безопасность (ООПТ – участок «Дельта Дона» природного парка «Донской»), близость мест зимовки. В июле-августе 2015 и 2016 гг. здесь держалось до 15–25 тыс. птиц.

Бакланы кормятся рыбой, используя несколько десятков видов разных размеров (сазан, карп, густера, белый амур, толстолобик, сельдь, чехонь, тюлька, бычки, уклея и др.). Состав добываемой рыбы определяется её доступностью. За кормом птицы летают дважды в день на расстояние до 10–20 км и более и добывают её на глубине до 4 м. Взрослые особи за сутки поедают до 1 кг, в среднем 700–750 г [12]. В дельте Дона вес рыбы в пробах корма колеблется от 2 до 508 г (в среднем 450 г), размеры – от 20 до 420 мм [6]. Количество рыбы, съедаемой размножающимися в дельте бакланами в теплый период, по самым скромным расчетам составляет не менее 1000 т ежегодно. Име-

ются сведения, что на месте охоты количество убитой, но неиспользованной рыбы превышает количество съеденной на 20–25 % [12]. Насытившись, бакланы нередко продолжают ловить рыбу. Отдельные рыбы вырываются из клюва птиц, но, будучи сильно искалеченными, позже погибают. Кроме того, в послегнездовый период сюда прилетают бакланы со всего Нижнего Дона и Таганрогского залива (до 15–25 тыс. особей). Концентрируются они в дельте и весной. Общий урон от этого вида, вероятно, составляет 2 и более тыс. т.

Бакланы не только наносят большой ущерб рыбным ресурсам Дона, прежде всего прудовому рыбоводству. Высокая их численность в дельте Дона ограничивает количество других видов околоводных птиц, негативно влияет на древесную растительность, загрязняет воду и создает благоприятные условия для размножения ряда вредных организмов для ресурсных и ценных животных, приводит к другим негативным последствиям. Бакланы являются потенциальными носителями возбудителей и прокормителями переносчиков ряда болезней домашних животных и людей. Это особенно опасно, так как дельта Дона находится в центре мегаполиса Ростов – Таганрог – Азов – Батайск, прилегающих населенных пунктов.

Попытки сокращения численности бакланов в дельте путем ежегодных отстрелов велись с 80-х гг. XX в. (1984–2003 гг. и др.). Они приводили лишь к исчезновению в колониях краснокнижных птиц (желтой цапли), сокращению количества малой белой цапли, кваквы и других видов, перераспределению птиц в колониях и в конечном итоге к увеличению количества бакланов [7–10]. Колонии бакланов находятся на ООПТ, отстрелы отрицательно влияют на обитающих здесь ценных (промысловых рыб, гусей, уток, куликов и т.д.) и редких животных. Рекомендации по применению в колонии химических препаратов [2] приведут к непоправимым для биоресурсов дельты Дона и Таганрогского залива последствиям.

В 90-х гг. был проведен анализ численности бакланов, мониторинг биологических, фенологических и других особенностей. Он показал, что в дельте оптимальное количество птиц составляет 300÷600 пар, и необходимо применять комплекс регулирующих их численность мероприятий [9, 10]. Данный вид широко распространен в Евразии, Африке и других регионах [12], хорошо изучен, во многих районах его количество регулируется. В РО численность бакланов ряд лет ограничивалась в некоторых местах Веселовского водохранилища. Анализ имеющегося международного и отечественного опыта, апробирование его в мест-

ных условиях позволят разработать и внедрить в дельте Дона, а позднее – на юге – комплекс мероприятий по снижению численности бакланов до оптимального количества. Этот комплекс должен состоять из безвредных для окружающей природы научно обоснованных регулирующих мероприятий, основанных на биологических знаниях жизненных циклов бакланов и сопутствующих видов птиц, ценных и редких рыб, фенологических материалах, оценке экологической ситуации в дельте и на Нижнем Дону.

К сожалению, данная работа не была выполнена, что привело к резкому увеличению количества бакланов в дельте и на Нижнем Дону, к нанесению ущерба рыбным и другим биоресурсам. Экологическая ситуация с природными ресурсами в дельте в последние десятилетия ухудшилась. Колонии бакланов располагаются на ООПТ природного парка «Донской» (бывший заказник «Гирловский»). Население здесь законно и незаконно осваивает дельту (возводятся различные строения, интенсивно добывается песок, нарушается ландшафт), часто изменяются статус и ведомственная подчиненность ООПТ, их площади. Квалифицированные зоологи в природном парке, дирекции государственных природных заказников и в минприроды РО отсутствуют. Решать проблемы бакланов некому. Целесообразны поиск и приглашение специалистов, их подготовка в ЮФУ.

В 2007 г. А.Д. Липкович разработал для Ростоблкомприроды проект-концепцию по созданию в дельте Дона орнитологической обсерватории. Нет сомнения в большой научной, практической, экономической (только сохраненные от уничтожения бакланами рыбные ресурсы по стоимости превысили бы функционирование обсерватории), природоохранной её значимости, но в наше время создать такую структуру сложно. Однако в штате природного парка необходимо иметь квалифицированного орнитолога (зоолога), который с помощью инспекторов и ученых сможет решать вопросы оптимальной регуляции численности баклана и других видов животных. Вопросы регуляции численности бакланов в дельте остаются экологически и экономически очень острыми и нуждаются в решении.

Литература

1. Алфераки С.Н. Птицы Восточного Приазовья // Орнитол. вестн. 1910. № 1–4. С. 11–35, 73–93, 162–170, 245–252.
2. Белик В.П. Антропогенный фактор в расселении и гнездовании большого баклана на Нижнем Дону // Экол. проблемы Ставроп. края и сопредельных террито-

рий : тез. докл. краевой науч.-практ. конф. Ставрополь, 1989. С. 156–159.

3. Казаков Б.А., Ломадзе Н.Х. Рыбоядные птицы в прудовых хозяйствах дельты Дона // Кавк. орнитол. вестн. 1991. Вып. 1. С. 38–47.

4. Казаков Б.А., Ломадзе Н.Х., Гончаров В.Т. Состояние колоний околоводных птиц дельты Дона и Западного Маныча // Фауна, экология и охрана животных Сев. Кавказа. Нальчик, 1980. С. 112–129.

5. Казаков Б.А., Ломадзе Н.Х., Гончаров В.Т. О колонии больших бакланов и голенастых в дельте Дона // Науч. основы обследования колониальных гнездовых околоводных птиц. М., 1981. С. 84–86.

6. Лебедева Н.В., Ломадзе Н.Х., Казаков Б.А. Популяционная экология большого баклана *Phalacrocorax carbo sinensis* в Таганрогском заливе Азовского моря // Экосистема исследования Азовского моря и побережья. Апатиты, 2002. Т. IV. С. 344–359.

7. Миноранский В.А. Дельта // Дон. 1989. № 5. С. 122–133.

8. Миноранский В.А. Приговоренные к расстрелу: проблема расселения и образования новых гнездовых колоний бакланов // Молот. 1991. 20 апр.

9. Миноранский В.А. Динамика численности рыбоядных птиц в смешанной колонии в дельте Дона // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 1995. № 2. С. 80–82.

10. Миноранский В.А., Добринов А.В. Наблюдения над гнездовым поведением рыбоядных птиц в смешанной колонии в дельте Дона // Кавк. орнитол. вестн. 1996. Вып. 8. С. 125–131.

11. Миноранский В.А. Уникальные экосистемы: дельта Дона. Ростов н/Д., 2004. 233 с.

12. Дементьев Г.П., Гладков Н.А., Птушенко Е.С., Спангенберг Е.П., Судилова А.М. Птицы Советского Союза. Т. I. М., 1951. 652 с.

References

1. Alferaki S.N. Ptitsy Vostochnogo Priazov'ya [Birds of the Eastern Azov Sea]. *Ornitol. vestn.* 1910, No. 1-4, pp. 11-35, 73-93, 162-170, 245-252.
2. Belik V.P. [The anthropic factor in the distribution and nesting of the great cormorant on the Lower Don]. *Ekol. problemy Stavr. kraia i sopredel'nykh territorii* [Ecological problems of the Stavropol Territory and adjacent territories]. Abstracts of the reports of the Regional Scientific Practical Conference. Stavropol, 1989, pp. 156-159.
3. Kazakov B.A., Lomadze N.Kh. Ryboyadnye ptitsy v prudovykh khozyaistvakh del'ty Dona [Fish-eating birds in pond farms of the delta of the Don]. *Kavk. ornitol. vestn.* 1991, iss. 1, pp. 38-47.
4. Kazakov B.A., Lomadze N.Kh., Goncharov V.T. [State of the colonies of waterbirds in the Don delta and

Western Manych]. *Fauna, ekologiya i okhrana zhivotnykh Sev. Kavkaza* [Fauna, ecology and animal welfare of the North Caucasus]. Nalchik, 1980, pp. 112-129.

5. Kazakov B.A., Lomadze N.Kh., Goncharov V.T. [On the colony of large cormorants and holed in the Don delta]. *Nauch. osnovy obsledovaniya kolonial'nykh gnezdovii okolovodnykh ptits* [Scientific foundations of the survey of colonial nesting of waterbirds]. Moscow, 1981, pp. 84-86.

6. Lebedeva N.V., Lomadze N.Kh., Kazakov B.A. [Population ecology of the great cormorant *Phalacrocorax carbo sinensis* in the Taganrog Gulf of the Azov Sea]. *Ekosistema issledovaniya Azovskogo morya i poberezh'ya* [Ecosystem of the Azov Sea and coast studies]. Apatity, 2002, vol. 4, pp. 344-359.

7. Minoranskii V.A. Del'ta [Delta]. *Don*. 1989, No. 5, pp. 122-133.

8. Minoranskii V.A. Prigovorennye k rasstrelu: problema rasseleniya i obrazovaniya novykh gnezdovykh kolonii baklanov [Sentenced to be shot: the problem of

resettlement and the formation of new nesting colonies of cormorants]. *Molot*. 1991, April 20.

9. Minoranskii V.A. Dinamika chislennosti ryboyadnykh ptits v smeshannoi kolonii v del'te Dona [Dynamics of number of fish-eating birds in a mixed colony in the Don delta]. *Izv. vuzov. Sev.-Kavk. region. Estestv. nauki*. 1995, No. 2, pp. 80-82.

10. Minoranskii V.A., Dobrinov A.V. Nablyudeniya nad gnezdovym povedeniem ryboyadnykh ptits v smeshannoi kolonii v del'te Dona [Observations on the nesting behavior of fish-eating birds in a mixed colony in the Don delta]. *Kavk. ornitol. vestn.* 1996, iss. 8, pp. 125-131.

11. Minoranskii V.A. *Unikal'nye ekosistemy: del'ta Dona* [Unique ecosystems: Don delta]. Rostov-on-Don, 2004, 233 p.

12. Dement'ev G.P., Gladkov N.A., Ptushenko E.S., Spangenberg E.P., Sudilovskaya A.M. *Ptitsy Sovetskogo Soyuz* [Birds of the Soviet Union]. Vol. 1. Moscow, 1951, 652 p.

Поступила в редакцию / Received

2 декабря 2016 г. / December 2, 2016

УДК 579.843.1:57.083.13:579.26

DOI 10.18522/0321-3005-2017-1-73-79

МЕТОДЫ КУЛЬТИВИРОВАНИЯ И ИЗУЧЕНИЯ БАКТЕРИАЛЬНЫХ БИОПЛЕНОК

© 2017 г. И.Р. Симонова, С.Н. Головин, Л.М. Веркина, Е.А. Березняк, С.В. Титова

METHODS OF CULTURING AND STUDYING BACTERIAL BIOFILMS

I.R. Simonova, S.N. Golovin, L.M. Verkina, E.A. Bereznyak, S.V. Titova

Симонова Ирина Рафиковна – Ростовский-на-Дону противочумный институт Роспотребнадзора, научный сотрудник, лаборатория биологической безопасности и лечения, ул. М. Горького, 117/40, г. Ростов-на-Дону, 344002, Россия, e-mail: labbiobez@mail.ru

Irina R. Simonova – Rostov-on-Don Anti-Plague Institute, Rosпотребнадзор, Researcher, Laboratory of Biological Safety and Treatment of Especially Dangerous Infections, M. Gorkogo St., 117/40, Rostov-on-Don, 344002, Russia, e-mail: labbiobez@mail.ru

Головин Сергей Николаевич – Ростовский-на-Дону противочумный институт Роспотребнадзора, лаборант, лаборатория биологической безопасности и лечения, ул. М. Горького, 117/40, г. Ростов-на-Дону, 344002, Россия, e-mail: labbiobez@yandex.ru

Sergey N. Golovin – Rostov-on-Don Anti-Plague Institute, Rosпотребнадзор, Assistant, Laboratory of Biological Safety and Treatment of Especially Dangerous Infections, M. Gorkogo St., 117/40, Rostov-on-Don, 344002, Russia, e-mail: labbiobez@yandex.ru

Веркина Людмила Михайловна – Ростовский-на-Дону противочумный институт Роспотребнадзора, кандидат медицинских наук, заведующая лабораторией биологической безопасности и лечения, ул. М. Горького, 117/40, г. Ростов-на-Дону, 344002, Россия, e-mail: labbiobez@mail.ru

Lyudmila M. Verkina – Rostov-on-Don Anti-Plague Institute, Rosпотребнадзор, Candidate of Medicine, Head of Laboratory of Biological Safety and Treatment of Especially Dangerous Infections, M. Gorkogo St., 117/40, Rostov-on-Don, 344002, Russia, e-mail: labbiobez@mail.ru

Березняк Елена Александровна – Ростовский-на-Дону противочумный институт Роспотребнадзора, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, лаборатория биологической безопасности и лечения, ул. М. Горького, 117/40, г. Ростов-на-Дону, 344002, Россия, e-mail: labbiobez@mail.ru

Elena A. Bereznyak – Rostov-on-Don Anti-Plague Institute, Rosпотребнадзор, Candidate of Biology, Senior Researcher, Laboratory of Biological Safety and Treatment of Especially Dangerous Infections, M. Gorkogo St., 117/40, Rostov-on-Don, 344002, Russia, e-mail: labbiobez@mail.ru

Титова Светлана Викторовна – Ростовский-на-Дону противочумный институт Роспотребнадзора, кандидат медицинских наук, директор, ул. М. Горького, 117/40, г. Ростов-на-Дону, 344002, Россия, e-mail: svetatitova@bk.ru

Svetlana V. Titova – Rostov-on-Don Anti-Plague Institute, Rosпотребнадзор, Candidate of Medicine, Director, M. Gorkogo St., 117/40, Rostov-on-Don, 344002, Russia, e-mail: svetatitova@bk.ru

Рассматриваются основные методы культивирования и изучения биопленок микроорганизмов. Актуальное на данный момент направление в микробиологии и медицине – исследование биопленок – привело к появлению большого числа различных методов их получения и исследования, совокупность которых позволяет изучать ключевые параметры биопленок и ответить на вопрос: что собой представляют эти структуры? Интерес к этой проблеме вызван в первую очередь клинической значимостью биопленок как одной из главных причин осложнений в хирургии при использовании имплантов. Проблема биопленкообразования требует пересмотра стандартов антибиотикотерапии, а также практического применения дезинфектантов в силу устойчивости биопленочных форм микроорганизмов к применяемым на данный момент дозам и концентрациям. Кроме того, важна эпидемиологическая значимость биопленок как факторов, способствующих сохранению инфекций в природных очагах. В статье освещены методы динамического и статического культивирования биопленок *in vitro* и *in vivo*, их достоинства и недостатки. Описаны различные варианты микроскопии, используемые для изучения структуры и морфологии биопленок, а также генетические методы исследований, позволяющие оценить уровень экспрессии различных генов и выявить их роль в биопленкообразовании.

Ключевые слова: биопленка, биопленкообразование, культивирование биопленок, сканирующая электронная микроскопия, трансмиссионная электронная микроскопия, лазерная конфокальная микроскопия.

We review the main methods of cultivation and a research of biofilms of microorganisms in this article. Research of biofilms - direction are currently important in microbiology and medicine - lead to emergence of a large number of various methods of their receiving and a research. This methods set allows to study key parameters of biofilms and to answer a question: what is represented by these structures? In first interest for this issue was caused by biofilms as the clinical significance key factor complications in implant surgery. The problem of biofilm formation requires a revision of the standards of antibiotic treatment, as well as the practical

application of disinfectants in view of the microbial resistance in biofilms at doses and concentrations, which used in clinical practice. Also important epidemiological significance of biofilm as the factors contributing to the conservation of infections in natural foci. We review methods of dynamic and static cultivation of biofilms in vitro and in vivo and their benefits and limitations in article. Various options of a microscopy used for studying of biofilms structure and morphology, and the genetic methods of researches allowing to estimate the level of an expression of various genes and to reveal their role in biofilm formation.

Keywords: biofilm, biofilm formation, biofilm culturing, scanning electron microscopy, transmission electron microscopy, laser scanning confocal microscopy.

Введение

Вплоть до конца XX в. в микробиологии было принято считать, что в естественных условиях микроорганизмы существуют в свободно взвешенном состоянии, и все описанные свойства изучались на так называемых планктонных формах чистых культур. Сейчас известно, что в естественной среде обитания до 99 % всех микроорганизмов существуют в виде биоплёнок [1] – организованных сообществ бактерий, состоящих из активно функционирующих клеток и покоящихся форм, заключенных в экстрацеллюлярный матрикс. Биопленки формируются на границе раздела твердой и жидкой или твердой и газообразной фаз. Исследования таких объектов приобрели в настоящее время систематический характер.

Изучение феномена биопленок стало возможным в первую очередь благодаря появлению вы-

сокотехнологического оборудования, позволяющего определять компоненты экстрацеллюлярного матрикса, его структуру, уровень экспрессии генов, ответственных за биопленкообразование, так как именно эти параметры [2] позволяют отличать биопленки от внешне похожих на них объектов, например колоний на агаре.

По последним данным, сформировавшаяся биопленка представляет собой сложноорганизованный аналог многоклеточной ткани с генетической регуляцией и собственной транспортной и сигнальной системами [1–3].

Биопленки по своей структуре – не гомогенные слои бактериальных клеток, фиксированные на поверхности, а гетерогенные во времени и в пространстве структуры с уровневой разнородностью, и их формирование – это сложный динамический процесс, состоящий из нескольких этапов (рис. 1):

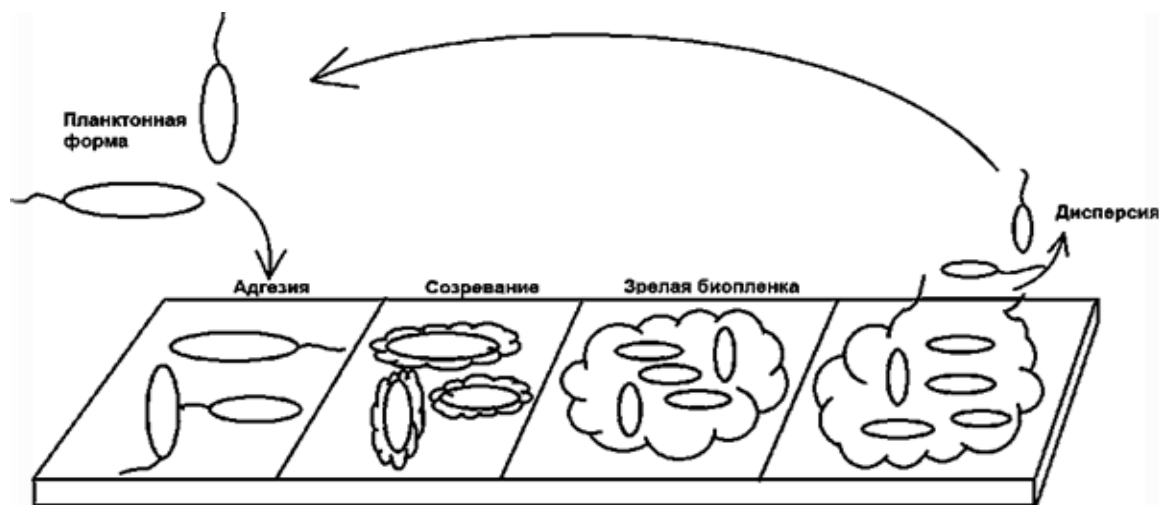


Рис. 1. Схема биопленкообразования / Fig. 1. Scheme of biofilm formation

1. Обратимая адгезия планктонных клеток к поверхности субстрата, связанная с действием неспецифических сил взаимодействия (ван-дер-ваальсовы, гидрофобные, электростатические и дисперсионные силы Лондона) [4].

2. Необратимая адгезия бактерий к субстрату посредством жгутиков и пилей IV типа, неполимерных адгезинов, лектина фимбрий и др.

3. Созревание биопленки, во время которого адгезированные бактерии, обмениваясь генами, начи-

нают синтезировать внеклеточное полимерное вещество, к которому прикрепляются также вторичные колонизаторы из планктонных форм [4].

4. В стадии зрелой биопленки бактерии практически не делятся, так как этому препятствует окружающий их матрикс, но сохраняют при этом высокую жизнеспособность.

5. Дисперсия, т.е. разрушение зрелой биопленки, с вторичной планктонизацией наступает через определённый период под действием собственных

бактериальных сурфактантов и других веществ, в результате чего высвободившиеся клетки получают питательные вещества, а также способность к делению и колонизации других поверхностей.

Стоит отметить, что адгезия микроорганизмов к колонизируемой поверхности является ключевым моментом, без которого образование биопленки невозможно. Адгезивность микроорганизмов зависит от большого числа различных параметров, определяемых в первую очередь видовой принадлежностью, и инициируется при формировании суммы необходимых экологических параметров (температуры, парциального давления кислорода, осмолярности, pH), опосредующих переход от планктонной формы существования к биопленочной [5–8].

Методы культивирования биопленок

В процессе изучения биопленок разрабатывались различные методы их культивирования, как *in vivo*, так и *in vitro*. Последние еще на ранних этапах разделились на два направления: динамическое и статическое.

В первом варианте исследуемые микроорганизмы циркулируют в жидкой питательной среде в закрытой системе (рис. 2). Биопленки образуются на фильтрах, специальных пластинах, капиллярах и полостях самой системы [9–12]. Основным преимуществом данной методики является максимальное приближение к условиям живых систем. Непрерывное поступление питательных веществ и удаление метаболитов позволяют увеличить интенсивность биопленкообразования. К недостаткам можно отнести большой расход питательных сред, сложную конструкцию, трудность стерилизации устройств и высокую стоимость их эксплуатации.

В статических методах наиболее часто применяется культивирование в пластиковых планшетах, в которые вносят суспензию бактерий. После инкубации планктон удаляют вместе с питательной средой, а оставшиеся биопленки исследуют различными способами, чаще – измеряют оптическую плотность. Однако стоит учитывать, что адгезия даже одних и тех же штаммов к разным поверхностям варьирует, и немаловажную роль в этом играют электрические заряды [13] (рис. 3).

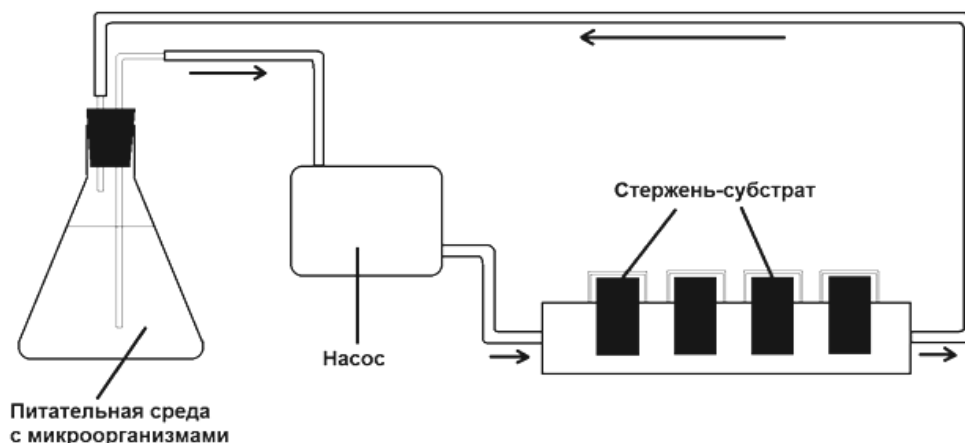


Рис. 2. Динамический метод культивирования биопленок / Fig. 2. Dynamic method for biofilms cultivation

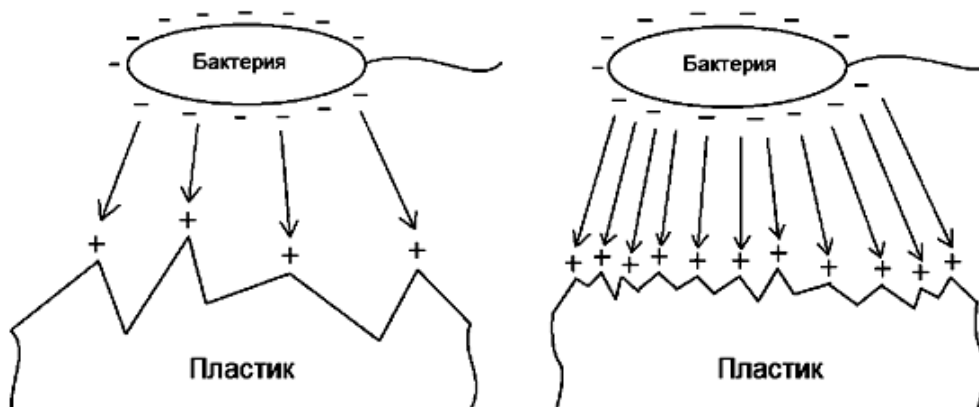


Рис. 3. Зависимость неспецифической адгезии микроорганизмов от степени заряда абиотической поверхности / Fig. 3. Dependence of the nonspecific adhesion of microorganisms from the degree of abiotic surface charge

Использование планшетов даже одного производителя может приводить к получению разных результатов, а помимо особенностей планшета, на формирование биопленок влияют еще и электролитный состав питательных сред и степень аэрации.

Другим статическим методом является культивирование биопленок на пористых дисках: на поверхность плотной питательной среды помещают диск, на который наносят суспензию исследуемой культуры, а питательные вещества поступают через поры диска путем диффузии [14] (рис. 4).

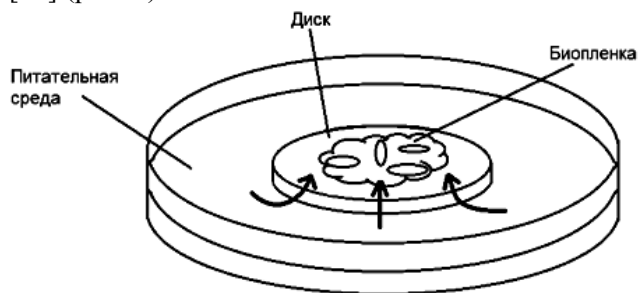


Рис. 4. Культивирование биопленок на гидроксиапатитовых дисках / Fig. 4. Cultivation of biofilms on hydroxyapatite disks

Широко используется также метод выращивания биопленок на покровных или предметных стеклах, пластике (рис. 5) [15] и тефлоновых блочках (рис. 6) [16].

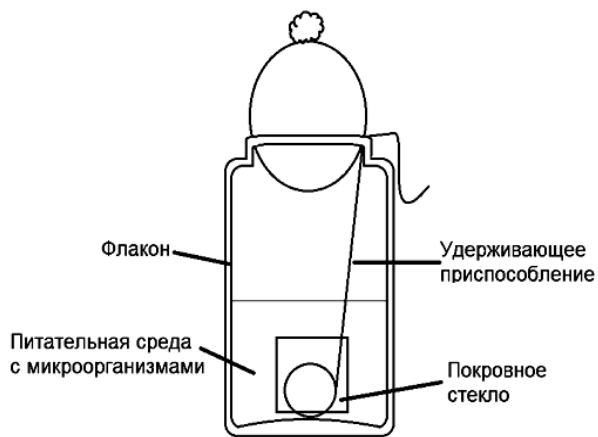


Рис. 5. Культивирование биопленок на покровных стеклах / Fig. 5. Cultivation of biofilms on the cover glasses

Существуют и методы культивирования биопленок *in vivo*. Для этого используют как различных млекопитающих (крыс, кроликов, обезьян, собак и т.д.), так и насекомых, гельминтов, простейших и растения. На млекопитающих удобно изучать биопленкообразование в хирургической ране или эндопротезах. Использование, например, нема-

тод позволяет изучать биопленкообразование в условиях, приближенных к природным, что является важным в понимании механизмов сохранения бактерий в различных природных очагах и их длительной персистенции [17].



Рис. 6. Культивирование биопленок на тефлоновых блочках / Fig. 6. Cultivation of biofilm on teflon blocks

Отдельная группа методов – *ex vivo*. В них культивирование биопленок производят на слоях различных эукариотических клеточных культур, например: HeLa, RHE, HMEC-1 Cells и т.п., или фрагментах различных органов. Способы культивирования могут быть как динамическими, так и статическими.

Методы изучения биопленок

Помимо культивирования, важной задачей являются визуализация полученных биопленок и изучение их свойств. Для этого существует большое количество методов: от измерения оптической плотности до различных вариантов световой и электронной микроскопии.

Для исследования биопленкообразования методом измерения оптической плотности из планшетов с полученными пленками бактерий удаляют питательную среду, промывают лунки физиологическим раствором для удаления планктонных форм микроорганизмов и окрашивают 1%-м спиртовым раствором кристаллвиолета. После инкубации в течение определенного времени краситель декан-

тируют, промывают дистиллированной водой и экстрагируют краситель этанолом. На микропланшетном спектофотометре измеряют оптическую плотность, оценивая по её величине способность к биопленкообразованию [18].

Световая микроскопия с применением различных стандартных методов окрашивания позволяет оценить, во-первых, степень биопленкообразования; а во-вторых, определить морфологический состав биопленок. В отличие от банальной световой микроскопии, её разновидность – конфокальная микроскопия позволяет получать трехмерные изображения биопленок. Используя различные красители, можно изучать взаиморасположение молекул в клетке, но самое главное преимущество – возможность исследовать живые клетки и динамические процессы в них.

Электронная микроскопия позволяет подробно изучить состав и ультраструктуру бактериальных пленок на различных этапах и при различных условиях культивирования, а также визуализировать эффекты воздействия на них различных факторов.

Так, например, растровая (сканирующая) электронная микроскопия, принцип которой заключается в прохождении пучка электронов вдоль поверхности образца и фиксировании свойств отраженных электронов, позволяет получить четкое изображение топографии этой поверхности [19, 20].

Атомно-силовая (зондовая) микроскопия – разновидность сканирующей микроскопии, но сканирование в этом случае происходит не пучком электронов, а специальной иглой-зондом – кантилвером. Помимо топографии поверхности, появляется возможность определять механические свойства бактерий (жесткость и пластичность), а измеряя электрическое сопротивление – и элементный состав образца [20].

Трансмиссионная (просвечивающая) электронная микроскопия хотя и более трудна в плане пробоподготовки объектов, тем не менее позволяет визуализировать как наружные, так и внутренние структуры и самой биопленки, и клеток в частности, причем в различных плоскостях. Применение гистохимических методов контрастирования при этом виде микроскопии дает возможность определять и химический состав различных компонентов биопленки [17, 19, 21–23].

К проблемам, возникающим при исследовании биопленок, необходимо отнести случаи, когда достаточно часто агаровые колонии микроорганизмов представляют как биопленки. При этом упускается факт несоответствия свойств колонии на агаре истинной биопленке: отсутствие адгезии, разный уровень экспрессии генов и пространственная

структура. Другим примером является метод отпечатков, при котором пленку-подложку, смонтированную на сетку, прикладывают к биопленке, а затем на получившийся отпечаток напыляют слой тяжелого металла. Данный метод явно не позволяет получить объективную картину рельефа исследуемой биопленки в отличие от метода реплик, при котором металл напыляется непосредственно на биопленку, что обеспечивает сохранность истинного рельефа биопленки.

Еще одним важным аспектом в исследовании биопленок является изучение экспрессии генов. Несомненно, такой сложный процесс, как биопленкообразование, основан на работе определенных генов, и для их выявления используют ряд методов [1].

Один из них уже рассматривался выше – лазерная конфокальная микроскопия. Используя гены-репортеры, кодирующие флуоресцирующие белки, удалось показать, к примеру, что интенсивность горизонтального переноса генов в биопленках выше, чем в планктонных культурах. Данный метод также позволяет наблюдать за миграцией плазмид.

Методы протеомики, такие как двухмерный электрофорез, показывая активность генов, позволяют установить различия в их экспрессии как между планктонными и биопленочными формами микроорганизмов, так и на разных этапах формирования биопленки.

Метод микроматриц позволяет определить различия в транскрипционной активности схожих участков генома путем сравнения уровня соответствующих ему мРНК.

Используя технологию матрично-активированной лазерной десорбции / ионизации (MALDI) и анализируя масс-спектры белков, сопоставляя показатели масса / заряд (m/z) и относительную интенсивность пиков, можно не только проводить идентификацию микроорганизмов по базам данных, но и определять различия в уровне экспрессии различных генов планктонных и биопленочных культур [2].

Заключение

Открытие феномена биопленкообразования и его дальнейшее изучение показали, что биопленки оказывают значительное влияние на патогенез многих инфекционных заболеваний. Хирурги и стоматологи столкнулись с необходимостью борьбы с данным явлением в своей практике, так как широкое использование имплантов сопряжено с риском формирования биопленок, а лечение постоперационных осложнений затруднительно вследствие

низкой чувствительности биопленок к антибиотикам и дезинфектантам.

Биопленки микроорганизмов в естественной среде обитания могут быть одним из резервуаров для возбудителей эпидемически значимых инфекций.

Все это указывает на актуальность и важность изучения биопленок, а также на необходимость разработки методов профилактики образования биопленок и борьбы с ними. Этому способствует большое разнообразие технических средств и методик их применения, разработка и усовершенствование которых продолжается и в настоящее время.

