

ИЗВЕСТИЯ
ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

*Северо-Кавказский
регион*

ЕСТЕСТВЕННЫЕ

НАУКИ

2021

3

Журнал основан в 1972 г. Ю.А. Ждановым

Главная редакция:

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

Редакционная коллегия:

М.А. Боровская – главный редактор, чл.-корр. РАО, доктор эконом. наук, профессор, Южный федеральный университет, Россия
В.Е. Закруткин – председатель редколлегии, доктор геол.-мин. наук, профессор, Южный федеральный университет, Россия
В.А. Бабешко – академик РАН, доктор физ.-мат. наук, профессор, Кубанский государственный университет, Россия
Б.С. Карамурзов – доктор техн. наук, профессор, Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова, Россия
В.И. Колесников – академик РАН, доктор техн. наук, профессор, Ростовский государственный университет путей сообщения, Россия
А.Г. Кусраев – доктор физ.-мат. наук, профессор, Южный математический институт ВНЦ РАН, Россия
Г.Г. Матишов – академик РАН, доктор геол.-мин. наук, профессор, Федеральный исследовательский центр, Южный научный центр РАН, Россия
В.И. Минкин – академик РАН, доктор хим. наук, профессор, Южный федеральный университет, Россия
М.Х. Рабаданов – доктор физ.-мат. наук, профессор, Дагестанский государственный университет, Россия
Э.З. Эмирбеков – доктор биол. наук, профессор, Южный федеральный университет, Россия
В.Н. Труфанов – зам. председателя редколлегии, доктор геол.-мин. наук, профессор, Южный федеральный университет, Россия
А.В. Абанин – доктор физ.-мат. наук, профессор, Южный федеральный университет, Россия
Г.Г. Бабаян – доктор техн. наук, Центр эколого-ноосферных исследований НАН РА, Армения
О.С. Безуглова – доктор биол. наук, профессор, Южный федеральный университет, Россия
Н.И. Бойко – доктор геол.-мин. наук, профессор, Южный федеральный университет, Россия
А.В. Бочкарев – доктор геол.-мин. наук, профессор, Российский государственный университет нефти и газа им. И.М. Губкина, Россия
Л.С. Ворович – кандидат физ.-мат. наук, доцент, Южный федеральный университет, Россия
О.Н. Демина – доктор биол. наук, профессор, Карачаево-Черкесский государственный университет им. У.Д. Алиева, Россия
А.Г. Захаров – доктор техн. наук, профессор, Южный федеральный университет, Россия
Л.М. Зубов – доктор физико-математических наук, профессор, Южный федеральный университет, Россия
Я.М. Ерусалимский – зам. председателя редколлегии, кандидат физ.-мат. наук, доктор техн. наук, профессор, Южный федеральный университет, Россия
М.И. Карякин – доктор физ.-мат. наук, доцент, Южный федеральный университет, Россия
С.Б. Климентов – доктор физ.-мат. наук, профессор, Южный федеральный университет, Россия
С.И. Колесников – кандидат геогр. наук, доктор с.-х. наук, профессор, Южный федеральный университет, Россия
Е.М. Колосова – кандидат физ.-мат. наук, Южный федеральный университет, Россия
Г.В. Куповых – доктор физ.-мат. наук, профессор, Южный федеральный университет, Россия
С.В. Курбатов – доктор хим. наук, профессор, Южный федеральный университет, Россия
А.М. Лерер – доктор физ.-мат. наук, профессор, Южный федеральный университет, Россия
В.А. Миноранский – доктор с.-х. наук, профессор, Южный федеральный университет, Россия
В.В. Онищенко – доктор геогр. наук, профессор, Карачаево-Черкесский государственный университет им. У.Д. Алиева, Россия
О.В. Назаренко – кандидат геогр. наук, доцент, Южный федеральный университет, Россия
Г.В. Пироговская – доктор с.-х. наук, профессор, Институт почвоведения и агрохимии НАН РБ, Белоруссия
В.С. Рабинович – доктор физ.-мат. наук, профессор, Национальный политехнический институт, Мексика
М.А. Сазыкина – доктор биол. наук, доцент, Южный федеральный университет, Россия
П. Фатталь – доктор наук, профессор, Университет Нанта, Франция
Ю.А. Федоров – доктор геогр. наук, профессор, Южный федеральный университет, Россия
А.Д. Хованский – кандидат геол.-мин. наук, доктор геогр. наук, профессор, Южный федеральный университет, Россия
Т.А. Ватульян – ответственный секретарь по издательской деятельности журнала, Южный федеральный университет, Россия

Учредители:

Дагестанский государственный технический университет,
Дагестанский государственный университет,
Донской государственный технический университет,
Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова,
Кубанский государственный технологический университет,
Ростовский государственный университет путей сообщения,
Ростовский государственный экономический университет (РИНХ),
Южно-Российский государственный политехнический университет им. М.И. Платова,
Южный федеральный университет

Над номером работали: Л.С. Ворович, Е.М. Колосова, В.И. Литвиненко, О.В. Назаренко, Н.Г. Шатравкина, М.С. Шипитко

Подписано в печать 27.09.2021. Выход в свет 30.09.2021. Формат 60×84 1/8. Бумага офсетная.
Шрифт Times. Усл. печ. л. 13,95. Уч.-изд. л. 15,53. Тираж 250 экз. Заказ № 8182

Адрес редакции и издателя (для переписки): 344006, г. Ростов-на-Дону, ул. Большая Садовая, 105/42, ЮФУ,
журнал «Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Естественные науки»,
e-mail: izvestiya@sfned.ru, адрес в Интернете: www.izvestiya.sfned.ru

Адрес редколлегии: 344090, г. Ростов-на-Дону, пр. Стачки, 200/1, корп. 2, к. 110,
тел.: +7 (863) 218-40-00 доб. 11-093; доб. 11-094.

Отпечатано в отделе полиграфической, корпоративной и сувенирной продукции
Издательско-полиграфического комплекса КИБИ МЕДИА ЦЕНТРА ЮФУ,
344090, г. Ростов-на-Дону, пр. Стачки, 200/1, корп. 1, к. 104, тел. +7 (863) 247-80-51

Journal was founded in 1972 by Yu.A. Zhdanov

Main Edition:

M.A. Borovskaya (Editor-in-Chief),
V.E. Zakrutkin (Deputy Editor-in-Chief),
E.A. Shinkarenko (Assistant Editor)

Editorial Board:

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

The Founders

Dagestan State Technical University,
Dagestan State University,
Don State Technical University,
Berkbekov Kabardino-Balkarian State University,
Kuban State Technological University,
Rostov State Transport University,
Rostov State University of Economics,
Platov South Russian State Polytechnical University,
Southern Federal University

Magazine released L.S. Vorovich, E.M. Kolosova, V.I. Litvinenko, O.V. Nazarenko, N.G. Shatravkina, M.S. Shipitko

Signed print September 27, 2021. The publication September 30, 2021. Format 60×84 1/8. Offset paper. Font Times.
Conv. print. sheets 13.95. Publ. sign. 15.53. Edition 250 copies. Order number 8182.

Address of Editorial Board: 344006, Rostov-on-Don, Bolshaya Sadovaya St., 105/42,
SFU, journal "Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science",
e-mail: izvestiya@sfnu.ru, Web Address: www.izvestiya.sfnu.ru

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

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

ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ. СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ РЕГИОН

BULLETIN OF HIGHER EDUCATIONAL INSTITUTIONS. NORTH CAUCASUS REGION.

DOI 10.18522/1026-2237-2021-3

*Свидетельство о регистрации
ПИ № ФС 77 – 77252 от 25.11.2019,
выдано Федеральной службой по надзору
в сфере связи, информационных технологий
и массовых коммуникаций
Научный журнал
Издаётся с 1973 г.
Периодичность серии 4 номера в год
№ 3 (211) 2021 г.*

*Registration certificate
PI No. FS 77 - 77252 dated 25.11.2019
issued Federal Service for Supervision
of Communications, Information Technology,
and Mass Media
Science magazine
Published since 1973.
4 issues per a year
No. 3 (211) 2021*

ЕСТЕСТВЕННЫЕ НАУКИ

NATURAL SCIENCE

СОДЕРЖАНИЕ

CONTENTS

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ

PHYSICAL AND MATHEMATICAL SCIENCES

- | | |
|---|---|
| Бондарчук А.А., Сумбатян М.А. Полуаналитический метод в задаче обтекания крылового профиля с острой задней кромкой потоком идеальной жидкости 4 | Bondarchuk A.A., Sumbatyan M.A. A Semi-Analytical Method for a Flow of Non-Viscous Fluid Around an Airfoil with a Sharp Trailing Edge 4 |
| До Тхань Бинь Оптимизация пьезоэлектрического генератора изгибных колебаний с активным пьезомагнитным слоем на основе сочетания метода конечных элементов и генетического алгоритма 11 | Do Thanh Binh Optimization of a Piezoelectric Generator of Flexural Vibrations with an Active Piezomagnetic Layer Based on a Combination of the Finite Element Method and a Genetic Algorithm 11 |
| Езаова А.Г., Канукоева Л.В., Куповых Г.В. Нелокальная краевая задача для одного смешанного уравнения третьего порядка 18 | Ezaova A.G., Kanukoeva L.V., Kupovykh G.V. Non-local Boundary Value Problem for One Mixed Third Order Equation 18 |
| Мусина А.А. Об основных математических моделях и приближенном методе теории фильтрации 25 | Mussina A.A. Basic Mathematical Models and an Approximate Method of Filtration Theory 25 |
| Саранчук Ю.С., Татаркин А.А. Об одном обобщении оператора сдвига 32 | Saranchuk Yu.S., Tatarkin A.A. A Generalization of the Shift Operator 32 |
| Танирберген А.К. Смешанная задача для вырождающегося многомерного эллиптического уравнения 37 | Tanirbergen A.K. A Mixed Problem for a Degenerate Multidimensional Elliptic Equation 37 |

НАУКИ О ЗЕМЛЕ

SCIENCES OF EARTH

- | | |
|--|--|
| Воробьев Н.В., Воробьев А.Н., Ипполитова Н.А. Байкало-монгольский транспортный коридор: взаимосвязь производства и населения 42 | Vorobyev N.V., Vorobyev A.N., Ippolitova N.A. Baikal-Mongolian Transport Corridor: Relationship of Production and Population 42 |
|--|--|

Каменецкий Е.С., Радионов А.А., Тимченко В.Ю., Панаэтова О.С. Изменчивость аэрозольной оптической толщины в горных и предгорных районах Северной Осетии по данным спутниковых измерений	51	Kamenetsky E.S., Radionoff A.A., Timchenko V.Yu., Panaetova O.S. The Variability of Aerosol Optical Thickness in Mountainous and Foothill Areas of the North Ossetia According to Satellite Measurements	51
Курамшина Н.Г., Елизарьев А.Н., Нафикова Э.В., Вдовина И.В., Смирнова Т.П., Кутлин Н.Г. Геоэкологическая оценка риска биологического загрязнения территории Республики Башкортостан по природно-очаговым факторам	64	Kuramshina N.G., Yelizariyev A.N., Nafikova E.V., Vdovina I.V., Smirnova T.P., Kutlin N.G. Geoecological Assessment of the Risk of Biological Contamination of the Republic of Bashkortostan Territory by Natural and Focal Factors	64
Плотников И.В. Особенности радиального прироста кустарничков <i>Betula nana</i> и <i>Salix lanata</i> на различных элементах профиля рельефа в южной тундре Ямала ...	74	Plotnikov I.V. Features of the Radial Growth of Shrubs <i>Betula Nana</i> and <i>Salix Lanata</i> on Various Landscape Elements in the Southern Tundra of Yamal.....	74
Решетняк О.С. Многолетняя изменчивость ионного стока крупных рек Арктической зоны России.....	80	Reshetnyak O.S. Long-Term Variability of the Ion Runoff of Large Rivers in the Arctic Zone of Russia	80
Хлопкова М.В. Изучение раковинного вещества современных и плейстоценовых моллюсков рода <i>Didacna</i>	87	Khlopikova M.V. Study of the Shell Matter of Modern and Pleistocene Molluscs of the Genus <i>Didacna</i>	87

БИОЛОГИЧЕСКИЕ НАУКИ

Гасанова А.Ш., Гусейнов К.М., Бархалов Р.М., Хлопкова М.В. К изучению биологии воблы <i>Rutilus rutilus caspicus</i> (Jakowlev, 1870) крайновского побережья Каспийского моря	93	Gasanova A.Sh., Guseynov K.M., Barkhalov R.M., Khlopikova M.V. The study of the Biology of the Roach <i>Rutilus Rutilus Caspicus</i> (Jakowlev, 1870) in the Kraynovsky Coast of the Caspian Sea.....	93
Гусейнов К.М., Гасанова А.Ш., Хлопкова М.В. К изучению биоэкологии креветок Каспия	98	Guseynov K.M., Gasanova A.Sh., Khlopikova M.V. To Study the Bioecology of Caspian Shrimps	98
Миноранский В.А., Малиновская Ю.В., Тихонов А.В., Даньков В.И., Килякова В.С. Изменения в комплексе млекопитающих (Mammalia) на территории заповедника «Ростовский» с середины XX века	103	Minoranskiy V.A., Malinovskaya Yu.V., Tikhonov A.V., Dankov V.I., Kilyakova V.S. Changes in the Mammalian Complex (Mammalia) on the Territory of the Rostov Nature Reserve Since the Mid-Twentieth Century... 103	103
Пуртова Л.Н. Показатели хемодеструкционного фракционирования органического вещества почв природных и антропогенно преобразованных ландшафтов юга Приморья	111	Purtova L.N. Indicators of Chemodestructive Fractionation of Organic Matter Soils of Natural and Anthropogenic-Transformed Landscapes of the South of Primorye.....	111