Литература

1. Николаев Ю.А., Плакунов В.К. Биопленка – «город микробов» или аналог многоклеточного организма? // Микробиология. 2007. Т. 76, № 2. С. 149–163.
2. Чеботарь И.В., Погорелов А.Г., Яшин В.А., Гурьев Е.Л., Ломинадзе Г.Г. Современные технологии исследования бактериальных биопленок // Современные технологии в медицине. 2013. Т. 5, № 1. С. 14–20.
3. Фролова Я.Н. Биологические свойства биопленок токсигенных штаммов *Corynebacterium diphtheriae* gravis tox+ : дис. ... канд. биол. наук. Ростов н/Д., 2015. 23 с.
4. Carpentier B., Cerf O. Biofilms and their consequences, with particular reference to hygiene in the food industry // J. Appl. Bacteriol. 1993. Vol. 75, № 6. P. 499–511.
5. El-Azizi M., Rao S., Kanchanapoom T., Khardori N. Molecular basis of bacterial adhesion // Ann. Clin. Microbiol Antimicrob. 2005. Vol. 7. P. 29–41.
6. O'Toole G.A., Gibbs K.A., Hager P.W., Phibbs P.V.Jr., Kolter R. The global carbon metabolism regulator Crc is a component of a signal transduction pathway required for biofilm development by *Pseudomonas aeruginosa* // J. Bacteriol. 2000. Vol. 182. P. 425–431.
7. O'Toole G. A., Kaplan H., Kolter R. Biofilm formation as microbial development // Annu. Rev. Microbiol. 2000. Vol. 54. P. 49–79.
8. An Y.H., Dickinson R.B., Doyle R.J. Mechanisms of bacterial adhesion and pathogenesis of implant and tissue infections // Handbook of bacterial adhesion: principles, methods, and applications. Totowa, 2000. P. 1–27.
9. Hall-Stoodley L., Rayner J., Stoodley P., Lappin-Scott H. Establishment of experimental biofilms using the modified robbins device and flow cells // Meth. Biotechn. 1999. Vol. 12. P. 307–318.
10. Jakobsen T.H., Van Gennip M., Christensen L.D., Bjarnsholt T., Givskov M. Qualitative and quantitative determination of quorum sensing inhibition in vitro. Quorum sensing: methods and protocols // Methods in Molecular Biology. 2011. Vol. 692. P. 253–263.
11. Goeres D.M., Loetterle L.R., Hamilton M.A., Murga R., Kirby D.W., Donlan R.M. Statistical assessment of a

laboratory method for growing biofilms // Microbiology. 2005. Vol. 151. P. 757–762.

12. Лямин А.В., Боткин Е.А., Жестков А.В. Методы выявления биопленок в медицине: возможности и перспективы // Клиническая микробиология и анти-микробная химиотерапия. 2012. Т. 14, № 1. С. 17–22.

13. Серегина Н.В., Честнова Т.В., Жеребцова В.А., Хромушин В.А. Обзор биофизических особенностей микробной адгезии // Вестн. новых медицинских технологий. 2008. Т. XV, № 3. С. 175–177.

14. Merritt J.H., Kadouri O.E., O'Toole G.A. Growing and analyzing static biofilms // Current Protocols in Microbiology. 2011. 1B.1.1–1B.1.18.

15. Тутова С.В., Кушнарева Е.В. Оценка способности холерных вибрионов к образованию биопленок in vitro с помощью нового методического подхода // Фундаментальные исследования. 2014. Вып. 10, ч. 2. С. 375–379.

16. Стрелкова Е.А. Действие стрессовых факторов на бактериальные биопленки с дефектом структуры внеклеточного полимерного матрикса : автореф. дис. ... канд. биол. наук. М., 2013. 26 с.

17. Кошель Е.И. Образование биопленки штаммами *Yersinia pestis* разных подвидов и их взаимодействие с членами почвенных биосеннозов : дис. ... канд. биол. наук. Саратов, 2014. 22 с.

18. Беляева Е.В., Кичикова В.В., Никифоров В.А. Исследование способности к образованию биопленки представителей микробиоценоза слизистой носоглотки практически здоровых людей // Мед. альманах. 2014. Т. 4, № 34. С. 49–51.

19. Мальник В.В. Микробное сообщество биопленок на поверхности раздела фаз «вода – твердое тело» литоральной зоны оз. Байкал : автореф. дис. ... канд. биол. наук. Улан-Удэ, 2010. 22 с.

20. Ерохин П.С. Атомно-силовая микроскопия как инструмент определения чувствительности бактерий к факторам биотической и абиотической природы : дис. ... канд. физ.-мат. наук. Саратов, 2015. 22 с.

21. Чеботарь И.В. Биопленки *Staphylococcus aureus*: структурно-функциональные характеристики и взаимоотношение с нейтрофилами: дис. ... д-ра мед. наук. Н. Новгород, 2014. 43 с.

22. Beveridge T.J. Visualizing Bacterial Cell Walls and Biofilms // Microbe. 2006. Vol. 1, № 6. P. 279–284.

23. Zahller J., Stewart P.S. Transmission electron microscopic study of antibiotic action on *Klebsiella pneumoniae* biofilm // Antimicrobial agents and chemotherapy. 2002. Vol. 46, № 8. P. 2679–2683.

References

1. Nikolaev Yu.A., Plakunov V.K. Bioplenka - «gorod mikrobov» ili analog mnogokletochnogo organizma? [Biofilm - “the city of microbes” or an analog of a multicellular organism?]. *Mikrobiologiya*. 2007, vol. 76, No. 2, pp. 149-163.

2. Chebotar' I.V., Pogorelov A.G., Yashin V.A., Gur'ev E.L., Lominadze G.G. Sovremennyye tekhnologii issledovaniya bakterial'nykh bioplenok [The modern technologies of a research of biofilms]. *Sovremennyye tekhnologii v meditsine*. 2013, vol. 5, No. 1, pp. 14-20.
3. Frolova Ya.N. *Biologicheskie svoystva bioplenok toksigennykh shtammov Corynebacterium diphtheriae gravis tox+*: avtoref. dis. ... kand. biol. nauk [Biological properties of biofilms of toxicogenic strains *Corynebacterium diphtheriae gravis tox+*]. Rostov-on-Don, 2015, 23 p.
4. Carpentier B., Cerf O. Biofilms and their consequences, with particular reference to hygiene in the food industry. *J. Appl. Bacteriol.* 1993, vol. 75, No. 6, pp. 499-511.
5. El-Azizi M., Rao S., Kanchanapoom T., Khardori N. Molecular basis of bacterial adhesion. *Ann. Clin. Microbiol. Antimicrob.* 2005, vol. 7, pp. 29-41.
6. O'Toole G.A., Gibbs K.A., Hager P.W., Phibbs P.Vr., Kolter R. The global carbon metabolism regulator Crc is a component of a signal transduction pathway required for biofilm development by *Pseudomonas aeruginosa*. *J. Bacteriol.* 2000, vol. 182, pp. 425-431.
7. O'Toole G. A., Kaplan H., Kolter R. Biofilm formation as microbial development. *Annu. Rev. Microbiol.* 2000, vol. 54, pp. 49-79.
8. An Y.H., Dickinson R.B., Doyle R.J. Mechanisms of bacterial adhesion and pathogenesis of implant and tissue infections. *Handbook of bacterial adhesion: principles, methods, and applications*. Totowa, 2000, pp. 1-27.
9. Hall-Stoodley L., Rayner J., Stoodley P., Lappin-Scott H. Establishment of experimental biofilms using the modified robbins device and flow cells. *Meth Biotechn.* 1999, vol. 12, pp. 307-318.
10. Jakobsen T.H., Van Gennip M., Christensen L.D., Bjarsholt T., Givskov M. Qualitative and quantitative determination of quorum sensing inhibition in vitro. Quorum sensing: methods and protocols. *Methods in Molecular Biology*. 2011, vol. 692, pp. 253-263.
11. Goeres D.M, Loetterle L.R., Hamilton M.A., Murga R., Kirby D.W., Donlan R.M. Statistical assessment of a laboratory method for growing biofilms. *Microbiology*. 2005, vol. 151, pp. 757-762.
12. Lyamin A.V., Botkin E.A., Zhestkov A.V. Metody vyyavleniya bioplenok v meditsine: vozmozhnosti i perspektivy [Methods of identification of biofilms in medicine: opportunities and prospects]. *Klinicheskaya mikrobiologiya i antimikrobnaya khimioterapiya*. 2012, vol. 14, No. 1, pp. 17-22.
13. Seregina N.V., Chestnova T.V., Zherebtsova V.A., Khromushin V.A. Obzor biofizicheskikh osobennosti mikrobnoi adgezii [Review of biophysical features of microbial adhesion]. *Vestn. novykh meditsinskikh tekhnologii*. 2008, vol. 15, No. 3, pp. 175-177.
14. Merritt J.H., Kadouri O.E., O'Toole G.A. Growing and analyzing static biofilms. *Current Protocols in Microbiology*. 2011, 1B.1.1-1B.1.18.
15. Titova S.V., Kushnareva E.V. Otsenka sposobnosti kholernykh vibrionov k obrazovaniyu bioplenok in vitro s pomoshch'yu novogo metodicheskogo podkhoda [Assessment of ability of cholera vibrios to formation of biofilms of in vitro by means of new methodical approach]. *Fundamental'nye issledovaniya*. 2014, iss. 10, ch. 2, pp. 375-379.
16. Strelkova E.A. *Deistvie stressovykh faktorov na bakterial'nye bioplenki s defektom struktury vnekletochnogo polimernogo matriksa*: avtoref. dis. ... kand. biol. nauk [The action of stress factors on bacterial biofilm defect structure of the extracellular polymeric matrix]. Moscow, 2013, 26 p.
17. Koshel' E.I. *Obrazovanie bioplenki shtammami Yersinia pestis raznykh podvidov i ikh vzaimodeistvie s chlenami pochvennykh biotsenozov*: avtoref. dis. ... kand. biol. nauk [Formation of a biofilm strains of *Yersinia pestis* of different subspecies and their interaction with terms of soil biocenoses]. Saratov, 2014, 22 p.
18. Belyaeva E.V., Kichikova V.V., Nikiforov V.A. Issledovanie sposobnosti k obrazovaniyu bioplenki predstavitelei mikrobitsenoza slizistoi nosoglotki prakticheski zdorovykh lyudei [Research of ability to formation of a biofilm of representatives of a micro biocenosis of a mucous nasopharynx of almost healthy people]. *Meditsinskii al'manakh*. 2014, vol. 4, No. 34, pp. 49-51.
19. Mal'nik V. V. *Mikrobnoe soobshchestvo bioplenok na poverkhnosti razdela faz "voda – tverdoe telo" litoral'noi zony oz. Baikal*: avtoref. dis. ... kand. biol. nauk [Microbial community of biofilms on a phase boundary "water – a solid body" a littoral zone of Lake Baikal]. Ulan-Ude, 2010, 22 p.
20. Erokhin P.S. *Atomno-silovaya mikroskopiya kak instrument opredeleniya chuvstvitel'nosti bakterii k faktoram bioticheskoi i abioticheskoi prirody*: avtoref. dis. ... kand. fiz.-mat. nauk [Atomic-force microscope as the instrument of definition of sensitivity of bacteria to factors of the biotic and abiotic nature]. Saratov, 2015, 22 p.
21. Chebotar' I.V. *Bioplenki Staphylococcus aureus: strukturno-funksional'nye kharakteristiki i vzaimootnoshenie s neitrofilami*: avtoref. dis. ... kand. med. nauk [Staphylococcus aureus biofilms: structurally functional characteristics and relationship with neutrophils]. N. Novgorod, 2014, 43 p.
22. Beveridge T.J. Visualizing Bacterial Cell Walls and Biofilms. *Microbe*. 2006, vol. 1, No. 6, pp. 279-284.
23. Zahller J., Stewart P.S. Transmission electron microscopic study of antibiotic action on *Klebsiella pneumoniae* biofilm. *Antimicrobial agents and chemotherapy*. 2002, vol. 46, No. 8, pp. 2679-2683.

НАУКИ О ЗЕМЛЕ
SCIENCE OF EARTH

УДК 551.594:504.315

DOI 10.18522/0321-3005-2017-1-80-88

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ И КОНТРОЛЯ РАЗВИТИЯ
ОПАСНЫХ ЯВЛЕНИЙ ПОГОДЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
РАДИОЛОКАЦИОННЫХ И ГРОЗОПЕЛЕНГАЦИОННЫХ МЕТОДОВ
НА ПРИМЕРЕ ОТДЕЛЬНОГО ГРОЗОВОГО ОЧАГА**

© 2017 г. А.А. Аджиева, В.А. Шаповалов

**IMPROVED FORECASTING AND MONITORING OF SEVERE WEATHER
PHENOMENA USING RADAR AND LIGHTNING DETECTION METHODS
ON THE EXAMPLE OF AN INDIVIDUAL THUNDERSTORM CELLS**

A.A. Adjieva, V.A. Shapovalov

Аджиева Аида Анатольевна – Кабардино-Балкарский государственный аграрный университет имени В.М. Кокова, доктор физико-математических наук, доцент, профессор, кафедра высшей математики, ул. Тарчокова, 1а, г. Нальчик, КБР, 360030, Россия, e-mail: aida-adzhieva@mail.ru

Aida A. Adjieva – Kokov Kabardino-Balkarian State Agrarian University, Doctor of Physics and Mathematics, Associate Professor, Professor, Department of Higher Mathematics, Tarchokova St., 1, Nalchik, KBR, 360030, Russia, e-mail: aida-adzhieva@mail.ru

Шаповалов Виталий Александрович – Высокогорный геофизический институт, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, пр. Ленина, 2, г. Нальчик, КБР, 360000, Россия, e-mail: atajuk@rambler.ru

Vitaliy A. Shapovalov – Mountain Geophysical Institute, Candidate of Physics and Mathematics, Senior Researcher, Lenina St., 2, Nalchik, KBR, 360000, Russia, email: vet555_83@mail.ru

Представлен обзор исследований электрических параметров как предвестников развития опасных явлений погоды. Показано, что своевременное обнаружение и идентификация опасных природных явлений, принятие мер защиты от них, с целью обеспечения безопасности жизнедеятельности населения на защищаемой территории зависят от систем раннего предупреждения и средств дистанционного зондирования атмосферы.

К настоящему времени средства оповещения достигли высокого уровня оперативности и массовости, поэтому совершенствование методов прогнозирования и контроля развития опасных явлений погоды на основе детального изучения их взаимосвязанных и взаимообусловленных параметров становится в настоящее время наиболее актуальной научной задачей.

Среди таких параметров можно выделить особую группу электрических параметров, являющихся предвестниками микроструктурных изменений в облаках и, соответственно, предикторами их эволюции. Поэтому изучение грозовой активности и развитие оперативной высокотехнологичной системы мониторинга гроз в современных условиях становятся важным направлением исследований. Оно, помимо научно-прикладных целей, позволяет решать множество задач для всех отраслей экономики – от проектирования инженерно-технических сооружений, обеспечения безопасной эксплуатации различных объектов, уменьшения экономического ущерба от грозовых явлений до обеспечения безопасности жизнедеятельности людей, что служит основой успешного развития всех отраслей народного хозяйства.

Результатом работы является комплексное исследование микрофизических и электрических процессов в атмосфере на примере отдельного грозового очага с использованием активно-пассивного комплекса геофизического мониторинга ФГБУ «ВГИ», состоящего из метеорологического радиолокатора и сети датчиков автоматического грозопеленгатора – дальномера LS 8000.

Ключевые слова: *грозопеленгация, грозовой очаг, метеорологический радиолокатор, безопасность жизнедеятельности, опасные явления погоды.*

This article presents a review of researches of electrical parameters as the precursors of severe weather. It's shown, that timely detection and identification of natural hazards, the adoption of measures to protect them, to ensure the safety of life of the population in the protected area depend on early warning systems and remote sensing.

To date, warning has reached a high level of speed and mass, therefore improving methods of forecasting and monitoring of development of dangerous weather phenomena based on the detailed study of the interrelated and interdependent parameters becomes currently the most important scientific problem.

Among these parameters it is possible to allocate a special group of electrical parameters which are the precursors of micro-structural changes in the clouds and accordingly predict their evolution. Therefore, the study of thunderstorm activity and the development of operational high-tech monitoring system of thunderstorms in modern conditions, is becoming an important area of research. It is in addition applied scientific purposes allows to solve many problems for all industries, from the design of the engineering structures, ensure the safe operation of various objects, reducing the economic damage from lightning phenomena to ensure life safety of people that is the basis for successful development of all sectors of the economy.

The work is a comprehensive study of microphysical and electrical processes in the atmosphere by the example of an individual thunderstorm cells using active-passive set of geophysical monitoring FSBI "HGI", consisting of a network of weather radar and automatic sensors lightning detection - LS 8000.

Keywords: lightning detection, storm center, weather radar, life safety, dangerous weather phenomena.

Введение

Проблема безопасности жизнедеятельности человека и защиты различных объектов от воздействия стихийных явлений во многом определяется своевременным обнаружением их местоположения и контролем состояния. В связи с этим большое значение для своевременного нахождения и идентификации опасных природных явлений, а также принятия мер защиты от них (в том числе и методами активного воздействия) имеют системы раннего предупреждения и средства дистанционного зондирования атмосферы. Средства оповещения к настоящему времени достигли высокого уровня оперативности и массовости, поэтому совершенствование методов прогнозирования и контроля развития опасных явлений погоды на основе детального изучения их взаимосвязанных и взаимообусловленных параметров становится в настоящее время актуальной научной задачей [1].

Необходимо выделить методы, основанные на использовании комплекса электрических параметров как предвестников микроструктурных изменений в облаках.

Непосредственно грозовое излучение регистрируется даже радиоприемником, так как грозы сопровождаются мощными электрическими разрядами и излучают в широком диапазоне длин волн. Современные автоматизированные системы грозопеленгации, в отличие от грозоотметчиков и грозо-регистраторов [2–4], подсчитывают количество разрядов, определяют направление и устанавливают их местоположение. Пеленгация молниевых разрядов представляет собой источник метеорологической информации, которая имеется во многих странах, но не эксплуатируется в оптимальном режиме. Несмотря на то что многие метеослужбы имеют доступ к данным о разрядах молний, их ис-

пользование остается ограниченным, хотя, например, они позволяют достаточно легко определить заранее, имеет ли конвективная ячейка, наблюдаемая радиолокатором, тенденцию к мощным ливневым осадкам или даже её градоопасность.

Оборудование для исследований и проведения воздействий

Система грозопеленгации, установленная на Северном Кавказе, состоит из четырех грозопеленгаторов LS 8000 фирмы Vaisala и центрального пункта приема и обработки информации от грозопеленгаторов [3].

Датчики расположены вблизи населенных пунктов: г. Черкесск, с. Кызбурун, г. Ставрополь и г. Зеленокумск в Северо-Кавказском федеральном округе. Их местоположение представляет неправильный четырехугольник со сторонами 158, 90, 118,5 и 90 км (рис. 1). Границы зоны со 100%-й вероятностью регистрации молнии, по данным производителя системы, представляют окружность с радиусом около 310 км. Территория сбора грозоразрядной информации, близкой к 100%-й надежности, составляет около $3 \cdot 10^5$ км². За пределами указанного района система регистрирует координаты разрядов молнии с ошибками от 10 до 40 %. Таким образом, грозорегистратор обеспечивает прием информации о молниях со всей территории Северного Кавказа, ее архивирование и передачу потребителям. Для этого данные с сенсоров с помощью спутниковой связи передаются на центральный пункт приема и обработки информации (г. Нальчик, здание Высшего геофизического института), представляющий собой аппаратно-программный комплекс из 6 компьютеров, программного обеспечения фирмы Vaisala и оборудования для спутниковой связи.



Рис. 1. Схема размещения грозопеленгаторов системы LS 8000 /
Fig. 1. Scheme of placement of storm DF LS 8000

Каждый грозопеленгатор имеет два датчика – низкочастотный (LF) и высокочастотный (VHF). LF-датчик регистрирует разряды облако – земля (CG) и внутриоблачные (IC), а VHF – внутриоблачные. Также в программно-аппаратный комплекс входят антенны GPS, позволяющие получать точное время со спутников GPS, что, в свою очередь, дает возможность синхронизировать все временные измерения, производимые сенсорами на центральном пункте. Временные значения определяются с точностью 100 наносекунд. При молниевом разряде датчики определяют азимут на разряд, время прихода сигнала и силу сигнала.

Комплекс LS 8000 предназначен для автоматического обнаружения и измерения координат грозовых очагов в зоне установки и на прилегающей территории и может использоваться как в автономном режиме, так и в составе региональной системы из нескольких аналогичных комплексов, объединяемых специальной системой связи или через Интернет [1, 3].

В процессе работы комплекс решает следующие задачи:

- обнаружение молниевых разрядов;
- измерение пеленга, дальности, времени приёма и оценка электромагнитных параметров разрядов;
- отображение грозовой обстановки в зоне ответственности на экране монитора с привязкой к карте местности;
- автоматическая выдача информации о координатах и параметрах грозовых очагов потребителям в сеть;
- документирование, архивирование, статистическая обработка полученной информации.

Радиус зоны ответственности комплекса – более 1000 км. Относительная погрешность определения дальности для равнинной местности не более – 10 %, пеленга – не более 30 мин, оперативность – около 100 нс при ежеминутной выдаче информации.

Грозопеленгационная сеть обнаружения молний комплекса LS 8000 определяет с высокой точностью и передает в центр приема данные о внутри- и межоблачных разрядах, а также разрядах облако – земля. Кроме того, она позволяет определять местоположение гроз, знак заряда и интенсивность, с какой скоростью и в каком направлении движутся грозовые очаги и характер их развития.

Эта система обеспечивает сбор, архивирование и передачу потребителям следующей грозоразрядной информации:

- координат молниевых разрядов облако – земля отрицательной полярности (разряды LF–);
- координат молниевых разрядов облако – земля положительной полярности (разряды LF+);
- координат молниевых разрядов облако – облако и внутриоблачных (разряды VHF);
- параметры этих молниевых разрядов.

Комплекс начал работу в 2008 г., с тех пор ведется архив данных о молниевых разрядах. Общая статистическая информация о молниях широко используется для молниезащиты. Правильная организация молниезащитных мероприятий во многих случаях позволяет избежать ущерба или существенно снизить его. Для этого определяются такие параметры, как, например, удельная грозопоражаемость территории за год, расчеты воздействия молний на различные объекты, повторяющиеся маршруты прохождения грозовых фронтов.

Анализ комплекса параметров отдельного грозового очага

Для установления применимости различных параметров, измеряемых комплексом радиолокаторами, как предикторов опасных явлений с помощью активно-пассивного комплекса геофизическо-

го мониторинга ФГБУ «ВГИ» [5, 6] были исследованы грозовые процессы за период с 2009 по 2015 г., и в качестве характерного примера был выбран отдельный случай 29.05.2012 г.

На рис. 2 приведены результаты пеленгации разрядов молний на территории КБР за 29 мая 2012 г. по данным системы LS 8000.

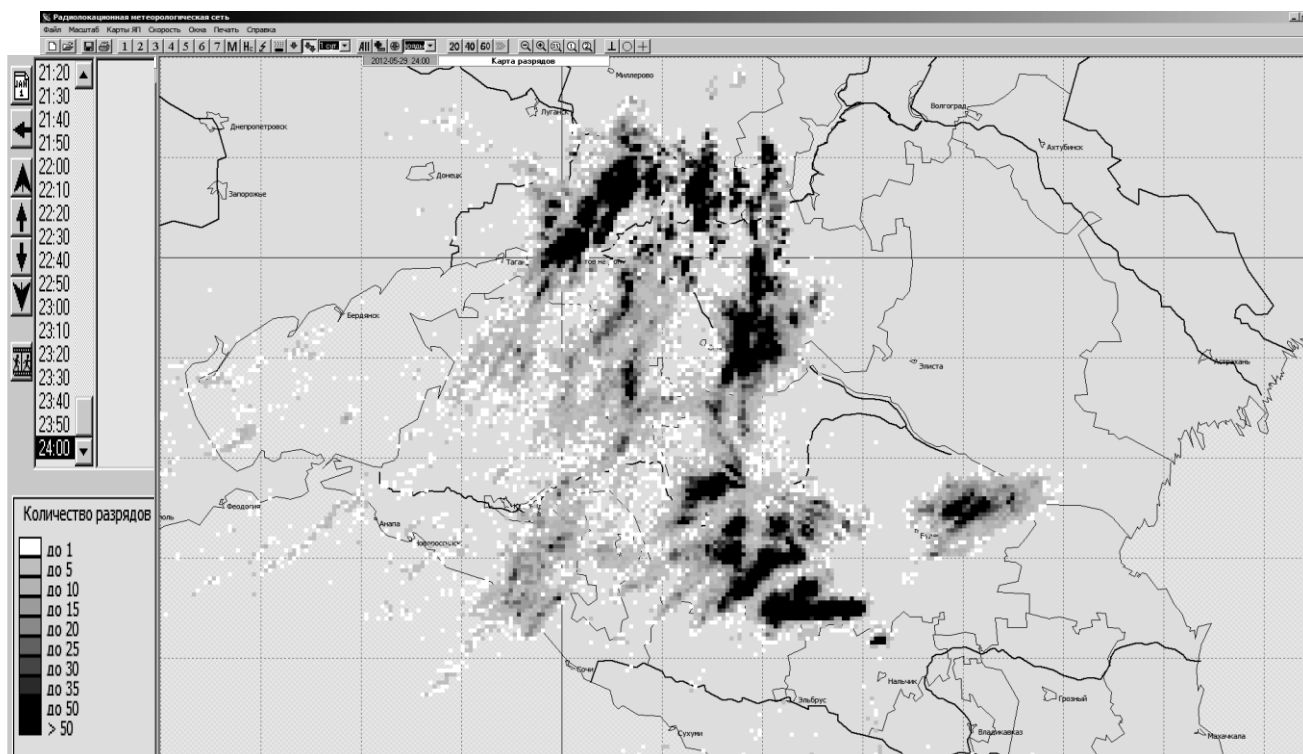


Рис. 2. Разряды на территории ЮФО и СКФО за 29 мая 2012 г. по данным грозопеленгационной системы LS 8000 /
Fig. 2. Discharges in the territory of the Southern Federal District and the North Caucasian Federal District for May 29, 2012 according to the data of storm DF LS 8000

Грозовой очаг образовался к 19 ч вечера по московскому времени к юго-западу от г. Пятигорска. Он продвигался, усиливаясь, огибая город с северо-запада, и, распадаясь, ушел на восток. Самая интенсивная грозовая активность зафиксирована в 20:00 – до 86 разрядов. Последние молнии зафиксированы в этом очаге в 20:40. Время электрической активности (жизни) процесса составило 1 ч 20 мин (рис. 3).

Анализ развития внутримассового грозового облака на характерном примере отдельной грозовой ячейки, развивавшейся с 19 ч 29.05.2012 г., по данным радиолокационных и грозопеленгационных параметров (рис. 4), показывает:

- возрастание интенсивности отрицательных разрядов происходит раньше, чем положительных, и сопровождается ростом верхней границы;
- максимальное суммарное количество разрядов некоторое время остается значительным после прохождения максимума отражаемости;

– рост площади радиоэха протекает на всех стадиях жизни ячейки, но увеличение площади радиоэха для уровней более 35 дБZ хорошо коррелирует с повышением отражаемости, т.е. имеет место рост объема радиолокационной отражаемости (зоны крупы и града);

– максимальная интенсивность осадков приходится на окончание стадии роста отражаемости при относительно стабильной верхней границе, максимальное количество осадков при этом достигается в случае уменьшения средней скорости облака;

– количество внутриоблачных положительных и отрицательных разрядов за минуту достаточно наглядно находится в противофазе;

– положительные и отрицательные разряды за минуту на землю демонстрируют, что положительные разряды происходят гораздо реже отрицательных, а значит, можно предполагать, что в данном случае грозовое облако имеет структуру с положительным зарядом в верхней части и отрицательным в нижней (положительный диполь).

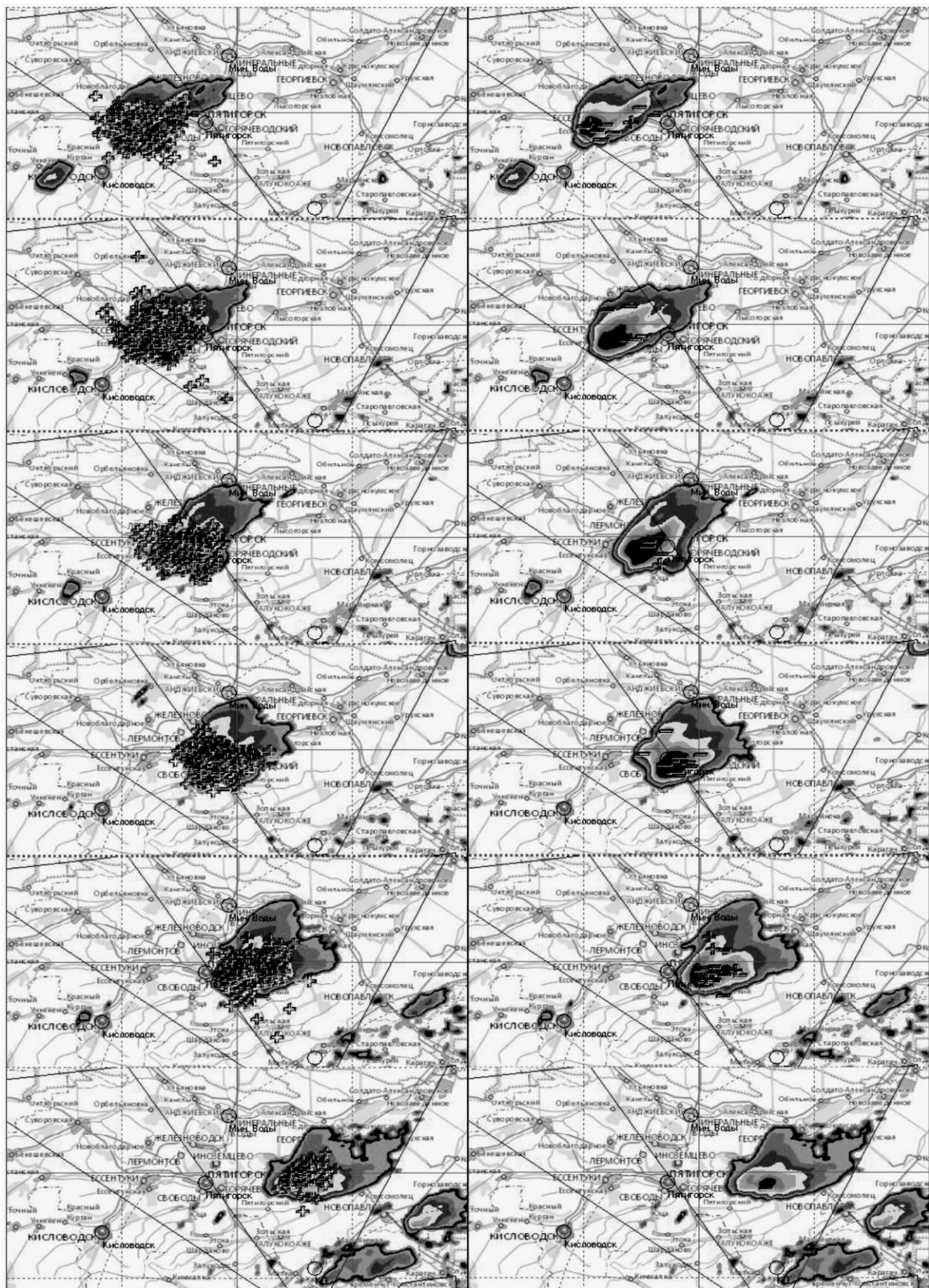


Рис. 3. Развитие грозового очага 29.05.2012 за время с 19:14 до 20:36 с шагом 15 минут по данным комплексирования радиолокационных и грозопеленгационных данных / Fig. 3. Development of thunderstorm cells 29.05.2012 in the period from 19:14 to 20:36 with 15-minute increments according to radar and storm DF data aggregation

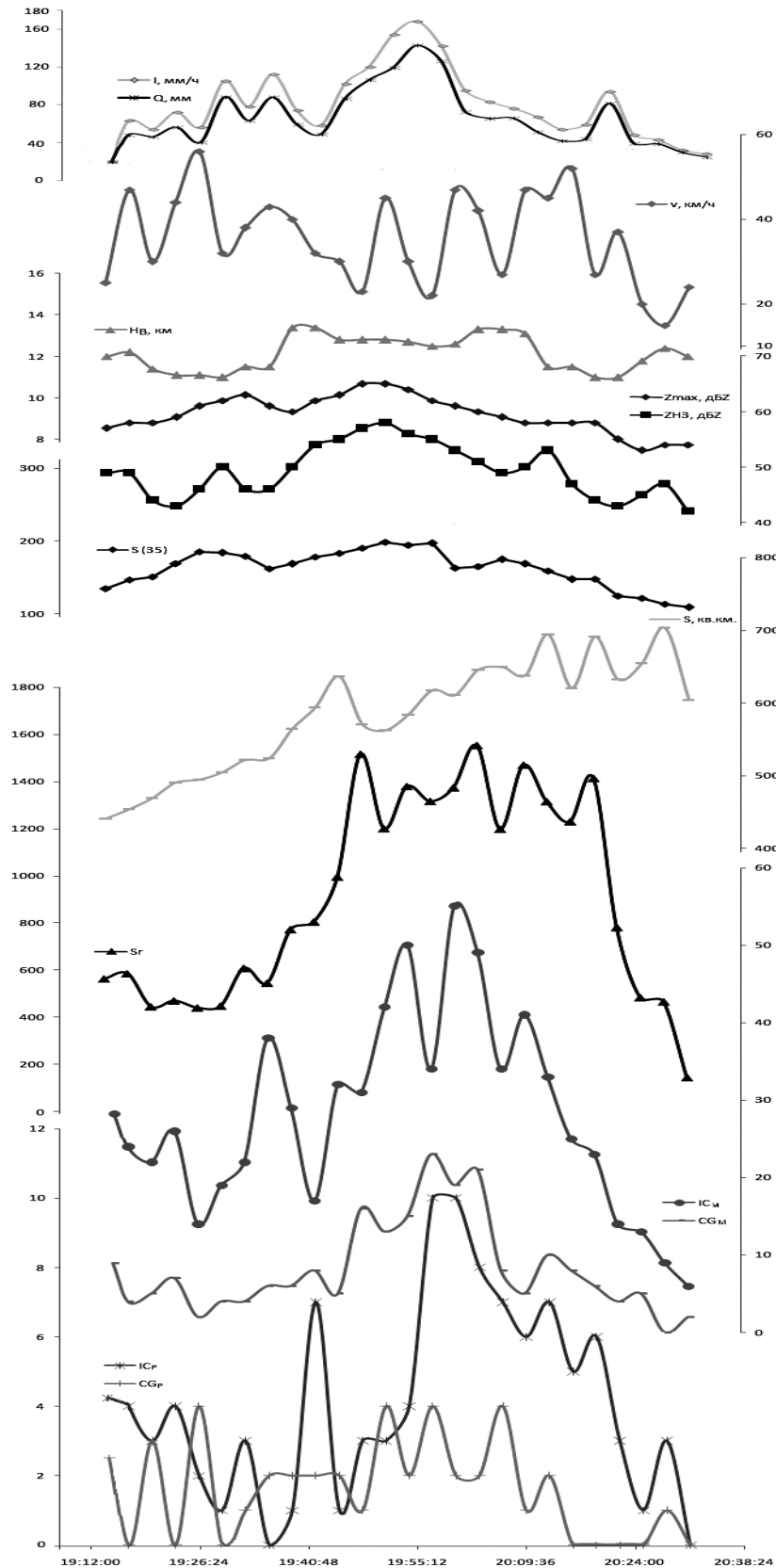


Рис. 4. Параметры, регистрируемые в ходе процесса: интенсивность и количество осадков, скорость облака, высота верхней границы, максимальная отражаемость и отражаемость на уровне $H_{22^{\circ}C}$, площадь отражаемости от уровня 35 дБZ, площадь облака, суммарное количество разрядов в пересчете на десять минут, максимальное количество отрицательных и положительных разрядов IC и CG за мин / Fig. 4. The parameters recorded during the process: the intensity and the amount of rainfall, cloud rate, upper limit height, the maximum reflectance and reflectance H-level at $22^{\circ}C$, the reflectance area 35 dBZ, clouds area, the total number of bits based on the ten minutes, the maximum number of positive and negative bits per IC and the CG for minute

Активную стадию грозового очага разделяют на следующие этапы, аналогичные развитию кучевого облака (роста, зрелости и диссипации):

1. Сильные восходящие потоки и внутриоблачная молниевая активность.

2. Интенсивная конвективная деятельность, сопровождающаяся усилением внутриоблачной молниевой активности и появлением межоблачных разрядов и разрядов на землю. Облака достигают максимального вертикального развития.

3. Сильная молниевая активность разрядов типа облако – земля на фоне постепенного уменьшения общего числа разрядов. Фиксируются порывы – сильные нисходящие воздушные потоки.

В наблюдениях ряда авторов [7, 8] установлена положительная корреляция между плотностью разрядов на землю и радиолокационной отражаемостью облаков. Отмечено, что интенсивность грозы (число разрядов в единицу времени) в отдельной конвективной ячейке пропорциональна скорости восходящих потоков. Сильные восходящие потоки переносят большее количество частиц, участвующих в процессе генерации и разделении электрических зарядов, в среднюю и верхнюю части облака. При этом предполагается, что периферия зоны повышенной отражаемости является областью эффективного разделения зарядов: крупные ледяные частицы, соударяясь с более мелкими кристалликами, приобретают отрицательный заряд и опускаются в средние и нижние части облака, в то время как мелкие положительно заряженные частицы уносятся в верхнюю часть облака. Можно утверждать, что распределение электрических полей, необходимых для образования молнии, в конвективных облаках зависит от структуры воздушных движений [9, 10].

Существует положительная разница во времени между скачками амплитуды и частоты разрядов и началом выпадения града; среднее и максимальное значение суммарной частоты разрядов, а также общая амплитуда отрицательных разрядов в грозах, не сопровождающихся выпадением града, ниже, чем в градовых; значительное число положительных разрядов обычно наблюдается на стадии, когда крупный град уже выпадает на землю, и поэтому не может служить предиктором градоопасности; скачок плотности молний наблюдается в период интенсивного роста облака и связан с возникновением зоны слабого радиоэха. Таким образом, конвективная организация играет решающую роль в развитии молний [11].

Установлено, что электрические процессы, происходящие в облаке, свидетельствуют не только о

его существенной микрофизической перестройке, но и предшествуют появлению опасных явлений погоды, фактически являясь их предикторами. К таким предикторам можно отнести возникновение в облаке межоблачных и облако – земля разрядов, интенсивность разрядов в единицу времени, значения амплитуды тока молний, время нарастания тока, знак разряда молнии, местоположение разрядов в облаке и т.д. Например, резкое увеличение интенсивности внутриоблачных разрядов в облаке (до 60 разр./мин) свидетельствует о том, что через 10–15 мин возможно возникновение тромба или смерча или что через 5–10 мин сформируются микробарсты, шквалы, опасные для авиации [12, 13]. Реверс полярности молний, преимущественно с отрицательной на положительную, свидетельствует о начале периода формирования градовых частиц в облаке и начале их выпадения, после окончания градоопасной стадии полярность восстанавливается.

Заключение

Были проведены комплексные исследования микрофизических и электрических процессов в атмосфере с использованием активно-пассивного комплекса геофизического мониторинга ФГБУ «ВГИ», состоящего из метеорологического радиолокатора и сети датчиков автоматического грозопеленгатора – дальномера LS 8000.

Сопоставление информации о молниях, т.е. облачных разрядах и разрядах облако – земля, служит индикатором и предвестником для опасных погодных явлений, в особенности когда частота внутриоблачных разрядов резко повышается в течение короткого промежутка времени – высока вероятность, что сильные восходящие потоки создают условия для образования града, возникновения шквалов и ливневых осадков.

Изучение грозовой активности и развитие современной высокотехнологичной системы мониторинга гроз в современных условиях становятся важным направлением исследований. Оно, помимо научно-прикладных целей, позволяет решать множество задач для всех отраслей экономики – от проектирования инженерно-технических сооружений, обеспечения безопасной эксплуатации различных объектов, уменьшения экономического ущерба от грозовых явлений до обеспечения безопасности жизнедеятельности людей, что является основой успешного развития всех отраслей народного хозяйства.

Кроме того, данные о молниевых разрядах доступны в режиме реального времени и на больших территориях, часто и в регионах без ра-

диолокационного покрытия. В случаях, когда нет никакой другой информации, эти данные позволяют в реальном времени производить оценку грозовых ячеек с достаточной достоверностью. Но наиболее перспективным является именно сочетание гронопеленгационных данных с радиолокационными и другими источниками метеорологической информации, особенно в контексте текущего прогноза опасных явлений погоды, на основе комплексного отслеживания, распознавания и прогнозирования гроз.

Дальнейшее совершенствование прогнозирования и контроля развития опасных явлений погоды следует сосредоточить на прямом автоматическом мониторинге грозовых очагов. Исследование хода параметров отдельных грозовых процессов с использованием математического моделирования и подключением других источников данных, а также включением дополнительной информации в реальном времени обеспечит значительное улучшение качества выявления грозовых ячеек на ранней стадии.

Литература

1. Аджиева А.А., Шаповалов В.А. Кластерный анализ в автоматическом выявлении и сопровождении грозовых очагов по данным гронопеленгационной сети // Инженерный вестн. Дона. 2016. № 2. С. 164–171.
2. Гальперин С.М. К вопросу о совместном использовании гронопеленгаторов-дальномеров и РЛС метеорологического назначения // Тр. НИЦ ДЗА (Филиал ГГО). СПб., 2001. Вып. 3 (549). С. 147–153.
3. Аджиев А.Х., Стасенко В.Н., Тапасханов В.О. Система гронопеленгации на Северном Кавказе // Метеорология и гидрология. 2013. № 1. С. 2–11.
4. Mareev E.A., Anisimov S.V. Global electric circuit as an open dissipative system // Proc. 12th Int. Conf. on Atmospheric Electricity. Versailles, 2003. P. 797–800.
5. Аджиева А.А., Шаповалов В.А., Машуков И.Х., Скорбеж Н.Н., Шаповалов М.А. Обнаружение и распознавание опасных конвективных процессов радиотехническими средствами // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2014. № 1 (179). С. 59–62.
6. Шаповалов А.В., Шаповалов В.А. Результаты разработки программного обеспечения трехмерного представления геофизической информации // Материалы Всерос. открытой конф. по физике облаков и активным воздействиям на гидрометеорологические процессы, посвященной 80-летию Эльбрусской высокогорной комплексной экспедиции АН СССР. Нальчик, 2014. С. 100–107.

7. Betz H.D., Schmidt K., Oettinger W.P., Montag B. Cell-tracking with lightning data from LINET // Adv. Geosci. 2008. Vol. 17. P. 55–61.

8. Price C. Lightning sensors for observing, tracking and nowcasting severe weather // Sensors. 2008. Vol. 8. P. 157–170.

9. Зимин Б.И. О связи электризации грозовых облаков с осадками // Метеорология и гидрология. 1981. № 8. С. 44–51.

10. Bennett A.J., Harrison R.G. Atmospheric electricity in different weather conditions // Weather. 2007. Vol. 62, № 10. P. 277–283.

11. Dimitrova T., Mitzeva R., Betz H.D., Zhelev H., Diebel S. Lightning behavior during the lifetime of severe hail-producing thunderstorms // Quarterly J. of the Hungarian Meteorological Service. 2013. Vol. 117, № 3. P. 295–314.

12. Miller P.W., Ellis A.W., Keighton S.J. The utility of total lightning trends in diagnosing single-cell thunderstorm severity: Examples from the central Appalachians region // J. Operational Meteor. 2015. № 3(8). P. 82–98.

13. Farnell C., Rigo T., Pineda N. Lightning jump as a nowcast predictor: Application to severe weather events in Catalonia // Atmospheric Research. 2016. Vol. 183. P. 130–141.

References

1. Adzhieva A.A., Shapovalov V.A. Klasternyi analiz v avtomaticheskom vyyavlenii i soprovozhdenii grozovykh ochagov po dannym grozopelengatsionnoi seti [Cluster analysis in an automatic detection and support of storm centers according lightning detection network]. *Inzhenernyi vestnik Dona*. 2016, No. 2, pp. 164-171.
2. Gal'perin S.M. [To the question about sharing lightning detection-range finders and radars used for meteorological purposes]. *Trudy NITs DZA (Filial GGO)* [Proceedings of SIC DZA (GGO Branch)]. Saint Petersburg, 2001, iss. 3 (549), pp. 147-153.
3. Adzhiev A.Kh., Stasenko V.N., Tapaskhanov V.O. Sistema grozopelengatsii na Severnom Kavkaze [Lightning detection system in the North Caucasus]. *Meteorologiya i gidrologiya*. 2013, No. 1, pp. 2-11.
4. Mareev E.A., Anisimov S.V. Global electric circuit as an open dissipative system. *Proc. 12th Int. Conf. on Atmospheric Electricity*. Versailles, 2003, pp. 797-800.
5. Adzhieva A.A., Shapovalov V.A., Mashukov I.Kh., Skorbezh N.N., Shapovalov M.A. Obnaruzhenie i raspознавание opasnykh konvektivnykh protsessov radiotekhnicheskimi sredstvami [Detection and identification of dangerous convective processes by radar facilities]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Severo-Kavkazskii region. Estestvennye nauki*. 2014, No. 1 (179), pp. 59-62.

6. Shapovalov A.V., Shapovalov V.A. [The results of the software development of three-dimensional representation of geophysical information]. *Materialy Vserossiiskoi otkrytoi konferentsii po fizike oblakov i aktivnym vozdeistviyam na gidrometeorologicheskie protsessy, posvyashchenoi 80-letiyu El'brusskoi vysokogornoj kompleksnoi ekspeditsii AN SSSR*. [Materials of the All-Russian Open Conference on the Physics of Clouds and Active Influences on Hydrometeorological Processes, dedicated to the 80th anniversary of the Elbrus High-mountainous Complex Expedition of the Academy of Sciences, USSR]. Nalchik, 2014, pp. 100-107.
7. Betz H.D., Schmidt K., Oettinger W.P., Montag B. Cell-tracking with lightning data from LINET. *Adv. Geosci.* 2008, vol. 17, pp. 55-61.
8. Price C. Lightning sensors for observing, tracking and nowcasting severe weather. *Sensors*. 2008, vol. 8, pp. 157-170.
9. Zimin B.I. O svyazi elektrizatsii grozovykh oblakov s osadkami [About the connection of electrification of thunderstorm clouds with precipitation]. *Meteorologiya i gidrologiya*. 1981, No. 8, pp. 44-51.
10. Bennett A.J., Harrison R.G. Atmospheric electricity in different weather conditions. *Weather*. 2007, vol. 62, No. 10, pp. 277-283.
11. Dimitrova T., Mitzeva R., Betz H.D., Zhelev H., Diebel S. Lightning behavior during the lifetime of severe hail-producing thunderstorms. *Quarterly Journal of the Hungarian Meteorological Service*. 2013, vol. 117, No. 3, pp. 295-314.
12. Miller P.W., Ellis A.W., Keighton S.J. The utility of total lightning trends in diagnosing single-cell thunderstorm severity: Examples from the central Appalachians region. *J. Operational Meteor.* 2015, No. 3(8), pp. 82-98.
13. Farnell C., Rigo T., Pineda N. Lightning jump as a nowcast predictor: Application to severe weather events in Catalonia. *Atmospheric Research*. 2016, vol. 183, pp. 130-141.

УДК 911.373.4

DOI 10.18522/0321-3005-2017-1-89-95

ОБ ОБЕСПЕЧЕННОСТИ ЦЕЛЕВОЙ ИНФОРМАЦИЕЙ ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЯ ГОРНЫХ ТЕРРИТОРИЙ (НА ПРИМЕРЕ КАРАЧАЕВО-ЧЕРКЕССКОЙ РЕСПУБЛИКИ)

© 2017 г. Я.В. Волосухин, Т.В. Иванкова, П.А. Кипкеева, Ю.Я. Потапенко

ABOUT SECURITY WITH TARGET INFORMATION OF ENVIRONMENTAL MANAGEMENT OF MOUNTAIN TERRITORIES (A STUDY OF THE KARACHAY-CHERKESS REPUBLIC)

Ya. V. Volosukhin, T. V. Ivankova, P. A. Kipkeeva, Yu. Ya. Potapenko

Волосухин Яков Викторович – Институт безопасности гидротехнических сооружений, генеральный директор, ОПС 21, а/я 77, г. Новочеркасск, 346421, Россия, e-mail: yakov.volosukhin@gmail.com

Yakov V. Volosukhin – Institute of Hydraulic Structures Safety, General Director, OPS 21, PO 77, Novocherkassk, 346421, Russia, e-mail: yakov.volosukhin@gmail.com

Иванкова Татьяна Викторовна – Институт безопасности гидротехнических сооружений, научный сотрудник, ОПС 21, а/я 77, г. Новочеркасск, 346421, Россия, e-mail: ivankova.tv@ibgts.ru

Tatiana V. Ivankova – Institute of Hydraulic Structures Safety, Researcher, OPS 21, PO 77, Novocherkassk, 346421, Russia, e-mail: ivankova.tv@ibgts.ru

Кипкеева Палистан Аубекировна – Карачаево-Черкесский государственный университет имени У.Д. Алиева, кандидат географических наук, доцент, кафедра физической и экономической географии, естественно-географический факультет, ул. Ленина, 29, г. Карачаевск, 369202, Россия, e-mail: kipkeeva62@mail.ru

Palistan A. Kipkeeva – Aliyev Karachay-Cherkess State University, Candidate of Geography, Associate Professor, Department of Physical and Economic Geography, Natural and Geographical Faculty, Lenina St., 29, Karachayevsk, 369202, Russia, e-mail: kipkeeva62@mail.ru

Потапенко Юрий Яковлевич – Карачаево-Черкесский государственный университет имени У.Д. Алиева, доктор геолого-минералогических наук, профессор, кафедра физической и экономической географии, естественно-географический факультет, ул. Ленина, 29, г. Карачаевск, 369202, Россия, e-mail: nupotap@yandex.ru

Yury Y. Potapenko – Aliyev Karachay-Cherkess State University, Doctor of Geology and Mineralogy, Professor, Department of Physical and Economic Geography, Natural and Geographical Faculty, Lenina St., 29, Karachayevsk, 369202, Russia, e-mail: nupotap@yandex.ru

Объект и предмет исследования – горные территории Северного Кавказа и состояние планирования природопользования для обеспечения устойчивого развития.

Цели исследования – оценка качества и количества информации, релевантной для оптимизации управления природопользованием и природообустройством горных территорий на региональном и локальном уровнях.

Методы исследования. Сопряженный анализ картографической, текстовой информации о природной среде и содержания генеральных планов сельских поселений, бассейновая концепция.

Выводы. На территории Северного Кавказа наибольший объем информации, релевантной для рационального природопользования на региональном и локальном уровнях, накоплен геологическими организациями (состав и структура литогенной основы, геоморфология, карты геоэкологические и геохимических аномалий и т.д.) и предприятиями водного хозяйства (энергетическая компания «РусГидро»). На примере Карачаево-Черкесской Республики показано, что генеральные планы поселений, составленные в 2010–2012 гг., фактически включают по два объекта планирования: населенный пункт площадью 20–30 га и прилегающую горную территорию площадью от десятков до 1090 км². Характеристики обоих объектов содержат недостаточный объем релевантной информации. Необходимо ограничить сферу деятельности архитекторов-градостроителей площадью населенных пунктов, а на обширных горных территориях выполнить силами ландшафтоведов и экологов ландшафтное планирование. Такая организация работ будет соответствовать концепции ландшафтного планирования, разработанной для России международным коллективом специалистов (Антипов и др., 2002).

Ключевые слова: природопользование, природообустройство, бассейновые геосистемы, управление, релевантная информация.

Object and subject of the research - mountain territory of the North Caucasus and planning of state environmental management for sustainable development.

The purpose of the study - quality and quantity assessment of information that is relevant for optimization of environmental management and nature management of mountain areas at regional and local levels.

Research methods. Cross-spectrum analysis of cartographic, textual information of nature and content of rural master, basin concept.

Conclusion. The greatest amount of information relevant for environmental management at regional and local levels on the territory of the Northern Caucasus, is accumulated by geological organisations (lithogenic basis composition and structure, geomorphology, geocological maps and geochemical anomalies, etc.) and water management enterprises (energy company «RusHydro»). On the example of the Karachay-Cherkess Republic it is shown that the urban General plans (compiled in 2010-2012), include two planning object: populated area with an area of 20-30 hectares, and imparted to it mountainous area from 10 to 1090 km². These two characteristics contain insufficient relevant information. It is necessary to limit the scope of architects, with settlements area, and make landscape planning by ecologists on vast mountain territories. Work organization in this way will be congruence with the landscape planning concept developed for Russia by the international professional team (Antipov and others, 2002).

Keywords: *environmental management, environmental engineering, basin geosystems, management, relevant information.*

Введение

Актуальность. Для экологически грамотного природопользования, в том числе для обеспечения экологически устойчивого развития, необходимо обладать определенным объемом конкретной информации, релевантной, т.е. отвечающей целям и задачам управления природопользованием. В мире накоплено множество данных, доказывающих, что неконтролируемое, стихийное развитие цивилизации привело к глобальному экологическому кризису. Международными форумами рекомендованы меры, которые могут замедлить или приостановить этот процесс, в частности, определены квоты выбросов вредных веществ для наиболее крупных и экономически развитых стран.

Практическое осуществление рекомендаций экологов на государственном, региональном и локальном уровнях встречает большие трудности. В России они возросли в связи с переходом от плановой к рыночной экономике, ослаблением централизованного управления и возрастанием самостоятельности субъектов. В этих условиях становятся особо актуальными региональный и локальный уровни управления, которые не могут функционировать без комплексных и экосистемных программ природопользования и охраны окружающей среды.

Цель исследования – оценка качества и количества информации, релевантной для эффективного управления природопользованием и природообустройством горных территорий на региональном и локальном уровнях.

Состояние проблемы. К началу 70-х гг. XX в. в СССР была осознана необходимость комплексного географического обеспечения территориального планирования. Появились теоретические и практические разработки ландшафтно-географического обоснования крупных народно-хозяйственных проектов [1], оформившиеся в итоге в концепцию

ландшафтного планирования территории России [2]. В МГУ под руководством академика Н.С. Касимова была разработана программа и преподается дисциплина «Ландшафтное планирование». Однако до практической реализации концепции в России, в отличие от Западной Европы, пока не дошло. Новый вариант территориального планирования, применяемый с 2012 г., – «Генеральные планы сельских поселений» – повторяет недостатки районных планировок прошлого века [3].

Методы и материалы исследования

Использованный подход выработан в сфере информационно-технологий. Громадный объем информации вызвал необходимость разработки приемов поиска и выделения из этого объема сведений, необходимых пользователю. Так возникли понятия «релевантность» и «релевантная информация» (РИ).

Релевантность – соответствие информации определенной цели [4, 5]. В логике достоверность дедуктивных умозаключений издавна обеспечивается отсечением нерелевантной информации. За последние 25 лет этот термин проник во многие науки. В теории принятия решений, экономике, когнитивистике и других релевантность широко применяется при оценке степени полезности информации, необходимой для выбора наиболее эффективного решения. В современных информационных технологиях разработан набор поисковых систем, с помощью которых пользователь выделяет РИ из контента. Особенность географии – изучение объектов и явлений в пространстве, что достигается составлением карт, являющихся мощным источником РИ. Для того чтобы данные о географическом объекте или его элементе стали информацией, они должны быть, прежде всего, «привязаны топографически» [6, с. 130]. В географии РИ – конкретная (целевая) информация, относящаяся к определенной территории и необходи-

мая для определенного вида деятельности (планирования, охраны природы, грамотного природопользования, прогнозирования, административного управления и т.д.). Методология и способы выделения РИ отражены в основном в англоязычных публикациях [5]. В России на целесообразность использования термина «релевантная информация» в сфере географических исследований впервые указал А.М. Котельников [4].

В территориальном планировании для обозначения объекта исследования широко используется термин «система»: ПХС – природно-хозяйственная система, ТПХС – территориальная природно-хозяйственная [4, 7, 8], бассейновая ПХС [9]; бассейновая геосистема [10]. Приведенные термины обозначают близкие понятия: системы, состоящие из двух подсистем – природной и антропогенной (в последней может рассматриваться преимущественно один из аспектов – хозяйственный [8], технический [10], экологический [11–13], экономический, социально-экономический [14, 15] и т.п.). Градостроительная система понимается как совокупность четырех подсистем: пространственной, социальной, экологической и экономической [3].

Район исследований расположен в Северном Приэльбрусье, на территории Карачаево-Черкесской Республики (КЧР), где представлены все основные варианты геологического строения, рельефа и ландшафтов северного макросклона Большого Кавказа.

В соответствии с поставленной целью проанализированы детальность и качество картографического материала, как изданного, так и доступного ведомственного: карты геологические, четвертичных отложений, геоморфологические, геохимические, ландшафтные, состояния природной среды, почвенная и др. Рассмотрено содержание генеральных планов сельских поселений Карачаевского района КЧР, выставленных в Интернете для общественного обсуждения. Учтены результаты, полученные авторами при изучении ландшафтных структур отдельных речных бассейнов КЧР. Дешифрировались аэро- и космоснимки с полевой заверкой полученных картосхем.

Результаты исследования и их обсуждение

Особенности морфоструктур и речной сети КЧР. Природопользование в пределах горных территорий на региональном и локальном уровнях испытывает существенное влияние сложной ландшафтной мозаики, определяемой сочетанием морфоструктур (МФ) и речной сети.

МФ – крупные формы земной поверхности, отличающиеся от соседних форм характером рельефа и геологическим строением. В КЧР (рис. 1) они

имеют субширотную ориентировку. С юга на север следуют МФ [11] Главного (ГХ) и Передового (ПХ) хребтов, Северо-Юрской депрессии (СЮД), Скалистого (СХ) и Пастбищного (ПсХ) хребтов и Предгорная (ПГ).

МФ ГХ обладают наиболее высокогорным (до 4046 м) альпийским рельефом, выработанным в палеозойских гранитах и более древних кристаллических сланцах. МФ ПХ с высотами до 3638 м отличаются контрастным набором горных пород осадочного и вулканического происхождения.

МФ СЮД – это плосковершинная среднегорная территория (1800–2401 м), имеющая двухъярусное строение: складчатый фундамент сложен докембрийскими породами, а субгоризонтально залегающий осадочный чехол представлен песчано-глинистыми отложениями ниже-среднеюрского возраста.

МФ СХ (1313–2644 м) и ПсХ (1200–1535 м) – типичные куэсты, они сложены полого наклоненными на север толщами известняков и песчаников верхней юры и мела. МФ ПГ развита севернее широты города Усть-Джегута; здесь террасированные речные долины разделены невысокими и широкими плоскими водоразделами.

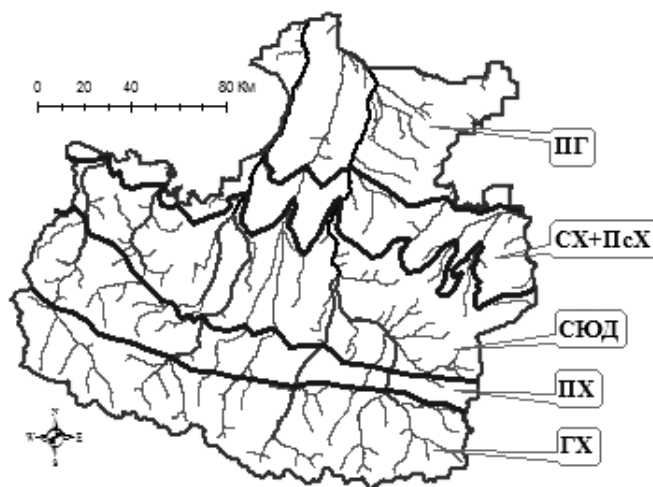


Рис. 1. Соотношение морфоструктур и речной сети КЧР / Fig. 1. The ratio of morphological structures and KCR river network

Обеспеченность картографическим материалом. Поскольку природная среда исследуется большей частью в прикладных целях, территории с разными природными ресурсами оказываются изученными с различной детальностью.

Горные страны обычно богаче равнин полезными ископаемыми, поэтому Кавказ наиболее детально изучен геологами. Многократно издававшиеся

геологические карты масштаба от 1:1 500 000 до 1:200 000 основываются на данных государственной геологической съемки масштаба 1:50 000, а отдельные МФ закартированы в масштабе 1:25 000 и детальнее. В комплект входили карты полезных ископаемых, геоморфологическая, четвертичных отложений, геохимическая и др.

Для сравнения: в пределах КЧР ландшафтная карта масштаба 1:50 000 имеется только для Тебердинского заповедника (6 % от площади республики), на остальной территории ландшафты изображены на схематических мелкомасштабных картах.

В 80-е гг. XX в. специалистами, приглашенными из других субъектов СССР, составлены почвенная карта и карта кормовых угодий Карачаево-Черкесии, нуждающиеся в настоящее время в обновлении.

Все перечисленные картографические материалы пригодны для регионального планирования, тогда как локальному уровню соответствует только геологическая информация.

Рассмотрим степень обеспеченности РИ проектов и планов регионального и локального уровней.

Региональный уровень. К нему следует отнести Территориальную комплексную схему охраны природы (ТерКСОП) Кавказских Минеральных Вод, составленную в 1985–1990 гг. 18 проектными НИИ во главе с московским институтом «Гипрогор». В последующие годы комплексного документа подобного рода на Северном Кавказе не составлялось. Территория уникального природного объекта исследования определялась не административными границами, а областью формирования лечебных минеральных вод. В неё входили, помимо южной части Ставропольского края, верховья рек Кума и Подкумок, берущих начало в СХ и ПСХ КЧР. ТерКСОП включает 23 карты различного содержания и объяснительные записки к каждой из них, обеспечившие комплексную характеристику территории. Особо ценными для будущего курортов были предложения по охране природы, режиму использования минеральных вод и природообустройству долины р. Подкумок, в которой планировалось создать анфиладу парков от Кисловодска до Георгиевска. В 1992 г. был издан указ президента РФ № 1229 о создании особо охраняемого эколого-курортного региона Кавминвод. К сожалению, осуществить ТерКСОП Кавминвод не удалось из-за распада СССР и перехода к рыночным отношениям.

Локальный уровень. К этому уровню принадлежат планы, составляемые: 1) для краев и областей; 2) районов; 3) речных бассейнов; 4) муниципальных объектов (городов и поселений).

1. Края и области республики Северного Кавказа не располагают документами, подобными ТерКСОПу Кавминвод.

2. Административные районы, на которые делится область, края и республики, некоторыми исследователями отождествляются с ПХС. Для высокогорий такое допущение справедливо в случаях, когда границы административных районов совпадают с границами речных бассейнов [13–15]. В КЧР 10 районов, сильно различающихся по природным условиям – от равнин до высокогорий, и по площади – от 202 до 3916 км². Схемы природопользования для районов не составлялись.

3. Речная сеть КЧР имеет древовидный рисунок субмеридиональной ориентировки. Она иерархизирована и состоит из системы бассейнов первого – *n*-го порядка [13, 14]. Возможные подходы к организации рационального природопользования с использованием бассейновой концепции обсуждены в публикациях [9, 10, 13, 15].

В соответствии с рекомендациями по содержанию географических исследований для формирования РИ [4] авторами составлялись и анализировались схемы ландшафтных и антропогенных компонентов бассейновых геосистем, репрезентативных для основных морфоструктур КЧР [12–14].

Пространственные соотношения морфоструктур, речных бассейнов и административных районов рассмотрены в работах авторов [13–15]. Поскольку бассейны четко обособлены водоразделами, их можно рассматривать в качестве ПХС [9].

4. Для многих сельских поселений КЧР составлены генеральные планы (генпланы) [3]. Они выполнены по единой форме и содержат до 16 разделов, что должно обеспечивать их комплексность и обоснованность. Программы развития сельских поселений соответствуют ст. 25 Градостроительного кодекса РФ от 29.12.2004 № 191 (ФЗ в редакции от 06.12.2011). Методологическая основа генпланов такова: «Градостроительная система состоит из совершенно разных подсистем, объединенных понятием “место”, пространство, где на протяжении десятилетий или веков они функционируют» [3]. Генпланы нацелены на «обеспечение градостроительными средствами роста качества жизни населения» [3]. Выполнение градостроительных заданий реально на площади конкретных населенных пунктов (аулов), тогда как прилегающие к ним весьма значительные горные территории фактически остаются за пределами планирования.

Рассмотрим эту ситуацию на примере Карачаевского района КЧР, в который входит 13 сельских поселений. Численность жителей в них варьирует от 700 до 5200 чел., а площадь – от 24 до 1090 км².

Генплан Хурзукского сельского поселения (ХСП) [3] содержит два самостоятельных территориальных объекта: сельское поселение площадью 850 км² и аул Хурзук площадью 22,46 га. Таким образом, площадь ХСП на 140 км² больше площади трех (!) районов (Абазинского, Ногайского и Адыге-Хабльского), находящихся на севере КЧР.

В генплане ХСП (объем 260 с.) на основополагающий раздел 5 «Природные условия» отведено 33 страницы. Раздел состоит из 9 параграфов: 1 – климат; 2 – геоморфологические особенности; 3 – экзогенные геологические процессы; 4 – инженерно-геологическое районирование; 5 – ландшафтное районирование; 6 – водные ресурсы; 7 – почвенный покров; 8 – растительные ресурсы; 9 – животный мир. Заголовки параграфов – это запросы пользователя (составителя проекта) для поиска РИ в контенте – в источниках исходной информации.

Раздел 5 содержит чрезвычайно мало информации о территории, приписанной к ХСП. В параграфах 5.1–5.5 приводятся общие сведения по республике и (или) Карачаевскому району. Есть и конкретные характеристики некоторых компонентов среды и процессов, однако их географические адреса находятся далеко за пределами ХСП: параметры погоды курорта Теберда, черноземовидные почвы, мергеленакопление, дубравы и их санитарное состояние и т.п. В параграфе 5.6 перечислены 18 рек, для четырех указаны длина и площадь водосборного бассейна, но нет более важных данных о величине их стока.

В большинстве генпланов Карачаевского района не предусмотрено строительство каких-либо производственных предприятий; на срок до 2030 г. намечено открытие лишь фельдшерских пунктов, детских садов и т.п. Поэтому маловероятен прогнозируемый для ХСП незначительный рост численности населения – за последние 100 лет она стабильно убывала и уменьшилась в три раза.

Согласно методическим указаниям Министерства регионального развития РФ от 26.05.2011 № 244, карты, сопровождающие текст генпланов, должны составляться в масштабе 1:50 000 – 1:2000. В источниках исходной информации по КЧР такой масштаб имеют лишь карты геологического содержания.

Мы полагаем, что для площади конкретного населенного пункта (аула), расположенного в горном рельефе, должна составляться в первую очередь детальная геоморфологическая схема. На рис. 2 приведена схема дешифрирования аэрофотоснимка аула Хурзук, заверенная полевыми маршрутами. Показано положение антропогенных типов землепользования на фоне мезо- и микрорельефа.

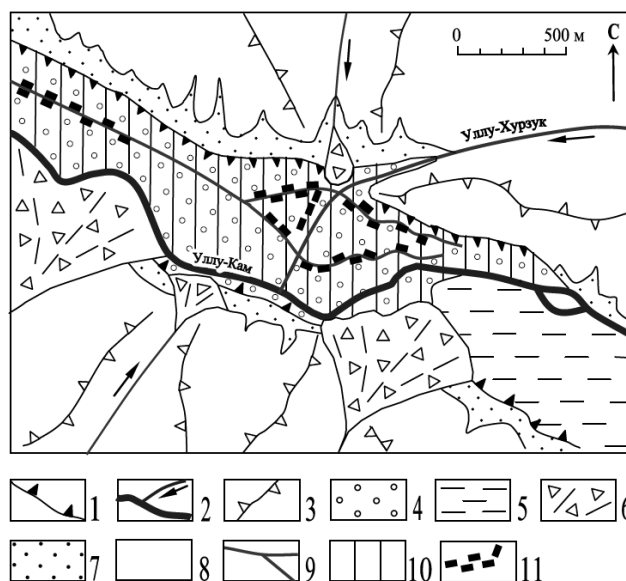


Рис. 2. Соотношение природных (1–8) и антропогенных (9–11) компонентов в пределах аула Хурзук: 1 – граница днища троговой долины р. Уллу-Кам; 2 – река и притоки; 3 – водоразделы; 4 – моренные отложения; 5 – озерные отложения; 6 – пролювий; 7 – коллювий; 8 – граниты и кристаллические сланцы; 9 – дороги; 10 – огороды, сады, сенокосы, 11 – жилые дома / Fig. 2. The ratio of natural (1-8) and anthropogenic (9-11) components within the village Hurzuk: 1 - the boundary of the trough valleys of the Ulla-Kam River; 2 - river and tributaries; 3 - watersheds; 4 - moraines; 5 - lacustrine deposits; 6 - proluvium; 7 - colluvium; 8 - granites and schists; 9 - roads; 10 - vegetable gardens, grounds, hay fields; 11 - residential houses

Выводы

1. Генеральные планы сельских поселений КЧР, составленные в 2012 г. на основе Градостроительного кодекса РФ, фактически включают по два объекта планирования: населенный пункт площадью 20–30 га и прилегающую к нему горную территорию площадью от десятков до 1090 км². Характеристики обоих объектов содержат недостаточный объем информации, необходимой для осуществления кратко- и долгосрочного устойчивого развития.

2. На территории Северного Кавказа, включая КЧР, наибольший объем информации, релевантной для рационального природопользования на региональном и локальном уровнях, накоплен геологическими организациями (состав литогенной основы, геохимические аномалии, геоморфология, геоэкологические исследования и т.д.) и предприятиями водного хозяйства (энергетическая компания «РусГидро»). Эта информация вследствие ведомственного характера не используется при составлении локальных планов природопользования.

3. Выполненный сопряженный анализ картографической и текстовой информации по террито-

рии КЧР и содержания генпланов сельских поселений позволяет присоединиться к мнению международного коллектива авторов, разработавших концепцию ландшафтного планирования для России [2]: проекты планировки в пределах площадей населенных пунктов – это достаточно широкая и ответственная сфера деятельности архитекторов и градостроителей; для обширных горных территорий, приписанных ныне к населенным пунктам, необходимы не градостроительные, а ландшафтные планы, которые должны разрабатываться коллективами, возглавляемыми ландшафтоведами и экологами.

4. Для обеспечения рационального природопользования горных территорий КЧР на разных уровнях необходима разработка единой комплексной региональной концепции для всей республики.