НАШИ ЮБИЛЯРЫ

Карякин М.И., Карапетыанц А.Н., Ватульян А.О. Стефан Григорьевич Самко (к 80-летию со дня рождения).....	117	Karjakin M.I., Karapetyants A.N., Vatulyan A.O. Stefan Grigorievich Samko (on the Occasion of His 80th Birthday)	117
---	-----	---	-----

OUR PERSONS

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ

PHYSICAL AND MATHEMATICAL SCIENCES

УДК 532.5

doi 10.18522/1026-237-2021-3-4-10

ПОЛУАНАЛИТИЧЕСКИЙ МЕТОД В ЗАДАЧЕ ОБТЕКАНИЯ
КРЫЛОВОГО ПРОФИЛЯ С ОСТРОЙ ЗАДНЕЙ КРОМКОЙ
ПОТОКОМ ИДЕАЛЬНОЙ ЖИДКОСТИ*© 2021 г. А.А. Бондарчук¹, М.А. Сумбатян¹¹Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, РоссияA SEMI-ANALYTICAL METHOD FOR A FLOW OF NON-VISCOUS
FLUID AROUND AN AIRFOIL WITH A SHARP TRAILING EDGEA.A. Bondarchuk¹, M.A. Sumbatyan¹¹Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia

Бондарчук Алексей Алексеевич – кандидат физико-математических наук, доцент, кафедра теоретической и компьютерной гидроаэродинамики, Институт математики, механики и компьютерных наук им. И.И. Воровича, Южный федеральный университет, ул. Мильчакова, 8а, г. Ростов н/Д, 344090, Россия, e-mail: melchior@list.ru

Alexey A. Bondarchuk - Candidate of Physics and Mathematics, Associate Professor, Department of Theoretical and Computational Hydroaerodynamics, Vorovich Institute of Mathematics, Mechanics and Computer Science, Southern Federal University, Milchakova St., 8a, Rostov-on-Don, 344090, Russia, e-mail: melchior@list.ru

Сумбатян Межлум Альбертович – доктор физико-математических наук, профессор, кафедра теоретической и компьютерной гидроаэродинамики, Институт математики, механики и компьютерных наук им. И.И. Воровича, Южный федеральный университет, ул. Мильчакова, 8а, г. Ростов н/Д, 344090, Россия, e-mail: masumbatyan@sfnu.ru

Mezhlum A. Sumbatyan - Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Department of Theoretical and Computational Hydroaerodynamics, Vorovich Institute of Mathematics, Mechanics and Computer Science, Southern Federal University, Milchakova St., 8a, Rostov-on-Don, 344090, Russia, e-mail: masumbatyan@sfnu.ru

Предлагается метод расчета плоского обтекания крылового профиля с острой кромкой при помощи уравнения потенциала двойного слоя в рамках теории идеальной жидкости. Циркуляция скорости моделируется при помощи потенциала точечного вихря, центр которого расположен внутри граничного контура. Величина циркуляции определяется при помощи постулата Жуковского – Чаплыгина. Приведены результаты применения метода для профиля типа «руль Жуковского», а также для профиля в виде пары пересекающихся окружностей. Выполнено сравнение расчетной циркуляции с ее теоретическим значением.

Ключевые слова: крыловой профиль, идеальная жидкость, острая задняя кромка, численный метод, гипотеза Жуковского – Чаплыгина, точечный вихрь, граничное интегральное уравнение.

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

In the present work we propose a method to study a two-dimensional flow of non-viscous fluid around an airfoil with a sharp trailing edge, by the double-layer potential theory.

The circulation of velocity vector is modeled by the potential of a point vortex whose center is located inside the boundary contour. The magnitude of the circulation is defined on the basis of the Joukowski-Chaplygin postulate. There are presented some results for a Joukowski rudder, as well as for the airfoil in the form of a pair of interacting circles. It is performed a comparison of the circulation with its theoretical value.

Keywords: airfoil, non-viscous fluid, sharp trailing edge, numerical method, Joukowski-Chaplygin postulate, point vortex, boundary integral equation.

Введение

Задача обтекания крылового профиля потоком идеальной несжимаемой жидкости является классической [1, 2]. Для произвольного обтекаемого тела применимы эффективные современные численные методы, основанные на конечных и граничных элементах [3–6]. Наличие острой задней кромки существенно усложняет применение численных методов в силу сингулярности давления в малой окрестности острой кромки [3]. Данная сложность не является критичной для некоторого класса профилей, допускающих аналитическое решение [1]. Однако в общем случае для получения решения требуется построение конформного отображения данного профиля на единичный круг, что является довольно сложной задачей. В то же время предпринимались численные попытки удовлетворения условию Жуковского – Чаплыгина (Ж-Ч) на острой задней кромке [3, 7], которые вряд ли можно назвать удачными из-за неустойчивости счета.

Целью данного исследования является развитие полуаналитического метода на основе метода коллокации для граничного интегрального уравнения (ГИУ), в котором условие Ж-Ч на задней кромке удовлетворяется численно введением одного или двух дополнительных точечных вихрей. После дискретизации предложенный метод фактически становится одним из вариантов метода граничных элементов.

Постановка задачи

Пусть двумерный профиль с острой задней кромкой и граничным контуром l обтекается однородным на бесконечности потоком идеальной несжимаемой жидкости (рис. 1). Будем считать, что полный потенциал течения складывается из потенциалов набегающего потока φ_0 и возмущенного течения φ'

$$\varphi = \varphi_0 + \varphi', \quad \varphi_0 = V_0 x.$$

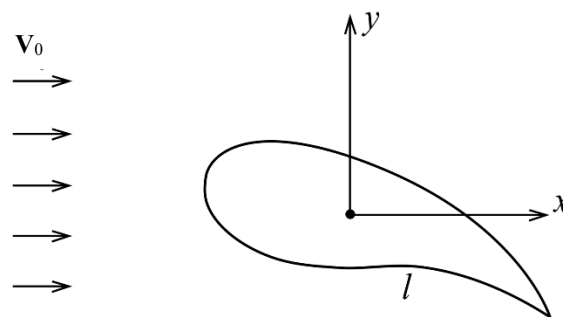


Рис. 1. Обтекание телесного профиля с острой задней кромкой однородным потоком идеальной несжимаемой жидкости / Fig. 1. Flow around a solid profile with a sharp trailing edge by a homogeneous flow of an ideal incompressible fluid

В теории потенциала известно основное интегральное представление, позволяющее выписать значение потенциала скорости потока в произвольной точке среды в виде линейной комбинации потенциалов простого и двойного слоя. Из него переходом на граничную кривую l легко вывести ГИУ, применимое к потенциалу возмущенного потока

$$\frac{\varphi'(z_0)}{2} = \int_l \left(\varphi'(z) \frac{\partial \Phi}{\partial n_z}(z_0, z) - \Phi(z_0, z) \frac{\partial \varphi'}{\partial n_z}(z) \right) dl_z, \quad (1)$$

$$\Phi(z_0, z) = -\frac{1}{2\pi} \ln r, \quad r = |z_0 - z|,$$

$z = (x, y)$, $z_0 = (x_0, y_0)$ – точки в двумерном пространстве; z и z_0 принадлежат контуру l ; n_z – внешняя нормаль к контуру l . При этом из условия непроницаемости следует

$$\frac{\partial \varphi'}{\partial n_z} = -\mathbf{n} \cdot \mathbf{V}_0,$$

где

$$\mathbf{V}_0 = \nabla \varphi_0.$$

Поскольку интегральное представление для потенциала скорости является однозначной непрерывной функцией в окружающем профиль пространстве, то таким образом можно получить

только потенциал бесциркуляционного обтекания, что связано с тем фактом, что потенциал течения с циркуляцией не является непрерывной функцией. В данной работе предлагается способ решения этой проблемы путем введения дополнительного точечного вихря, размещенного внутри контура l . В этом случае найденный из интегрального уравнения потенциал также не будет давать вклад в циркуляцию, но циркуляция от поля скоростей точечного вихря останется. В силу линейности задачи полученное решение является суммой решений построенного численно бесциркуляционного обтекания и потока, генерируемого введенным точечным вихрем. Такой подход кажется естественным, однако при этом возникает необходимость нахождения конкретного значения циркуляции вихря. Если бы задача решалась полностью аналитически, то при рассмотрении профиля с острой задней кромкой значение скорости на этой кромке получалось бы бесконечно большим для всех случаев, кроме одного значения циркуляции, которое и следовало бы выбрать, согласно постулату Ж-Ч. При численном решении значения скоростей получаются конечными. Кроме того, их векторы оказываются направленными под углом к касательным сторон задней кромки, что не дает возможность обнулить их сумму выбором подходящего значения циркуляции. Эта техническая сложность может быть преодолена путем рассмотрения двух точечных вихрей, расположенных в разных точках (но оба внутри контура), благодаря тому, что в этом случае получается сумма трех векторов, причем все три направлены под разными углами.

Таким образом, для применения предлагаемого подхода требуется найти с помощью интегрального уравнения четыре потенциала $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4$, соответствующих разным типам внешнего потока – два набегающих вдоль осей координат направлений потока с единичной скоростью V_1 и два точечных вихря с единичной циркуляцией Γ_1 в точках $(x_1; y_1)$ и $(x_2; y_2)$. В декартовых координатах поля скоростей этих потоков имеют следующий вид:

$$\mathbf{V}_{ext,1} = \{V_1; 0\},$$

$$\mathbf{V}_{ext,2} = \{0; V_1\},$$

$$\mathbf{V}_{ext,3} = \left\{ \frac{-(y-y_1)\Gamma_1}{2\pi((x-x_1)^2 + (y-y_1)^2)}; \frac{(x-x_1)\Gamma_1}{2\pi((x-x_1)^2 + (y-y_1)^2)} \right\},$$

$$\mathbf{V}_{ext,4} = \left\{ \frac{-(y-y_2)\Gamma_1}{2\pi((x-x_2)^2 + (y-y_2)^2)}; \frac{(x-x_2)\Gamma_1}{2\pi((x-x_2)^2 + (y-y_2)^2)} \right\},$$

где последние два соотношения вытекают из формулы Био – Савара [1]. Итоговое поле скорости при произвольной скорости набегающего потока $V_0 = V_1 v_0$ под углом α и для вихрей с циркуляциями $\Gamma_1 g_1$ и $\Gamma_1 g_2$ (v_0, g_1, g_2 – безразмерные коэффициенты; α – угол, радиан) в этом случае будет выражаться в следующем виде:

$$\mathbf{V}(x, y) = v_0 \cos \alpha (\mathbf{V}_{ext,1} + \nabla \varphi_1) + v_0 \sin \alpha (\mathbf{V}_{ext,2} + \nabla \varphi_2) + g_1 (\mathbf{V}_{ext,3} + \nabla \varphi_3) + g_2 (\mathbf{V}_{ext,4} + \nabla \varphi_4).$$

Обозначим значения градиентов найденных потенциалов $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4$ в острой кромке с координатами x_0, y_0 как $\mathbf{V}_{cr,1}, \mathbf{V}_{cr,2}, \mathbf{V}_{cr,3}, \mathbf{V}_{cr,4}$. Тогда из условия равенства нулю скорости в острой кромке

$$\mathbf{V}|_{x=x_0, y=y_0} = 0$$

вытекает следующее векторное уравнение:

$$v_0 \cos \alpha (\mathbf{V}_{ext,1} + \mathbf{V}_{cr,1})|_{x=x_0, y=y_0} + v_0 \sin \alpha (\mathbf{V}_{ext,2} + \mathbf{V}_{cr,2})|_{x=x_0, y=y_0} + g_1 (\mathbf{V}_{ext,3} + \mathbf{V}_{cr,3})|_{x=x_0, y=y_0} + g_2 (\mathbf{V}_{ext,4} + \mathbf{V}_{cr,4})|_{x=x_0, y=y_0} = 0.$$

Считая, что g_1 и g_2 – неизвестны, а v_0 и α – константы, несложно решить получившуюся систему двух линейных алгебраических уравнений, причем решение может быть записано в виде

$$g_1 = g_{11} v_0 \cos \alpha + g_{12} v_0 \sin \alpha,$$

$$g_2 = g_{21} v_0 \cos \alpha + g_{22} v_0 \sin \alpha,$$

где g_{ij} – некоторые числовые значения, явное выражение которых не приводится ввиду их громоздкости. Тогда значение итоговой циркуляции можно записать как

$$\begin{aligned} \Gamma &= \Gamma_1 (g_1 + g_2) = v_0 \Gamma_1 \times \\ &\times ((g_{11} + g_{21}) \cos \alpha + (g_{12} + g_{22}) \sin \alpha) = \\ &= \frac{V_0}{V_1} \Gamma_1 \frac{\sin(\alpha - \alpha_\Gamma)}{\sqrt{(g_{11} + g_{21})^2 + (g_{12} + g_{22})^2}} = \\ &= V_0 A_\Gamma \sin(\alpha - \alpha_\Gamma), \end{aligned}$$

где значения A_Γ и α_Γ однозначно определяются значениями скоростей, порождаемыми каждым из потенциалов, и имеют смысл коэффициента циркуляции (имеющего размерность длины) и угла бесциркуляционного обтекания соответственно.

Работоспособность метода проверялась на теоретическом профиле «руль Жуковского» – профиле, полученном применением конформного отображения ($z=x+iy$, $c>0$)

$$z = \frac{1}{2} \left(\zeta + \frac{c^2}{\zeta} \right)$$

к окружности в комплексной плоскости с центром в точке $-d+hi$ (i – мнимая единица), проходящей через точку c и, соответственно, имеющей радиус

$$a = \sqrt{(c+d)^2 + h^2},$$

где d и h – некоторые положительные параметры.

Этот профиль был выбран ввиду того, что для него известна теоретическая циркуляция, равная

$$\Gamma = -4\pi am_\infty V_0 \sin(\alpha - \varepsilon_0).$$

Здесь $m_\infty = 0,5$ – параметр конформного отображения; ε_0 – угол бесциркуляционного обтекания, определяемый направлением на критическую точку c из центра окружности:

$$\varepsilon_0 = \arctan\left(\frac{-h}{c+d}\right).$$

После дискретизации профиля получаем несколько массивов с численными значениями, характеризующими геометрию контура – координаты центров отрезков разбиения, их длины l_j , радиусы кривизны σ_j , а также единичные векторы нормалей $\mathbf{n}_j$ и касательных (в направлении обхода контура) $\mathbf{\tau}_j$.