Литература

1. Михеев В.С. Ландшафтно-географическое обеспечение комплексных проблем Сибири. Новосибирск, 1987. 208 с.
2. Антипов А.Н., Дроздов А.В., Кравченко В.В., Семенов Ю.М., Гагаринова О.В., Плюснин В.М., Суворов Е.Г., Федоров В.Н., Винкельбрандт А., Милькен В., фон Хаарен К., Шиллер И. Ландшафтное планирование: принципы, методы, европейский и российский опыт. Иркутск, 2002. 141 с.
3. Генеральный план Хурзукского сельского поселения Карачаевского района Карачаево-Черкесской Республики. Ростов н/Д., 2012.
4. Котельников А.М. Основные направления географических исследований для целей управления природопользованием в регионе // География и природные ресурсы. 1998. № 1. С. 5–12.
5. Hjoerland B. The foundation of the concept of relevance // J. of the American Society for Information Science and Technology. 2010. Vol. 61 (2). P. 217–237.
6. Симонов Ю.Г., Болысов С.И. Методы геоморфологических исследований. Методология. М., 2002. 191 с.
7. Фоменко М.А., Фоменко Г.А. Планирование природопользования на региональном и локальном уровнях в современных условиях России // Изв. РАН. Серия географическая. 1997. № 1. С. 63–72.
8. Черкашин А.К. Закономерности пространственной структуры и организации низового административно-территориального устройства России // География и природные ресурсы. 1996. № 4. С. 5–17.
9. Сергин С.Я., Зотов С.И. Моделирование природно-хозяйственной системы «речной бассейн» для оптимизации природопользования // Докл. АН СССР. 1988. Т. 298, № 5. С. 1229–1233.
10. Бондаренко В.Л., Волосухин В.А., Гутенев В.В., Денисов В.В., Дьяков В.П., Леценко А.В., Поляков Ю.П.,

Румянцев И.С. Природообустройство: территории бассейновых геосистем : учеб. пособие / под общ. ред. И.С. Румянцева. Ростов н/Д., 2010. 528 с.

11. Потапенко Ю.Я. Ландшафтно-геоэкологические исследования и картирование горных территорий (на примере Приэльбрусья). Карачаевск, 2009. 264 с.

12. Кипкеева П.А., Потапенко Ю.Я. Геоморфологические особенности дна долины р. Теберда (Северный Кавказ) // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2016. № 2. С. 100–104.

13. Иванкова Т.В., Кипкеева П.А. Ландшафтные структуры горных бассейновых систем Северного Приэльбрусья как основа оптимизации природопользования // Экол. вестн. науч. центров Черноморского экономического сотрудничества. 2016. № 3. С. 23–28.

14. Кипкеева П.А., Потапенко Ю.Я. Влияние структуры речных бассейнов на развитие общественно-территориальных систем (на примере Приэльбрусья) // Изв. Даг. гос. пед. ун-та. Естеств. и точные науки. 2016. № 1. С. 104–111.

15. Иванкова Т.В., Кипкеева П.А., Потапенко Ю.Я. Факторы стабильности населения в горных регионах (на примере Северного Кавказа) // Успехи современного естествознания. 2016. № 8. С. 178–182.

References

1. Mikheev V.S. *Landshaftno-geograficheskoe obespechenie kompleksnykh problem Sibiri* [Landscape and geographical providing complex problems of Siberia]. Novosibirsk, 1987, 208 p.
2. Antipov A.N., Drozdov A.V., Kravchenko V.V., Semenov Yu.M., Gagarinova O.V., Plyusnin V.M., Suvorov E.G., Fedorov V.N., Vinkel'brandt A., Mil'ken V., fon Khaaren K., Shiller I. *Landshaftnoe planirovanie: printsipy, metody, evropeiskii i rossiiskii opyt* [Landscape planning: principles, methods, European and Russian experience]. Irkutsk, 2002, 141 p.
3. *General'nyi plan Khurzukского sel'skogo poseleniya Karachaevskogo raiona Karachaevo-Cherkesskoi Respubliki* [The General plan of the rural settlement Khurzuk, Karachayevsk District, Karachay-Cherkess Republic]. Rostov-on-Don, 2012.
4. Kotel'nikov A.M. *Osnovnye napravleniya geograficheskikh issledovaniy dlya tselei upravleniya prirodopol'zovaniem v regione* [Main trends of geographical research for environmental management in the region]. *Geografiya i prirodnye resursy*. 1998, No. 1, pp. 5-12.
5. Hjoerland B. The foundation of the concept of relevance. *Journal of the American Society for Information Science and Technology*. 2010, vol. 61(2), pp. 217-237.
6. Simonov Yu.G., Bolysov S.I. *Metody geomorfologicheskikh issledovaniy. Metodologiya*. [Methods of geomorphological researches. Methodology]. Moscow, 2002, 191 p.

7. Fomenko M.A., Fomenko G.A. Planirovanie prirodopol'zovaniya na regional'nom i lokal'nom urovnyakh v sovremennykh usloviyakh Rossii [The environmental planning at regional and local levels in modern Russia]. *Izvestiya RAN. Seriya geograficheskaya*. 1997, No. 1, pp. 63-72.

8. Cherkashin A.K. Zakonomernosti prostranstvennoi struktury i organizatsii nizovogo administrativno-territorial'nogo ustroystva Rossii [Regularities of the spatial structure and organization of grass-roots administrative-territorial structure of Russia]. *Geografiya i prirodnye resursy*. 1996, No. 4, pp. 5-17.

9. Sergin S.Ya., Zotov S.I. Modelirovanie prirodno-khozyaistvennoi sistemy «rechnoi bassein» dlya optimizatsii prirodopol'zovaniya [Modeling of natural-economic system "river basin" to optimize environmental management]. *Doklady Akademii nauk SSSR*. 1988, vol. 298, No. 5, pp. 1229-1233.

10. Bondarenko V.L., Volosukhin V.A., Gutenev V.V., Denisov V.V., D'yakov V.P., Leshchenko A.V., Polyakov Yu.P., Rummyantsev I.S. *Prirodoobustroystvo: territorii basseinovykh geosistem* [Environmental engineering: areas of basin geosystems]. Tutorial. Ed. I.S. Rummyantsev. Rostov-on-Don, 2010, 528 p.

11. Potapenko Yu.Ya. *Landshaftno-geoekologicheskie issledovaniya i kartirovanie gornyykh territorii (na primere Priel'brus'ya)* [Landscape-geoecological research and mapping of mountain territories (on the example of the Elbrus region)]. Karachaevsk, 2009, 264 p.

12. Kipkeeva P.A., Potapenko Yu.Ya. *Geomorfologicheskie osobennosti dnishcha doliny r. Teberda (Severnnyy Kavkaz)* [The Geomorphological features of Teberda river valley bottom (North Caucasus)]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Severo-Kavkazskii region. Estestvennye nauki*. 2016, No. 2 (190), pp. 100-104. DOI: 10.18522/0321-3005-2016-2-100-104.

13. Ivankova T.V., Kipkeeva P.A. Landshaftnye struktury gornyykh basseinovykh sistem Severnogo Priel'brus'ya kak osnova optimizatsii prirodopol'zovaniya [Landscape structures of mountain basin systems of the Northern Elbrus region as a basis for optimization of nature management]. *Ekologicheskii vestnik nauchnykh tsentrov Chernomorskogo ekonomicheskogo sotrudnichestva*. 2016, No. 3, pp. 23-28.

14. Potapenko Yu.Ya., Kipkeeva P.A. Vliyaniye struktury rechnyykh basseynov na razvitiye obshchestvenno-territorial'nykh sistem (na primere Priel'brus'ya) [The influence of the river basins structure on the development of the socio-territorial systems (on the Elbrus region example)]. *Izvestiya Dagestanskogo gosudarstvennogo pedagogicheskogo universiteta. Estestvennye i tochnye nauki*. 2016, No. 1 (34), pp. 104-110.

15. Ivankova T.V., Kipkeeva P.A., Potapenko Yu.Ya. Faktory stabil'nosti naseleniya v gornyykh regionakh (na primere Severnogo Kavkaza) [Factors of stability of the population in mountain regions (on the example of the North Caucasus)]. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya*. 2016, No. 8-0, pp. 178-182.

УДК 911.37:556.5221

DOI 10.18522/0321-3005-2017-1-96-100

АНАЛИЗ АДМИНИСТРАТИВНО-ТЕРРИТОРИАЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ КАРАЧАЕВО-ЧЕРКЕССКОЙ РЕСПУБЛИКИ

© 2017 г. П.А. Кипкеева, Ю.Я. Потапенко

ANALYSIS OF ADMINISTRATIVE-TERRITORIAL STRUCTURE OF THE KARACHAY-CHERKESS REPUBLIC

P.A. Kipkeeva, Yu.Ya. Potapenko

Кипкеева Палистан Аубекировна – Карачаево-Черкесский государственный университет имени У.Д. Алиева, кандидат географических наук, доцент, кафедра физической и экономической географии, естественно-географический факультет, ул. Ленина, 29, г. Карачаевск, КЧР, 369202, Россия, e-mail: kipkeeva62@mail.ru

Palistan A. Kipkeeva – Aliyev Karachay-Cherkess State University, Candidate of Geography, Associate Professor, Department of Physical and Economic Geography, Natural and Geographical Faculty, Lenina St., 29, Karachayevsk, KCR, 369202, Russia, e-mail: kipkeeva62@mail.ru

Потапенко Юрий Яковлевич – Карачаево-Черкесский государственный университет имени У.Д. Алиева, доктор геолого-минералогических наук, профессор, кафедра физической и экономической географии, естественно-географический факультет, ул. Ленина, 29, г. Карачаевск, КЧР, 369202, Россия, e-mail: yurpotap@yandex.ru

Yury Ya. Potapenko – Aliyev Karachay-Cherkess State University, Doctor of Geology and Mineralogy, Professor, Department of Physical and Economic Geography, Natural and Geographical Faculty, Lenina St., 29, Karachayevsk, KCR, 369202, Russia, e-mail: yurpotap@yandex.ru

Предмет исследования – административно-территориальная структура Карачаево-Черкесской Республики (КЧР).

Цель исследования – анализ административно-территориальной структуры КЧР для определения пространственных соотношений речных бассейнов и административных районов, речной и транспортной сети; оценка компактности территорий районов.

Методы исследования: комплексный ландшафтно-геоэкологический подход с использованием бассейновой концепции. Применялись полевые исследования и дешифрирование космо- и аэрофотоснимков, ГИС-технологии (ARCGIS 9.3.1).

Выводы. КЧР уступает ряду областей и краев РФ по площади (14,1 тыс. км², количеству жителей (447,6 тыс.) и числу административных районов (10). В основном области европейской части страны имеют площадь в пределах 50–200 тыс. км² при среднем числе административных районов 28. Административная структура средне- и высокогорной частей республики отражает морфологию речных бассейнов 4–6 порядков, так как именно водоразделы бассейнов явились ведущими параметрами при выборе границ районов. Пространственная структура транспортной сети определяется рисунком эрозионной сети. Расположение большинства дорог совпадает с наиболее доступными участками речных долин – поверхностями террас. Эрозионная и транспортная сеть – существенный фактор экономического развития: почти все населенные пункты находятся в долинах рек, а наиболее крупные из них расположены вдоль автодорог федерального значения. Республиканский центр г. Черкесск приурочен к пересечению двух федеральных автодорог и железной дороги. Компактность территорий районов нарастает с понижением высоты местности над уровнем моря. В то же время высота местности над уровнем моря не влияет на численность населения административных центров. Резкое различие районов по площади и разные принципы их наименования (этнический и географический) неблагоприятны для экономического развития.

Ключевые слова: административно-территориальное устройство, морфоструктура, речной бассейн, географические параметры, бассейновая геосистема.

Subject of the research - administrative-territorial structure of the Karachay-Cherkess Republic (KCR).

The purpose of the study - the analysis of the administrative-territorial structure of the KCR to determine spatial relationships of river basins and administrative regions, drainage and transport networks; estimation of the compactibility of the regions territories.

Research methods. Integrated landscape-geoecological approach using basin concept. Applied field method and interpretation of space and aerial images, GIS technology (ARCGIS 9.3.1).

Conclusion. KCR cedes to the most regions of the Russian Federation (area – 14.1 thousand km², inhabitants (447.6 thousand) and number of administrative regions (10). Most of the regions in the European part of the country has an area in the range of 50-200 km² with an average number of administrative districts - 28. The administrative structure of medium and high-mountainous parts

of the Republic reflects the morphology of river basins within 4-6 orders of magnitude, as the drainage divides of the basins were the leading options for choosing boundaries of the districts. Spatial structure of transport network is determined with erosion pattern. The most roads location coincides with the most accessible sections of the river valleys - surface terrace. Erosion and transport network is a significant factor of the economic development: the vast majority of human settlements located in river valleys, and the largest of them are located along the federal highways. The Republican center of Cherkessk dedicated to the intersection of two federal highways and railways. The compactness of the districts territories increases with in decreasing sea level. At the same time height of the terrain above sea level does not affect the population of administrative centers. A dramatic difference of zoning districts and different principles of their names (ethnic and geographic) are not conducive to economic development.

Keywords: administrative-territorial structure, morphological structure, river basin, geographical parameters, basin geosystem.

Социально-экономическое развитие территорий зависит не только от природных факторов и хозяйственного уклада, но и от степени совершенства административной структуры и планирования. В СССР обеспечению эффективного экономического развития уделялось постоянное внимание [1, 2], народно-хозяйственное планирование осуществлялось на разных уровнях с учетом научных прогнозов. В 90-е гг. XX в. Россия отошла от данных принципов, но новые программы, соответствующие рыночной экономике, разрабатываются слабо, конкретные проекты обычно имеют локальный и инкрементальный характер [3]. Из шести основных типов планирования, применяемых сейчас в мировой практике, нашей стране наиболее подходит всеобщее рациональное планирование, основанное на системном подходе и анализе альтернативных вариантов. По своему содержанию оно весьма близко ТерКСОПам (территориальным комплексным схемам охраны природы) СССР.

В Российской Федерации в 43 из 89 субъектов имеются горные районы. На Северном Кавказе (Карачаево-Черкесия, Кабардино-Балкария, Дагестан и др.) такой рельеф преобладает. При обсуждении проблем развития горных регионов наиболее часто предлагаются различные варианты устойчивого развития с акцентом на туризм и рекреацию. В настоящее время комплексное планирование развития территорий уступило место составлению генеральных планов отдельных населенных пунктов. Необходимо возвращение к комплексному планированию развития. В условиях дефицита материальных средств достижение комплексности возможно путем поэтапного анализа различных параметров административных районов.

Цель исследования – анализ административно-территориальной структуры Карачаево-Черкесской Республики (КЧР). Задачи: определение пространственных соотношений речных бассейнов и административных районов, речной сети и транспортной сети; оценка компактности территорий районов.

Методы исследования – комплексный ландшафтно-геоэкологический подход с использованием бассейновой концепции [4]. Применялись поле-

вые исследования и дешифрирование космо- и аэрофотоснимков, ГИС-технологии (ARCGIS 9.3.1).

На рассматриваемой территории авторами исследован ряд параметров природной среды – геоморфология, геология, ландшафтная структура, туристско-рекреационная привлекательность, геоэкология [5–11]. В результате выявлены индивидуальные особенности речных бассейнов в разных морфоструктурах; установлено существенное влияние внутриводораздельных ландшафтных структур на специализацию, степень развития хозяйственных отраслей и на размещение новых туристско-рекреационных объектов; показано, что некоторые новостройки сооружены на селеопасных участках.

Административный район – базовая единица административно-территориального деления более крупных подразделений – областей, краев и республик. Считается, что это образование обладает комплексом устойчивых характеристик и связей природы, населения и хозяйства. Административный район в таком понимании является системой, включающей при вводе в ГИС информационные слои, число которых зависит от степени изученности территории.

Прежде чем перейти к рассмотрению районов, кратко охарактеризуем морфоструктуры и речные бассейны КЧР.

Морфоструктура – это достаточно крупная форма земной поверхности, отличающаяся от соседних не только характером рельефа, но и составом и строением литогенной основы. Морфоструктуры рассматриваемой территории имеют субширотную ориентировку. С юга на север следуют морфоструктуры [5] Главного хребта, включающие высокогорные Водораздельный и Боковой хребты (палеозойские граниты и более древние метаморфиты), Передового высокогорного хребта (метаморфические и магматические породы палеозоя), среднегорной Северо-Юрской депрессии (нижне-среднеюрские осадочные породы), куэсты Скалистого и Пастбищного хребтов (песчаники и известняки верхней юры и мела), предгорий (мергели и аргиллиты палеогена и неогена) (рис. 1).

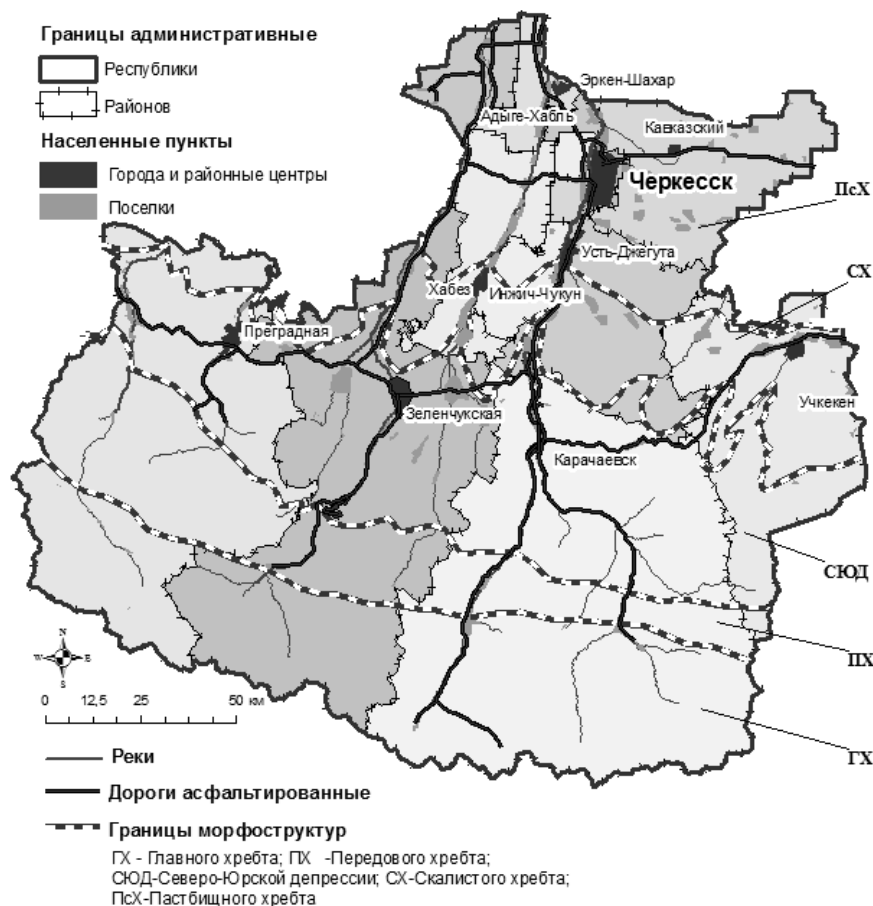


Рис. 1. Карта административно-территориального устройства и морфоструктур Карачаево-Черкесии. Морфоструктуры: GX – Главного хребта; PX – Передового хребта; СЮД – Северо-Юрской депрессии; CX – Скалистого хребта; ПсX – Пастбищного хребта и предгорий / Fig. 1. Map of the administrative-territorial structure and morphological structures of Karachay-Cherkessia. Morphological structures: GX - Main Ridge, PX - Front Range, SJUD - North-Jurassic depression, CX - Rocky Ridge, ПсX - Pasture Range and foothills

Речная сеть рассматриваемой территории имеет субмеридиональную ориентировку, перпендикулярную морфоструктурам. В результате такого наложения возникла чрезвычайно разнообразная и сложная ландшафтная мозаика территории. Ландшафтная структура речных бассейнов в пределах разных морфоструктур индивидуальна [9]. В морфоструктурах Главного и Передового хребтов отчетливо выражена высотная поясность: с увеличением высоты сменяются растительные пояса: луго-степной, лесной, субальпийский, альпийский, субнивальный и прерывистый нивальный. В Северо-Юрской депрессии, Скалистом и Пастбищном хребтах присутствуют два высотных пояса – лесной и горно-луговой. В полосе предгорий первичные луго-степные фитоценозы практически полностью замещены агроценозами.

Поскольку речные бассейны четко обособлены водоразделами, их можно рассматривать в качестве природно-хозяйственных систем [4].

Пространственная структура административных районов. Территория КЧР в сравнении с

краями и областями РФ невелика. Большинство областей европейской части страны имеет площадь в пределах 50–200 тыс. км² при среднем числе административных районов 28 [12], тогда как в КЧР всего 10 районов.

Современное административное деление КЧР отражает три этапа формирования. Три южных района территориально фактически соответствуют округам конца XIX в., изменилось только название одного из них – Эльбрусский на Карачаевский. Пять районов северной половины КЧР были сформированы во второй половине XX в. В 2006–2007 гг. за счет перераспределения территории здесь созданы еще два района – Ногайский и Абазинский с предельно малой площадью: 202 и 300 км² соответственно. Это изменение было продиктовано не экономической целесообразностью, а обострением напряженности в межэтнических отношениях. Итоговая структура несовершенна: 1) 4 района носят этнические названия, 6 – географические; 2) районы резко различаются по размерам площади.

Плотность населения – малоинформативный показатель для горных территорий. Так, в Карачаевском районе КЧР при плотности населения 8,12 чел/км² пригодны для проживания только днища долин наиболее крупных рек (порядок русел 4–6), которые занимают не более 5 % площади. Таким образом, 95 % площади района имеет нулевую плотность, а в днищах долин среднее значение составляет $8,12 \times 20 = 162,4$ чел/км².

Компактность – свойство топологического пространства, означающее доступность всех его точек в транспортном, информационном и других смыслах [12]. Горный рельеф сильно снижает степень доступности значительной части площади КЧР. Например, в высокогорной морфоструктуре Главного хребта альпинотипные водоразделы доступны только квалифицированным альпинистам.

Максимальной доступностью обладают самые северные районы (Прикубанский и Адыг-Хабльский).

Пространственное соотношение эрозионной и транспортной сети. Расположение большинства дорог совпадает с наиболее доступными участками речных долин – поверхностями террас (рис. 1). Эрозионная и транспортная сеть – существенный фактор экономического развития: абсолютное большинство населенных пунктов находится в долинах рек, а наиболее крупные из них расположены вдоль автодорог федерального значения. Республиканский центр г. Черкесск приурочен к пересечению двух федеральных автодорог и железной дороги. В то же время высота местности над уровнем моря не влияет на численность населения административных центров (рис. 2).

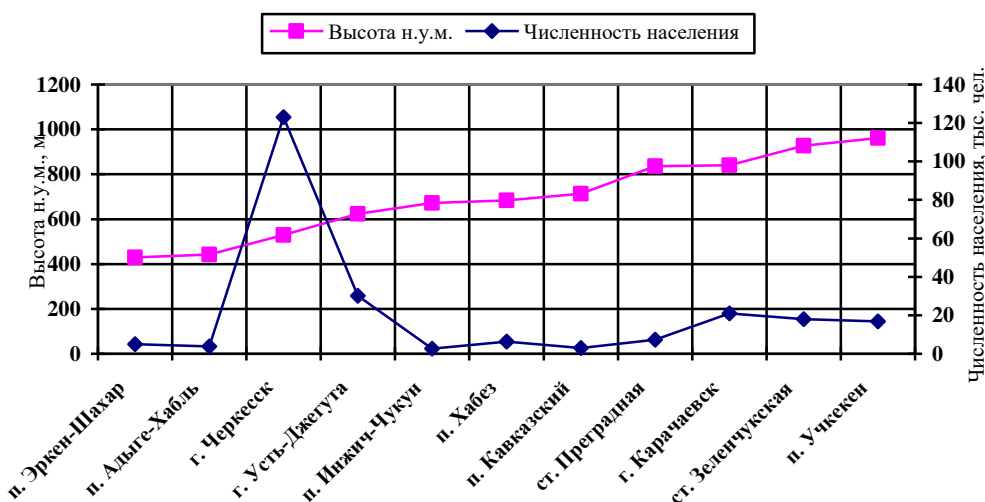


Рис. 2. Соотношение численности населения центров административных районов КЧР и высоты над уровнем моря /
 Fig. 2. The ratio of the population of centers of KCR administrative districts and the height above sea level

Выводы. КЧР уступает большинству областей и краев РФ по площади, количеству жителей и числу административных районов. Резкое различие районов по площади и разные принципы их наименования (этнический и географический) неблагоприятны для экономического развития.

Административная структура средне- и высокогорной частей республики отражает морфологию речных бассейнов 4–6 порядков, так как именно водоразделы бассейнов явились ведущими признаками при выборе границ районов. Компактность территорий районов нарастает с понижением высоты местности над уровнем моря.

Литература

1. Хорев Б.С. Территориальная организация общества. М., 1981.

2. Рабочая книга по прогнозированию / отв. ред. И.В. Бестужев-Лада. М., 1982. 430 с.

3. Фоменко М.А., Фоменко Г.А. Планирование природопользования на региональном и локальном уровнях в современных условиях России // Изв. РАН. География. 1997. № 1. С. 63–72.

4. Сергин С.Я., Зотов С.И. Моделирование природно-хозяйственной системы «речной бассейн» для оптимизации природопользования // Докл. АН СССР. 1988. Т. 298, № 5. С. 1229–1233.

5. Потапенко Ю.Я. Ландшафтно-геоэкологические исследования и картирование горных территорий (на примере Приэльбрусья). Карачаевск, 2009. 264 с.

6. Кипкеева П.А., Потапенко Ю.Я. Влияние структуры речных бассейнов на развитие общественно-территориальных систем (на примере Приэльбрусья) // Изв. Даг. гос. пед. ун-та. Естественные и точные науки. 2016. № 1 (34). С. 104–111.

7. Иванкова Т.В., Кипкеева П.А., Потепенко Ю.Я. Факторы стабильности населения в горных регионах (на примере Северного Кавказа) // Успехи современного естествознания. 2016. № 8–0. С. 178–182.

8. Кипкеева П.А., Потепенко Ю.Я. Геоморфологические особенности днища долины р. Теберда (Северный Кавказ) // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2016. № 2 (190). С. 100–104.

9. Иванкова Т.В., Кипкеева П.А. Ландшафтные структуры горных бассейновых систем Северного Приэльбрусья как основа оптимизации природопользования // Экол. вестн. науч. центров Черноморского экономического сотрудничества. 2016. № 3. С. 23–28.

10. Кипкеева П.А., Потепенко Ю.Я. Основные факторы обеспечения устойчивого туризма в Карачаево-Черкесии // Вестн. Моск. ун-та. География. 2015. № 5. С. 76–81.

11. Черкашин А.К. Закономерности пространственной структуры и организации низового административно-территориального устройства России // География и природные ресурсы. 1996. № 4. С. 5–17.

References

1. Khorev B.S. *Territorial'naya organizatsiya obshchestva* [Territorial organization of society]. Moscow, 1981.

2. *Rabochaya kniga po prognozirovaniyu* [Working book on forecasting]. Ed. I.V. Bestuzhev-Lada. Moscow, 1982, 430 p.

3. Fomenko M.A., Fomenko G.A. *Planirovanie prirodopol'zovaniya na regional'nom i lokal'nom urovnyakh v sovremennykh usloviyakh Rossii* [Planning of nature management at the regional and local levels in the modern conditions of Russia]. *Izvestiya RAN. Seriya geograficheskaya*. 1997, No. 1, pp. 63-72.

4. Sergin S.Ya., Zotov S.I. *Modelirovanie prirodno-khozyaistvennoi sistemy «rechnoi bassein» dlya optimizatsii prirodopol'zovaniya* [Modeling of the natural-economic system “river basin” for optimization of nature management]. *Doklady Akademii nauk SSSR*. 1988, vol. 298, No. 5, pp. 1229-1233.

5. Potapenko Yu.Ya. *Landshaftno-geoekologicheskie issledovaniya i kartirovanie gornyykh territorii (na primere Priel'brus'ya)* [Landscape-geocological research and mapping of mountain areas (for example, the Elbrus region)]. Karachaevsk, 2009, 264 p.

6. Kipkeeva P.A., Potapenko Yu.Ya. *Vliyanie struktury rechnykh basseinov na razvitie obshchestvenno-territorial'nykh sistem (na primere Priel'brus'ya)* [Influence of the structure of river basins on the development of socio-territorial systems (on the example of the Elbrus region)]. *Izvestiya Dagestanskogo gosudarstvennogo pedagogicheskogo universiteta. Estestvennye i tochnye nauki*. 2016, No. 1 (34), pp. 104-111.

7. Ivankova T.V., Kipkeeva P.A., Potapenko Yu.Ya. *Faktory stabil'nosti naseleniya v gornyykh regionakh (na primere Severnogo Kavkaza)* [Factors of population stability in mountain regions (on the example of the North Caucasus)]. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya*. 2016, No. 8-0, pp. 178-182.

8. Kipkeeva P.A., Potapenko Yu.Ya. *Geomorfologicheskie osobennosti dnishcha doliny r. Teberda (Severnyi Kavkaz)* [Geomorphological features of the valley bottom of the river Teberda (North Caucasus)]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Severo-Kavkazskii region. Estestvennye nauki*. 2016, No. 2 (190), pp. 100-104.

9. Ivankova T.V., Kipkeeva P.A. *Landshaftnye struktury gornyykh basseinovyykh sistem Severnogo Priel'brus'ya kak osnova optimizatsii prirodopol'zovaniya* [Landscape structures of mountain basin systems of the Northern Elbrus region as a basis for optimization of nature management]. *Ekologicheskii vestnik nauchnykh tsentrov Chernomorskogo ekonomicheskogo sotrudnichestva*. 2016, No. 3, pp. 23-28.

10. Kipkeeva P.A., Potapenko Yu.Ya. *Osnovnye faktory obespecheniya ustoichivogo turizma v Karachaevo-Cherkessii* [The main factors for sustainable tourism in Karachay-Cherkessia]. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5: Geografiya*. 2015, No. 5, pp. 76-81.

11. Cherkashin A.K. *Zakonomernosti prostranstvennoi struktury i organizatsii nizovogo administrativno-territorial'nogo ustroystva Rossii* [The patterns of spatial structure and organization of the lower administrative-territorial structure of Russia]. *Geografiya i prirodnye resursy*. 1996, No. 4, pp. 5-17.

УДК 553.98; 550.812

DOI 10.18522/0321-3005-2017-1-101-109

СОВРЕМЕННАЯ ОЦЕНКА ПЕРСПЕКТИВ НЕФТЕГАЗОНОСНОСТИ И РЕСУРСНОЙ БАЗЫ РЕСПУБЛИКИ КАЛМЫКИЯ НА ОСНОВЕ НОВЕЙШИХ ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ДАННЫХ

© 2017 г. Ю.В. Куранов

MODERN ASSESSMENT OF THE HYDROCARBON POTENTIAL AND RESOURCE BASE OF REPUBLIC OF KALMYKIA, SUPPLEMENTED THE NEWEST GEOLOGICAL AND GEOPHYSICAL DATA

Yu. V. Kuranov

Куранов Юрий Вячеславович – ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг», ведущий специалист, управление геолого-разведочных работ, Покровский бульвар, 3, стр. 1, г. Москва, 109028, Россия, e-mail: Yury.Kuranov@Lukoil.com

Yury V. Kuranov – ООО «LUKOIL-Engineering», Leading Specialist, Geological Exploration Department, Pokrovskii Blvd, 3, build. 1, Moscow, 109028, Russia, e-mail: Yury.Kuranov@Lukoil.com

Рассматриваются геолого-геофизические данные, полученные недропользователями в XXI в., и перспективы нефтегазоносности территории Республики Калмыкия. Отмечается, что недра республики изучались на конкурентной и аукционной основе отечественными и зарубежными нефтегазовыми компаниями.

Анализируются комплекс геолого-геохимических данных по составу и свойствам исходного органического вещества пород, характер нефтегазоносности и условия тектонического развития региона. Выявлено, что скопление углеводородов фиксируется в двух основных областях генерации: Кумо-Манычском прогибе и юго-западной части Прикаспийской впадины. Также предполагается наличие генерации углеводородов в триасовых рифтовых структурах в пределах вала Карпинского. С учетом геолого-геохимических особенностей строения и формирования залежей дается прогноз размещения углеводородов. Обосновываются основные перспективные направления геолого-разведочных работ на нефть и газ в Калмыкии по стратиграфическим комплексам и территориальному признаку. Разработаны карты перспектив нефтегазоносности по продуктивным и перспективным отложениям, которые стали основой для современной количественной оценки ресурсной базы Калмыкии. Оценка выполнялась методом сравнительных геологических аналогий с выделением по каждому комплексу отложений эталонных участков и переносом их удельной плотности ресурсов на оцениваемые территории с применением коэффициентов аналогии.

Полученные результаты подтверждают, что значительная часть ресурсной базы Калмыкии остается неучтенной. Необходимо дальнейшее геологическое изучение этой территории, так как не исключено, что ее ресурсный потенциал гораздо значительнее, чем представляется исследователями в настоящее время.

Ключевые слова: Республика Калмыкия, оценка перспектив нефтегазоносности, ресурсный потенциал, ресурсная база, геологогеофизические данные, геолого-разведочные работы.

We consider the geological and geophysical data obtained by subsoil users in the twenty-first century, and petroleum potential of the Republic of Kalmykia. It is noted that the subsoil of the republic were studied on a competitive auction basis and domestic and foreign oil and gas companies.

It analyzes the geological and geochemical data complex on the composition and properties of the original organic matter of rocks, nature and conditions of oil and gas potential of the tectonic development of the region. It was revealed that the hydrocarbons accumulation is fixed in two main areas of generation: Kuma-Manych deflection and south-western part of the Caspian depression. Also not ruled out the hydrocarbons generation in the Triassic rift within the shaft Karpinsky. Taking into account the geological and geochemical characteristics of the structure and the formation of deposits, given the forecast of hydrocarbon allocation. It is possible to substantiate the main perspective directions of exploration for oil and gas in Kalmykia for stratigraphic complexes and territorial basis. The author of the article designed maps of oil and gas potential for productive and promising deposits. Maps have become the basis for modern quantitative assessment of the Kalmykia resource base. The evaluation was performed by the method of comparative geological similarities with the release of each complex reference sites deposits and transfer of specific resources on the measured density of the territory with similar coefficients.

These results confirm that a significant portion of the Kalmykia resource base remain unaccounted for. The further geological study of the area, since it is possible that its resource potential is much larger than is represented by researchers at the moment.

Keywords: Republic of Kalmykia, assessment of the hydrocarbon potential, resource potential, resource base, geological and geophysical data, exploration activities.

Начиная с середины XX в. были получены первые значимые геолого-геофизические данные о геологии и перспективах нефтегазоносности территории Республики Калмыкия. Эти исследования проводились различными научно-исследовательскими и производственными организациями, такими как СевКавНИИГаз, ВНИГНИ, ВолгоградНИПИнефть, Запприкаспийгеофизика, Кавказгеолсъемка, Калмнефтегазразведка, Дагнефть, Грознефтегеофизика, Ставропольнефтегеофизика, ИГИРГИ, ГИН РАН и многие др. Изучалась территория Калмыкии и отдельными исследователями, среди которых А.А. Ярошенко, Л.М. Зорькин, Ю.А. Волож, А.П. Козуб, С.В. Делия, В.Э. Бембеев, А.В. Бембеев, О.Г. Бражников и др. [1–9]. К этому же хронологическому периоду относится открытие значительной части месторождений нефти и газа в Калмыкии. Но единого научно-производственного и научно-исследовательского центра, который аккумулировал бы всю получаемую геолого-геофизическую информацию, в Калмыкии долгое время не существовало. Этот факт объясняет то, что значительный объем фактического материала и результатов геолого-геофизических исследований оставался в немалой степени разрознен, не обобщен и не проанализирован в должной мере.

В начале 2000-х гг. Комитету природных ресурсов по Республике Калмыкия, благодаря разумной политике и конструктивному подходу в своей деятельности, удалось привлечь на конкурсной и аукционной основе к изучению недр республики значительное число отечественных и зарубежных нефтегазовых компаний, среди которых «ЛУКОЙЛ», «Калмтатнефть» (СП «Татнефть» и «ЛУКОЙЛ»), «Итера» («Югнефтегаз»), «Шелл», «Калмрост», Калмыцкая нефтегазовая компания, «Лаганьойл», «Евросибойл», «Калмпетрол», «Калмнедра», «Кавказтрансгаз», «Ильменскнефть», «Калмгаз», «Калмнефть» и др. В результате к середине 2000-х гг. практически для всей территории были заключены лицензионные соглашения на геологическое изучение недр, поиски, разведку и эксплуатацию месторождений углеводородов (УВ).

Впоследствии часть выданных на геологическое изучение лицензий закончила свое действие, часть отозвана за неполное выполнение недропользователями условий заключенных лицензионных соглашений, и сегодня значительная часть территории Калмыкии (около 85 %) значится в нераспределенном фонде недр. Но отдельные нефтегазовые

компании достаточно успешно выполнили поставленные перед ними лицензионными соглашениями задачи, ими был получен значительный объем новой геолого-геофизической информации по территории Калмыкии. Полученные новые данные из-за ограниченного доступа не обобщались и не анализировались в целом по региону, а также не сопоставлялись с данными прошлых лет.

Попытки оценить перспективы нефтегазоносности как всей республики, так и ее отдельных участков предпринимались и ранее. В 2000 г. подобными работами занималось ФГУП «Кавказгеолсъемка», в 2001 и 2009 гг. оценку ресурсной базы Калмыкии выполняли во ВНИГНИ, а в 2006 г. свое видение перспектив нефтегазоносности обосновывали ГНЦ РФ ВНИИгеосистем и ВСЕГЕИ.

Нами представлена современная оценка перспектив нефтегазоносности Калмыкии по результатам обобщения и анализа значительного объема геолого-геофизического материала, включая новейшие данные, полученные недропользователями в XXI в.

В 2014–2015 гг. в ходе региональных обобщений геолого-геофизических материалов по Калмыкии с участием автора был выполнен анализ комплекса геолого-геохимических данных по составу и свойствам исходного органического вещества пород, характера нефтегазоносности и условий тектонического развития региона. Полученные результаты позволили сделать вывод, что на большей части Калмыкии выявленные и прогнозируемые скопления УВ можно связывать с двумя основными областями генерации: Кумо-Маньчским прогибом и юго-западной частью Прикаспийской впадины (рис. 1). В первой из них происходит образование как нефтяных, так и газовых УВ. В Прикаспийской впадине генерационный потенциал нефтегазоматеринских пород в значительной степени исчерпан ввиду достаточно высокой степени катагенетической преобразованности, достигшей уровня генерации газоконденсатов и газов, и только в самой западной части возможно формирование нефти. Также не исключена генерация УВ в триасовых рифтовых структурах в пределах вала Карпинского.

С учетом выявленных геолого-геохимических особенностей строения и формирования залежей автором дан прогноз размещения УВ, что позволило обосновать основные перспективные направления геолого-разведочных работ (ГРР) на нефть и газ в Калмыкии по стратиграфическим комплексам и территориальному признаку.

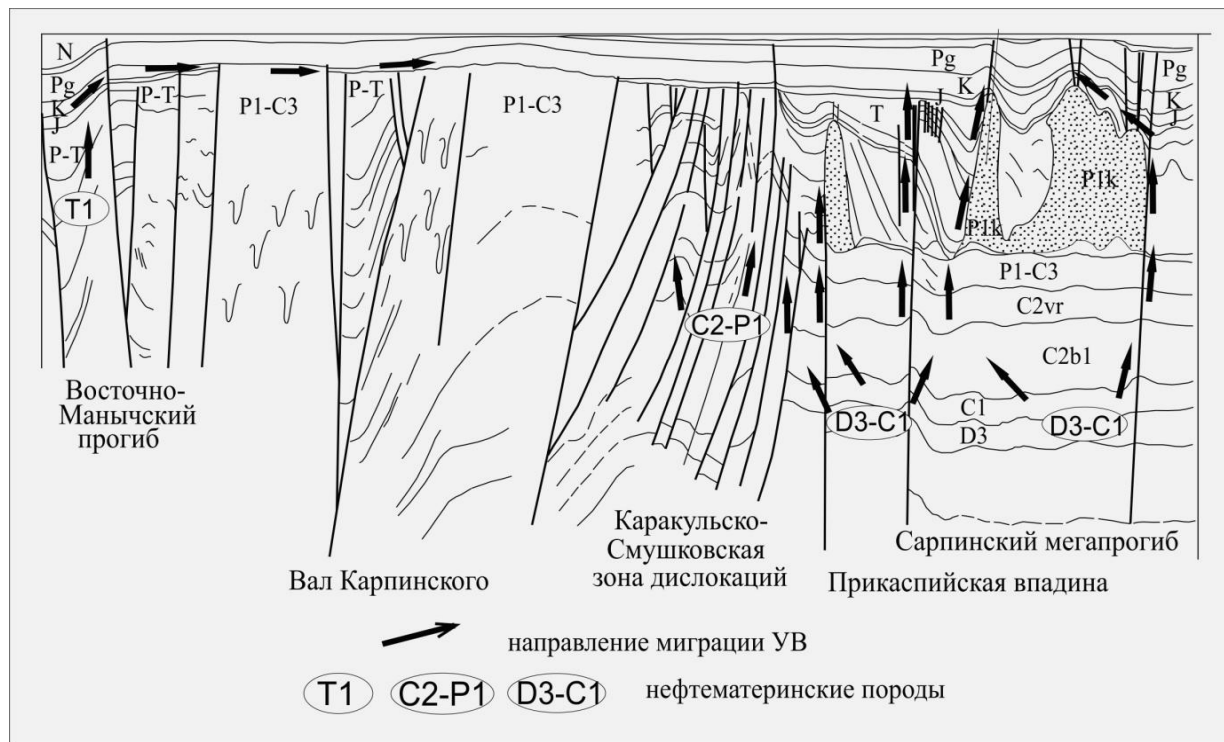


Рис. 1. Принципиальная схема миграции УВ (авт.: В.Ф. Шарафутдинов, Д.А. Шлыгин, Ю.В. Куранов, В.В. Калабин) / Fig. 1. Schematic diagram of the hydrocarbon migration (authors V.F. Sharafutdinov, D.A. Shlygin, Yu.V. Kuranov, V.V. Kalabin)

Наиболее значимыми и первоочередными направлениями поисков УВ на территории Республики являются нефтекумская свита нижнего триаса в Восточно-Маньчском прогибе, среднекаменноугольные отложения калмыцкой части Астраханского свода, ниже- и среднекаменноугольные и нижнепермские отложения Карасальской моноклинали, среднеюрские и нижнемеловые отложения вала Карпинского.

В северной части Калмыкии в границах Прикаспийской впадины основными направлениями ГРП являются поиски нефти и газа в подсолевых (P_{1a}g, P_{1a}+s, C₂b, D₃f-fm) отложениях Карасальской моноклинали, а также на юго-западном склоне Астраханского свода. С этими ГРП связаны вероятности наиболее крупных открытий скоплений УВ на территории Республики.

В период с 2002 по 2014 г. в пределах калмыцкой части Астраханского свода силами Астраханской геофизической экспедиции, ЗАО «НП Заприкаспий-геофизика» и ООО «ТНГ-Групп» было отработано сейсморазведочными работами МОГТ 2D 941 пог. км профилей и выполнена переинтерпретация сейсмического материала прошлых лет в объеме 1521 пог. км. Анализ результатов работ позволяет выделить 19 перспективных рифогенных объектов по среднекаменноугольным (башкирским) и верхнедевонским отложениям. Перспективность данных объектов в отношении газоносности обуславливает-

ся наличием на сопредельной с Калмыкией территории Астраханской области крупнейшего Астраханского газоконденсатного месторождения, открытого в башкирских известняках среднего карбона, а также многочисленных нефтегазопроявлений в скважинах как на калмыцкой части Астраханского свода, так и на смежных территориях.

В пределах калмыцкой части Карасальской моноклинали пристального изучения требуют ниже- и среднекаменноугольные отложения, а также подсолевые отложения нижнепермского возраста. Их продуктивность уже установлена ГРП. Так, на Хонгорском участке недр в период с 2002 по 2005 г. предприятиями ООО «Геотехсистем» и ОАО «Татнефтегеофизика» выполнялись сейсморазведочные работы 2D, а также переобработка и переинтерпретация сейсмического материала. В 2005 г. НПУ «Казаньгеофизика» и ОАО «Татнефтегеофизика» выполняли комплекс геофизических (гравиразведка, электроразведка МТЗ, магниторазведка, электроразведка ЕП) и геохимических исследований. По результатам проведенных исследований в 2006–2007 гг. ОАО «Калмнефтегаз» была пробурена поисковая скважина 1-Хонгорская, установившая газоносность визейского яруса среднекаменноугольных отложений. Помимо открытого Хонгорского газового месторождения, в пределах калмыцкой части Карасальской моноклинали подготовлен к бурению по каменноугольным отложениям ряд

структур (Владимирская, Шарнунтская, Валентиновская), которые могут стать первоочередными объектами для последующих ГРП.

В калмыцком Прикаспии интерес представляют подсольевые отложения пермского возраста. В настоящее время известно лишь одно открытое месторождение, в подсольевых нижнепермских отложениях – Южно-Плодовитенское нефтяное месторождение в отложениях артинского возраста. Но в Карасальской моноклинали также имеется ряд подготовленных к бурению структур по нижнепермским отложениям. Некоторые из них были опоискованы бурением в прошлые годы, но с неоднозначными результатами: отдельные скважины были ликвидированы как аварийные, в то время как в них отмечались признаки нефтенасыщенности.

В южной части Калмыкии основными направлениями дальнейших ГРП являются поиски УВ в триасовых отложениях вдоль северного борта Восточно-Маньчского прогиба, где возможны открытия месторождений УВ, а также поиск небольших по размерам залежей в юрско-меловом комплексе вала Карпинского и Восточно-Маньчского прогиба с целью поддержания и наращивания существующего темпа добычи нефти и газа.

Одним из наиболее перспективных направлений ГРП в Калмыкии является нефтекумская свита нижнего триаса Восточно-Маньчского прогиба [10, с. 17–21]. Привлекательность нефтекумского (нижнетриасового) комплекса обусловлена очень высокими дебитами скважин (до 500 т/сут). Нефтеносность нефтекумской свиты уже доказана на смежных территориях Дагестана, где в 1985 г. на Озерном рифогенном объекте было открыто Озерное нефтяное месторождение.

В пределах Калмыкии наибольшие перспективы нефтекумской свиты сосредоточены в границах Цекертинского блока. В последние годы здесь были сосредоточены значительные усилия по геологическому изучению недр. В период с 2000 по 2010 г. ОАО «Ставропольнефтегеофизика» и ООО «ТНГ-ГРУПП» проводили на различных участках Цекертинского блока региональные и детальные сейсморазведочные работы МОГТ 2D и МОГТ 3D. Помимо сейсмических исследований, в 2003–2004 гг. на Цекертинском участке выполнялись акустическая низкочастотная разведка (150 км²), нейрокompьютерные исследования, гравиметрические исследования (291 пог. км).

По результатам исследований на Цекертинском блоке, вдоль границы Калмыкии и Дагестана была выделена цепочка карбонатных построек нефтекумской свиты, входящих в полосу «барьерного рифа»: это Восточно-Бирюзакская, Ново-Надеждинская, Цекертинская, Барьерная, Калининская и другие

структуры, представляющие значительный поисковый интерес.

В последние годы часть из этих рифогенных структур уже опоискованы бурением. В 2006 г. была закончена бурением скважина 8-Цекертинская на одноименной структуре, где, по данным ГИС, зафиксирована нефтегазонасыщенность отложений нефтекумской свиты. В скважине в процессе испытания произошел аварийный выброс с фонтанированием нефтью с газом. Переинтерпретация новейших данных сейсмических исследований позволила установить нахождение скважины 8-Цекертинская в неоптимальных геологических условиях (на крыле структуры), что обуславливает необходимость бурения скважины-дублера в куполе Цекертинской структуры и высокую вероятность открытия нового нефтяного месторождения.

В 2012 г. на границе Дагестана и Калмыкии в результате бурения поисковой скважины на Ново-Надеждинской структуре, являющейся одной из структур выявленной ранее цепочки карбонатных построек, была подтверждена нефтеносность отложений нефтекумской свиты и открыто нефтяное месторождение Новая Надежда.

В январе 2016 г. ЗАО «КалмТатнефть» совместно с ПАО «ЛУКОЙЛ» начали бурение поисковой скважины с проектной глубиной 5700 м на наиболее крупной и контрастно выраженной Барьерной структуре. Установление продуктивности нефтекумской свиты на Барьерной структуре окончательно подтвердит перспективность нефтекумских отложений нижнего триаса на территории Республики Калмыкия.

Еще одним из значимых направлений ГРП в Калмыкии в Восточно-Маньчском прогибе (как и на вале Карпинского) являются юрско-меловые отложения [10, с. 17–27]. Несмотря на то что значительная часть месторождений в меловых и юрских отложениях на рассматриваемых территориях была открыта еще в 60–70-е гг. XX в., углеводородный потенциал данных отложений далеко еще не исчерпан, о чем свидетельствует переинтерпретация геофизических данных. С 2004 по 2012 г. для оценки дальнейших перспектив ГРП и выявления новых поисковых объектов проводились сейсморазведочные работы МОГТ 2D, переобработка сейсмических материалов прошлых лет и комплексная их интерпретация на таких лицензионных участках вала Карпинского и Восточно-Маньчского прогиба, как месторождения Таша и Маньч (2004 г.), Южно-Ермолинская площадь (2006 г.), Буратинский ЛУ (2011–2012 гг.), Ермолинский ЛУ (2012 г.), Состинский и Зултарганский ЛУ (2012 г.). Общий объем только этих сейсморазведочных работ за указанный период составил 1418 пог. км. На данных лицензи-

онных участках прогнозируются структуры небольшого размера и сложного геологического строения.

Выделенные и описанные выше первоочередные, на наш взгляд, направления дальнейших ГРП нашли свое отражение в разработанных автором картах перспектив нефтегазоносности по основным продуктивным и перспективным отложениям. По каменноугольным, пермским, триасовым, юрским,

меловым и палеогеновым отложениям на территории Калмыкии были оконтурены зоны с установленной нефтегазоносностью, зоны с возможной нефтегазоносностью (перспективные для дальнейших ГРП) и малоперспективные (бесперспективные для дальнейших ГРП) территории.

Разработанные карты перспектив нефтегазоносности представлены на рис. 2–4.

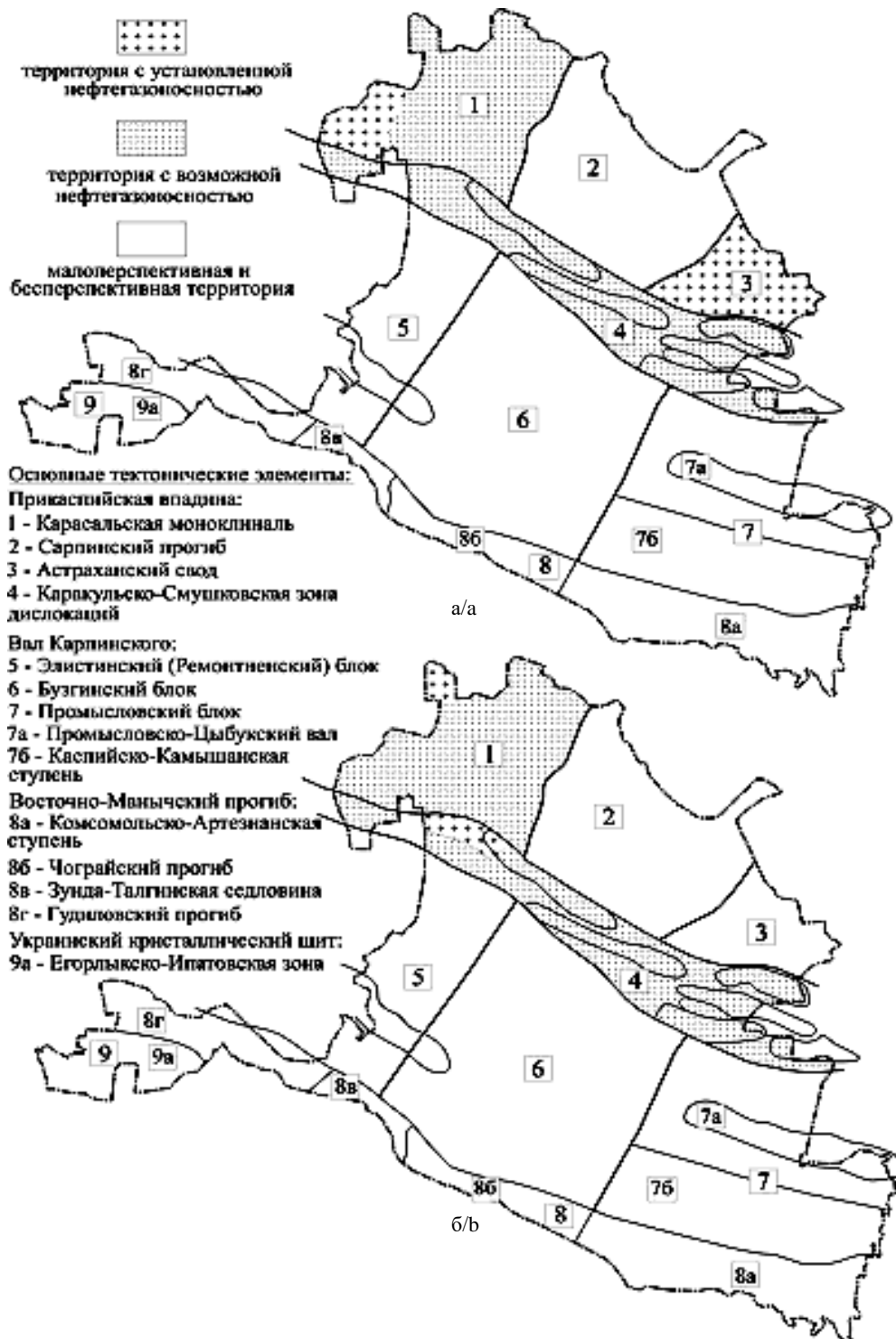


Рис. 2. Карты перспектив нефтегазоносности территории Калмыкии: а – каменноугольные отложения; б – пермские отложения / Fig. 2. Maps of petroleum potential in Kalmykia: a - coal deposits; b - Permian deposits

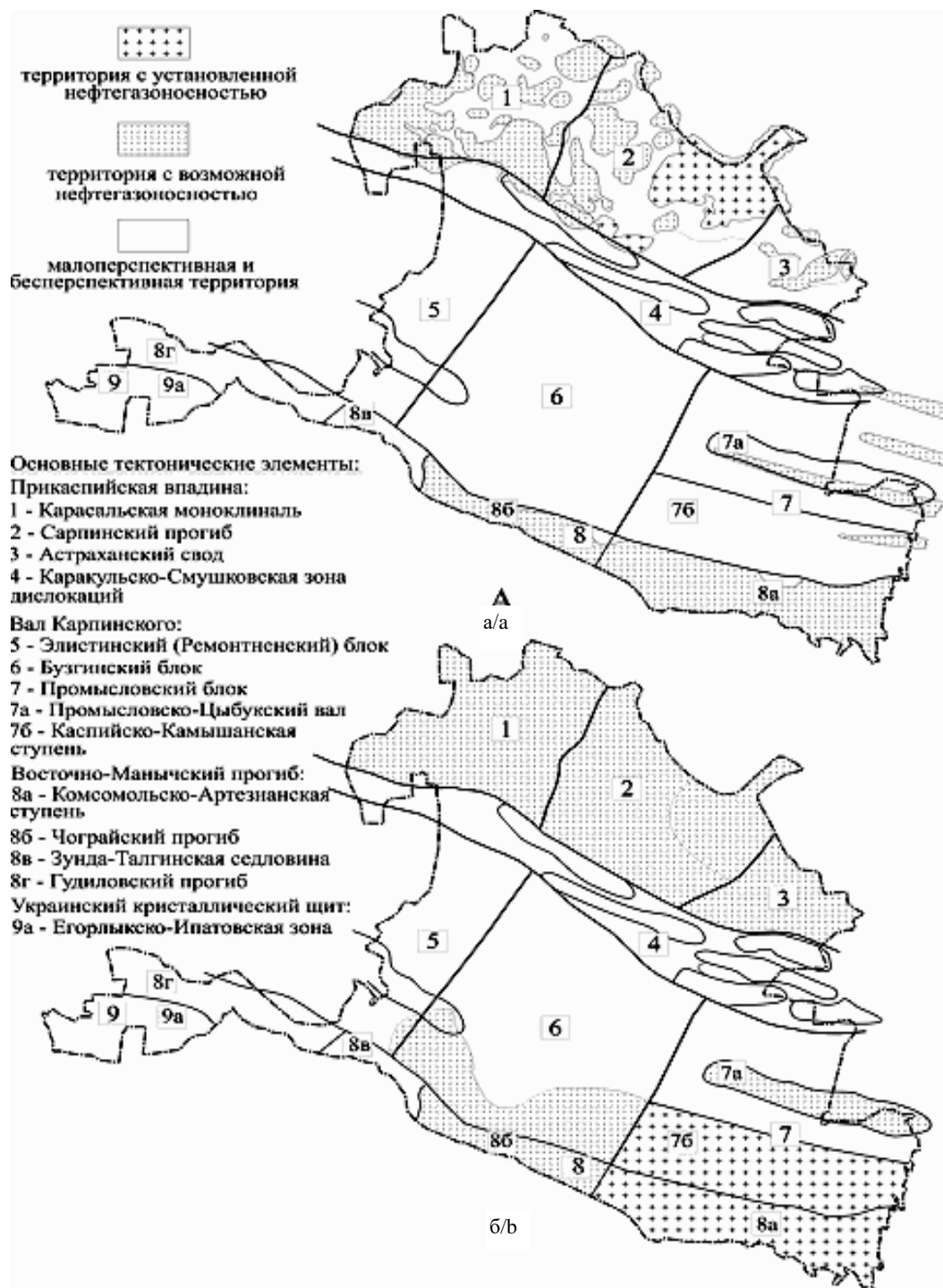


Рис. 3. Карты перспектив нефтегазоносности территории Калмыкии: а – триасовые отложения; б – юрские отложения /
 Fig. 3. Maps of petroleum potential in Kalmykia: a - Triassic deposits; b - Jurassic deposits

Представленные карты перспектив, в свою очередь, стали основой для современной количественной оценки ресурсной базы Калмыкии. В методическом плане оценка выполнялась методом сравнительных геологических аналогий с выделением по каждому комплексу отложений эталонных участков и переносом их удельной плотности ресурсов

на оцениваемые территории с применением коэффициентов аналогии. Полученные результаты количественной оценки приведены в таблице.

Анализ этих результатов подтверждает, что значительная часть ресурсной базы Калмыкии в настоящее время остается неучтенной. На долю открытых геологических ресурсов УВ приходится не

более 10 % от оцененной в представляемом исследовании ресурсной базы республики, что свидетельствует о том, что территория требует дальнейшего геологического изучения и скорейшего освоения для более полного раскрытия и использования ее ресурсного потенциала. Нельзя не отметить

в данном контексте и крайнюю неоднородность в степени изученности территории исследований. В Калмыкии по-прежнему немало «белых пятен» – участков, где геолого-геофизические работы либо проводились в крайне незначительном объеме, либо не проводились вообще.

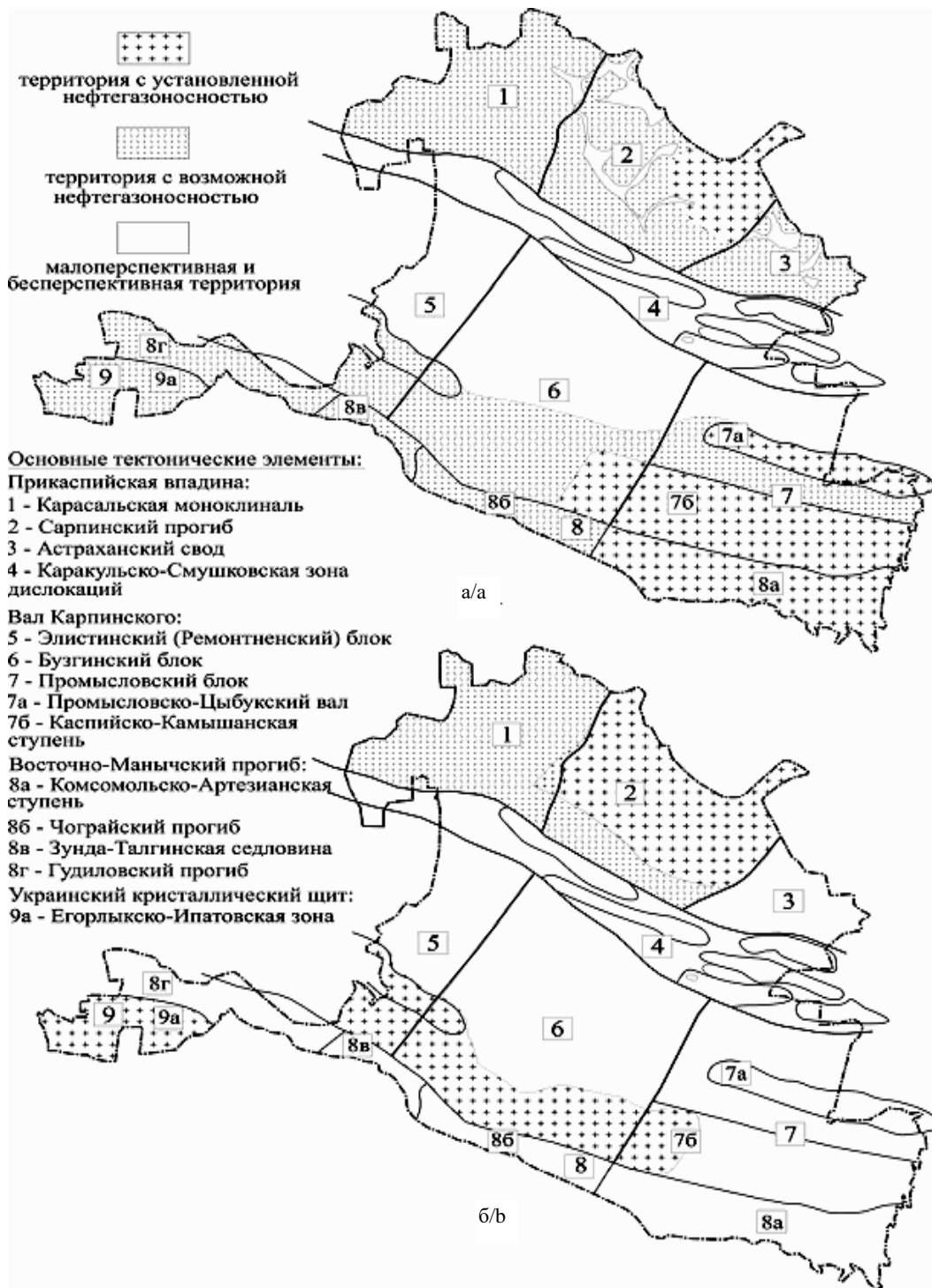


Рис. 4. Карты перспектив нефтегазоносности территории Калмыкии: а – меловые отложения; б – палеогеновые отложения /
 Fig. 4. Maps of petroleum potential in Kalmykia: a - Cretaceous deposits; b - Paleogene deposits

Результаты количественной оценки ресурсной базы территории Республики Калмыкия /
 The quantify results of the resource base of the Republic of Kalmykia

Тектонический элемент	Тектонический элемент II порядка	Начальные геологические ресурсы, млн
Прикаспийская впадина	Астраханский свод	675,5
	Сарпинский прогиб	98,4
	Карасальская моноклираль	336,9
	Каракульско-Смушковская зона дислокаций	188,9
Всего Прикаспийская впадина		1299,7 (в том числе открытые 45,0)
Вал Карпинского	Промысловский блок	328,4
	Бузгинский блок	147,3
	Элистинский блок	26,1
Всего вал Карпинского		501,8 (в том числе открытые 92,2)
Восточно-Манычский прогиб	Восточный прогиб	279,6
	Чограйский прогиб	41,9
	Зунда-Талгинская седловина	3,2
	Гудиловский прогиб	10,3
Всего Восточно-Манычский прогиб		335,0 (в том числе открытые 18,8)
Украинский кристаллический щит	Егорлыкско-Ипатовская зона	33,1
Всего по территории Калмыкии		2169,6 (в том числе открытые 157,1)

Подобным «белым пятном» остается Каракульско-Смушковская зона дислокаций, перспективы нефтегазоносности которой в этой связи требуют отдельного уточнения [10, с. 27–30; 11]. Требуют дальнейшего изучения территория всего Калмыцкого Прикаспия, южный борт Бузгинского и Элистинского блоков вала Карпинского и северный борт Восточно-Манычского прогиба. В Калмыкии не проводились сейсморазведочные работы 3D, за исключением Барьерной площади в Восточно-Манычском прогибе. Таким образом, не исключено, что ресурсный потенциал может быть еще значительнее, чем представляется на данной стадии изученности ее территории.

Автор выражает благодарность А.В. Бембееву, имеющему огромный опыт поисковых работ по нефти и газу на территории Калмыкии за неоценимую помощь и консультации в ходе проведения представленного в статье исследования.

Литература

1. Аванисьян Г.М. Основные черты геологического строения Астраханской области и Калмыцкой АССР и направление поисково-разведочных работ на нефть и газ // Вопросы геологии и нефтегазоносности Нижнего Поволжья. Волгоград, 1969. С. 148–161.
2. Бембеев В.Э., Скоцкий С.С. О перспективах поисков залежей УВ в палеогеновых отложениях юго-запада Прикаспийской впадины // Геология нефти и газа. 1983. № 9. С. 11–15.
3. Бембеев А.В. Прогнозирование нефтегазоносности палеозойских отложений юго-западной части Прикаспийской впадины по комплексу геолого-гео-

химических данных: автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. Ставрополь, 1998. 140 с.

4. Бражников О.Г., Мизинов Н.В., Мордовин А.А. Геологические предпосылки поисков газа в надсолевых отложениях Калмыцкой АССР // Геология нефти и газа. 1979. № 1. С. 14–17.

5. Гасангусейнов Г.Г., Шарафутдинов Ф.Г., Мирзоев Д.А., Воцалевский З.С., Сидоров В.В., Романов П.Г. О нефтегазоносности пермских и триасовых отложений Южной Калмыкии // Геология нефтегазоносных комплексов мезозоя Дагестана. 1979. № 4.

6. Капустин И.Н., Бембеев В.Э., Кирюхин Л.Г. Основные направления геологоразведочных работ на нефть и газ // Геологическое строение и нефтегазоносность Калмыкии. Элиста, 1986. С. 141, 144–145.

7. Михайлов Б.Ч. Развитие нефтегазовой отрасли в Калмыкии (1957–2000 гг.): автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. Элиста, 2006. 178 с.

8. Одолев О.Г., Калинин В.В., Одолев Г.О. Геология и нефтегазоносность Калмыкии. Волгоград, 2008. 158 с.

9. Федоров Д.Л. Перспективы нефтегазоносности Калмыцкой АССР // Нефтегазовая геология и геофизика. 1965. № 2. С. 7–9.

10. Шарафутдинов В.Ф., Бембеев А.В., Куранов Ю.В. Нефтегазоносные комплексы Восточно-Манычского прогиба Калмыкии // Природно-ресурсный потенциал Прикаспия и сопредельных территорий: проблемы его рационального использования. Элиста, 2016. С. 17–27.

11. Сианисян Э.С., Анореев В.М. Динамокатагенетические особенности сочленения Прикаспийской впадины и вала Карпинского в связи с нефтегазоносностью // Сб. тр., посвященных 70-летию со дня рождения проф. Ю.А. Стерленко. Ставрополь, 2001. С. 275–281.

References

1. Avanis'yan G.M. [The main features of the geological structure of the Astrakhan region and the Kalmyk ASSR and the direction of prospecting for oil and gas]. *Voprosy geologii i neftegazonosnosti Nizhnego Povolzh'ya* [Questions of geology and oil and gas potential of the Lower Volga Region]. Volgograd, 1969, pp. 148-161.
2. Bembееv V.E., Skrotskii S.S. O perspektivakh poiskov zalezhei UV v paleogenovykh otlozheniyakh yugo-zapada Prikaspiiskoi vpadiny [On the Prospects for the Search for Hydrocarbon Deposits in Paleogene Deposits in the Southwest of the Caspian Depression]. *Geologiya nefiti i gaza*. 1983, No. 9, pp. 11-15.
3. Bembееv A.V. *Prognozirovaniye neftegazonosnosti paleozoiskikh otlozhenii yugo-zapadnoi chasti Prikaspiiskoi vpadiny po kompleksu geologo-geokhimicheskikh dannykh*: avtoref. dis. ... kand. geol.-mineral. nauk [Forecasting of oil and gas content of Paleozoic deposits of the south-western part of the Caspian depression along a complex of geological and geochemical data]. Stavropol, 1998, 140 p.
4. Brazhnikov O.G., Mizinov N.V., Mordovin A.Ya. Geologicheskie predposylki poiskov gaza v nadsoleykh otlozheniyakh Kalmytskoi ASSR [Geological prerequisites for gas exploration in the over-salt sediments of the Kalmyk ASSR]. *Geologiya nefiti i gaza*. 1979, No. 1, pp. 14-17.
5. Gasanguseinov G.G., Sharafutdinov F.G., Mirzoev D.A., Votsalevskii Z.S., Sidorov V.V., Romanov P.G. O neftegazonosnosti permskikh i triasovykh otlozhenii Yuzhnoi Kalmykii [About oil and gas content of Permian and Triassic deposits of Southern Kalmykia]. *Geologiya neftegazonosnykh kompleksov mezozoya Dagestana*. 1979, No. 4.
6. Kapustin I.N., Bembееv V.E., Kiryukhin L.G. [The main areas of geological exploration for oil and gas]. *Geologicheskoe stroenie i neftegazonosnost' Kalmykii* [Geological structure and oil and gas content of Kalmykia]. Elista, 1986, pp. 141, 144-145.
7. Mikhailov B.Ch. *Razvitie neftegazovoi otrasli v Kalmykii (1957-2000 gg.)*: avtoref. dis. ... kand. geol.-mineral. nauk [The development of the oil and gas industry in Kalmykia (1957-2000)]. Elista, 2006, 178 p.
8. Odoleev O.G., Kalinin V.V., Odoleev G.O. *Geologiya i neftegazonosnost' Kalmykii* [Geology and oil and gas content of Kalmykia]. Volgograd, 2008, 158 p.
9. Fedorov D.L. Perspektivy neftegazonosnosti Kalmytskoi ASSR [Prospects of oil and gas potential of the Kalmyk ASSR]. *Neftegazovaya geologiya i geofizika*. 1965, No. 2, pp. 7-9.
10. Sharafutdinov V.F., Bembееv A.V., Kuranov Yu.V. [Oil and gas bearing complexes of the East Manych trough of Kalmykia]. *Prirodno-resursnyi potentsial Prikaspiya i sopredel'nykh territorii: problemy ego ratsional'nogo ispol'zovaniya* [Natural and resource potential of the Caspian and adjacent territories: problems of its rational use]. Elista, 2016, pp. 17-27.
11. Sianisyan E.S., Andreev V.M. [Dynamocatalytic features of the articulation of the Caspian depression and Karpinsky shaft in connection with oil and gas content]. *Sb. tr., posvyashchennykh 70-letiyu so dnya rozhdeniya prof. Yu.A. Sterlenko* [Collected works dedicated to the 70th anniversary of the birth of Professor Yu.A. Sterlenko]. Stavropol, 2001, pp. 275-281.