ГИУ (1) в дискретном виде выглядит следующим образом (опуская штрихи):

$$\frac{\Phi_i}{2} = \sum_{j=1}^N \left(\Phi_j \left(\frac{\partial \Phi}{\partial n_y} \right)_{ij} - \Phi_{ij} \left(\frac{\partial \Phi}{\partial n_y} \right)_j \right) l_j, \quad i=1, \dots, N,$$

где из условия непроницаемости

$$\left(\frac{\partial \Phi}{\partial n_y} \right)_j = -\mathbf{n}_j \cdot \mathbf{V}_{ext}(x_j, y_j)$$

а Φ_j – неизвестные граничные значения потенциала в дискретных узлах. Для функции Грина Φ и ее производной обычно используется упрощенное представление в предположении, что интегрируемая функция слабо изменяется вдоль каждого отрезка разбиения (кроме значений на главной диагонали, которые находят явным интегрированием)

$$\Phi_{ij} l_j = \begin{cases} -\frac{l_j}{2\pi} \ln r_{ij}, & i \neq j, \\ -\frac{1}{2\pi} \int_{-l_j/2}^{l_j/2} \ln z dz = -\frac{l_j}{2\pi} \left(\ln \frac{l_j}{2} - 1 \right), & i = j, \end{cases}$$

$$\left(\frac{\partial \Phi}{\partial n_y} \right)_{ij} = \begin{cases} -\frac{\mathbf{n}_j \cdot \mathbf{r}_{ij}}{2\pi r_{ij}^2}, & i \neq j, \\ -\frac{1}{4\pi \sigma_j}, & i = j. \end{cases}$$

Однако при рассмотрении руля Жуковского такой подход приводит к крайне высокой погрешности расчета. Это связано с тем, что у профилей этого типа – нулевой угол на острой задней кромке, из-за чего пары отрезков разбиения, находящиеся на разных сторонах контура вблизи кромки, оказываются расположенными слишком близко друг к другу.

Заметим, что случай острой кромки с нулевым углом раскрытия традиционно считается одним из самых серьезных препятствий при численной реализации метода ГИУ. Именно это препятствие привело к появлению быстрых методов типа метода мультиполя и его модификаций [8–10], позволяющих рассчитывать за реальное время системы с предельно большим числом узлов. Между тем были найдены и альтернативные эффективные методы, заменяющие для тонких препятствий интегральные уравнения Фредгольма второго рода с регулярными ядрами на интегральные уравнения первого рода с сингулярными и гиперсингулярными ядрами [11].

В данной работе для построения устойчивого алгоритма применяется еще один альтернативный подход. Введем обозначения в виде величин r_n и r_τ , которые характеризуют относительное положение центров двух отрезков разбиения в проекциях на нормаль и касательную

$$r_n = \mathbf{n}_j \cdot \mathbf{r}_{ij}, \quad r_\tau = \mathbf{\tau}_j \cdot \mathbf{r}_{ij}. \quad (22)$$

Тогда выражения для функции Грина и ее производной можно записать следующим образом:

$$\begin{aligned} \Phi_{ij} l_j &= -\frac{1}{2\pi} \int_{-l_j/2}^{l_j/2} \ln |x-z| dz = \\ &= -\frac{1}{4\pi} \int_{-l_j/2}^{l_j/2} \ln [(z-r_\tau)^2 + r_n^2] dz = \\ &= -\frac{1}{2\pi} \left(r_n \times \right. \\ &\quad \left. \times \left(\arctan \left(\frac{l_j/2 - r_\tau}{r_n} \right) + \right. \right. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + \arctan\left(\frac{l_j/2 + r_\tau}{r_n}\right) - l_j + \\
& + \frac{1}{2}\left(\frac{l_j}{2} - r_\tau\right) \ln\left[\left(\frac{l_j}{2} - r_\tau\right)^2 + r_n^2\right] + \\
& + \frac{1}{2}\left(\frac{l_j}{2} + r_\tau\right) \ln\left[\left(\frac{l_j}{2} + r_\tau\right)^2 + r_n^2\right], \\
\left(\frac{\partial\Phi}{\partial n_y}\right)_{ij} = \\
& = -\frac{1}{4\pi} \frac{\partial}{\partial r_n} \int_{-l_j/2}^{l_j/2} \ln\left[(z - r_\tau)^2 + r_n^2\right] dz = \\
& = -\frac{r_n}{2\pi} \int_{-l_j/2}^{l_j/2} \frac{dz}{(z - r_\tau)^2 + r_n^2} = -\frac{1}{2\pi} \times
\end{aligned}$$

$$\times \left(\arctan\left(\frac{l_j/2 - r_\tau}{r_n}\right) + \arctan\left(\frac{l_j/2 + r_\tau}{r_n}\right) \right).$$

В таком виде они и использовались для численных расчетов.

На рис. 2 приводится форма конкретного профиля, к которому применялся предложенный метод. В табл. 1 приводятся результаты расчетов при различном количестве отрезков разбиения N , а также теоретические значения для выбранного набора параметров.

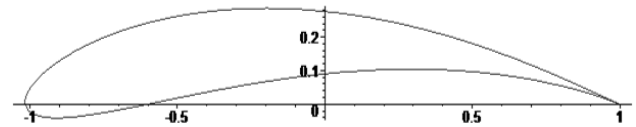


Рис. 2. Форма профиля: $c=1, h=0,2, d=0,1$
/ Fig. 2. Profile form: $c=1, h=0.2, d=0.1$

Таблица 1

Коэффициент циркуляции A_Γ и угол бесциркуляционного обтекания α_Γ в зависимости от размерности вычислительной сетки: $x_1 = -0,162, y_1 = 0,537; x_2 = -0,912, y_2 = 0,238$ / The circulation coefficient A_Γ and the angle of non-circulation flow α_Γ depending on the dimension of the computational grid: $x_1 = -0.162, y_1 = 0.537; x_2 = -0.912, y_2 = 0.238$

	$A_\Gamma, \text{м}$	$\alpha_\Gamma, \text{рад}$
N=25	-7,8004166424981	-0,058187334936685
N=50	-6,6262309451548	-0,22126434206970
N=75	-7,0361200868545	-0,18721893106239
N=100	-6,9330830827545	-0,17790533735429
N=200	-6,9505828108077	-0,17069392638675
N=300	-6,9735893904551	-0,17331925675325
N=350	-6,9803089906677	-0,17405362367015
Аналитическое значение	-7,024814734	-0,1798534998

Также тестирование было выполнено для симметричного профиля, составленного из двух дуг окружностей, для которого существует конформное отображение, сводящее его форму к круглому цилиндру [12], что позволяет получить аналитическую формулу для циркуляции

$$\Gamma = -\frac{2L\pi^2}{\pi - \delta} V_0 \sin \alpha, \quad \delta = \arcsin\left(\frac{L}{R}\right),$$

где L – половина хорды профиля; R – радиус кривизны (рис. 3). В табл. 2 приводятся результаты расчетов при различном количестве отрезков разбиения N , а также теоретические значения для выбранного набора параметров. В силу симметрии

профиля угол бесциркуляционного обтекания в этом случае равен нулю и не выносится в таблицу.

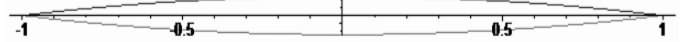


Рис. 3. Форма профиля: $L=1, R=10$
/ Fig. 3. Profile form: $L=1, R=10$

Заметим, что для данного частного профиля предложенный метод зануляет скорость на острой задней кромке. При этом скорость на передней острой кромке теоретически остается бесконечной.

Однако при численных расчетах можно наблюдать конечную, но большую скорость в окрестности этой кромки, значение которой возрастает при сгущении сетки.

Таблица 2

Коэффициент циркуляции A_Γ в зависимости от размерности вычислительной сетки ($\alpha_\Gamma = 0$):
 $x_1 = -0,95, y_1 = 0,0001; x_2 = -0,95, y_2 = -0,0001$ /
Circulation coefficient A_Γ depending on the dimension of the computational grid ($\alpha_\Gamma = 0$): $x_1 = -0.95, y_1 = 0.0001$; $x_2 = -0.95, y_2 = -0.0001$

	$A_\Gamma, \text{м}$
N=25	-5,5432387488984
N=50	-6,4669741371108
N=75	-6,4592433894037
N=100	-6,5354023311090
N=200	-6,4591946411763
N=300	-6,4568111930170
N=350	-6,4592721534250
Аналитическое значение	-6,4901180511412

Выводы

1. Предложен новый полуаналитический метод в задаче обтекания крылового профиля с острой задней кромкой однородным потоком идеальной несжимаемой жидкости. В основу нашего подхода положен метод ГИУ для непрерывного потенциального потока с добавлением двух точечных вихрей, сосредоточенных внутри граничного контура профиля. Это позволяет занулить обе компоненты скорости на острой кромке, что соответствует постулату Жуковского – Чаплыгина.

2. Метод апробирован на двух профилях сложной формы, отличающихся тем, что в окрестности острой задней кромки касательные к верхней и нижней граням профиля практически совпадают. Как известно из литературы, это доставляет сильную неустойчивость прямым численным методам. Предложенный нами метод с успехом преодолевает это препятствие и дает устойчивое решение, которое довольно близко к известным аналитическим решениям для этих частных профилей.

Литература

1. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. М.: Наука, 1973. 830 с.

2. Katz J., Plotkin A. Low-Speed Aerodynamics: From Wing Theory to Panel Methods. Singapore: McGraw-Hill, 1991. 632 p.

3. Флетчер К. Численные методы на основе метода Галеркина. М.: Мир, 1988. 352 с.

4. Бреббия К., Теллес Ж., Вроубел Л. Методы граничных элементов. М.: Мир, 1987. 524 с.

5. Zienkiewicz O. C., Taylor R. L., Nithiarasu P. The Finite Element Method for Fluid Dynamics (7th ed.). New York: Butterworth-Heinemann, 2014. 584 p.

6. Power H., Wrobel L.C. Boundary Integral Methods in Fluid Mechanics. Southampton, England: COMP. Mech. Publ., 1995. 330 p.

7. Воронков Ю.С., Елманов И.М., Лежнев В.Г., Лежнев М.В., Карсян А.Ж., Потетюнко Э.Н. Задачи обтекания тел. Ростов н/Д.: Изд-во РГУПС, 2011. 284 с.

8. Greengard L., Rokhlin V. A fast algorithm for particle simulations // J. of Computational Physics. 1987. Vol. 73. P. 325–348.

9. Rokhlin V. Rapid solutions of integral equations of scattering theory in two dimensions // J. of Computational Physics. 1990. Vol. 86. P. 414–439.

10. Ying L., Biros G., Zorin D. A kernel-independent adaptive fast multipole algorithm in two and three dimensions // J. of Computational Physics. 2004. Vol. 196. P. 591–626.

11. Сумбатян М.А., Скалия А. Основы теории дифракции с приложениями в механике и акустике. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2013. 328 с.

12. Фабрикант Н.Я. Аэродинамика: общий курс. М.: Наука, 1964. 815 с.

References

1. Loitsyansky L.G. (1973). *Mechanics of liquid and gas*. Moscow, Nauka Publ., 830 p. (in Russian).

2. Katz J., Plotkin A. (1991). *Low-Speed Aerodynamics: From Wing Theory to Panel Methods*. Singapore, McGraw-Hill Publ., 632 p.

3. Fletcher K. (1988). *Numerical methods based on the Galerkin method*. Moscow, Mir Publ., 352 p. (in Russian).

4. Brebbia K., Telles J., Vroebel L. (1987). *Methods of boundary elements*. Moscow, Mir Publ., 524 p. (in Russian).

5. Zienkiewicz O.C., Taylor R. L., Nithiarasu P. (2014). *The Finite Element Method for Fluid Dynamics* (7th ed.). New York, Butterworth-Heinemann, 584 p.

6. Power H., Wrobel L.C. (1995). *Boundary Integral Methods in Fluid Mechanics*. Southampton, England, COMP. Mech. Publ., 330 p.

7. Voronkov Yu.S., Elmanov I.M., Lezhnev V.G., Lezhnev M. V., Karsyan A. Zh., Potetyunko E. N. (2011).

Problems of body flow. Rostov-on-Don, Rostov State University of Railway Transport Press, 284 p. (in Russian).

8. Greengard L., Rokhlin V. (1987). A fast algorithm for particle simulations. *Journal of Computational Physics*, vol. 73, pp. 325-348.

9. Rokhlin V. (1990). Rapid solutions of integral equations of scattering theory in two dimensions. *Journal of Computational Physics*, vol. 86, pp. 414-439.

10. Ying L., Biros G., Zorin D. (2004). A kernel-independent adaptive fast multipole algorithm in two and three dimensions. *Journal of Computational Physics*, vol. 196, pp. 591-626.

11. Sumbatyan M.A., Scalia A. (2013). *Fundamentals of the theory of diffraction with applications in mechanics and acoustics*. Moscow, FIZMATLIT Publ., 328 p. (in Russian).

12. Fabrikant N.Ya. (1964). *Aerodynamics: General course*. Moscow, Nauka Publ., 815 p. (in Russian).

Поступила в редакцию / Received

9 июня 2021 г. / June 9, 2021

УДК 539.3

doi 10.18522/1026-2237-2021-3-11-17

ОПТИМИЗАЦИЯ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ГЕНЕРАТОРА ИЗГИБНЫХ КОЛЕБАНИЙ С АКТИВНЫМ ПЬЕЗОМАГНИТНЫМ СЛОЕМ НА ОСНОВЕ СОЧЕТАНИЯ МЕТОДА КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ И ГЕНЕТИЧЕСКОГО АЛГОРИТМА

© 2021 г. До Тхань Бинь¹¹Донской государственный технический университет, Ростов-на-Дону, Россия

OPTIMIZATION OF A PIEZOELECTRIC GENERATOR OF FLEXURAL VIBRATIONS WITH AN ACTIVE PIEZOMAGNETIC LAYER BASED ON A COMBINATION OF THE FINITE ELEMENT METHOD AND A GENETIC ALGORITHM

Do Thanh Binh¹¹Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russia

До Тхань Бинь – аспирант, кафедра теоретической и прикладной механики, агропромышленный факультет, Донской государственный технический университет, пл. Гагарина, 1, г. Ростов-на-Дону, 344000, Россия, e-mail: dothanhbinh@mail.ru

Do Thanh Binh - Postgraduate, Department of Theoretical and Applied Mechanics, Agribusiness Faculty, Don State Technical University, Gagarina Sq., 1, Rostov-on-Don, 344000, Russia, e-mail: dothanhbinh@mail.ru

Конструкция пьезоэлектрического генератора (ПЭГ) для устройства накопления энергии оказывает значительное влияние на характеристики электромеханического преобразования. ПЭГ и оптимальный выбор его геометрических параметров являются важной предпосылкой для обеспечения эффективности электромеханического преобразования. В статье рассматривается модель ПЭГ на основе круглой трехслойной пластины в пакете ANSYS. Два пьезоактивных слоя – пьезоэлектрический и пьезомагнитный – приклеены на стальную подложку. Программа, построенная в пакете MATLAB, позволяет управлять скриптами ANSYS для нахождения зависимости коэффициента электромеханической связи от геометрических параметров объекта. Генетический алгоритм используется для определения максимального значения коэффициента электромеханической связи при изменении радиуса и толщины слоев в определенных пределах. Таким образом, определяется набор геометрических размеров для достижения наилучшей эффективности преобразования энергии ПЭГ. После применения алгоритма оптимизации коэффициент электромеханической связи увеличивается на 34 % по сравнению с результатами предыдущих исследований.

Ключевые слова: оптимизация, генетический алгоритм, пьезоэлектрики, пьезомагнетики, устройство сбора энергии.

The construction of the piezoelectric generator (PEG) for the energy storage device has a significant effect on the electromechanical conversion characteristics, and the optimal choice of its geometric parameters is an important prerequisite for ensuring efficiency of the electromechanical conversion. This article discusses a PEG model based on circular three-layer plate in the ANSYS package. Two piezoactive layers, piezoelectric and piezomagnetic, are glued to a steel substrate. The program built in the MATLAB package allows to control ANSYS scripts to find the dependence of the electromechanical coupling coefficient on the geometric parameters of the object. The genetic algorithm is used to determine the maximum value of the electromechanical coupling coefficient when changing the radius and thickness of the layers within certain limits. Thus, a set of geometric dimensions is determined to achieve the best PEG energy conversion efficiency. After applying the optimization algorithm, the electromechanical coupling coefficient increases by 34% in comparison with the results of previous studies.

Keywords: optimization, genetic algorithm, piezoelectrics, piezomagnetism, energy harvesting device.

Введение

В настоящее время производство и развитие источников так называемой зеленой энергии для замены источников энергии на основе ископаемого сырья являются неизбежной тенденцией. Помимо использования чистых источников энергии (ветер, солнечная радиация, гидроэнергетика и др.) сбор энергии из невозобновляемых источников энергии стал важной составляющей из-за растущего спроса на электроэнергию. В последние годы было проведено много исследований пьезоэлектрического генератора (ПЭГ) с применением пьезоматериалов. В [1–5] исследованы ПЭГ, использующие прямой пьезоэлектрический эффект пьезоэлектрических материалов для преобразования механической энергии в чистую электрическую.

Если ПЭГ содержит пьезомагнитный слой и находится в переменном магнитном поле, то под действием переменного поля пьезоэлектрический слой деформируется, что приводит к деформации пьезомагнитного слоя. За счет этого генерируется электрический ток. В [6] получена зависимость коэффициента электромеханической связи (КЭС) от геометрических размеров пьезоэлементов на основе расчета методом конечных элементов (МКЭ), реализованным в пакете ANSYS. Однако эти вычисления были выполнены в ограниченном диапазоне значений радиуса и толщины пьезопластины.

В настоящей работе рассматривается конечно-элементная модель ПЭГ, на основе которой оптимизируется эффективность преобразования энергии за счет максимизации КЭС при изменении геометрических параметров в рассматриваемых пределах. Генетический алгоритм (ГА) применен для нахождения максимального значения КЭС, определенного путем расчета частоты резонанса и антирезонанса. Пакет ANSYS используется в качестве инструмента для решения задачи численным методом. Создана программа для соединения MATLAB и ANSYS, позволяющая MATLAB обрабатывать численные данные, полученные программным обеспечением ANSYS.

Континуальная постановка задачи

Модель ПЭГ с использованием биморфной конфигурации составляется из металлической подложки, внешний радиус которой закреплен жестко или шарнирно (рис. 1). На неё с двух разных сторон наклеены пьезоэлектрический и пьезомагнитный слои. Верхняя и нижняя поверхности пьезоэлектрической пластины электродированы и подключены к внешней электрической цепи, связанной с накопле-

нием энергии. Гармоническое магнитное поле, созданное постоянными магнитами, установленными на вращающейся части машины, действует на пьезомагнитную пластину.

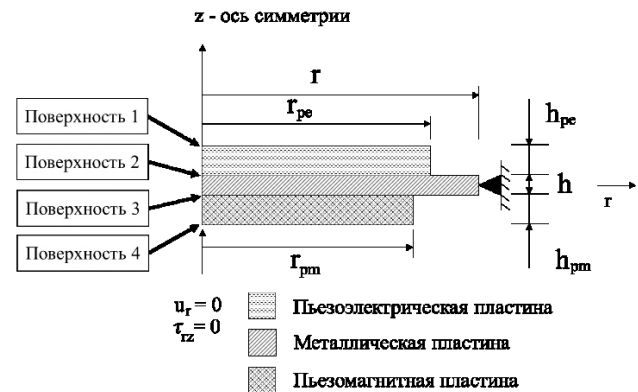


Рис. 1. Осевое сечение половины ПЭГ на основе круглого биморфа / Fig. 1. Axial section of half of the PEG based on a circular bimorph

На рис. 1 представлена половина осевого сечения конструкции преобразователя. Металлическая подложка (сталь) имеет толщину h и радиус r . Пьезоэлементы, поляризованные по толщине, имеют толщину и радиус соответственно: h_{pe} , r_{pe} (пьезоэлектрический слой), h_{pm} , r_{pm} (пьезомагнитный слой).

Общие уравнения и определяющие соотношения для пьезомагнитоэлектрического тела [7]:

$$\begin{aligned} \nabla \cdot \sigma + \rho f &= \rho \ddot{u}, \quad \nabla \cdot D = \sigma_\Omega, \quad \nabla \cdot B = 0, \\ \sigma &= c : \varepsilon - e^T \cdot E - h^T \cdot H, \\ D &= e : \varepsilon + k \cdot E + a \cdot H, \\ B &= h : \varepsilon + a^T \cdot E + \mu \cdot H, \\ \varepsilon &= \frac{1}{2} (\nabla u + (\nabla u)^T), \quad E = -\nabla \phi, \quad B = -\nabla \varphi. \end{aligned} \quad (1)$$

В (1) σ и ε – тензоры механических напряжений и деформации; D и E – векторы электрической индукции и напряженности электрического поля; B и H – векторы магнитной индукции и напряженности магнитного поля; ρ – плотность материала; c – тензор упругих модулей; e – тензор пьезоэлектрических модулей; h – тензор пьезомагнитных модулей; k – тензор диэлектрических проницаемостей; a – тензор магнитоэлектрических модулей; μ – тензор магнитных проницаемостей; f – вектор плотности массовых сил; σ_Ω – объемная плотность электрических зарядов; u – вектор перемещений; φ и ϕ – электрический и магнитный потенциалы.

При рассмотрении только пьезоэлектрической или пьезомагнитной среды соответствующие константы в (1) обнуляются.

Граничные условия определяются для механического, электрического и магнитного полей.

Сформулируем механические граничные условия. Пусть поверхность S состоит из двух частей: Γ_1 и Γ_2 , так что $S = \Gamma_1 \cup \Gamma_2$, причём $\Gamma_1 \cap \Gamma_2 = \emptyset$.

$$\mathbf{u} = \mathbf{U} \text{ на } \Gamma_1, \mathbf{n} \cdot \boldsymbol{\sigma} = \mathbf{p} \text{ на } \Gamma_2.$$

Электрические граничные условия. Пусть поверхность S состоит из двух частей: Γ_3 и Γ_4 , так что $S = \Gamma_3 \cup \Gamma_4$, причём $\Gamma_3 \cap \Gamma_4 = \emptyset$.

$$\phi = \phi(\mathbf{x}, t) \text{ на } \Gamma_3, \mathbf{n} \cdot \mathbf{D} = -\sigma_0 \text{ на } \Gamma_4,$$

где σ_0 – плотность поверхностных зарядов. Кроме того, если электроды подключены к внешней цепи, то электрический потенциал на них неизвестен и для его нахождения необходимо добавить два условия:

$$\phi|_{S_E} = v, \iint_{S_E} \mathbf{n} \cdot \mathbf{D} dS = I, \quad (2)$$

где S_E – площадь электрода; v – неизвестный потенциал, который находится из второго условия; I – электрический ток.

Магнитные граничные условия. Пусть поверхность S состоит из двух частей: Γ_5 и Γ_6 , так что $S = \Gamma_5 \cup \Gamma_6$, причём $\Gamma_5 \cap \Gamma_6 = \emptyset$.

$$\phi = \phi(\mathbf{x}, t) \text{ на } \Gamma_5, \mathbf{n} \cdot \mathbf{B} = \sigma_1 \text{ на } \Gamma_6,$$

где σ_1 – плотность магнитного потока.

Для упругого слоя подложки неизвестными являются компоненты вектора смещений $\mathbf{u}$, для пьезоэлектрического слоя к ним добавляется электрический потенциал ϕ , а для пьезомагнитного – магнитный потенциал ϕ , при этом соотношения (1) преобразуются обнулением соответствующих констант.

Конечно-элементное моделирование

В комплексе ANSYS построена конечно-элементная модель ПЭГ. Пьезоэлектрический слой и металлическая подложка моделируются, соответственно, конечными элементами PLANE13 и PLANE42. Конечный элемент PLANE13 также применяется для моделирования пьезомагнитного слоя с соответствующими материальными свойствами [6].

В табл. 1, 2 представлены константы материалов, используемых в расчетах: пьезоэлектрик – PZT-4, пьезомагнитный элемент – CoFe₂O₄ [8, 9]. Клеевые слои не учитываются.

Таблица 1

Материальные свойства пьезокерамики PZT-4
/ **Material properties of PZT-4 piezoceramics**

C_{11}^E	C_{12}^E	C_{13}^E	C_{33}^E	C_{44}^E
139	77,8	74,3	115	25,6
e_{31}	e_{33}	e_{15}	k_{11}/ϵ_0	k_{33}/ϵ_0
-5,2	15,1	12,7	730	635

В табл. 1 C_{ij}^E , ГПа – модули упругости; e_{ij} , Кл/м² – пьезоэлектрические постоянные; k_{ij} и ϵ_0 – диэлектрическая проницаемость; $\epsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12}$ Ф/м. Плотность пьезокерамики PZT-4: $\rho = 7500$ кг/м³.

Таблица 2

Материальные свойства пьезомагнитного элемента CoFe₂O₄
/ **Material properties of the piezomagnetic element CoFe₂O₄**

C_{11}^M	C_{12}^M	C_{13}^M	C_{33}^M	C_{44}^M
286	173	170	269,5	45,3
Q_{31}	Q_{33}	Q_{15}	λ_{11}	λ_{33}
580,3	699,7	550	$5,9 \cdot 10^{-4}$	$1,57 \cdot 10^{-4}$

В табл. 2 C_{ij}^M , ГПа – модули упругости; Q_{ij} , Н/Ам – пьезомагнитные коэффициенты; λ_{ij} , 10^{-6} Нс²/Кл² – магнитная проницаемость. Плотность пьезомагнитного элемента CoFe₂O₄ $\rho = 5290$ кг/м³.

Изотропные материалы характеризуются упругими свойствами, такими как модуль Юнга E и коэффициент Пуассона ν . Для стали $E = 200$ ГПа, $\nu = 0,29$, плотность $\rho = 7860$ кг/м³.

Для достижения достаточной точности в расчетах размер конечного элемента металлического слоя установлен значением не выше 1/5 его толщины, размер конечного элемента пьезослоев определяется автоматически.

При анализе собственных колебаний ПЭГ предполагается выполнение следующих механических и электромагнитных граничных условий: на левом конце заданы условия симметрии, правый конец жестко или шарнирно закреплен, как указано на рис. 1. Для вычисления частоты резонанса устройства электрические потенциалы заданы на поверхностях 1, 2; магнитный потенциал и плотность магнитного потока – на поверхностях 3, 4. В случае вычисления частоты антирезонанса устройства на всех поверхностях заданы такие же

граничные условия, как для вычисления частоты резонанса, однако электрический потенциал на поверхности 1 неизвестен и для его определения дополнительно используется условие (2).

Оптимизация эффективности преобразования энергии ПЭГ

Интерфейс между пакетами MATLAB и ANSYS для расчета коэффициента электромеханической связи. Важнейшей характеристикой ПЭГ с пьезоактивными элементами является КЭС, определяемый по формуле

$$k = \sqrt{1 - \frac{(f_r)^2}{(f_a)^2}}, \quad (3)$$

где f_a – частота антирезонанса; f_r – частота резонанса.