УДК 551.324.63

DOI 10.18522/0321-3005-2017-1-110-117

СТРУКТУРА И ДИНАМИКА ДАУТСКОГО ГЛЯЦИАЛЬНО-ГИДРОЛОГИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА В КАРАЧАЕВО-ЧЕРКЕССИИ

© 2017 г. В.В. Онищенко, Н.С. Дега, Ш.Ю. Тохчуков, Н.М. Корчагина, А.Р. Байрамкулова

STRUCTURE AND DYNAMICS OF THE DAUT GLACIAL AND HYDROLOGICAL COMPLEX IN KARACHAY-CHERKESSIA

V.V. Onishchenko, N.S. Dega, Sh.Yu. Tokhchukov, N.M. Korchagina, A.R. Bairamkulova

Онищенко Вячеслав Валентинович – Карачаево-Черкесский государственный университет имени У.Д. Алиева, доктор географических наук, профессор, заведующий кафедрой экологии и природопользования, ул. Ленина, 29, г. Карачаевск, 369202, КЧР, Россия, e-mail: ovv333@mail.ru

Vyacheslav V. Onishchenko – Aliyev Karachay-Cherkess State University, Doctor of Geography, Professor, Head of the Department of Ecology and Environmental Management, Lenina St., 29, Karachaevsk, Karachay-Cherkess Republic, 369202, Russia, e-mail: ovv333@mail.ru

Дега Наталья Сергеевна – Карачаево-Черкесский государственный университет имени У.Д. Алиева, кандидат географических наук, доцент, заведующая лабораторией геоэкологического мониторинга, ул. Ленина, 29, г. Карачаевск, 369202, КЧР, Россия, e-mail: dega999@mail.ru

Natalya S. Dega – Aliyev Karachay-Cherkess State University, Candidate of Geography, Associate Professor, Head of the Laboratory of the Geoecological Monitoring, Lenina St., 29, Karachaevsk, Karachay-Cherkess Republic, 369202, Russia, e-mail: dega999@mail.ru

Тохчуков Шамиль Юсуфович – Карачаево-Черкесский государственный университет имени У.Д. Алиева, младший научный сотрудник, лаборатория геоэкологического мониторинга, ул. Ленина, 29, г. Карачаевск, 369202, КЧР, Россия, e-mail: shamil.ekolog@gmail.ru

Shamil Yu. Tokhchukov – Aliyev Karachay-Cherkess State University, Junior Researcher, Laboratory of Geoecological Monitoring, Lenina St., 29, Karachaevsk, Karachay-Cherkess Republic, 369202, Russia, e-mail: shamil.ekolog@gmail.ru

Корчагина Наталья Михайловна – Карачаево-Черкесский государственный университет имени У.Д. Алиева, старший научный сотрудник, лаборатория геоэкологического мониторинга, ул. Ленина, 29, г. Карачаевск, 369202, КЧР, Россия

Natalya M. Korchagina – Aliyev Karachay-Cherkess State University, Senior Researcher, Laboratory of Geoecological Monitoring, Lenina St., 29, Karachaevsk, 369202, Karachay-Cherkess Republic, Russia

Байрамкулова Асият Руслановна – Карачаево-Черкесский государственный университет имени У.Д. Алиева, аспирант, ул. Ленина, 29, г. Карачаевск, 369202, КЧР, Россия, e-mail: bayramkulova.asya@mail.ru

Asiyat R. Bairamkulova – Aliyev Karachay-Cherkess State University, Postgraduate, Lenina St., 29, Karachaevsk, Karachay-Cherkess Republic, 369202, Russia, e-mail: bayramkulova.asya@mail.ru

В процессе экспериментальных исследований и количественных оценок горных геосистем и отдельных ледников Карачаево-Черкесии все контрастнее проявляется увеличение интенсивности сокращения современного оледенения. Ледники теряют привычные очертания. В период с 2001 по 2015 г. отмечаются наиболее интенсивный процесс таяния ледников и активизация экзогенных процессов. Увеличение летних осадков снижало амплитуду температурных колебаний и повышало интенсивность таяния ледников под действием жидких осадков. В зимний период снижение твердых осадков не компенсировало стаявшей за летний период части ледника, т. е. за исследуемый период имел место отрицательный баланс многих ледников – расход превышал аккумуляцию льда.

Потепление климата и изменение местной циркуляции воздушных потоков, связанные с региональной хозяйственной деятельностью, по нашему мнению, являются определяющими факторами, формирующими структуру современного оледенения.

В работе приводится пространственно-временной анализ более чем вековой динамики ледника Даутский как наиболее показательного из сохранившихся на Боковом хребте в Карачаево-Черкесии. Представлены тренды гидротермического режима среднегорной республики. Дана причинно-следственная характеристика изменений геоморфологических показателей ледника, образования горного озера, смены структуры гляциально-гидрологического комплекса. Результаты проведенных исследований могут представлять интерес для специалистов в области наук о Земле, натуралистов, гидротехников горного туризма.

Ключевые слова: ледники, горное озеро, гляциально-гидрологический комплекс, гидротермические показатели, тренды, геоморфологическая характеристика, динамика, язык ледника, абляция, подпрудное озеро.

In the course of the pilot studies and the quantitative assessments of mountain geosystems and separate glaciers of Karachay-Cherkessia increase in intensity of reduction of the modern freezing is more and more contrastly shown. Glaciers lose habitual outlines. During the period, from 2001 to 2015 the most intensive process of a melting of glaciers and activization of exogenetic processes is noted. Increase in summer rainfall reduced amplitude of temperature fluctuations and increased intensity of a melting of glaciers on action by fluid settlings. During the winter period, decrease in solid rainfall did not compensate the part of a glacier which melted for the summer period, i.e. for the studied period the negative balance of many glaciers took place – the expense exceeded ice accumulation.

Warming of climate and change of local circulation of airflows, the bound to regional economic activity, in our opinion, are the defining factors forming structure of the modern freezing.

Daut Glacier as most exponential of remained on Side Range in Karachay-Cherkessia is brought in work the existential analysis of more than century dynamics of a glacier. Trends of the hydrothermal mode of middle mountains of the republic are presented. The cause and effect characteristic of changes of geomorphological indexes of a glacier, formation of the mountain lake, change of structure of a glacial and hydrological complex is given. Results of the conducted researches can be of interest to experts in the field of sciences about Earth, naturalists, guides of mountaineering.

Keywords: glaciers, mountain lakes, glacial and hydrological complex, hydrothermal indicators, trends, geomorphological characteristics, dynamics, glacier tongue, ablation, dammed lake.

Введение

В последние пятнадцать лет все больше горных регионов в мире подвергаются воздействию повышенных температур, ледники увеличивают интенсивность таяния, теряют привычные очертания. Это наблюдается в процессе натурных исследований и количественных оценок, используемых для изучения горных систем и отдельных ледников Карачаево-Черкесской Республики (КЧР). Проводится сравнительный анализ снимков из космоса, фотоснимков разных лет, данных из каталогов, топографических данных и объективных наблюдений. Оценка изменений охватывает более чем вековое существование ледников Карачаево-Черкесии.

С 2001 по 2015 г. рассматривались материалы, полученные с использованием спутниковых снимков, неоднократные съемки поверхности ледников. Этот отрезок времени представляет большой интерес ввиду того, что именно в это время наблюдались интенсивный процесс таяния и активизация разнообразных экзогенных процессов стихийного характера в высокогорных районах Карачаево-Черкесии. Сходили лавины, возникали сели и наводнения, которые имели своей причиной процессы интенсивного таяния ледников на хребтах и склонах гор. В результате практически исчезло оледенение на Передовом хребте. Многие ледники Главного и особенно Бокового хребтов или прекратили свое существование, или значительно сократили площади залегания.

В настоящее время проводятся исследования количественных показателей изменения ледников на горных склонах Карачаево-Черкесии и в бассейнах рек – притоков р. Кубани. В последний раз такие значения были в 60-е гг. XX в. Поверхностная высота отдельных ледников за прошедшие пятнадцать

лет понизилась до 8 м. Было замечено, что уменьшение размеров ледников в сильной степени зависит от того, какие температуры наблюдаются в летний период. Снижение летних значений амплитуды температуры воздуха при одновременном увеличении жидких осадков способствует уменьшению размеров ледников. За последние 15 лет осадков становится меньше, температура воздуха возрастает по всем сезонам года, за счет чего размеры ледников неуклонно сокращаются. Абляция на данный момент превышает аккумуляцию примерно в три с лишним раза. Эти показатели очень тревожные, можно ожидать дальнейшего увеличения интенсивности сокращения площади оледенения.

Потепление климата и изменение местной циркуляции воздушных масс, связанное не только с климатическими преобразованиями, но и с региональной хозяйственной деятельностью [1], по нашему мнению, являются определяющими факторами структуры современного оледенения в КЧР. Метеорологическая станция Теберда позволила получить точные параметры климатических изменений в среднегорье республики.

Динамика среднегодовых температур и осадков за 2000–2014 гг. (рис. 1) наглядно иллюстрирует тенденции изменения гидротермического режима в среднегорьях, эти изменения являются наиболее характерными по геоморфологическим показателям Тебердинской долины. По данным 15-летних наблюдений прослеживается устойчивый характер повышения температуры воздуха – по среднегодовым и по среднесезонным показателям (табл. 1). Заметное увеличение отмечено зимой, наименьшее – летом. Вероятно, это связано с выпадением осадков, которые, напротив, снижались зимой, в период отрицательных температур, и увеличивались летом.



Рис. 1. Динамика гидротермического режима в среднегорьях Карачаево-Черкесии (М. Теберда) / Fig. 1. Dynamics of hydrothermal regime in the midlands of Karachay-Cherkessia (Malaya Teberda)

Таблица 1

Тенденции изменений гидротермических показателей 2000–2014 гг. по годовым и сезонным циклам (М. Теберда) / Trends in changes of hydrothermal indicators in 2000-2014 on annual and seasonal cycles (Malaya Teberda)

Климатические показатели	Зима	Весна	Лето	Осень	Среднее за за год
Температура воздуха, °С	+ 1,1	+ 0,9	+ 0,3	+ 0,7	+ 0,8
Осадки, мм	- 25	- 7	+ 16	+ 11	- 3

Примечание. + – увеличение показателя; – снижение.

Увеличение летних осадков уменьшало амплитуду температурных колебаний и повышало интенсивность таяния ледников. В зимний период снижение твердых осадков не компенсировало стаявшей за летний период части ледника, т. е. за исследуемый период отмечается отрицательный баланс ледника (расход превышал аккумуляцию льда). В табл. 1 представлены количественные показатели изменений температуры и выпадавших осадков по разнице значений начальных и конечных показателей сезонных и годовых трендов за период.

Среднее увеличение температуры воздуха за период составило $+0,8$ °С, при этом количество выпадающих годовых осадков имело тенденцию, хоть и незначительно, к снижению. Наиболее существенные изменения в годовом цикле динамики гидротермических показателей происходили в зимнее время. Известно, что таяние ледников зимой приостанавливается и происходит по остаточному принципу накопленного тепла летом. Однако снижение твердых осадков зимой при одновременном повышении температуры воздуха создают предпосылки для изменения годового цикла динамики ледника. Весной продолжающийся рост температуры воздуха и снижение осадков усугубляют сценарий повышения интенсивности таяния ледника в последующие сезоны года. В летнее время наступает период наибольшей трансформации ледника и по фронту, и по мощности. Этому способствует продолжение повышения температуры воздуха и значительное увеличение жидких осадков. Дальнейшее наращивание количества осадков осенью при одновременном повышении температуры воздуха также влияет на сезонную динамику ледника. Однако увеличение суточной амплитуды температуры воздуха осенью замедляет его таяние, тем не менее процесс трансформации продолжается. Абляция [2] прекращается при выпадении постоянно снежного покрова на поверхность ледника.

Материал и методы исследования

В верховьях Даутского ущелья Карачаево-Черкесии, где берет начало одноименная река, впадающая в р. Кубань, находится сравнительно небольшой, но весьма своеобразный ледник Даутский (в 1874 г. – глетчер I разряда) [3]. Протяженность его в длину – 2,6 км. Поверхность ледника в настоящее время имеет пологий уклон, упирающийся в скальные обнажения в виде бараньих лбов.

Из записок Кавказского отдела Императорского Русского географического общества [4] следует, что во второй половине 1870-х гг. в конце ледникового языка находился огромный асимметричной формы грот из сине-зеленого льда, своды которого

представляли собой великолепное по красоте природное сооружение. Из грота вытекала река – исток р. Даут. Большая часть поверхности ледника (глетчера I разряда) отличалась чистотой. Местами его поверхность покрывалась обломками скал и другими моренными отложениями. В средней части отмечалось большое количество дугообразных трещин. Несколько выше ледник имел более суровый вид из-за множества зубчатых нагромождений, разделенных более глубокими трещинами. Еще выше поверхность представляет собой фирновые поля, частично обрамленные по краям обрывистыми фирн-глетчерами [5].

Ледник в начале XX в. имел цельную, пологую поверхность с крутым окончанием языка – ледопадом (рис. 2). В этот период грот значительно уменьшил свои размеры, о чем свидетельствует микрорельеф перед фронтом языка. На фронтальной, крутой поверхности просматривается разделительная линия ледопада, где в результате таяния конца ледника впоследствии сформировалась отвесная ледяная стена. Во второй половине XX столетия процесс таяния по фронту языка ледника имел симметричный характер по всей его поверхности (рис. 3).

Грот исчез, и на его месте в 1975–1978 гг. начало образовываться неглубокое приледниковое озеро. Наиболее существенные геоморфологические преобразования происходили в зоне ледопада конечной части языка Даутского ледника. Отступая, ледник оставлял после себя изменяющееся в линейных размерах и береговых очертаниях озеро [6].

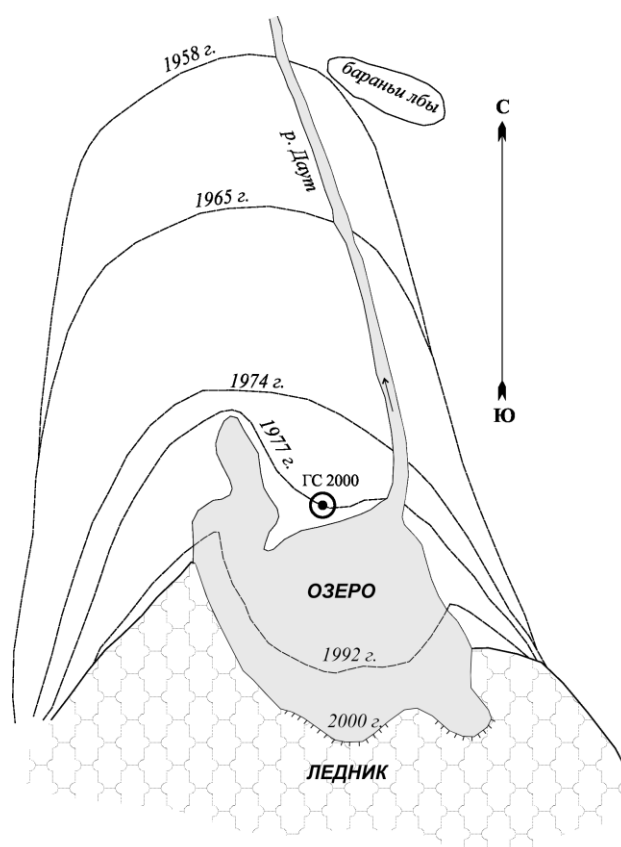
В конце XX – начале XXI в. язык ледника спустился прямо в озеро (рис. 4). Южная береговая линия озерного водоема представляла собой ледовую стенку высотой в несколько метров, завершающую ледопад конечной части языка ледника. На западном берегу озера пульсировал лавинный снежник-перелеток. Водоем подпружен невысоким валом конечной морены ледника, где расположен съемочный, маркированный репер.

Геоморфологический облик ледника существенно изменился в 2007 г. Интенсивное таяние льда на скальном ригеле происходило по разделительной линии в верхней части ледопада, что создавало предпосылки возможного отрыва конечной части языка. Так оно и произошло.

Сохранившийся гидроклиматический режим потепления и снижения увлажнения способствовал отделению конца ледника (ледопада), который до 2015 г. практически прекратил свое существование. При этом скорость стаивания отделившейся части значительно повысилась. Озеро расширило свои границы, пополнив запасы воды талыми, ледниковыми водами.



Рис. 2. Нижний конец Даутского ледника (06.08.1909) [4] / Fig. 2. The lower end of the Daut Glacier (08.06.1909) [4]



$S_{\text{озера 2000}} = 8900 \text{ м}$
 $S_{\text{озера 1992}} = 5800 \text{ м}$
Начало образования озера 1975 г.

Рис. 3. Схема стадийного отступления Даутского ледника и образования подпрудного озера во второй половине XX в. /
Fig. 3. Scheme of Daut Glacier stadial retreat and formation of dammed lake in the second half of the twentieth century



Рис. 4. Язык Даутского ледника и подпрудное озеро в 2000 г. /
 Fig. 4. Language of Daut Glacier and dammed lake in 2000

Полученные результаты и их обсуждение

Обследование 19.07.2015 г. показало, что из-за отрыва конца языка конечный фронт ледника расположился на стенке «бараньих лбов». Выше поверхности озера на 150 м, на берегу, от ледника осталась совсем незначительная, покрывтая снегом часть. На наличие

остатка ледника под фирновым снегом указывает небольшая ледяная стенка над поверхностью воды. Соприкосновение береговой линии озера с ледником также исчезло. Геоморфологический тип озера изменился коренным образом.

За последние 60 лет скорость отступления ледника существенно изменялась, постепенно снижаясь к концу столетия (табл. 2). Независимо от периодичности измерений ледника, скорость его таяния по фронту неуклонно снижалась в течение всей второй половины XX в. и достигла минимальной величины 3,1 м/год в период 1992–2000 гг.

Однако в последние 15 лет (2000–2015 гг.) скорость таяния резко возросла до 10 м/год. Причиной внезапного увеличения интенсивности таяния языка Даутского ледника послужила геоморфологическая структура подстилающей поверхности: обрывистая, подледниковая скала («бараньи лбы»), которая после отступления ледника стала разделительным, межкарповым ригелем, увеличившим площадь образовавшегося озера. Подледниковый ригель способствовал отделению ледопада языка ледника от основной его массы. В результате оторвавшаяся часть языка оказалась значительно ниже основного тела ледника в микроклиматических условиях озерного водоема, что и создало решающие условия для ускоренного таяния конца ледникового языка.

Таблица 2

Динамика интенсивности отступления Даутского ледника, м /
 The dynamics of the intensity of Daut Glacier retreat, m

Период наблюдений	Число лет	Величина отступления, м	
		за период	среднее в год
1958–1965	7	67	9,6
1965–1974	9	80	8,9
1974–1977	3	15	5,0
1977–1992	15	70	4,7
1992–2000	8	25	3,1
2000–2015	15	150	10
1958–2015	42	407	6,1

Отступление ледника за период наблюдений с 2000 г. увеличило озеро в четыре раза, изменив геоморфологическую структуру гляциально-гидрологического ландшафта.

Около половины площади юго-восточной части озера в период измерений находилось под поверхностным снегом. Лишь проступающая сквозь снежную поверхность и по линии берегового уреза серо-голубая вода свидетельствовала о наличии водной толщи озерного водоема. Площадь озера с 8,9 тыс. м² в 2000 г. увеличилась до 17,6 тыс. м² в 2007 г., а по измерениям 2015 г. составила 34,4 тыс. м² (рис. 5).

Дно озера имеет уклон в южную сторону. Максимальная измеренная глубина – 6,1 м. Расчетная глубина озера под снежной поверхностью достигает 10 м.

Сложившаяся гляциально-гидрологическая ситуация отражает очередную стадию геоморфологической динамики современного природно-территориального комплекса в результате потепления климата и местной циркуляции воздушных потоков. Лавинный снежник-перелеток за период последних наблюдений исчез из западной части берега озера и образовался на юго-западной.



Рис. 5. Гляциально-гидрологическая ситуация Даутского ледника в 2015 г. /
 Fig. 5. Glacial and hydrological situation of the Daut Glacier in 2015

Озеро значительно увеличило свои размеры, с тенденцией дальнейшего расширения, при условии стаивания берегового снежника и остатка ледника [7]. Абсолютная высота водной поверхности озера составила 2720 м над уровнем моря, фронт ледника поднялся до отметки 2870 м.

Даутский ледник в первой декаде XXI в. сохранял свой морфологический тип как долинный (глетчер). Однако дальнейшее его таяние и связанное с этим отступление конца языка на верхний геоморфологи-

ческий кар, исчезновение ледопада изменили его морфологический тип на карово-долинный.

Морены Даутского ледника не отличались по своей структуре, что характеризовало бы его геоморфологические особенности.

Еще совсем недавно, в 2007 г., ледопад конечной части языка ледника в нижней части обрывался крутой ледяной стеной в поверхность небольшого озера. В настоящее время ледник существенно изменил свои геоморфологические характеристики (табл. 3).

Таблица 3

Изменение геоморфологических характеристик ледника Даутский за период 1965–2015 гг. [8] /
 Changing the geomorphological characteristics of the Daut Glacier for the period 1965-2015 [8]

Характеристика ледника	1965	2015	%
Морфологический тип	Долинный	Карово-долинный	
Экспозиция	СЗ	СЗ	СЗ
Макс. длина, км	2,2	1,7	22,7
Площадь всего ледника, км ²	1,6	1,4	12,5
Площадь открытой части, км ²	1,5	1,2	20,0
Мин. высота	2680	2870	6,6
Макс. высота	3540	3540	0
Высота фирновой линии	2920	2980	2,8
Область абляции	0,4	0,4	0

Примечание. Данных о циклических наступательных подвижках ледника не имеется.

Заключение

По единому мнению авторов и ведущих специалистов – гляциологов Северо-Кавказского Росгидромета, ледник по своим морфологическим при-

знакам стал карово-долинным с отдельными висячими фрагментами по западному геоморфологическому борту. Северо-западное направление Даутского ледника, его пологая поверхность и окружающие геоморфологические формы ландшафта,

определяющие местную циркуляцию воздушных потоков, по нашему мнению, способствуют постоянному его таянию уже в течение более чем векового периода.

Тем не менее за последний период скорость его стаивания увеличивается.

Подобные ситуации отмечаются и на ледниках Главного Кавказского хребта Карачаево-Черкесии [9]: Аманаузском (в долине Пшиш), Восточно-Клухорском, Махарском, Чаулу-Чат и др.

Литература

1. Дегя Н.С., Онищенко В.В., Тохчуков Ш.Ю. Геоэкологический мониторинг в устойчивом развитии горных территорий Карачаево-Черкесии // Карачаево-Черкесская Республика. Устойчивое развитие: опыт, проблемы, перспективы. М., 2013. С. 48–52.
2. Хрусталева Ю.П. Эколого-географический словарь. Батайск, 2000. 198 с.
3. Записки Кавказского отдела Императорского Русского географического общества. Тифлис, 1892. Кн. 14, вып. 1.
4. Буш Н.А. О состоянии ледников Северного склона Кавказа в 1907, 1909, 1911 и 1913 гг. // Изв. РГО. 1914. Т. 50, вып. 9.
5. Ильичев Ю.Г., Онищенко В.В., Тохчуков Ш.Ю. Динамика снежного покрова в высотных зонах Карачаево-Черкесии // Устойчивое развитие горных территорий. 2015. № 1 (23). С. 53–58.
6. Тохчуков Ш.Ю., Онищенко В.В., Дегя Н.С. Эколого-географическая и рекреационная привлекательность ледника Хакель // Современные концепции научных исследований : материалы VIII Международ. науч.-практ. конф. М., 2014. С. 154–157.
7. Онищенко В.В., Дегя Н.С., Тохчуков Ш.Ю. Озера Карачаево-Черкесии – рекреационный ресурс развития туризма // Учен. записки Ставропольского краевого отделения РГО. Ставрополь, 2013. Т. 1. С. 33–41.
8. Панов В.Д., Кравцова В.И. Каталог ледников СССР. Ленинград, 1967. 124 с.
9. Дегя Н.С., Онищенко В.В., Тохчуков Ш.Ю. Озерно-гляциальный баланс Восточно-Клухорского рекреационного комплекса // Современное состояние естественных и технических наук : материалы XI Международ. науч.-практ. конф. М., 2013. С. 76–84.

References

1. Dega N.S., Onishchenko V.V., Tokhchukov Sh.Yu. [Geoecological monitoring in the sustainable development of the mountainous areas of Karachay-Cherkessia]. *Karachaevo-Cherkesskaya Respublika. Ustoichivoe razvitie: opyt, problemy, perspektivy* [Karachay-Cherkess Republic. Sustainable development: experience, problems, prospects]. Moscow, 2013, pp. 48-52.
2. Khrustalev Yu.P. *Ekologo-geograficheskii slovar'* [Ecological and geographical dictionary]. Bataysk, 2000, 198 p.
3. *Zapiski Kavkazskogo otdela Imperatorskogo Russkogo geograficheskogo obshchestva* [Notes of the Caucasian Department of the Imperial Russian Geographical Society]. Tiflis, 1892, book 14, iss. 1.
4. Bush N.A. O sostoyanii lednikov Severnogo sklona Kavkaza v 1907, 1909, 1911 i 1913 gg. [On the state of the glaciers of the northern slope of the Caucasus in 1907, 1909, 1911 and 1913]. *Izvestiya RGO*. 1914, vol. 50, iss. 9.
5. Il'ichev Yu.G., Onishchenko V.V., Tokhchukov Sh.Yu. Dinamika snezhnogo pokrova v vysotnykh zonakh Karachaevo-Cherkessii [Dynamics of the snow cover in the high-altitude zones of Karachay-Cherkessia]. *Ustoichivoe razvitie gornyykh territorii*. 2015, No. 1 (23), pp. 53-58.
6. Tokhchukov Sh.Yu., Onishchenko V.V., Dega N.S. [Ecological, geographical and recreational attractiveness of the Hackel Glacier]. *Sovremennye kontseptsii nauchnykh issledovaniy* [Modern concepts of scientific research]. Materials of the 8 International Scientific and Practical Conference. Moscow, 2014, pp. 154-157.
7. Onishchenko V.V., Dega N.S., Tokhchukov Sh.Yu. Ozera Karachaevo-Cherkessii – rekreatsionnyi resurs razvitiya turizma [Lakes of Karachay-Cherkessia - a recreational resource of tourism development]. *Uchen. zapiski Stavropol'skogo kraevogo otdeleniya RGO*. Stavropol, 2013, vol. 1, pp. 33-41.
8. Panov V.D., Kravtsova V.I. *Katalog lednikov SSSR* [Catalog of glaciers of the USSR]. Leningrad, 1967, 124 p.
9. Dega N.S., Onishchenko V.V., Tokhchukov Sh.Yu. [Lacustrine glacial balance of the Eastern Klukhor recreational complex]. *Sovremennoe sostoyanie estestvennykh i tekhnicheskikh nauk* [Current state of natural and engineering sciences]. Materials of the 11 International Scientific and Practical Conference. Moscow, 2013, pp. 76-84.

УДК 550.385.3, 550.343

DOI 10.18522/0321-3005-2017-1-118-123

ГРАВИМАГНИТНЫЕ ВОЗМУЩЕНИЯ И ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ

© 2017 г. Л.Е. Собищевич, Д.В. Лиходеев, Х.Д. Канониди, К.Х. Канониди

GRAVIMAGNETIC PERTURBATIONS AND EARTHQUAKES

L.E. Sobisevich, D.V. Likhodeev, Kh.D. Kanonidi, K.Kh. Kanonidi

Собищевич Леонид Евгеньевич – Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, доктор технических наук, главный научный сотрудник, ул. Большая Грузинская, 10, г. Москва, 123995, Россия, e-mail: sobis@ifz.ru

Лиходеев Дмитрий Владимирович – Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник, ул. Большая Грузинская, 10, г. Москва, 123995, Россия, e-mail: dmitry@ifz.ru

Канониди Харлампий Дмитриевич – Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН, кандидат физико-математических наук, заведующий сектором магнитно-ионосферных взаимодействий, Калужское шоссе, 4, г. Троицк, Московская область, 142191, Россия, e-mail: kanonidi@izmiran.ru

Канониди Константин Харлампиевич – Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН, старший научный сотрудник, Калужское шоссе, 4, г. Троицк, Московская область, 142191, Россия, e-mail: kkkh@izmiran.ru

Leonid E. Sobisevich – Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Doctor of Technical Science, Main Researcher, Bolshaya Gruzinskaya St., 10, Moscow, 123995, Russia, e-mail: sobis@ifz.ru

Dmitry V. Likhodeev – Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Candidate of Physics and Mathematics, Researcher, Bolshaya Gruzinskaya St., 10, Moscow, 123995, Russia, e-mail: dmitry@ifz.ru

Kharlampiy D. Kanonidi – Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation, Russian Academy of Sciences, Candidate of Physics and Mathematics, Head of Sector of Magnetic-Ionospheric Interactions, Kaluzhskoe Highway, 4, Troitsk, Moscow Region, 142191, Russia, e-mail: kanonidi@izmiran.ru

Konstantin Kh. Kanonidi – Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation, Russian Academy of Sciences, Senior Researcher, Kaluzhskoe Highway, 4, Troitsk, Moscow Region, 142191, Russia, e-mail: kkkh@izmiran.ru

Рассматриваются отличительные особенности гравимагнитных возмущений, наблюдаемых в структуре геофизических полей при развитии сейсмического процесса. Проведен анализ обсерваторских наблюдений вариаций магнитного поля Земли перед крупными сейсмическими событиями. Отмечены некоторые характерные особенности, проявившиеся в процессе развития изучаемого сейсмического процесса перед главным ударом. Выявлено изменение частоты фиксируемых сигналов по мере приближения главного сейсмического удара. Приводятся примеры регистрации вариаций магнитного поля перед землетрясениями в океане и на суше. Первый относится к гравимагнитному возмущению, которое зафиксировано приборами Северокавказской геофизической обсерватории ИФЗ РАН на этапе подготовки и развития сейсмического события 19 марта 2009 г. в районе островов Тонга. Событие отличается характерными квазигармоническими формами, что свидетельствует о наличии в развивающейся очаговой зоне флюид насыщенных дилатантных структур резонансного типа. Во втором примере рассматривается серия землетрясений, которые потрясли Непал начиная с 25 апреля 2015 г. Первое землетрясение, магнитуда которого по разным оценкам составила 7,5–7,9, было сильнейшим. За ним последовал афтершок с магнитудой 6,8. Непосредственно перед этими сейсмическими ударами магнитный фон в регионе начал монотонно возрастать за четыре часа до землетрясения.

На основании многочисленных наблюдений делается вывод о появлении гравимагнитных возмущений за 2–4 ч перед сейсмическим событием.

Ключевые слова: предвестники землетрясений, гравимагнитные возмущения, дилатантные образования, УНЧ-вариации магнитного поля.

Specific features of the gravimagnetic perturbations observed in the structure of geophysical fields accompanying the development of seismic process are considered. Analysis of the observational data on variations in Earth's magnetic field prior to and along with strong seismic events has been carried out. It has been emphasized that certain features of the observed waveforms originate in the course of preparation of the studied seismic process before the main event. The frequency variation for the mentioned waveforms depending on their temporal proximity to the main seismic event has been revealed. Examples of the registered variations in magnetic field prior to significant earthquakes occurred on-shore and at the ocean bottom are presented. The first example illustrates a gravimagnetic perturbation recorded by the instruments at the Geophysical observatory in Northern Caucasus in the course of preparation and development of the March 19, 2009 earthquake in the Tonga Islands region. This seismic event features specific quasi-harmonic waveforms indicating the existence of the fluid-saturated dilatant structures of resonant type in the developing focal domain. Second example is related to a series of earthquakes that stressed Nepal starting from 25 April, 2015. The first and the strongest earthquake with magnitude estimated as of 7.5–7.9 has been followed by the aftershock with magnitude 6.8. Just before these seismic blows, the magnetic background has begun to increase in the region monotonously in four hours prior to an earthquake. Thus, on the basis of numerous instrumental observations the appearance of gravimagnetic perturbations in the time interval of 2-4 hours prior to strong seismic events is suggested.

Keywords: earthquake precursors, gravimagnetic perturbation, dilatant education, ULF magnetic field variations.

В последние годы XX и в начале XXI столетия расширилась область исследований, посвященная вопросам энергетических взаимодействий в геосферах Земли. Установлено, что воздействие на внешние геосферы возможно и со стороны внутренних оболочек Земли.

Твердая оболочка Земли (литосфера) постоянно находится в неравновесном напряженно-деформированном состоянии. Отдельные разломно-блоковые структурные элементы этого образования способны возбуждаться грозовой деятельностью, взаимодействием атмосферных потоков с подстилающей поверхностью, выбросами энергии и массы как естественного, так и искусственного происхождения при землетрясениях, взрывах, извержениях вулканов, а также во время работы различного рода мощных технических устройств.

Касаясь исторической стороны проблемы, отметим, что широкомасштабные поиски магнитных возмущений – предвестников, развернутые в 70-е гг. на территории СССР, привели российских ученых к выделению ряда характерных сигналов, которые наблюдались перед землетрясениями. Здесь следует отметить работы наших ученых, выполненные в 70-е гг. XX в. Они были связаны с исследованиями импульсного электромагнитного излучения, возникающего перед сильными сейсмическими событиями [1–3].