Вычисление КЭС повторяется много раз в соответствии с различными значениями входных геометрических параметров, что занимает много времени. Таким образом, в этой работе предлагается программа в пакете MATLAB, которая позволяет получить доступ к ANSYS для вычисления частоты колебания в качестве основы для расчета коэффициента k по формуле (3).

На рис. 2 показаны последовательности вычисления коэффициента k , выполняемые при объединении MATLAB и ANSYS. Геометрические параметры ПЭГ представляют собой переменные величины, поэтому могут быть введены в программное обеспечение MATLAB и сохранены в текстовом файле в формате inp (parameter.inp). Исполняемый файл в формате bat (launch.bat) позволяет запускать программное обеспечение ANSYS и выполнять код, предварительно созданный как текст с расширением mac (modeling.mac), для расчета частоты резонанса и антирезонанса на основе входных параметров, сохраненных в файле parameter.inp. Результаты вычисления сохраняются в виде текста, что позволяет MATLAB получать к ним доступ и преобразовывать в числовой формат.

В работе [6] рассмотрены поперечные колебания круглого биморфа с пьезоэлектрическим и пьезомагнитным слоями. Размеры подложки постоянные: радиус подложки $r = 10$ мм, толщина $h = 0,1$ мм; пьезослой имеют одинаковые размеры: $r_p = 6,8 \div 9,8$ мм, $h_p = 0,3 \div 0,7$ мм. Анализ показывает, что КЭС достигает максимального значения ($k = 0,313$) в заданной области изменения параметров при $h_p = 0,3$, $r_p = 9,8$ мм.

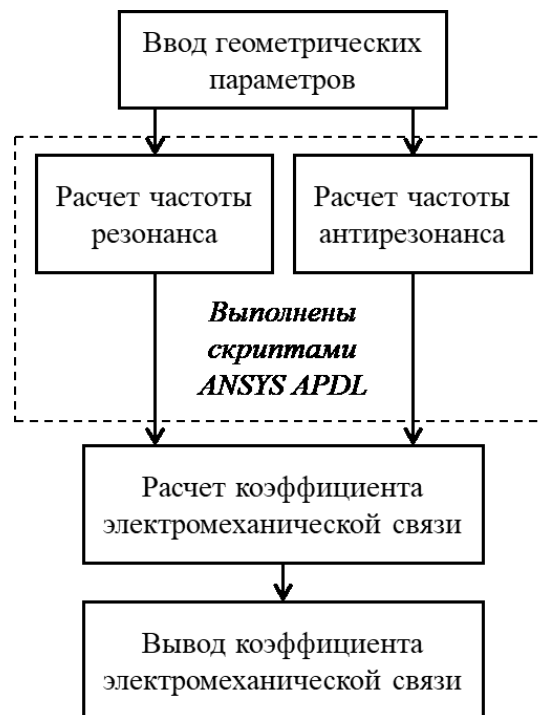


Рис. 2. Блок-схема модуля для расчета КЭС
/ Fig. 2. Block diagram of the module for calculating the electromechanical coupling coefficient

В настоящей работе КЭС вычисляется в программе, соединяющей MATLAB и ANSYS. Результаты расчетов автоматически синтезируются и упорядочиваются в виде таблиц и графиков, что упрощает процесс оценки и анализа. КЭС рассчитывается как функция и реализуется в среде MATLAB, что также позволяет применять современные алгоритмы, доступные в MATLAB, для решения задач оптимизации.

Взаимодействие ГА с модулем расчета. ГА можно использовать для задач, которые трудно решить обычными методами оптимизации [10], например, когда искомая целевая функция является разрывной, нелинейной, не имеет производных [11]. ГА может полностью применяться к решению задач дискретной оптимизации [12].

На рис. 3 изображена блок-схема ГА, в которой модуль для расчета КЭС участвует в качестве фитнес-функции. После создания исходной популяции (набор геометрических параметров ПЭГ) значение КЭС определяется расчетным модулем, описанным выше, как функция в MATLAB. Проверяются условия остановки итерации. Если ни одно из условий не выполняется, итерация продолжится с этапов гибридизации или мутации для создания новой популяции и вернется для вычисления значения КЭС, соответствующего новым геометрическим параметрам. В

противном случае, если одно из условий выполняется или количество итераций достигает заданного предельного значения, процесс завершается и выбирается наилучшее значение КЭС.

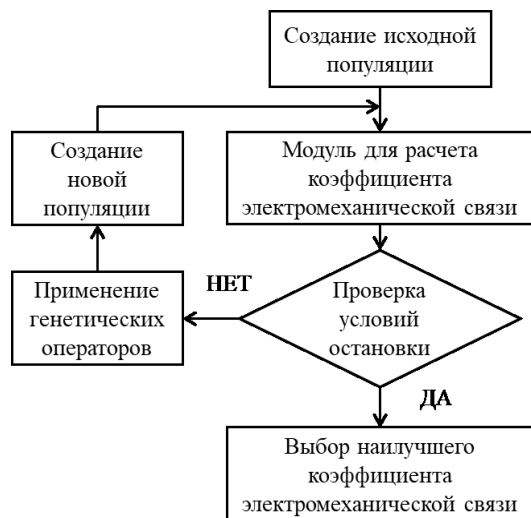


Рис. 3. Блок-схема ГА / Fig. 3. GA block diagram

Результаты. Эффективность преобразования энергии ПЭГ оптимизируется при изменении геометрических параметров в рассматриваемых пределах, т.е. значения геометрических размеров пластин ищутся для достижения наибольшего значения КЭС. Как и другие современные алгоритмы оптимизации, ГА позволяет найти минимальное значение фитнес-функции, которое зависит от множества раз-

личных переменных. Рассмотрим модель ПЭГ на основе круглых биморфов, показанную на рис. 1, в случае, когда одновременно изменяются радиус и толщина всех трех пластин (табл. 3).

Таблица 3

Диапазон размеров пластин / Range of plate sizes

Пластина	Толщина, мм	Радиус, мм
Металлическая	$h = 0,1 \div 0,5$	$r = 10 \div 15$
Пьезоэлектрическая	$h_{pe} = 0,3 \div 0,7$	$r_{pe} = 6,8 \div 9,8$
Пьезомагнитная	$h_{pm} = 0,3 \div 0,7$	$r_{pm} = 6,8 \div 9,8$

Поскольку по умолчанию в ГА ищется минимум фитнес-функции, то для нахождения максимального значения функции $k = f(r, h, r_{pe}, h_{pe}, r_{pm}, h_{pm})$ необходимо найти минимальное значение функции с обратным знаком $g = -f(r, h, r_{pe}, h_{pe}, r_{pm}, h_{pm})$. Результат (рис. 4) показывает, что $g_{min} = -0,419$ (т.е. $k_{max} = 0,419$), когда внешний радиус подложки шарнирно закреплен. Если внешний радиус закреплен жестко, то $g_{min} = -0,379$ (т.е. $k_{max} = 0,379$). Таким образом, в рассматриваемых пределах геометрических размеров эффективность преобразования энергии ПЭГ в случае шарнирно закрепленного внешнего радиуса подложки лучше, чем при жестком закреплении.

Зависимость КЭС от радиусов пьезопластин изображена на рис. 5 в случае, когда остальные размеры не изменяются и равны значениям при максимальном КЭС.

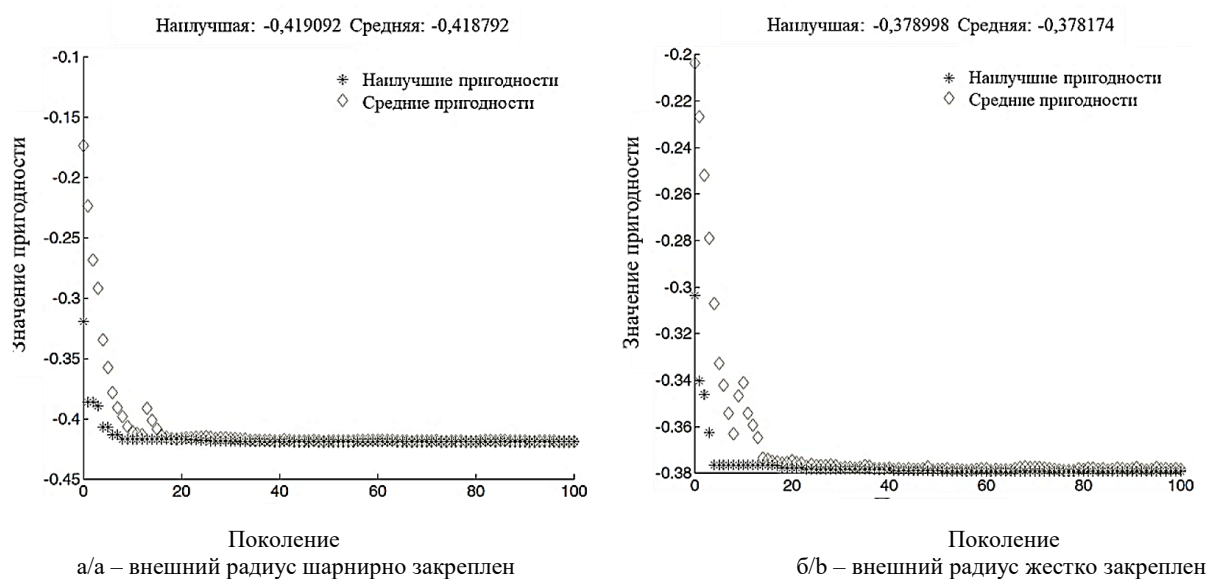
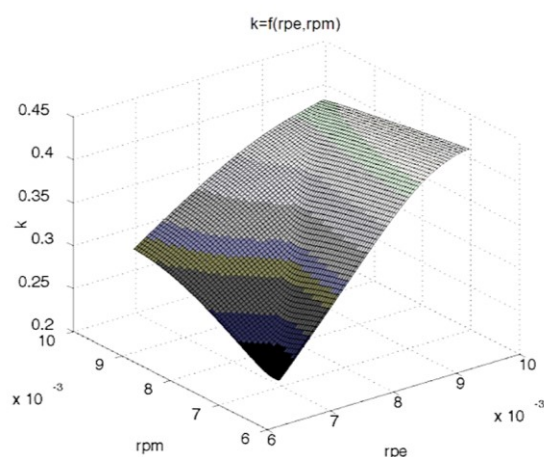
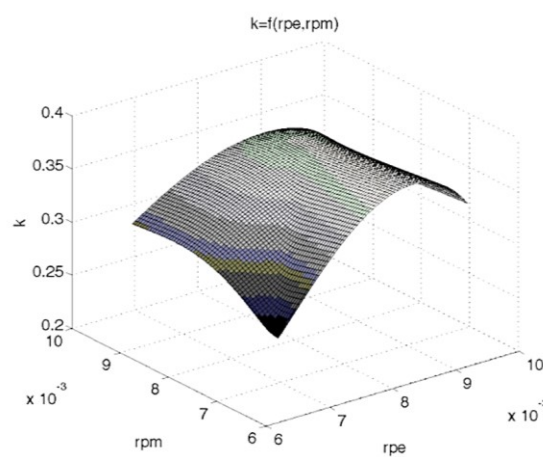


Рис. 4. График наилучшей и средней пригодности / Fig. 4. Graph of the best and mean fitnesses



Поколение
а/а – внешний радиус шарнирно закреплен



Поколение
б/б – внешний радиус жестко закреплен

Рис. 5. Зависимость k от радиусов пьезоэлементов / Fig. 5. Dependence of k on radiuses of piezoelements

Анализ рис. 4, 5 показывает, что целевая поверхность $k = f(r, h, r_{pe}, h_{pe}, r_{pm}, h_{pm})$ имеет несложную структуру и для определения максимума достаточно 40 поколений ГА.

Результаты расчетов также показывают, что КЭС достигает максимального значения при $r = 10,4$ мм, $h = 0,4$ мм, $r_{pe} = 9,8$ мм, $h_{pe} = 0,6$ мм, $r_{pm} = 6,9$ мм, $h_{pm} = 0,3$ мм, если внешний радиус металлического слоя шарнирно закреплен. По сравнению с результатами работы [6] толщина ПЭГ (суммарная толщина трех пластин) меняется с 7 до 13 мм (возрастает на 86 %), радиус (радиус наибольшей пластины) увеличивается с 10 до 10,4 мм (возрастает на 4 %). Однако КЭС также значительно увеличивается с 0,313 до 0,419 (возрастает на 34 %).

В том случае, когда внешний радиус жестко закреплен, максимальная величина КЭС ($k = 0,379$) достигается при следующих значениях геометрических параметров: $r = 10,6$ мм, $h = 0,2$ мм, $r_{pe} = 9,8$ мм, $h_{pe} = 0,6$ мм, $r_{pm} = 6,9$ мм, $h_{pm} = 0,3$ мм.

Заключение

В статье рассматривается осесимметричная конечно-элементная модель ПЭГ, состоящего из трех круглых пластин в пакете ANSYS. Активными элементами ПЭГ являются пьезослой (пьезоэлектрический и магнитный), клеенные на металлической подложке, внешний радиус которой жестко или шарнирно закреплен. Исследована эффективность преобразования энергии ПЭГ через КЭС, зависящий от геометрических характеристик. Программа, построенная в пакете MATLAB, позволяет рассчитывать КЭС с использованием МКЭ в пакете ANSYS.

ГА применяется для оптимизации КЭС при изменении размеров пластин в пределах рассматриваемого диапазона. Результаты расчетов показывают, что КЭС достигает максимального значения и увеличивается на 34 % по сравнению с результатами, полученными в работе [6], когда суммарная толщина слоев увеличивается на 86 %, а радиус самого большого слоя – на 4 % при шарнирном закреплении внешнего радиуса подложки.

Разработанное программное обеспечение, объединяющее конечно-элементный (ANSYS), математический (MATLAB) пакеты и модуль ГА, может быть использовано при оптимальном проектировании ПЭГ с пьезоэлектрическими и пьезомагнитными активными элементами.

Литература

1. Shevtsov S.N., Soloviev A.N., Parinov I.A., Cherpakov A.V., Chebanenko V.A. Piezoelectric Actuators and Generators for Energy Harvesting. Heidelberg, Springer, 2018. 182 p.
2. Solovyev A.N., Duong L.V. Optimization for the harvesting structure of the piezoelectric bimorph energy harvesters circular plate by reduced order finite element analysis // International Journal of Applied Mechanics. 2016. Vol. 8, No. 3. P. 1–17. Doi 10.1142/S1758825116500290.
3. Duong L.V., Pham M.T., Chebanenko V.A., Solovyev A.N., Chuong V. Nguyen Finite Element Modeling and Experimental Studies of Stack-Type Piezoelectric Energy Harvester // International Journal of Applied Mechanics. 2017. Vol. 9, No. 6, P. 1–16. Doi 10.1142/S1758825117500843.
4. Soloviev A.N., Parinov I.A., Cherpakov A.V., Chebanenko V.A., Rozhkov E.V., Duong L.V. Analysis of the performance of the cantilever-type piezoelectric generator

based on finite element modeling // *Advances in Structural Integrity*. 2018. P. 291–301. Doi 10.1007/978-981-10-7197-3_25.

5. Soloviev A., Oganessian P., Romanenko P., Van Duong L., Lesnjak O. Applied theory of the vibration of inhomogeneously polarized axisymmetric bimorph piezoelements // *Advanced Materials*. 2018. P. 353–362. Doi 10.1007/978-3-319-78919-4_26.

6. Соловьев А.Н., До Бинь Тх., Лесняк О.Н. Поперечные колебания круглого биморфа с пьезоэлектрическим и пьезомагнитным слоями // *Вестн. ДГТУ*. 2020. Т. 20, № 2. С. 118–124. Doi 10.23947/1992-5980-2020-20-2-118-124.

7. Kurbatova N.V., Nadolin D.K., Nasedkin A.V., Oganessian P.A., Soloviev A.N. Finite element approach for composite magneto-piezoelectric materials modeling in ACELAN-COMPOS // *Analysis and Modelling of Advanced Structures and Smart Systems*. Series “Advanced Structured Materials”. Vol. 81. H. Altenbach, E. Carrera, G. Kulikov (Eds.). Singapore: Springer. 2018. Ch. 5. P. 69–88. Doi 10.1007/978-981-10-6895-9_5.

8. Kim J.-Y. Micromechanical analysis of effective properties of magneto-electro-thermo-elastic multilayer composites // *International Journal of Engineering Science*. 2011. Vol. 49. P. 1001–1018. Doi 10.1016/j.ijengsci.2011.05.012.

9. Challagulla K.S., Georgiades A.V. Micromechanical analysis of magneto-electro-thermo-elastic composite materials with applications to multilayered structures // *International Journal of Engineering Science*. 2011. Vol. 49. P. 85–104. Doi 10.1016/j.ijengsci.2010.06.025.

10. Баранов И.В., Ватульян А.О., Соловьев А.Н. Об одном генетическом алгоритме и его применении в обратных задачах идентификации упругих тел // *Вычислительные технологии*. 2006. Т. 11, № 3. С. 14–26.

11. Бураков М.В. Генетический алгоритм: теория и практика. СПб.: СПбГУАП, 2008. 164 с.

12. Батищев Д.И., Неймарк Е.А., Старостин Н.В. Применение генетических алгоритмов к решению задачи дискретной оптимизации. Н. Новгород: ННГУ им. Н. И. Лобачевского, 2007. 85 с.

References

1. Shevtsov S.N., Soloviev A.N., Parinov I.A., Cherpakov A.V., Chebanenko V.A. (2018). *Piezoelectric Actuators and Generators for Energy Harvesting*. Heidelberg, Springer, 182 p.

2. Solovyev A.N., Duong L.V. (2016). Optimization for the harvesting structure of the piezoelectric bimorph energy harvesters circular plate by reduced order finite element analysis. *International Journal of Applied Mechanics*, vol. 8, No. 3, pp. 1-17. Doi 10.1142/S1758825116500290.

3. Duong L.V., Pham M.T., Chebanenko V.A., Solovyev A.N., Chuong V. N. (2017). Finite Element Modeling and Experimental Studies of Stack-Type Piezoelectric Energy Harvester. *International Journal of Applied Mechanics*, vol. 9, No. 6, pp. 1-16. Doi 10.1142/S1758825117500843.

4. Soloviev A.N., Parinov I.A., Cherpakov A.V., Chebanenko V. A., Rozhkov E. V., Duong L. V. (2018). Analysis of the performance of the cantilever-type piezoelectric generator based on finite element modeling. *Advances in Structural Integrity*, pp. 291-301. Doi 10.1007/978-981-10-7197-3_25.

5. Soloviev A., Oganessian P., Romanenko P., Van Duong L., Lesnjak O. (2018). Applied theory of the vibration of inhomogeneously polarized axisymmetric bimorph piezoelements. *Advanced Materials*, pp. 353-362. Doi 10.1007/978-3-319-78919-4_26.

6. Soloviev A.N., Do Thanh Binh, O.N. Lesnjak (2020). Transverse vibrations of a circular bimorph with piezoelectric and piezomagnetic layers. *Vestnik of DGTU*, vol. 20, No. 2, pp. 118-124. Doi 10.23947/1992-5980-2020-20-2-118-124. (in Russian).

7. Kurbatova N.V., Nadolin D.K., Nasedkin A.V., Oganessian P.A., Soloviev A.N. (2018). Finite element approach for composite magneto-piezoelectric materials modeling in ACELAN-COMPOS. *Analysis and Modelling of Advanced Structures and Smart Systems*. Series “Advanced Structured Materials”. Vol. 81. H. Altenbach, E. Carrera, G. Kulikov (Eds.). Springer, Singapore, ch. 5, pp. 69-88. Doi 10.1007/978-981-10-6895-9_5.

8. Kim J.-Y. (2011). Micromechanical analysis of effective properties of magneto-electro-thermo-elastic multilayer composites. *International Journal of Engineering Science*, vol. 49, pp. 1001-1018. Doi 10.1016/j.ijengsci.2011.05.012.

9. Challagulla K.S., Georgiades A.V. (2011). Micromechanical analysis of magneto-electro-thermo-elastic composite materials with applications to multilayered structures. *International Journal of Engineering Science*, vol. 49, pp. 85-104. Doi 10.1016/j.ijengsci.2010.06.025.

10. Baranov I.V., Vatulyan A.O., Soloviev A.N. (2006). About genetic algorithm and its application in inverse problems of identification of elastic objects. *Vychislitel'nye tehnologii*, vol. 11, No. 3, pp. 14-26. (in Russian).

11. Burakov M.V. (2008). *Genetic algorithm: theory and practice*. Saint Petersburg, St. Petersburg SUAI Press, 164 p. (in Russian).

12. Batishev D.I., Neymark E.A., Starostin N.V. (2007). *Application of genetic algorithms to the solution of the discrete optimization problem*. Nizhny Novgorod, Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod Press, 85 p. (in Russian).

УДК 517.95

doi 10.18522/1026-2237-2021-3-18-24

НЕЛОКАЛЬНАЯ КРАЕВАЯ ЗАДАЧА ДЛЯ ОДНОГО СМЕШАННОГО УРАВНЕНИЯ ТРЕТЬЕГО ПОРЯДКА

© 2021 г. А.Г. Езаова¹, Л.В. Канукоева¹, Г.В. Куповых²

¹Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова, Нальчик, Россия,

²Южный федеральный университет, Таганрог, Россия

NONLOCAL BOUNDARY VALUE PROBLEM FOR ONE MIXED THIRD ORDER EQUATION

A.G. Ezaova¹, L.V. Kanukoeva¹, G.V. Kupovykh²

¹Kabardino-Balkarian State University, Nalchik, Russia,

²Southern Federal University, Taganrog, Russia

Езаова Алена Георгиевна – кандидат физико-математических наук, доцент, Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова, ул. Чернышевского, 173, г. Нальчик, КБР, 360004, Россия, e-mail: alena_ezaova@mail.ru

Alena G. Ezaova - Candidate of Physics and Mathematics, Associate Professor, Berbekov Kabardino-Balkarian State University, Chernyshevskogo St., 173, Nalchik, KBR, 360004, Russia, e-mail: alena_ezaova@mail.ru

Канукоева Ляна Владимировна – кандидат физико-математических наук, доцент, Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова, ул. Чернышевского, 173, г. Нальчик, КБР, 360004, Россия

Liana V. Kanukoeva - Candidate of Physics and Mathematics, Associate Professor, Berbekov Kabardino-Balkar State University Chernyshevskogo St., 173, Nalchik, KBR, 360004, Russia, e-mail: alena_ezaova@mail.ru

Куповых Геннадий Владимирович – доктор физико-математических наук, профессор, Инженерно-технологическая академия, Южный федеральный университет, пер. Некрасовский, 44, г. Таганрог, 347928, Россия, e-mail: kupovykh@sfsedu.ru

Gennady V. Kupovykh - Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Academy for Engineering and Technologies, Southern Federal University, Nekrasovsky St., 44, Taganrog, 347928, Russia, e-mail: kupovykh@sfsedu.ru

Рассматривается нелокальная краевая задача для смешанного гипербола-параболического уравнения третьего порядка. Уравнение решается в конечной односвязной области, состоящей из гиперболической и параболической частей. Решение исследуется для различных значений параметра λ , находящегося в исходном уравнении. В случае, когда $\frac{1-2m}{2} < \lambda < 1$, решение сводится к сингулярному интегральному уравнению, которое известным методом Карлемана – Векуа редуцируется к интегральному уравнению Фредгольма третьего рода. В случае, когда $\lambda = \frac{1-2m}{2}$, сформулирована и доказана теорема о существовании и единственности решения. Для доказательства единственности решения применяется метод интегралов энергии и выводятся ограничения неравенственного типа на заданные функции, входящие в краевое условие. Показано, что однородная задача, соответствующая исходной, при выполнении условий теоремы единственности имеет только тривиальное решение во всей рассматриваемой области. Следовательно, исходная задача имеет единственное решение. При нарушении полученных ограничений на заданные функции задача не имеет единственного решения. При исследовании вопроса о существовании решения рассматривается система двух уравнений, состоящая из основных функциональных соотношений между следом искомой функции и следом ее производной, принесенных на линию вырождения $y = 0$. Исключая из системы функцию $\tau(x)$ – след искомого решения на линии вырождения, приходим к уравнению относительно следа производной искомой функции. При выполнении условия теоремы существования и единственности задача эквивалентно редуцируется к интегральному уравнению Фредгольма второго рода, безусловная разрешимость которого следует из единственности решения.

Ключевые слова: нелокальная краевая задача, смешанный тип уравнения, уравнения третьего порядка, конечная область, теорема о существовании и единственности, метод интегралов энергии, эквивалентная редукция, регулярное решение, интегральное уравнение Фредгольма второго рода, сингулярные интегральные уравнения, линия вырождения, метод Карлемана – Векуа.

The paper considers a nonlocal boundary value problem for a mixed hyperbolic-parabolic equation of the third order. The equation is considered in a finite simply connected domain consisting of a hyperbolic and a parabolic part. The solution to the problem posed is considered for various cases of the parameter λ , which is in the original equation. In the case when $\frac{1-2m}{2} < \lambda < 1$, the solution of the problem is reduced to a singular integral equation, which is reduced by the well-known Carleman-Vekua method to the Fredholm integral equation of the third kind. In the case when $\lambda = \frac{1-2m}{2}$, a theorem on the existence and uniqueness of a solution to the problem posed is formulated and proved. To prove the uniqueness of the solution, the method of energy integrals is used and inequalities of the type are derived on the given functions that are in the boundary condition. It is shown that the homogeneous problem corresponding to the original problem, under the conditions of the uniqueness theorem, has only a trivial solution in the entire considered domain. From which we can conclude that the original problem has only a single solution. If the obtained conditions for the given functions are violated, the problem posed does not have a unique solution. When investigating the question of the existence of a solution to the problem posed, a system of two equations is considered, consisting of the basic functional relations between the trace of the desired function and the traces of the derivative of the desired function, brought to the line of degeneration $y = 0$. Eliminating from the system the function $\tau(x)$ - the trace of the desired solution on the line of degeneration, we arrive at an equation for the trace of the derivative of the desired function. Under the condition of the existence and uniqueness theorem, the problem posed is equivalently reduced to the Fredholm integral equation of the second kind, the unconditional solvability of which follows from the uniqueness of the solution to the problem posed.

Keywords: nonlocal boundary value problem, mixed type of equation, third order equations, end area, existence and uniqueness theorem, energy integrals method, equivalent reduction, regular solution, Fredholm integral equation of the second kind, singular integral equations, degeneration line, Carleman-Vekua method.

Введение

Задачи со смещением возникают при рассмотрении вопросов, связанных с динамикой почвенной влаги, описании процесса излучения лазера и диффузии в трехкомпонентных системах, математическом моделировании задач газовой динамики, теории плазмы. Достаточно полная библиография по теории локальных и нелокальных задач для уравнений смешанного типа содержится в монографиях [1–7], а также в ряде статей [8–10]. Во всех этих работах исследованы в основном нелокальные краевые задачи для вырождающихся гиперболических уравнений и уравнений смешанного эллиптического-гиперболического типа как с одной, так и с двумя параллельными или перпендикулярными линиями изменения типа в плоскости и пространстве.

Уравнения смешанного гипербола-параболического типа второго и третьего порядка лежат в основе математических моделей различных природных явлений. Локальные и нелокальные краевые задачи для таких уравнений встречаются, например, при изучении движения жидкости, окруженной пористой средой, в канале, в теории распространения электромагнитных полей и в ряде других областей физики [11], при изучении математических моделей, описывающих влияние растительного покрова на теплообменные процессы в почве и приземном

воздухе, когда возникает необходимость исследования задачи для двух уравнений: уравнения Аллера переноса влаги, предполагающего бесконечную скорость распространения возмущения, и уравнения А.В. Лыкова, учитывающего конечную его скорость [12]. «Совместное движение различных несмачивающихся жидкостей в трещинах и пористых пластах, с учетом вязкоупругих характеристик движения вязкоупругой и вязкой жидкостей, в плоской горизонтальной трещине, без учета поверхностных явлений, описывается одномерным гиперболическим уравнением теплопроводности с интегро-дифференциальными условиями на границе раздела движущихся жидкостей» [13].