Однако путь исследовательских поисков предвестников крупных геофизических катастроф в сейсмически активных регионах планеты до сих пор остается сложным и неоднозначным. Характеризуя эту проблему, следует выделить масштабные полевые работы, теоретические исследования ученых Института физики Земли и других институтов АН СССР на полигонах Средней Азии и на Камчатке, которые к концу XX в. привели к обнадеживающим результатам [4]. Были получены новые знания, которые дают возможность более глубоко проанализировать ряд определяющих свойств геологической среды. В их числе трансформация геологических образований дилатансного типа в очаговых зонах, участие флюидов в процессах протекания геохимических реакций и порождаемых ими электродинамических полях [5]. С непознанными пока до конца процессами в ядре Земли, литосфере и других геосферах ряд исследователей связывают генерацию аномальных гравимагнитных возмущений, предваряющих масштабные сейсмические события на суше и в океане [6].

Наблюдаемые взаимосвязи в системе «литосфера – атмосфера – ионосфера» являют пример взаимодействия между различными геофизическими оболочками Земли. Оно проявляется при специфических условиях, когда можно говорить о квазистационарном, но неравновесном состоянии геоло-

гической среды в одной из геосфер, когда малое внешнее воздействие высвобождает ранее накопленную энергию [7]. Подобные эффекты активно изучаются, однако их пока нельзя положить в основу практической системы прогноза землетрясений с жесткими требованиями к уровню пропусков цели и ложных тревог.

Ионосферные аномалии, которые предшествуют сейсмическим событиям, связывают с генерацией электрического поля вблизи или на самой поверхности Земли на этапе подготовки сейсмического события. Можно предположить, что образующиеся перед землетрясениями и несущие положительный заряд микротрещины, определяющие структуру и процесс электростатического заряда дилатансных образований в геологической среде, передают его из фокальной области к поверхности Земли. Пока нет общепринятой точки зрения, позволяющей однозначно интерпретировать данные известных ионосферных и других возмущений, наблюдаемых в геосферах сейсмически активных регионов. Существует гипотеза, что трансформацией УНЧ-полей, генерируемых в процессах смещения и разрушения вдоль активных разломов перед землетрясением, можно объяснить вариации наблюдаемых свечений. Согласно еще одной гипотезе, крупномасштабный ток, текущий вдоль будущего разлома в зоне готовящегося сейсмического события, индуцирует в ионосфере электромагнитные возмущения низкочастотного диапазона.

В последние годы проводятся масштабные экспериментальные исследования УНЧ-магнитных полей, которые отражают процессы подготовки крупных сейсмических событий. Установлено, что перед сильными землетрясениями практически всегда удается выделить характерные УНЧ-магнитные возмущения, интенсивность и квазипериодические волновые формы которых трансформируются по мере приближения главного удара [8–10]. Первые значимые результаты здесь были получены при анализе данных наблюдений аномальных гравитомагнитных возмущений, зафиксированных в период подготовки и развития катастрофического Суматра-Андаманского цунамигенного землетрясения [11].

Ниже мы остановимся на некоторых отличительных особенностях гравитомагнитных возмущений, наблюдаемых в структуре геофизических полей при развитии сейсмического процесса. В этой связи обратимся к одному из цунамигенных землетрясений, которое произошло в районе Тонга – сейсмоактивной области Тихого океана.

Район Тонга входит в островодужную систему Тонга – Кермадек, протягивающуюся в субмеридиональном направлении более чем на 3 тыс. км от островов Самоа до Новой Зеландии. Здесь происходит около половины глубокофокусных землетря-

сений. По данным наблюдений, сейсмофокальная зона в регионе прослеживается до 600–700 км. Именно поэтому эпицентры глубокофокусных землетрясений, связанных с этой зоной, расположены достаточно далеко к западу от островной дуги.

Гравимагнитное возмущение, зафиксированное приборами Северокавказской геофизической обсерватории ИФЗ РАН на этапе подготовки и развития

сейсмического события 19.03.2009 г. в районе островов Тонга (рис. 1), отличается характерными квазигармоническими формами, что свидетельствует о наличии в развивающейся очаговой зоне флюидонасыщенных дилатансных структур резонансного типа [10]. Во время афтершоков здесь также отмечались гравитомангнитные возмущения (рис. 1, вставки 3 и 5).

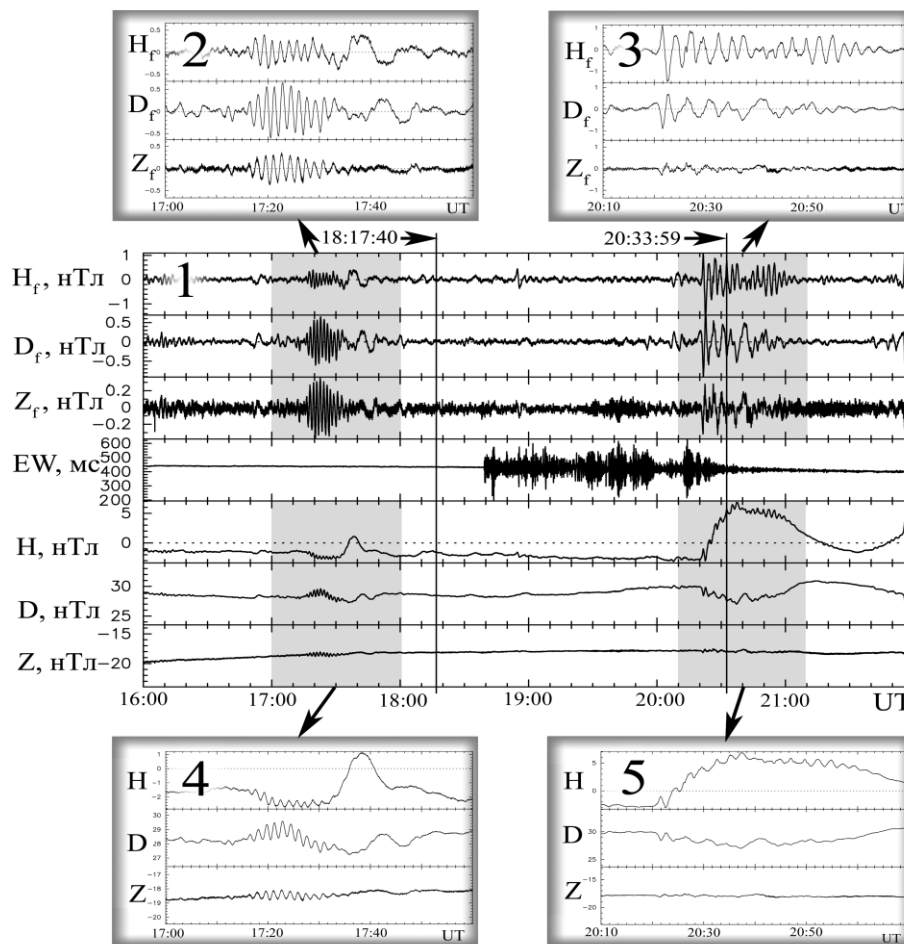


Рис. 1. УНЧ-возмущения на этапе подготовки и развития цунамигенного землетрясения в районе островов Тонга 19.03.2009 г. (время в очаге: 18:17:38.8, магнитуда 7,6, глубина 33 км, широта – 23.2, долгота – 174.6), зарегистрированные магнитными вариометрами (H, D, Z) и наклономерами (E-W) Северокавказской геофизической обсерватории за один час до главного удара.

На врезках показана тонкая структура зарегистрированных волновых форм магнитных вариаций до (врезки 2 и 3) и после (врезки 4 и 5) фильтрации в диапазоне периодов 20–300 с. Вставка 1 – регистрограммы магнитовариационной станции (H, D, Z) и показания наклономеров запад – восток (EW); 2, 4 – волновые формы аномального ультранизкочастотного магнитного возмущения, проявившиеся за час до землетрясения; 3 и 5 – характерные волновые формы аномальных УНЧ-квазигармонических магнитных возмущений, которые наблюдались на этапах подготовки и развития землетрясения. H, D, Z – вариации магнитного поля Земли; EW – показания наклонометра (восток – запад); H_f, D_f, Z_f – вариации магнитного поля Земли, профильтрованные в диапазоне периодов 20–300 с. Стрелкой и вертикальной линией здесь отмечено время в очаге для первого события и последовавшего афтершока / Fig. 1. ULF perturbations during the preparation and development of tsunamigenic earthquake near Tonga Islands 19.03.2009 (time in the outbreak: 18: 17: 38.8, magnitude 7.6, depth of 33 km, the latitude - 23.2, longitude - 174.6) registered by magnetic variometers (H, D, Z) and tiltmeter (EW) of the North Caucasus Geophysical Observatory, one hour before the main attack. The insets show the fine structure of the registered waveforms magnetic variations before (inset 2 and 3) and after (inset 4 and 5) filtering in the period range from 20–300 s. Inset 1 - program registers of magnetic variation station (H, D, Z) and tiltmeters indications, west-east (EW). Insets 2, 4 - waveforms of very low frequency anomalous magnetic disturbance, manifested in an hour before the earthquake. Insets 3 and 5 - characteristic waveforms of anomalous ULF quasi-harmonic magnetic disturbances were observed at the stages of preparation and development of the earthquake. H, D, Z - the variation of the magnetic field of the Earth; EW - tiltmeter indications (east-west); H_f, D_f, Z_f - variation of the magnetic field of the Earth, the filtered in the period range from 20–300 s. The arrow and the vertical line is the time noted in the focus for the first event and subsequent aftershocks

Отметим, что изменение частоты фиксируемых сигналов по мере приближения главного сейсмического удара – характерная особенность гравитоманнитных возмущений, наблюдаемых в геосферах.

Сопоставляя полученные экспериментальные результаты, отражающие структуру гравитоманнитных возмущений с данными о геологическом строении дна океана в регионе, можно заключить, что здесь мы встречаемся с мощными деформационными процессами, активизация которых неразрывно связана с флюидодинамическими особенностями структур дилатансного типа.

Теперь обратимся к землетрясениям, которые произошли на суше. Они потрясли Непал, начиная с 25.04.2015 г. Первое землетрясение, магнитодиаграмма которого приведена на рис. 2, оказалось сильнейшим. Магнитуда этого катастрофического события по разным оценкам составила величину 7,5–7,9. Удар стихии был зафиксирован в 11:24 по местному времени (07:05:17 по мировому), широта 27.82, долгота 86.21, глубина 15 км. За ним последовал афтершок магнитудой 6,8. Эпицентр землетрясения располагался в 82 км к северо-западу от столицы Катманду.

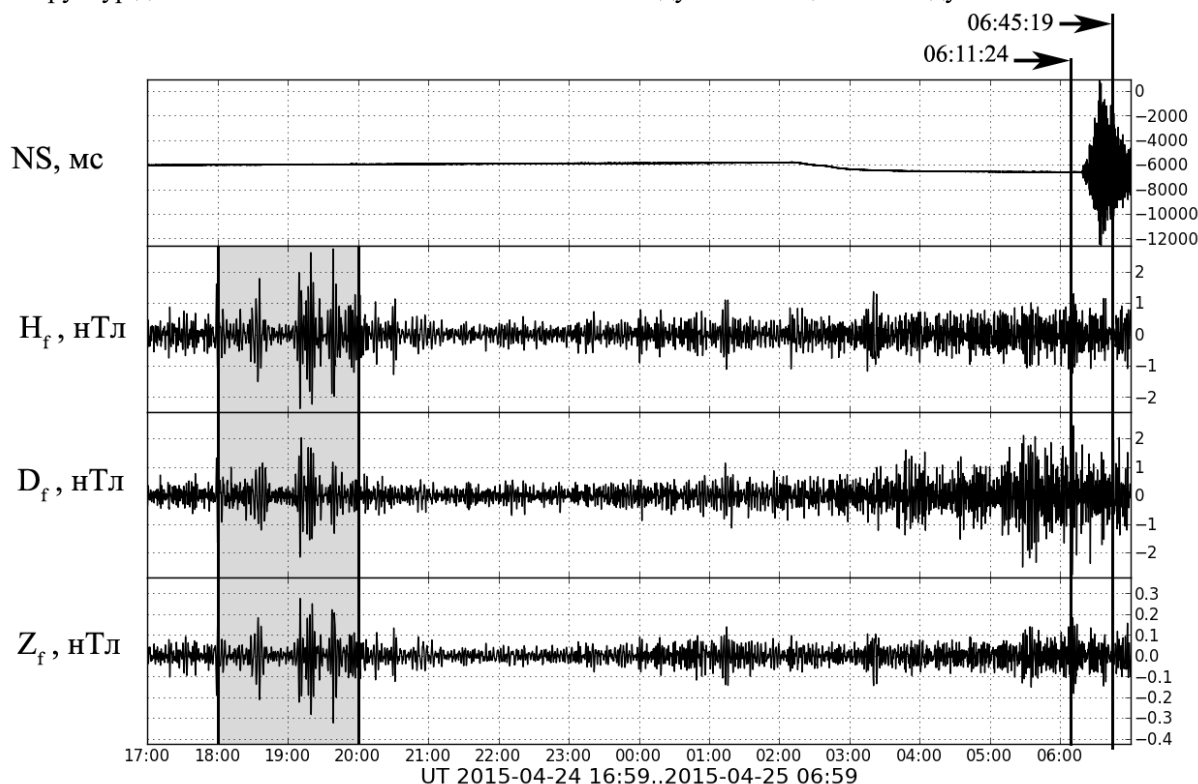


Рис. 2. УНЧ-магнитные возмущения, наблюдаемые на этапе подготовки и развития землетрясения в Непале 25.04.2015 г. Сигналы зарегистрированы магнитными вариометрами (каналы Н и Z) в авральной зоне (Архангельская область, с. Карпогоры). Данные профильтрованы в диапазоне периодов 20–300 с. Стрелками и вертикальной линией отмечено время в очаге для первого события и последовавшего афтершока / Fig. 2. ULF magnetic disturbances observed during the preparation and development of the earthquake in Nepal 25.04.2015. The magnetic signals recorded magnetic variometers (H and Z channels) in the auroral zone (Arkhangelsk Region, village Karpogory). Data filtered in the period range from 20-300 s. The arrows and the vertical line indicates the time in the focus for the first event and subsequent aftershocks

Отметим, что сейсмическая катастрофа произошла здесь через 81 год после приблизительно равного по мощности стихийного бедствия, которое случилось в 1934 г. Анализируя результаты натуральных наблюдений, следует обратить внимание на некоторые характерные особенности, проявившиеся в процессе развития изучаемого сейсмического процесса перед главным ударом. Так, если обратиться к данным, приведенным на рис. 2, то можно заметить, что гравитоманнитное возмущение длительностью около двух часов, величина

которого составила 3,8 нТ, проявилось за 10 ч перед главным ударом. Развернутая структура характерных возмущений-предвестников в вариациях магнитного поля Земли представлена на рис. 3.

Наблюдения сейсмических событий в других регионах Земли указывают, что чаще всего гравитоманнитные возмущения появляются за 2–4 ч. Однако здесь, непосредственно перед сейсмическим ударом, магнитный фон в регионе начал монотонно возрастать за четыре часа до землетрясения.

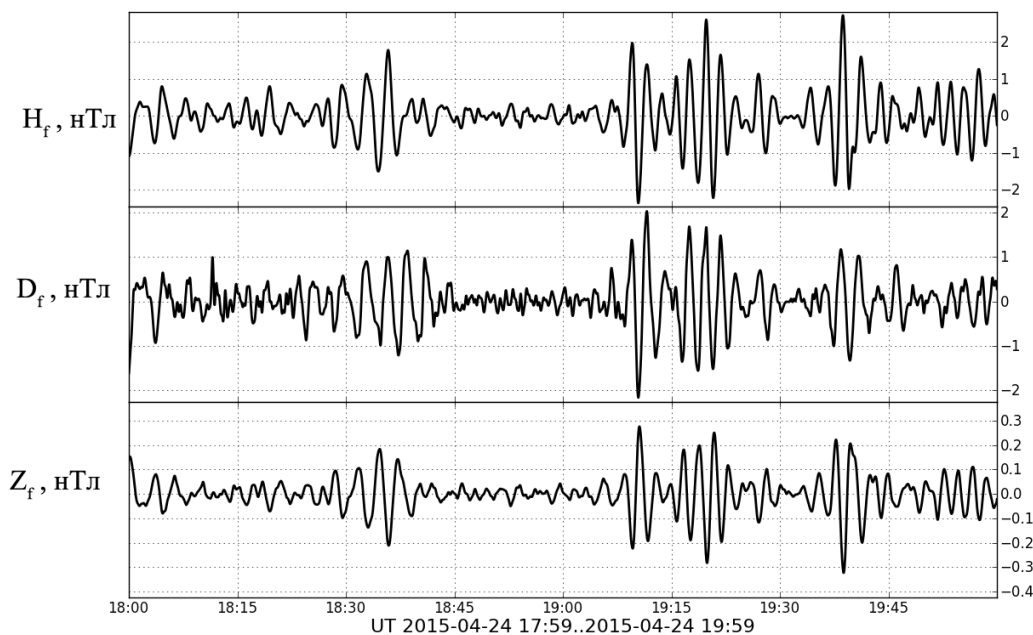


Рис. 3. Развернутая структура характерных возмущений-предвестников в вариациях магнитного поля Земли (H и Z – компоненты) по данным научного стационара «Карпогоры» в период подготовки и развития землетрясения в Непале 25.04.2015 г. Данные магнитных вариометров профильтрованы в диапазоне периодов 20–300 с / Fig. 3. The detailed structure of the specific perturbation - precursors in variations of the Earth magnetic field (H and Z-components) according to the research center Karpogory during the preparation and development of the earthquake in Nepal 25.04.2015. The magnetic variometers data filtered in the period range of 20-300 s

Изучение большого числа экспериментальных данных по мелко- и глубокофокусным землетрясениям позволило получить уникальную геофизическую информацию, которая показывает, что тонкая структура наблюдаемых аномальных гравитомагнитных возмущений определяется в первую очередь геологическими особенностями среды в очаговой зоне и отражает характерные свойства наблюдаемых геолого-геофизических процессов развивающегося сейсмического события [5, 6]. Она отражает непрекращающиеся перестройки геологической среды (спонтанные трансформации локальных геофизических структур резонансного типа) в районе готовящейся сейсмической катастрофы.

Литература

1. Воробьев А.А. О возможности электрических разрядов в недрах Земли // Геология и геофизика. 1970. № 12. С. 3–13.
2. Воробьев А.А., Дмитриевский В.С., Заводская Е.К., Приезжей Б.Н., Сальников В.Н. Наблюдение излучения горных пород // Вопросы геологии Сибири. Томск, 1971. С. 17–21.
3. Воробьев А.А. Высокие электрические поля в земных недрах и возможная роль в геологических, геохимических процессах в горном деле // Изв. Томского политехн. ин-та. 1976. Вып. 288. С. 15–18.
4. Сидорин А.Я. Предвестники землетрясений. М., 1992. 190 с.
5. Николаевский В.Н. Очаг землетрясения – события и предвестники удара // Экстремальные природные процессы и катастрофы. М., 2011. Т. 2. С. 316–322.
6. Николаевский В.Н., Собисевич Л.Е. Природа бифокального очага землетрясения и предвестники удара // Геофиз. журн. 2015. Т. 37, № 4. С. 51–74.
7. Popov L.N., Krakovezkiy Yu.K., Gokhberg M.B., Pilipenko V.A. Terrogenic effects in the ionosphere: a review // Phys. Earth and Planet. Int. 1989. Vol. 57. P. 115–128.
8. Собисевич А.Л. Избранные задачи математической геофизики, вулканологии и геоэкологии. М., 2012. Т. 1. 512 с.
9. Собисевич А.Л. Избранные задачи математической геофизики, вулканологии и геоэкологии. М., 2013. Т. 2. 286 с.
10. Собисевич Л.Е., Канониди К.Х., Собисевич А.Л. Аномальные геомагнитные возмущения в вариациях магнитного поля Земли на этапах подготовки и развития глубокофокусных землетрясений // Докл. АН. Геофизика. 2013. Т. 453, № 3. С. 329–333.
11. Собисевич Л.Е., Канониди К.Х., Собисевич А.Л. Наблюдения УНЧ-геомагнитных возмущений, отражающих процессы подготовки и развития цунамигенных землетрясений // Докл. АН. Геофизика. 2010. Т. 435, № 4. С. 548–553.

References

1. Vorob'ev A.A. O vozmozhnosti elektricheskikh razryadov v nedrakh Zemli [On the possibility of electric discharges in the bowels of the Earth]. *Geologiya i geofizika*. 1970, No. 12, pp. 3-13.
2. Vorob'ev A.A., Dmitrievskii V.S., Zavodskaya E.K., Priezzhei B.N., Sal'nikov V.N. [Observation of radiation from rocks]. *Voprosy geologii Sibiri* [Questions of geology of Siberia]. Tomsk, 1971, pp. 17-21.
3. Vorob'ev A.A. Vysokie elektricheskie polya v zemnykh nedrakh i vozmozhnaya rol' v geologicheskikh, geokhimicheskikh protsessakh v gornom dele [High electric fields in the earth's interior and possible role in geological, geochemical processes in mining]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo instituta*. 1976, iss. 288, pp. 15-18.
4. Sidorin A.Ya. *Predvestniki zemletryaseni* [Precursors of earthquakes]. Moscow, 1992, 190 p.
5. Nikolaevskii V.N. [The earthquake focus - events and harbingers of impact]. *Ekstremal'nye prirodnye protsessy i katastrofy* [Extreme natural processes and catastrophes]. Moscow, 2011, vol. 2, pp. 316-322.
6. Nikolaevskii V.N., Sobisevich L.E. Priroda bifokal'nogo ochaga zemletryaseniya i predvestniki udara [The nature of the bifocal focus of the earthquake and the precursors of the impact]. *Geofizicheskii zhurnal*. 2015, vol. 37, No. 4, pp. 51-74.
7. Popov L.N., Krakovezkiy Yu.K., Gokhberg M.B., Pilipenko V.A. Terrogenic effects in the ionosphere: a review. *Phys. Earth and Planet. Int.* 1989, vol. 57, pp. 115-128.
8. Sobisevich A.L. *Izbrannye zadachi matematicheskoi geofiziki, vulkanologii i geoekologii* [Selected problems of mathematical geophysics, volcanology and geoecology]. Moscow, 2012, vol. 1, 512 p.
9. Sobisevich A.L. *Izbrannye zadachi matematicheskoi geofiziki, vulkanologii i geoekologii* [Selected problems of mathematical geophysics, volcanology and geoecology]. Moscow, 2013, vol. 2, 286 p.
10. Sobisevich L.E., Kanonidi K.Kh., Sobisevich A.L. Anomal'nye geomagnitnye vozmushcheniya v variatsiyakh magnitnogo polya Zemli na etapakh podgotovki i razvitiya glubokofokusnykh zemletryaseni [Anomalous geomagnetic disturbances in variations of the earth's magnetic field at the stages of preparation and development of deep-focus earthquakes]. *Doklady AN. Geofizika*. 2013, vol. 453, No. 3, pp. 329-333.
11. Sobisevich L.E., Kanonidi K.Kh., Sobisevich A.L. Nablyudeniya UNCh-geomagnitnykh vozmushchenii, otrazhayushchikh protsessy podgotovki i razvitiya tsunamigennykh zemletryaseni [Observations of ULF geomagnetic disturbances reflecting the processes of preparation and development of tsunamigenic earthquakes]. *Doklady AN. Geofizika*. 2010, vol. 435, No. 4, pp. 548-553.

УДК 551.583

DOI 10.18522/0321-3005-2017-1-124-129

ДИНАМИКА ИЗМЕНЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА И ОСАДКОВ В ЧУЙСКОЙ КОТЛОВИНЕ*

© 2017 г. М.Г. Сухова, О.В. Журавлева

DYNAMICS OF AIR TEMPERATURE AND PRECIPITATION IN THE CHUI VALLEY

M.G. Sukhova, O.V. Zhuravleva

Сухова Мария Геннадьевна – Горно-Алтайский государственный университет, доктор географических наук, доцент, проректор по научной и инновационной деятельности, ул. Ленкина, 1, г. Горно-Алтайск, Республика Алтай, 649000; Горно-Алтайский филиал Института водных и экологических проблем Сибирского отделения РАН, старший научный сотрудник, пер. Мирный, 8, с. Кызыл-Озек, Майминский район, 649105, Россия, e-mail: suhovamg@rambler.ru

Maria G. Sukhova – Gorno-Altai State University, Doctor of Geography, Associate Professor, Vice-Rector for Scientific and Innovative Activity, Lenkina St., 1, Gorno-Altai, Altai Republic, 649000, Russia; Gorno-Altai Branch, Institute for Water and Environmental Problems, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Mirnyi Laner, 8, Kyzyl-Ozek, Maima District, Altai Republic, 649105, Russia, e-mail: suhovamg@rambler.ru

Журавлева Ольга Валерьевна – Горно-Алтайский государственный университет, кандидат географических наук, доцент, кафедра геоэкологии и природопользования, ул. Ленкина, 1, г. Горно-Алтайск, Республика Алтай, 649000, Россия, e-mail: zhuravleva-ov@rambler.ru

Olga V. Zhuravleva – Gorno-Altai State University, Candidate of Geography, Associate Professor, Department of Geoecology and Environmental Management, Lenkina St., 1, Gorno-Altai, Altai Republic, 649000, Russia, e-mail: zhuravleva-ov@rambler.ru

Проведено изучение региональных проявлений изменений климата в горных территориях, что способствует детализации планетарной картины. Динамика климатических изменений изучалась на основе использования многолетней метеорологической информации (60-летний период). В качестве объекта рассматривалась высокогорная Чуйская котловина. Установлена устойчивая тенденция к потеплению, при незначительном похолодании последнего десятилетия, а также отсутствие значимых изменений в режиме осадков. Выявлено, что мировое сообщество всерьез обеспокоено ростом числа стихийных бедствий, огромными ущербами от наводнений засух и пожаров, которые являются следствием происходящих изменений в окружающей среде. Указывается, что данный факт свидетельствует о четкой тенденции усиления аридизации территории, поскольку наблюдаемый прирост температур воздуха не сопровождается соответствующим увеличением атмосферных осадков. Делается вывод, что действенным средством предупреждения последствий изменения климата будут создание и укрепление систем прогнозирования бедствий и климатического обслуживания.

Ключевые слова: изменение климата, Чуйская котловина, аридизация территории.

The study of the regional manifestations of climate change in mountain areas is of special significance, because it can refine the planetary picture. The dynamics of climate change has been studied through the use of long-term meteorological data (60 years). Chui basin considered as an object. Established a steady warming trend, with a slight cold snap of the last decade, as well as the absence of significant changes in precipitation. The world community is seriously concerned about the increasing number of natural disasters, enormous damage from flooding droughts and fires, which are a consequence of the changes in the environment. This fact shows a clear trend of increased aridity of the territory, since the air temperature observed increase is not accompanied by a corresponding increase in precipitation. We conclude that the effective mean of prevention to the impacts of climate change is establishing and strengthening prediction of disaster and climate services systems.

Keywords: climate change, Chui Basin, aridity of the territory.

* Работа выполнена в рамках госзадания Минобрнауки РФ № 440, а также гранта РФФИ 16-45-040266 p_a.

Актуальность исследований современных изменений климата, к сожалению, не вызывает никаких сомнений. Мировое сообщество всерьез обеспокоено ростом числа стихийных бедствий, огромными ущербами от наводнений, засух и пожаров, которые являются следствием перемен в окружающей среде [1–5]. В заявлении Всемирной метеорологической организации (ВМО) (2015 г.) говорится, что «одним из самых действенных средств для адаптации к последствиям изменения климата является укрепление систем заблаговременных предупреждений о бедствиях и климатического обслуживания» [1, с. 3]. В связи с этим изучение региональных проявлений трансформаций метеопказателей в горных территориях приобретает особый смысл, так как способно детализировать общую картину.

Объект и методы

В таких регионах, как Республика Алтай, межгорные котловины – это наиболее заселенные и освоенные в хозяйственном отношении территории. Чуйская котловина, или Чуйская степь, – одна из них, находится в Юго-Восточной Алтайской провинции. Ее днище расположено на высоте 1750–1850 м над уровнем моря и со всех сторон ограничено горными хребтами: Курайским на севере, Северо-Чуйским и Южно-Чуйским на западе, хребтом Сайлюгем на юге и хребтом Чихачёва на востоке.

Рельеф очень специфичен – здесь практически отсутствуют наклоненные участки равнин. Из-за малого количества осадков особо представлена плоскостная эрозия. Имеющиеся конусы выноса и делювиальные шлейфы очень незначительны и неспособны сформировать наклонную равнину. Днище котловины в основном сложено озерными, аллювиальными и пролювиальными отложениями [6].

Резкая континентальность климата определяется географическим расположением в центре материка и орографической изолированностью. Климатические особенности значительно отличаются от климата долин и водоразделов. «В зимние месяцы выхолаживание воздуха на днищах котловин обусловлено господством антициклональных условий, стоком воздуха со склонов и его застою. Зимы суровые и малоснежные. В теплый период с восстановлением западного переноса воздушных масс при переваливании наветренных склонов хребтов возникает барьерный эффект, и на подветренных склонах облачность размывается, поэтому осадков выпадает мало. На подветренной стороне образуется барьер-

ная тень. При опускании воздух адиабатически нагревается, облака размываются и возрастает число часов солнечного сияния» [7, с. 315].

Динамика климатических изменений изучалась на основе использования многолетней метеорологической информации (60-летний период). Для корректного анализа временного распределения основных показателей на территории Чуйской котловины были использованы ежедневные данные наблюдений оперативно-наблюдательных подразделений Горно-Алтайского ЦГМС – филиала ФГБУ «Западно-Сибирский УГМС» по метеостанции Кош-Агач, данные, размещенные на официальном сайте ВНИИГМИ МЦД (URL: http://www.meteo.ru.climate.sp_clim.php), для продления рядов использовались данные по количеству осадков по срокам наблюдений с сайта оперативных метеорологических данных (URL: <http://rp5.ru>).

Результаты исследования и их обсуждение

В результате проведенного анализа продолжительности солнечного сияния за теплый период (май – сентябрь) (рис. 1) установлена статистически незначимая положительная динамика – в среднем увеличение составляет 10 ч за весь анализируемый период с 1961 по 2012 г. Однако, начиная с 1997 г., отклонения от нормы имеют меньший диапазон, но большую изрезанность графика, что объясняется изменением циркуляционных процессов, приводящих к увеличению облачности.

Проведенные расчеты годовой температуры воздуха в календарных рамках позволили установить значительный положительный линейный тренд. Величина повышения среднегодовой температуры воздуха за 60 лет (1955–2015 гг.) на основе линейных трендов составила 3 °С (рис. 2), при средней многолетней температуре этого периода –4,7 °С, что на 2 °С выше климатической нормы по справочным данным, однако на 0,9 °С ниже аналогичного показателя за последние 30 лет. Это объясняется наибольшими темпами потепления, начиная с 1997 г.

Однако отклонения температуры от нормы в средних годовых показателях не отражают полную динамику термического режима в течение годового цикла.

По сезонам года местные циркуляционные условия могут изменяться довольно значительно: от преобладания антициклональной, малооблачной и сухой погоды зимой до неустойчивой циклональной погоды с чередованием волн тепла и холода, осадками весной и осенью.

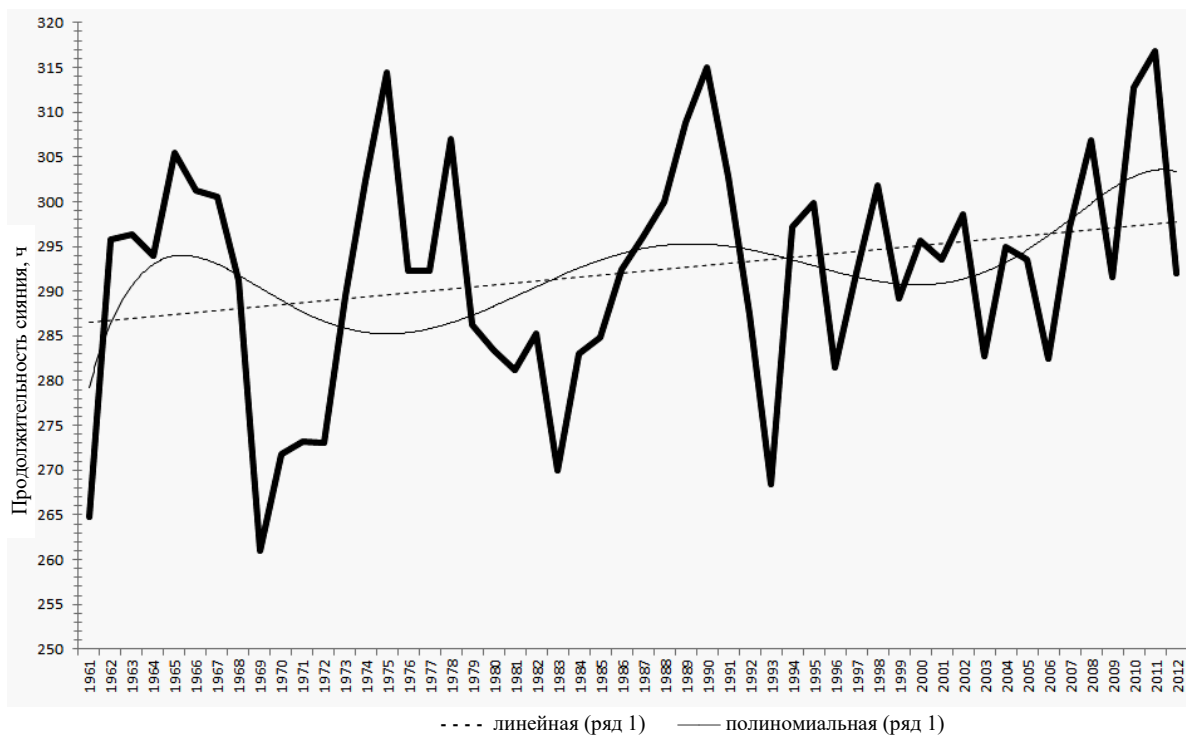


Рис. 1. Продолжительность солнечного сияния (в часах) за теплый период (май – сентябрь), МС Кош-Агач /
 Fig. 1. The duration of sunshine (hour) during the warm period (May - September), MS Kosh-Agach

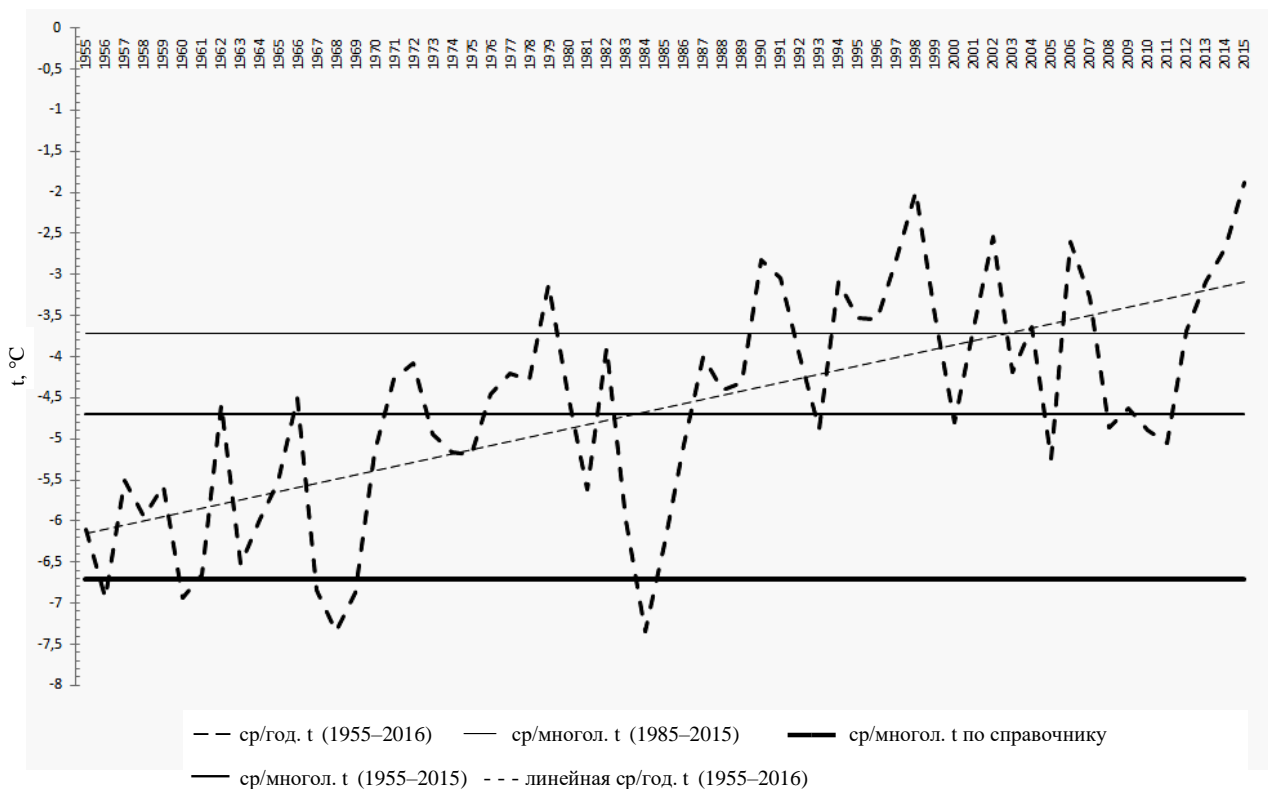


Рис. 2. Динамика среднегодовой температуры воздуха, МС Кош-Агач /
 Fig. 2. Dynamics of average annual air temperature, MS Kosh-Agach

В условиях горной территории погодные (и климатические) характеристики еще более дифференцируются под влиянием рельефа, что находит отражение и в особенностях термического режима [8]. Таким образом, наиболее объективная картина отклонения температуры воздуха от нормы раскрывается при сезонном анализе (рис. 3).