Постановка задачи

В евклидовом пространстве плоскости переменных x и y рассматривается уравнение

$$0 = \begin{cases} U_{xxx} - U_y, & y > 0, \\ y^{2m} U_{xx} + y U_{yy} + \lambda U, & y < 0, \end{cases} \quad (1)$$

λ – заданная постоянная, в односвязной области Ω , ограниченной отрезками AA_0 , A_0B_0 , B_0B прямых $x = 0$, $y = 1$, $x = 1$ при $y > 0$ соответственно и характеристиками

$$AC: x - \frac{2}{2m+1}(-y)^{\frac{2m+1}{2}} = 0;$$

$$BC: x + \frac{2}{2m+1}(-y)^{\frac{2m+1}{2}} = 1$$

уравнения (1) при $y < 0$; m – целое фиксированное натуральное число. Везде далее будем обозначать $\Omega_1 = \Omega \cap \{y > 0\}$, $\Omega_2 = \Omega \cap \{y < 0\}$; I – интервал $0 < x < 1$ линии $y = 0$;

$$\Theta_0(x) = \frac{x}{2} - i \left(\frac{2m+1}{4} x \right)^{\frac{2}{2m+1}};$$

$$\Theta_1(x) = \frac{1+x}{2} - i \left(\frac{2m+1}{4} (1-x) \right)^{\frac{2}{2m+1}}$$

– точки пересечения характеристик уравнения (1), выходящих из точки $(x, 0)$, с характеристиками AC , BC соответственно.

Задача. Найти функцию $U(x, y)$ со следующими свойствами:

1) $U(x, y) \in$

$$\in C(\bar{\Omega}) \cap C^1(\Omega) \cap C_{x,y}^{3,1}(\Omega_1) \cap C_{x,y}^{2,2}(\Omega_2);$$

2) $U(x, y)$ – регулярное в $\Omega_1 \cup \Omega_2$ решение уравнения (1);

3) $U(x, y)$ удовлетворяет краевым условиям:

$$U(0, y) = \varphi_1(y), \quad U(1, y) = \varphi_2(y),$$

$$U_x(0, y) = \varphi_3(y), \quad 0 \leq y \leq h, \quad (2)$$

$$\alpha(x)U[\Theta_0(x)] + \beta(x)U[\Theta_1(x)] = \gamma(x), \quad x \in \bar{I}, \quad (3)$$

$$\lim_{y \rightarrow 0+} U_y(x, y) = \lim_{y \rightarrow 0-} (-y)^\lambda U_y(x, y) = v(x), \quad (4)$$

$x \in I$.

Предполагается, что функция $v(x) \in C^2(I)$ при $x=0$ и $x=1$ может обращаться в бесконечность порядка меньше $1+2\varepsilon$, где $\varepsilon = \frac{2m-1+2\lambda}{2+4m}$; $\varphi_i(y) \in C[0, 1]$, $i = \overline{1, 3}$;

$$\alpha(x) = x^p \alpha_0(x); \quad p = \text{const} > 2\varepsilon,$$

$$\alpha_0(x), \beta(x), \gamma(x) \in C^3(\bar{I});$$

$$\left[\alpha(x)x^{p-\varepsilon}(1-x)^\varepsilon - \beta(x)\cos p\varepsilon, \right]^2 + \\ + \beta^2(x)\sin^2 p\varepsilon \neq 0, \quad \forall x \in \bar{I}.$$

Сформулированная задача относится к классу нелокальных краевых задач со смещением [2].

Хорошо известно, что простейшей моделью гиперболических уравнений второго порядка, тип и порядок которых вырождается на одном и том же $(n-1)$ -мерном континууме, является уравнение (1) при $y < 0$. Корректность задачи Коши и нелокальных краевых задач существенным образом зависит от значения коэффициента λ [14–17]. Будем рассматривать случаи, когда $1/2 - m \leq \lambda < 1$.

Основные результаты

Рассмотрим случай, когда $1/2 - m < \lambda < 1$.

Пусть существует решение задачи (1)–(4). Тогда регулярное в области Ω_2 решение уравнения (1) при $y < 0$, удовлетворяющее условиям

$$U(x, 0) = \tau(x), \quad \lim_{y \rightarrow 0-} (-y)^\lambda U_y(x, y) = v(x), \quad x \in I,$$

существует и единственно. Это решение дается формулой [14, 18]

$$U(x, y) = \frac{\Gamma(2\varepsilon)}{\Gamma^2(\varepsilon)} \times \\ \times \int_0^1 \tau \left[x + \frac{2(1-2t)}{2m+1} (-y)^{\frac{2m+1}{2}} \right] [t(1-t)]^{\varepsilon-1} dt - \\ - \frac{2}{m+2} \frac{\Gamma(2-2\varepsilon)}{\Gamma^2(1-\varepsilon)} (-y)^{1-\lambda} \times \\ \times \int_0^1 v \left[x + \frac{2(1-2t)}{2m+1} (-y)^{\frac{2m+1}{2}} \right] [t(1-t)]^{-\varepsilon} dt. \quad (5)$$

Подставляя в (5) значения $\Theta_0(x)$ и $\Theta_1(x)$ и проделав несложные преобразования, с учетом свойств операторов дробного интегро-дифференцирования [19, 20] получим

$$U[\Theta_0(x)] = \frac{\Gamma(2\varepsilon)}{\Gamma(\varepsilon)} x^{1-2\varepsilon} D_{0x}^{-\varepsilon} x^{\varepsilon-1} \tau(x) - \frac{1}{2} \times \\ \times \left(\frac{2m+1}{4} \right)^{-2\varepsilon} \frac{\Gamma(2-2\varepsilon)}{\Gamma(1-\varepsilon)} D_{0x}^{\varepsilon-1} x^{-\varepsilon} v(x), \quad (6)$$

$$U[\Theta_1(x)] = \frac{\Gamma(2\varepsilon)}{\Gamma(\varepsilon)} (1-x)^{1-2\varepsilon} D_{x1}^{-\varepsilon} (1-x)^{\varepsilon-1} \tau(x) - \\ - \frac{1}{2} \left(\frac{2m+1}{4} \right)^{-2\varepsilon} \frac{\Gamma(2-2\varepsilon)}{\Gamma(1-\varepsilon)} D_{x1}^{\varepsilon-1} (1-x)^{-\varepsilon} v(x),$$

где D_{0x}^l, D_{x1}^l – операторы дробного интегрирования порядка $-l$ при $l < 0$ и обобщенные в смысле Лиувилля производные порядка l при $l > 0$; l – любое действительное число.

Учитывая (6) в краевом условии (3) и проведя соответствующие преобразования, будем иметь [21]

$$\alpha(x) \int_0^x \frac{v(t)}{[t(x-t)]^\varepsilon} dt + \beta(x) \int_x^1 \frac{v(t)}{[(1-t)(t-x)]^\varepsilon} dt = \\ = \kappa_1 \left[\alpha(x) x^{1-2\varepsilon} \int_0^x \frac{\tau(t)}{[t(x-t)]^{1-\varepsilon}} dt + \right. \\ \left. + \beta(x) (1-x)^{1-2\varepsilon} \int_x^1 \frac{\tau(t)}{[(1-t)(t-x)]^{1-\varepsilon}} dt \right] + \kappa_2 \gamma(x), \quad (7)$$

$$\kappa_1 = 2 \left(\frac{2m+1}{4} \right)^{2\varepsilon} \frac{\Gamma^2(1-\varepsilon)\Gamma(2\varepsilon)}{\Gamma(2-2\varepsilon)\Gamma^2(\varepsilon)},$$

$$\kappa_2 = -2 \left(\frac{2m+1}{4} \right)^{2\varepsilon} \frac{\Gamma^2(1-\varepsilon)}{\Gamma(2-2\varepsilon)}.$$

Равенство (7) является основным функциональным соотношением между функциями $\tau(x)$ и $v(x)$, принесенным на линию $y=0$ из области Ω_2 .

Переходя в уравнении (1) к пределу при $y \rightarrow +0$ и учитывая краевые условия (2), получим задачу Коши относительно $\tau(x)$

$$\tau'''(x) = v(x), \quad (8)$$

$$\tau(0) = \varphi_1(0), \quad \tau(1) = \varphi_2(0), \quad \tau'(0) = \varphi_3(0).$$

Решая задачу (8) относительно $\tau(x)$, получим основное функциональное соотношение между функциями $\tau(x)$ и $v(x)$, принесенное из области Ω_1 [22–24]

$$\tau(x) = \frac{1}{2} \int_0^x (x-t)^2 v(t) dt - \frac{1}{2} x^2 \int_0^1 (1-t)^2 v(t) dt + f_1(x),$$

$$f_1(x) = (1-x^2)\varphi_1(0) + x^2\varphi_2(0) + (x-x^2)\varphi_3(0). \quad (9)$$

Подставляя (9) в правую часть равенства (7) и делая несложные преобразования, получим

$$\alpha(x) \int_0^x \frac{v(t)}{[t(x-t)]^\varepsilon} dt + \beta(x) \int_x^1 \frac{v(t)}{[(1-t)(t-x)]^\varepsilon} dt = \frac{1}{2} \kappa_1 \times$$

$$\begin{aligned} & \left[\alpha(x) x^{1-2\varepsilon} \times \right. \\ & \times \int_0^x \frac{dt}{[t(x-t)]^{1-\varepsilon}} \left(\int_0^t (t-z)^2 v(z) dz - \right. \\ & \left. \left. - t^2 \int_0^1 (1-z)^2 v(z) dz \right) + \right. \\ & \left. + \beta(x) (1-x)^{1-2\varepsilon} \int_x^1 \frac{dt}{[(1-t)(t-x)]^{1-\varepsilon}} \times \right. \\ & \left. \times \left(\int_0^t (t-z)^2 v(z) dz - t^2 \int_0^1 (1-z)^2 v(z) dz \right) \right] + \kappa_1 \times \\ & \times \left[\alpha(x) x^{1-2\varepsilon} \int_0^x \frac{f_1(t) dt}{[t(x-t)]^{1-\varepsilon}} + \right. \\ & \left. + \beta(x) (1-x)^{1-2\varepsilon} \int_x^1 \frac{f_1(t) dt}{[(1-t)(t-x)]^{1-\varepsilon}} \right] + \kappa_2 \gamma(x). \end{aligned}$$

После некоторых дополнительных преобразований последнее уравнение сводится к сингулярному интегральному уравнению вида [18]

$$\begin{aligned} & \pi(1-x)^{1-\varepsilon} S\varphi + 2B(1+\varepsilon, 2-\varepsilon) x^{p-\varepsilon} \alpha_0(x) \times \\ & \times \int_0^x F\left(\varepsilon, 1-\varepsilon, 2; \frac{x-t}{x(1-t)}\right) \frac{\varphi(t)}{t} dt = \kappa(x), \end{aligned}$$

где S – сингулярный оператор. Применяя метод Карлемана – Векуа [21, 25, 26], полученное сингулярное интегральное уравнение редуцируем к уравнению вида

$$\gamma_1(x)v(x) + \int_0^1 \frac{K(x, \xi)v(\xi)d\xi}{|x-\xi|^{2\varepsilon}} = F(x), \quad (10)$$

причем ядро $K(x, t)$ и функция $F(x)$ достаточно гладкие, ограниченные при $0 \leq x, t \leq 1$, соответственно. Уравнение (10) – интегральное уравнение Фредгольма третьего рода со слабой особенностью в ядре и непрерывной правой частью [21, 25, 26].

По найденному $v(x)$ определяется $\tau(x)$ из (9), а решение задачи (1)–(4) в области Ω_2 – как решение задачи Коши. В области Ω_1 решение задачи определяется по формуле [27].

$$U(x, y) = \int_0^y G_{\xi\xi}(x, y; 0, \eta) \varphi_1(\eta) d\eta -$$

$$- \int_0^y G_{\xi\xi}(x, y; 1, \eta) \varphi_2(\eta) d\eta -$$

$$- \int_0^y G_{\xi}(x, y; 0, \eta) \varphi_3(\eta) d\eta + \int_0^1 G(x, y; \xi, 0) \tau(\xi) d\xi,$$

где $G(x, y; \xi, \eta)$ – функция Грина задачи (1), (2), $U(x, 0) = \tau(x)$.

Далее рассмотрим случай $\lambda = (1-2m)/2$.