Анализ динамики среднесезонных изменений температуры воздуха показал их неоднородность в течение года (рис. 3). Так, наибольшая положительная тенденция наблюдается в зимний период и составляет

3,2 °С. И хотя за последние 60 лет средняя температура зимы повысилась, изменение ее далеко не однородно. Так, в 60-е гг. в Чуйской котловине средняя температура зимы составляла –23,1 °С, в 90-е гг. – 18,5 °С. Однако в последние годы (2006–2015) наблюдалось значительное понижение, при средней температуре зимнего периода –20,3 °С. Мы вправе констатировать и значительные флуктуации значений, так, например, в 2008 г. средняя температура зимы составляла –17,3 °С, в 2015 г. –15,7 °С, в 2006 и 2009 гг. около –23 °С, а в 2011 г. –24,4 °С.

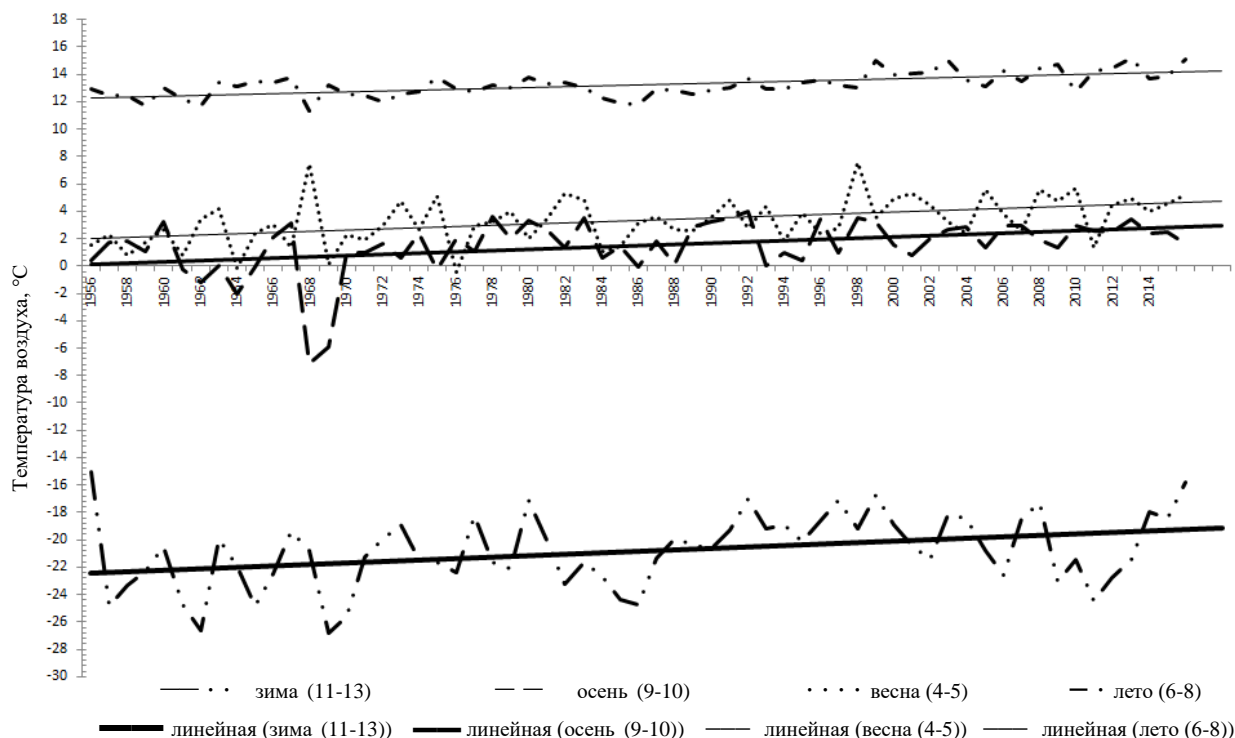


Рис. 3. Динамика среднесезонной температуры воздуха, МС Кош-Агач /
 Fig 3. The dynamics of mean air temperature, MS Kosh-Agach

Для весеннего сезона характерна очень большая изменчивость температур: на графике линии имеют глубоко изрезанный вид. Относительно теплые весны сменяются более холодными. В целом за 60-летний период весной отклонение температуры воздуха от нормы в сторону повышения температуры составило 2,2 °С.

В отличие от других сезонов, межгодовое распределение среднесезонных температур лета имеет более плавный ход, что свидетельствует об относительной устойчивости летних погод [9, 10]. Вертикальная поясность температуры воздуха летом выражена наиболее четко. Превышение температуры относительно нормы летом составляет около 1 °С.

За последние 60 лет наиболее холодным было лето 1968 г., когда среднелетняя температура составила 11,3 °С, что ниже нормы на 1,2 °С.

Динамика изменения среднеосенних температур по большей части синхронна весенним, в противофазе находится 1968 г., когда средняя температура осени составила –7,1 °С, в 2001 г. – 0,8 °С при норме 0,7 °С. Отклонения температуры в сторону понижения не столь глубокие и продолжительные, как зимой.

Анализ изменения годового количества осадков за период с 1956 по 2015 г. не выявил статистически значимых отклонений (рис. 4).

При рассмотрении сезонной специфики на основе линейных трендов выявились некоторые отличия (рис. 5), так, величина повышения летних сумм осадков составила 12 мм, величина понижения зимних сумм – 10 мм. Однако оба эти значения не являются статистически значимыми.

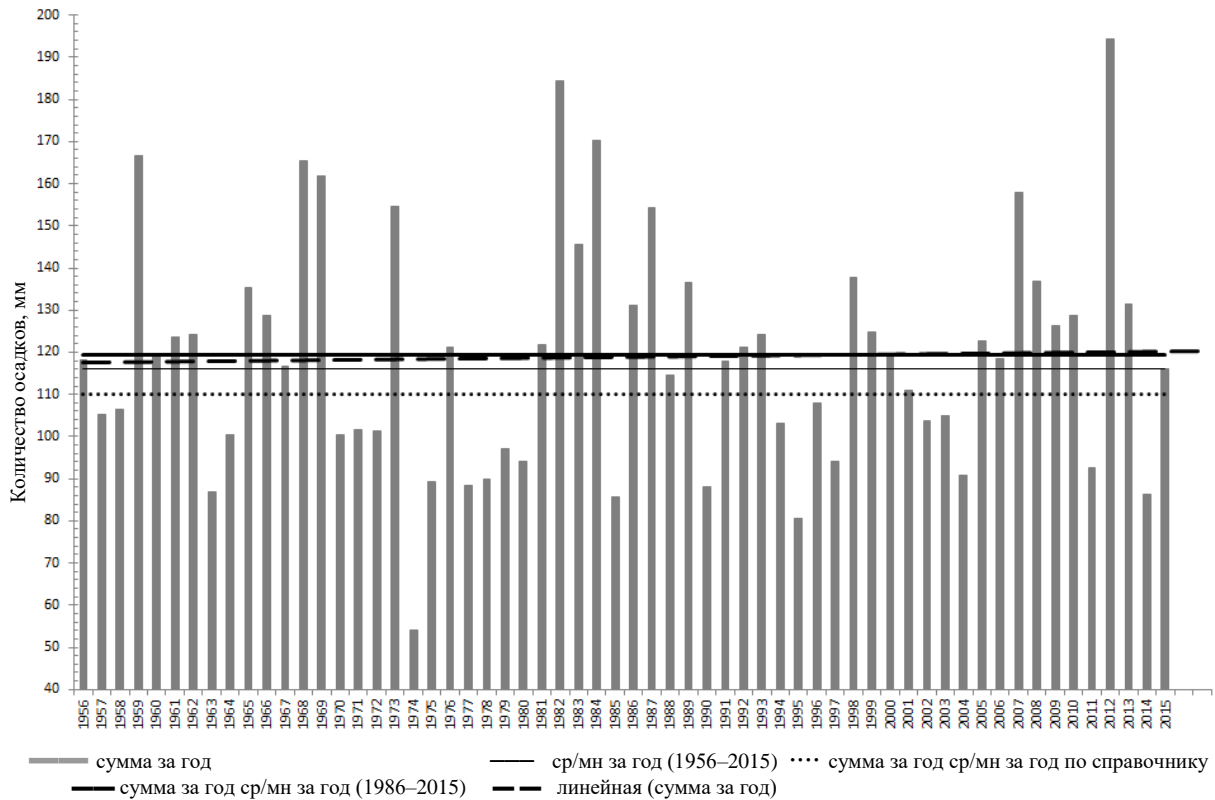


Рис. 4. Динамика годового количества атмосферных осадков, МС Кош-Агач /
 Fig. 4. The dynamics of annual precipitation, MS Kosh-Agach

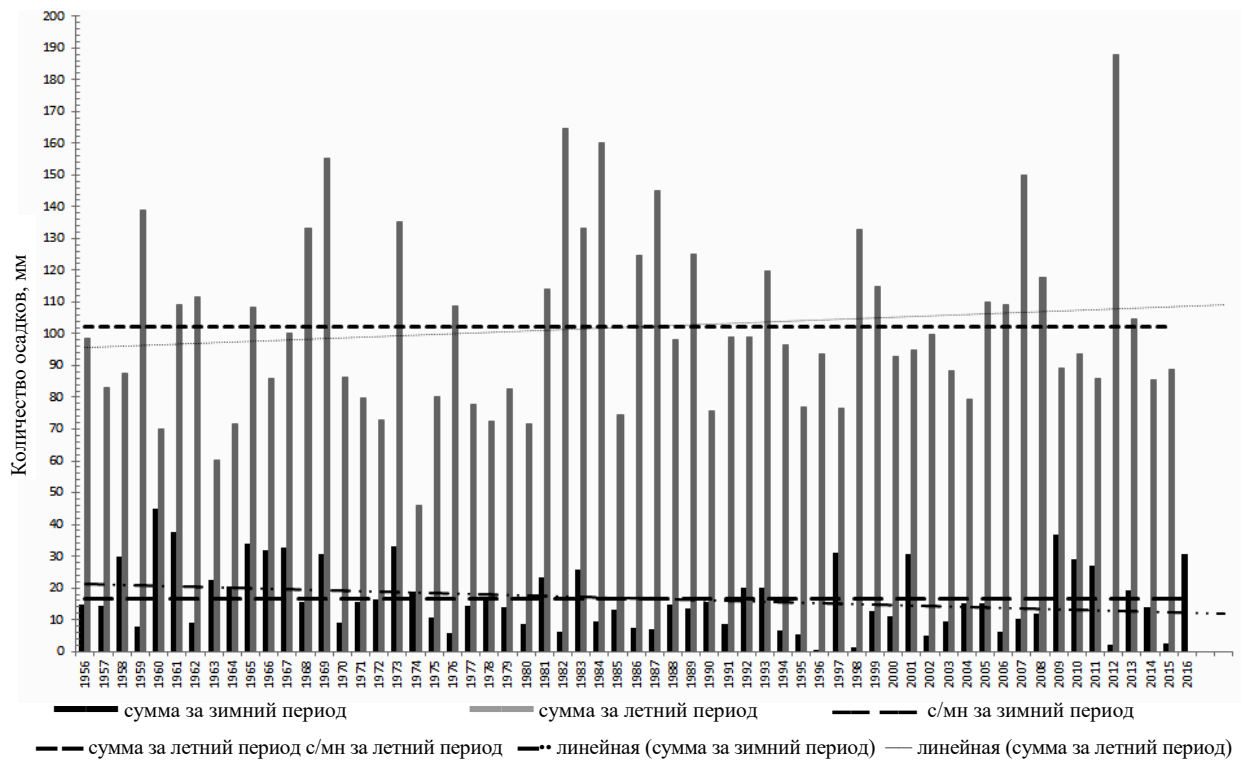


Рис. 5. Динамика атмосферных осадков теплого и холодного периодов, МС Кош-Агач /
 Fig. 5. Dynamics of precipitation of warm and cold periods, MS Kosh-Agach

Выводы

Таким образом, проанализировав динамику изменения температуры воздуха и осадков на территории Чуйской котловины, мы установили устойчивую тенденцию к потеплению при незначительном похолодании последнего десятилетия, а также отсутствие значимых изменений в режиме осадков. Данный факт свидетельствует о четкой тенденции усиления аридизации территории, поскольку наблюдаемый прирост температур воздуха не сопровождается соответствующим увеличением атмосферных осадков.

Литература

1. Заявление ВМО о состоянии глобального климата в 2015 году. URL: http://library.wmo.int/pmb_ged/wmo_1167_ru.pdf (дата обращения : 18.12.2016).
2. Изменение климата // Ежемесячный информационный бюллетень. М., 2016. URL: <http://www.global-climate-change.ru/index.php/ru/bul-izmenenie-klimata/archive-of-bullet> (дата обращения : 18.12.2016).
3. Изменение климата и его воздействие на экосистемы, население и хозяйство российской части Алтае-Саянского экорегиона: оценочный доклад / под ред. А.О. Кокорина. М., 2011. 168 с.
4. Ротанова И.Н., Харламова Н.Ф., Останин О.В. Изменения климата Алтая за период инструментальных исследований // Изв. АлтГУ. 2012. № 3. С. 105–109.
5. Сыромятина М.В., Москаленко И.Г., Чистяков К.В. Тенденции изменения климата на Алтае на фоне глобальных климатических изменений (по инструментальным и дендрохронологическим данным) // Вестн. СПбГУ. Серия 7 : Геология. География. 2010. № 3. С. 82–91.
6. Михайлов Н.И. Горы Южной Сибири: очерк природы. М., 1961. 238 с.
7. Сухова М.Г., Гармс Е.О. Климатические условия формирования межгорно-котловинных и горнодолинных ландшафтов Алтая // Мир науки, культуры, образования. 2012. № 1. С. 315–318.
8. Вернадский В.И. Живое вещество. М., 1938. 399 с.
9. Кондратьев К.Я. Глобальные изменения климата: данные наблюдений и результаты численного моделирования // Исследование Земли из космоса. 2004. № 2. С. 61–96.
10. Кондратьев К.Я. Глобальный климат. СПб., 1992. 358 с.

References

1. *Zayavlenie VMO o sostoyanii global'nogo klimata v 2015 godu* [Statement by WMO on the state of the global climate in 2015]. Available at: http://library.wmo.int/pmb_ged/wmo_1167_ru.pdf (accessed 18.12.2016).
2. [Climate change]. *Ezhemesyachnyi informatsionnyi byulleten'* [Monthly newsletter]. Moscow, 2016. Available at: <http://www.global-climatechange.ru/index.php/ru/bul-izmenenie-klimata/archive-of-bullet> (accessed 18.12.2016).
3. *Izmenenie klimata i ego vozdeistvie na ekosistemy, naselenie i khozyaistvo rossiiskoi chasti Altae-Sayanskogo ekoregiona* [Climate change and its impact on ecosystems, population and economy of the Russian part of the Altai-Sayan Ecoregion]. Evaluation report. Ed. A.O. Kokorin. Moscow, 2011, 168 p.
4. Rotanova I.N., Kharlamova N.F., Ostanin O.V. *Izmeneniya klimata Altaya za period instrumental'nykh issledovaniy* [Altai climate changes during the period of instrumental research]. *Izvestiya AltGU*. 2012, No. 3, pp. 105–109.
5. Syromyatina M.V., Moskalenko I.G., Chistyakov K.V. *Tendentsii izmeneniya klimata na Altae na fone global'nykh klimaticheskikh izmenenii (po instrumental'nym i dendrokronologicheskim dannym)* [Trends in climate change in the Altai against the backdrop of global climate change (on instrumental and dendrochronological data)]. *Vestnik SPbGU. Seriya 7 : Geologiya. Geografiya*. 2010, No. 3, pp. 82–91.
6. Mikhailov N.I. *Gory Yuzhnoi Sibiri: ocherk prirody* [Mountains of South Siberia: an essay of nature]. Moscow, 1961, 238 p.
7. Sukhova M.G., Garms E.O. *Klimaticheskie usloviya formirovaniya mezhgorno-kotlovinnnykh i gornodolinnnykh landshaftov Altaya* [Climatic conditions for the formation of intermontane basins and mountain-valley landscapes of Altai]. *Mir nauki, kul'tury, obrazovaniya*. 2012, No. 1, pp. 315–318.
8. Vernadskii V.I. *Zhivoe veshchestvo* [A living substance]. Moscow, 1938, 399 p.
9. Kondrat'ev K.Ya. *Global'nye izmeneniya klimata: dannye nablyudenii i rezul'taty chislennogo modelirovaniya* [Global climate changes: observational data and numerical simulation results]. *Issledovanie Zemli iz kosmosa*. 2004, No. 2, pp. 61–96.
10. Kondrat'ev K.Ya. *Global'nyi klimat* [The global climate]. Saint Petersburg, 1992, 358 p.

НАШИ ЮБИЛЯРЫ

OUR PERSONS

DOI 10.18522/0321-3005-2017-1-130-131

Владимир Евгеньевич Закруткин – исследователь, наставник, уникальный специалист в области экологии и защиты окружающей среды (к 70-летию со дня рождения)

Vladimir Evgenievich Zakrutkin - Researcher, Mentor, Unique Specialist in the Field of Ecology and Environmental Protection (To the 70th Anniversary)



Владимир Евгеньевич Закруткин, доктор геолого-минералогических наук, профессор, родился 1 февраля 1947 г. в г. Таллине, в 1970 г. окончил Ростовский госуниверситет, в 1974 г. в Геологическом институте РАН защитил кандидатскую диссертацию, а в 1982-м там же – докторскую. С 1974 г. и по настоящее время работает в Ростовском госуниверситете (ныне Южный федеральный университет) в должности заведующего кафедрой геоэкологии и прикладной геохимии, на протяжении многих лет возглавляет научную геоэкологическую школу на Юге России.

В круг научных интересов Владимира Евгеньевича входят общая эволюция биосферы и причины биотических кризисов геологического прошлого, интегральная оценка состояния и районирование территорий по степени экологической напряженности, прогнозирование чрезвычайных ситуаций,

связанных с опасными природными явлениями, техногенными авариями и катастрофами, геохимические закономерности антропогенных преобразований геосистем и нормирование техногенного воздействия на природную среду. Им доказана биогенная природа углеродистого органического вещества древнейших (3,8–4,0 млрд лет) осадочных пород, дана количественная оценка масштабов накопления биогенного углерода в докембрии и фанерозое, выявлена тенденция изменения в истории биосферы факторов, лимитирующих процесс фотосинтеза в глобальном масштабе, сделан вывод, что докембрийский этап эволюции биосферы был наиболее благоприятным для жизнедеятельности организмов.

В последние 20 лет его занимают региональные аспекты геоэкологического анализа природно-техногенной сферы, мониторинг и прогнозирование чрезвычайных ситуаций, связанных с техногенными катастрофами. На основе геоэкологических исследований южных регионов России им разработаны методология и методика интегральной оценки состояния и районирования территории по степени экологической напряженности. Выявлены и обоснованы региональные природные и антропогенные причины и предпосылки возникновения зон экологического риска, изучены геохимические закономерности антропогенных преобразований урбанизированных территорий и агроландшафтов, расположенных в зоне интенсивного воздействия горнодобывающих предприятий, предприятий энергетики (ГРЭС, АЭС), химической и металлургической промышленности. Разработаны методические приемы нормирования техногенного воздействия на ландшафт.

Владимиром Евгеньевичем разработаны концепция и методика локального геоэкологического мониторинга ареалов техногенного загрязнения природной среды нефтью, а также оригинальные геотехнологические схемы локализации и устранения очагов нефтяного загрязнения пород зоны аэрации и грунтовых вод. Использование этих на-

учных разработок на практике позволило предотвратить региональную экологическую катастрофу – широкомасштабное загрязнение бассейна р. Дон в результате аварий на нефтепроводах в 1993–1997 гг.

В.Е. Закруткин – один из самых авторитетных экологов на Юге России, разработавших региональные экологические программы: «Программу неотложных мер по оздоровлению окружающей среды Ростовской области на период 1994–1996 гг.» и «Программу действий по охране окружающей среды Ростовской области на период до 2000 г.», «Региональный план действий по охране окружающей среды для Ростовской области на период 2000–2005 гг.», утвержденные решениями Законодательного собрания и губернатора Ростовской области. Главным результатом реализации этих программ явились комплексная оценка состояния окружающей среды Ростовской области и районирование ее территории по степени экологической напряженности, на основании которой большим коллективом ученых и специалистов во главе с В.Е. Закруткиным создан «Экологический атлас Ростовской области». По полноте охвата экологических проблем, комплексности подхода он представляет собой уникальное исследование, вносящее значительный вклад в оценку экологического состояния одного из крупнейших субъектов Российской Федерации, и служит основой для реализации путей перехода Ростовской области к устойчивому развитию.

Владимир Евгеньевич Закруткин имеет большой опыт в области экспертизы. Долгие годы он являлся председателем экспертной комиссии Управления Росприроднадзора по Ростовской области. В настоящее время он – эксперт Экспертного совета при Правительстве РФ, эксперт Департамента Росприроднадзора по Южному федеральному округу. В качестве официального эксперта от Ростовской области участвовал в государственной экспертизе Ростовской АЭС, экспертизе многих научных проектов, в том числе зарубежных.

В.Е. Закруткин принимал участие в работе первого Всероссийского съезда по охране природы (г. Москва, 1995 г.) в качестве председателя секции «Задачи науки и научно-техническая политика в сфере экологии».

За большой личный вклад в улучшение состояния окружающей среды и работу по пропаганде экологических знаний среди населения В.Е. Закруткин удостоен звания лауреата премии Госкомэкологии Ростовской области, имеет благодарственное письмо полномочного представителя Президента РФ в Южном федеральном округе за большой личный вклад в дело организации охраны окружающей среды и экологической безопасности Юга России. Награжден почетной грамотой Министерства образования Российской Федерации, медалью за заслуги перед Южным федеральным университетом.

Плодотворную научно-педагогическую работу, воспитание и подготовку специалистов высокого класса В.Е. Закруткин успешно сочетает с многогранной научно-организационной и общественной деятельностью. Он является сопредседателем одной из секций научного совета по проблемам экологии и чрезвычайных ситуаций при Президиуме РАН, членом объединенного научного совета по фундаментальным географическим проблемам при Международной ассоциации академий наук, научного совета по фундаментальным географическим проблемам при отделении наук о Земле РАН, председателем координационного совета Приграничного белорусско-российско-украинского университетского консорциума, председателем диссертационного совета Д212.208.12 по географическим наукам, членом диссертационного совета Д212.208.07 по биологическим наукам при Южном федеральном университете, председателем редколлегии журнала «Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки».

В.Е. Закруткин пользуется заслуженным авторитетом у студентов и преподавателей. Он щедро делится своим опытом с коллегами Института наук о Земле, вносит большой вклад в достижение ключевых стратегических целей развития университета и высокое качество выполняемых работ.

Поздравляя Владимира Евгеньевича с юбилеем, с глубоким удовлетворением отмечаем, что в свои 70 лет он полон сил, энергии, планов на будущее. Желаем ему дальнейших творческих успехов, здоровья, жизненного благополучия!

*О.В. Назаренко, кандидат географических наук, доцент,
Южный федеральный университет*

DOI 10.18522/0321-3005-2017-1-131-133

**Вячеслав Николаевич Труфанов – известный ученый, педагог,
творческая личность (к 80-летию со дня рождения)**

**Vyacheslav Nikolaevich Trufanov - Famous Scientist, Teacher,
Creative Personality (To the 80th Anniversary)**



10 января 2017 г. исполнилось 80 лет со дня рождения и 60 лет научно-педагогической деятельности Вячеслава Николаевича Труфанова, доктора геолого-минералогических наук, заслуженного деятеля наук РФ, проф. Южного федерального университета, одного из основателей и организаторов журнала «Известия вузов. Северо-Кавказский регион».

В.Н. Труфанов окончил геолого-географический факультет Ростовского государственного университета (РГУ) в 1959 г. с отличием по специальности «инженер-геолог-разведчик». Работал в Алтайской экспедиции Мингео СССР, участвовал в разведке и открытии крупных месторождений пьезооптического минерального сырья в Юго-Восточном и Центральном Казахстане. С 1960 по 1963 г. обучался в аспирантуре при кафедре минералогии и петрографии РГУ, которую успешно окончил с защитой кандидатской диссертации по хрусталеносным пегматитам Акжайляу (Казахстан).

С 1963 г. Вячеслав Николаевич работает на геолого-географическом факультете РГУ (в настоящее время Южный федеральный университет), прово-

дит комплексные исследования, направленные на развитие минерально-сырьевой базы Юга России. Является основателем научной школы «Молекулярная термобарогеохимия и экспериментальная геотехнология», коллективом которой обоснованы новые методы исследований природных систем «минерал – флюид» с применением оригинальных приборов и устройств, созданных авторами (вакуумная декриптометрия, электронная фрактография, лазерная спектроскопия флюидных включений, термоЭДС и др.). Показаны также преимущества и перспективы развития молекулярной термобарогеохимии, возможности ее применения для решения широкого круга задач металлогении, экспериментальной минералогии и геотехнологии для выполнения фундаментальных и прикладных исследований месторождений рудных, нерудных и горючих полезных ископаемых Восточного Донбасса, Северного Кавказа, Западной Сибири и других регионов России.

Наиболее крупные научные достижения принадлежат В.Н. Труфанову в теоретическом и экспериментальном обосновании термодинамических барьеров формирования рудных месторождений Большого Кавказа, результатом которого явилась защита докторской диссертации в 1983 г.; исследованиях новых типов формовочных материалов, внедренных на заводе «Ростсельмаш» с большим экономическим эффектом; в разработке концепции углеводородной флюидизации ископаемых углей. Концепция представляет собой значительный вклад в развитие современной теории формирования угольных, нефтяных и газовых месторождений. Вячеславу Николаевичу принадлежит приоритет в открытии и исследовании эффекта «обратного взрыва» – распада минералов и горных пород на атомно-молекулярные группировки при высоких перепадах температур и давлений, на основе которого разработаны новые технологические методы обогащения руд и прогнозирования опасных газодинамических явлений при разведке и эксплуатации угольных месторождений (НТП «Уголь-выброс»).

В 1998 г. по итогам конкурса проектов ФЦП «Интеграция» В.Н. Труфановым был организован Южно-Российский учебно-научный геотехнологический центр (Геотехцентр-Юг). Его сотрудниками совместно с ИПКОН (РАН), ЮРГТУ (НПИ), ВНИГРИуголь и рядом других организаций выполнено более 10 важнейших НИР по изучению и комплексному использованию новых видов минерального сырья, в том числе связанных с решением крупной научно-технической проблемы освоения ресурсов угольного метана Восточного Донбасса как нетрадиционного вида углеводородного сырья. В настоящее время Геотехцентр-Юг преобразован в лабораторию «Геотехпрогноз» в составе Института наук о Земле, на базе которой продолжают фундаментальные и прикладные исследования по молекулярной термобарогеохимии и экспериментальной геотехнологии.

Более 25 лет В.Н. Труфанов был заведующим кафедрой месторождений полезных ископаемых, инициировал открытие новых перспективных специализаций – «геотехнология и комплексное использование минерального сырья» и «менеджмент минерально-сырьевых ресурсов», воспитал и подготовил к защите 15 кандидатов геолого-минералогических наук, 55 дипломников – инженеров-геологов и горных инженеров, многие из которых являются руководителями крупных геологоразве-

дочных организаций и экспедиций практически во всех регионах России.

В.Н. Труфанов – автор более 300 научных работ и 8 изобретений, связанных с созданием новых типов высокоточных приборов и устройств – вакуумных декриптографов ВД-5, автоклавной установки БАР-1 и электромагнитных дистанционных влагомеров ЭВД-3, внедренных в 50 научных организациях, вузах и предприятиях. Продолжает вести активную общественную работу. Более 40 лет является членом редколлегии журнала «Известия вузов. Северо-Кавказский регион» – долгое время был первым заместителем главного редактора журнала «Изв. СКНЦ ВШ» и председателем редколлегии Естественных наук.

Награжден медалью «За трудовое отличие», медалями ВДНХ, нагрудным знаком «Изобретатель СССР», номинант премии Губернатора Ростовской области за высокие достижения в научной работе и педагогической деятельности, член-корреспондент Международной академии наук высшей школы, в 2009 г. внесен в энциклопедию успешных людей в области науки издательством Who is who (Швейцария). В.Н. Труфанов награжден юбилейной медалью «За заслуги перед Южным федеральным университетом» 1-й степени.

Поздравляем Вячеслава Николаевича с юбилеем, желаем ему здоровья, исполнения желаний, удачи во всех начинаниях!

*М.И. Гамов, доктор геолого-минералогических наук, профессор,
Южный федеральный университет*

Редакция и редколлегия журнала присоединяются ко всем поздравлениям, отмечая со своей стороны многолетний бескорыстный труд Владимира Евгеньевича и Вячеслава Николаевича на благо нашего журнала, желают им крепкого здоровья на многие лета, благодарных учеников и покорения новых творческих вершин!

1. Материалы, предназначенные для публикации, могут быть представлены в редакцию по одному из вариантов:

- по электронной почте: izvestiya@sfedu.ru;
- на диске и бумажном носителе почтой по адресу: 344006, г. Ростов-на-Дону, ул. Б. Садовая, 105/42, журнал «Известия вузов. Северо-Кавказский регион»;
- принесены в редакцию лично по адресу: г. Ростов-на-Дону, пр. Стачки, 200/1, корп. 2, к. 110.

2. К статье прилагаются на отдельном листе на русском и английском языках:

- сведения о каждом из авторов (фамилия, имя, отчество, место работы, должность, учёная степень, звание, домашний, служебный и электронный адреса, телефоны). Если авторов несколько, указать, с кем вести переписку;
- аннотация (1500 – 2000 знаков/150 – 200 слов);
- название статьи и фамилии авторов;
- ключевые слова (6–8);
- индекс УДК.

Единицы измерения следует давать в соответствии с Международной системой единиц (СИ).

3. Объем статьи – не менее 8 страниц машинописного текста, включая таблицы, список литературы (желательно не менее 10 источников) и рисунки (не более 5).

4. Статья оформляется в формате DOC или DOCX (MS Word) через 1,5 интервала, шрифтом Times New Roman размером 14 пт. Поля со всех сторон – 2,5 см. Использование любых других шрифтов возможно только в виде исключения, с приложением файла шрифта (TTF). Не следует использовать знаки принудительного переноса и дополнительных пробелов.

Для записи формул применять только редактор формул Equation 3.0. Статья должна содержать лишь необходимые формулы, от промежуточных выкладок желательно отказаться. Формула должна помещаться на половине строки. Большие формулы надо разбить на несколько строк, каждая новая строка – новый объект. Размеры при наборе: текст – 11 пт, крупный индекс – 8 пт, мелкий индекс – 6 пт, крупный символ – 12 пт, мелкий символ – 10 пт. Формулы не должны включать в состав знаки пунктуации и нумерацию. Векторные величины выделяются прямым полужирным шрифтом. Нумеруются только те формулы, на которые имеются ссылки. Нумерация формул – сквозная по всей статье.

5. *Таблицы* должны иметь заголовки на русском и английском языках; в них допускаются только общепринятые сокращения. Желательно, чтобы таблица не превышала одной страницы текста. Количество таблиц не может превышать количество страниц.

Рисунки, графики и схемы располагаются в папке «Рисунки». Они должны быть черно-белыми, в формате TIF, JPG, каждый рисунок должен иметь подрисуночную подпись на русском и английском языках.

6. *Литература* приводится в порядке упоминания в конце статьи, ссылки в тексте в квадратных скобках. Допускаются ссылки только на опубликованные материалы. Иностранские источники даются на языке оригинала. При ссылке на электронный ресурс указывается дата обращения.

Также должна прилагаться транслитерация списка литературы. Для русскоязычных статей дополнительно в скобках указать перевод названия на английский язык. Транслитерация (References) – выполняется с помощью программы на сайте <http://translit.net>, выбрать вкладку «Варианты» – BSI.

Библиография должна быть оформлена согласно ГОСТу 7.0.5-2008.

Несоблюдение правил оформления и компьютерного набора рукописи задерживает ее публикацию.

**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.

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