Теорема. Решение задачи (1)–(4) при $\lambda = \frac{1-2m}{2}$ существует и единственно, если выполняются условия:

$$\alpha^2(x) + \beta^2(x) \neq 0, \quad \alpha(x) \neq \pm\beta(x), \quad (11)$$

$$\frac{\alpha(1)}{\alpha(1)+\beta(1)} \geq 0, \quad \frac{\beta(0)}{\alpha(0)+\beta(0)} \geq 0, \quad \left(\frac{\beta(x)}{\alpha(x)} \right)' \geq 0.$$

Доказательство единственности

Если $\lambda = \frac{1-2m}{2}$, то регулярное в Ω_2 решение уравнения (1) выписывается в виде [14]

$$\begin{aligned} U(x, y) = & \frac{1}{2} \tau \left(x - \frac{2}{2m+1} (-y)^{\frac{2m+1}{2}} \right) + \\ & + \frac{1}{2} \tau \left(x + \frac{2}{2m+1} (-y)^{\frac{2m+1}{2}} \right) - \frac{2}{2m+1} \times \\ & \times (-y)^{\frac{2m+1}{2}} \int_0^1 v \left(x + \frac{2}{2m+1} (-y)^{\frac{2m+1}{2}} (1-2t) \right) dt. \end{aligned} \quad (12)$$

Подставляя в (12) значения $\Theta_0(x)$ и $\Theta_1(x)$, получим

$$U(\Theta_0(x)) = \frac{1}{2}[\tau(x) + \tau(0)] - \frac{1}{2} \int_0^x v(t) dt, \quad (13)$$

$$U(\Theta_1(x)) = \frac{1}{2}[\tau(x) + \tau(1)] - \frac{1}{2} \int_x^1 v(t) dt.$$

Учитывая (13) в краевом условии (3), получим основное функциональное соотношение между функциями $\tau(x)$ и $v(x)$, принесенное из гиперболической части Ω_2 области Ω на линию $y=0$, которое имеет вид

$$\alpha(x) \int_0^x v(t) dt + \beta(x) \int_x^1 v(t) dt = h(x)\tau(x) + g(x), \quad (14)$$

где

$$h(x) = \alpha(x) + \beta(x), \quad g(x) =$$

$$= \varphi_1(0)\alpha(x) + \varphi_2(0)\beta(x) - 2\gamma(x).$$

Уравнение (14) перепишем в виде

$$\tau(x) = \frac{\alpha(x)}{h(x)} \int_0^x v(t) dt + \frac{\beta(x)}{h(x)} \int_x^1 v(t) dt + \frac{g(x)}{h(x)}. \quad (15)$$

Докажем, что решение задачи (1)–(4) единственно при выполнении условий (11) теоремы единственности. Для этого с учетом однородных граничных условий покажем, что для интеграла справедливо неравенство

$$I = \int_0^1 \tau(x) v(x) dx \geq 0.$$

Выражение (15) умножим на $v(x)$ и проинтегрируем от 0 до 1. Получим

$$\begin{aligned} I &= \int_0^1 \tau(x) v(x) dx = \\ &= \int_0^1 \frac{\alpha(x)}{h(x)} v(x) dx \int_0^x v(t) dt + \\ &+ \int_0^1 \frac{\beta(x)}{h(x)} v(x) dx \int_x^1 v(t) dt. \end{aligned}$$

С учетом формул из [11, 26] получаем

$$\begin{aligned} v(x) \int_0^x v(t) dt &= \frac{1}{2} \left[\left(\int_0^x v(t) dt \right)^2 \right]', \\ v(x) \int_x^1 v(t) dt &= -\frac{1}{2} \left[\left(\int_x^1 v(t) dt \right)^2 \right]', \end{aligned}$$

тогда интеграл I принимает вид

$$\begin{aligned} I &= \frac{1}{2} \int_0^1 \frac{\alpha(x)}{h(x)} \left[\left(\int_0^x v(t) dt \right)^2 \right]' \times \\ &\times dx - \frac{1}{2} \int_0^1 \frac{\beta(x)}{h(x)} \left[\left(\int_x^1 v(t) dt \right)^2 \right]' dx. \end{aligned}$$

Применяя формулу интегрирования по частям, после несложных преобразований будем иметь

$$\begin{aligned} I &= \frac{1}{2} \left(\frac{\alpha(1)}{h(1)} + \frac{\beta(0)}{h(0)} \right) \left(\int_0^1 v(t) dt \right)^2 - \\ &- \frac{1}{2} \int_0^1 \left(\frac{\alpha(x)}{h(x)} \right)' \left(\int_0^x v(t) dt \right)^2 dx + \\ &+ \frac{1}{2} \int_0^1 \left(\frac{\beta(x)}{h(x)} \right)' \left(\int_x^1 v(t) dt \right)^2 dx. \end{aligned}$$

Таким образом, при выполнении условий (10), (11) теоремы выполняется неравенство

$$I = \int_0^1 \tau(x) v(x) dx \geq 0. \quad (16)$$

С другой стороны, переходя в уравнении (1) к пределу при $y \rightarrow +0$, получаем

$$v(x) = \tau'''(x). \quad (17)$$

Умножая последнее равенство на $\tau(x)$, а затем интегрируя от 0 до 1, с учетом однородных граничных условий получим

$$I = \int_0^1 \tau(x) v(x) dx = -\frac{[\tau'(1)]^2}{2} \leq 0. \quad (18)$$

С учетом (16) и (18)

$$I = \int_0^1 \tau(x) v(x) dx = 0.$$

Следовательно, $v(x) = 0$, $\forall x \in [0, 1]$. С учетом однородных граничных условий получаем, что $\tau(x) = 0$. Таким образом, $U(x, y) \equiv 0$ всюду в области Ω_2 как решение задачи Коши с нулевыми данными, а в области Ω_1 $U(x, y) \equiv 0$ как решение задачи (1), $U(x, y) = \tau(x) = 0$, $U(1, y) = 0$, $U(0, y) = 0$. Отсюда заключаем, что однородная задача, соответствующая рассматриваемой задаче, при выполнении условий (11) имеет только тривиальное решение во всей области Ω . Следовательно, исходная задача имеет единственное решение.

Доказательство существования решения

Подставим (9) в правую часть равенства (14), получим

$$\begin{aligned} \alpha(x) \int_0^x v(t) dt + \beta(x) \int_x^1 v(t) dt &= \\ &= h(x) \int_0^1 G(x, t) v(t) dt + n(x), \end{aligned} \quad (19)$$

где

$$G(x, t) = \begin{cases} \frac{1}{2}(x-t)^2 - \frac{1}{2}x^2(1-t)^2, & 0 \leq t < x; \\ -\frac{1}{2}x^2(1-t)^2, & x < t \leq 1, \end{cases}$$

$$n(x) = g(x) + h(x)f_1(x).$$

Из выражения (19) путем несложных преобразований приходим к уравнению относительно функции $v(x)$ вида

$$v(x) + p(x) \int_0^1 R(x, t) v(t) dt = q(x),$$

где

$$p(x) = \frac{1}{\beta(x) - \alpha(x)}, \quad q(x) = \frac{n'(x)}{\alpha(x) - \beta(x)},$$

$$R(x, t) =$$

$$= \begin{cases} h'(x)G(x, t) + h(x)G'_x(x, t) - \alpha'(x), & 0 \leq t < x; \\ h'(x)G(x, t) + h(x)G'_x(x, t) - \beta'(x), & x < t \leq 1. \end{cases}$$

Уравнение (19) есть интегральное уравнение Фредгольма второго рода, безусловная разрешимость которого следует из единственности решения поставленной задачи.

Заключение

Таким образом, исследована проблема однозначной разрешимости нелокальной краевой задачи для смешанного гипербола-параболического уравнения третьего порядка в конечной односвязной области. В зависимости от условий, накладываемых на коэффициент λ при искомой функции в исходном уравнении, выделены два случая. Первый, когда $\frac{1-2m}{2} < \lambda < 1$. Задача эквивалентно редуцируется к сингулярному интегральному уравнению, которое методом Карлемана – Векуа сводится к интегральному уравнению Фредгольма третьего рода. Второй, когда $\lambda = \frac{1-2m}{2}$. В работе сформулирована и доказана теорема о существовании и единственности решения поставленной задачи. При доказательстве существования задача эквивалентно редуцирована к интегральному уравнению Фредгольма второго рода. Показано, что при нарушении приведенных ограничений неравенственного типа на заданные функции единственность решения нарушается.

Литература

1. Бицадзе А.В. Некоторые классы уравнений в частных производных. М.: Наука, 1981. 448 с.
2. Нахушев А.М. Задачи со смещением для уравнений в частных производных. М.: Наука, 2006. 287 с.
3. Нахушев А.М. Новая краевая задача для вырождающегося гиперболического уравнения // Докл. Академии наук СССР. 1969. Т. 187, № 4. С. 736–739.
4. Нахушев А.М. О некоторых новых краевых задачах для гиперболических уравнений и уравнений смешанного типа // Диф. уравнения. 1969. Т. 5, № 1. С. 44–59.
5. Нахушев А.М. Уравнения математической биологии. М.: Высшая школа, 1995. 301 с.
6. Смирнов М.М. Уравнения смешанного типа. М.: Высшая школа, 1985. 304 с.
7. Салахитдинов М.С. Уравнения смешанно-ставного типа. Ташкент: Фан, 1974. 156 с.
8. Бжыхатлов Х.Г. Об одной краевой задаче для смешанных парабола-гиперболических уравнений с характеристической линией изменения типа // Диф. уравнения. 1977. Т. 13, № 1. С. 10–16.
9. Кумыкова С.К. О некоторых краевых задачах со смещением для уравнения Лаврентьева – Бицадзе // Диф. уравнения. 1973. Т. 9, № 1. С. 106–114.
10. Озаров И. Задача со смещением для гиперболического уравнения с нехарактеристическим вырождением на части границы // Диф. уравнения. 1982. Т. 18, № 1. С. 92–100.
11. Тихонов А.Н., Самарский А.А. Уравнения математической физики. М.: Наука, 1977. 735 с.
12. Трикоми Ф. О линейных уравнениях смешанного типа: пер. с итал. М.; Л.: Гостехиздат, 1947. 192 с.
13. Карташов Э.М. Аналитические методы в теории теплопроводности твердых тел. М.: Высшая школа, 1985. 480 с.
14. Бицадзе А.В. К теории уравнений смешанного типа, порядок которых вырождается вдоль линии изменения типа // Механика сплошных сред и родственные проблемы анализа. М., 1972. С. 42–47.
15. Езаова А.Г. Задача с нелокальными условиями на характеристиках для смешанного уравнения третьего порядка // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2009. № 3. С. 14–17.
16. Иргашев Б.Ю. Некоторые краевые задачи для уравнений третьего порядка с кратными характеристиками // Краевые задачи для дифференциальных уравнений и их приложения. Ташкент: Фан, 1976. С. 17–31.
17. Шхануков М.Х. О некоторых краевых задачах для уравнения третьего порядка, возникающих при моделировании фильтраций жидкости в пористых сферах // Диф. уравнения. 1982. Т. 18, № 4. С. 689–669.
18. Бжыхатлов Х.Г. Краевая задача для одного вырождающегося гиперболического уравнения и сингулярные интегральные уравнения третьего порядка // Диф. уравнения. 1971. Т. 7, № 1. С. 3–14.
19. Самко С.Г., Килбас А.А., Маричев О.И. Интегралы и производные дробного порядка и некоторые их приложения. Минск: Наука и техника, 1987. 688 с.
20. Лебедев Н.Н. Специальные функции и их приложения. М.: ТТИ, 1953. 379 с.
21. Бжыхатлов Х.Г., Карасев И.М., Лесковский И.П., Нахушев А.М. Избранные вопросы дифференциальных и интегральных уравнений. Нальчик: КБГУ, 1972. 290 с.
22. Матвеев Н.М. Методы интегрирования обыкновенных дифференциальных уравнений. М.: Высшая школа, 1967. 565 с.
23. Езаова А.Г. Об одной нелокальной задаче для уравнения смешанного типа третьего порядка // Изв. Кабардино-Балкарского гос. ун-та. 2011. Т. 1, № 4. С. 26–31.
24. Джураев Т.Д., Сопуев А., Мамаджанов М. Краевые задачи для уравнений парабола-гиперболического типа. Ташкент: Фан, 1986. 237 с.
25. Корзюк В.И., Лемешевский С.В., Матус П.П. Разрешимость задачи сопряжения гиперболического и параболического уравнений с интегро-дифференциальными условиями на границе раздела областей // Аналитические методы анализа и дифференциальных уравнений: тр. Ин-та математики НАН Беларуси. 2000. Т. 6. С. 100–108.
26. Кумыкова С.К. Краевая задача для одного вырождающегося гиперболического уравнения в характеристическом двуугольнике // Диф. уравнения. 1979. Т. 15, № 1. С. 79–91.
27. Елеев В.А., Кумыкова С.К. О некоторых краевых задачах со смещением на характеристиках для смешанного уравнения гипербола-параболического типа // Украинский мат. журн. 2000. Т. 52, № 5. С. 707–716.

References

1. Bitsadze A.V. (1981). *Some classes of partial differential equations*. Moscow, Nauka Publ., 448 p. (in Russian).
2. Nakhushev A.M. (2006). *Bias problems for partial differential equations*. Moscow, Nauka Publ., 287 p. (in Russian).
3. Nakhushev A.M. (1969). A new boundary value problem for a degenerate hyperbolic equation. *Dokl. Akad. emii nauk SSSR*, vol. 187, No. 4, pp. 736-739. (in Russian).
4. Nakhushev A.M. (1969). On some new boundary value problems for hyperbolic equations and equations of mixed type. *Dif. uravneniya*, vol. 5, No. 1, pp. 44-59. (in Russian).
5. Nakhushev A.M. (1995). *Equations of mathematical biology*. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 301 p. (in Russian).
6. Smirnov M.M. (1985). *Mixed type equations*. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 304 p. (in Russian).
7. Salakhitdinov M.S. (1974). *Mixed-composite equations*. Tashkent, Fan Publ., 156 p. (in Russian).
8. Bzhikhatlov Kh.G. (1977). On a boundary value problem for mixed parabolic-hyperbolic equations with a characteristic line of change in type. *Dif. uravneniya*, vol. 13, No. 1, pp. 10-16. (in Russian).
9. Kумыkova S.K. (1973). On some boundary value problems with displacement for the Lavrent'ev-Bitsadze equation. *Dif. uravneniya*, vol. 9, No. 1, pp. 106-114. (in Russian).
10. Ozarov I. (1982). Problem with displacement for a hyperbolic equation with non-characteristic degeneration on a part of the boundary. *Dif. uravneniya*, vol. 18, No. 1, pp. 92-100. (in Russian).
11. Tikhonov A.N., Samarsky A.A. (1977). *Equations of mathematical physics*. Moscow, Nauka Publ., 735 p. (in Russian).
12. Tricomi F. (1947). *On linear equations of mixed type*. Moscow, Leningrad, Gostekhizdat Publ., 192 p. (in Russian).
13. Kartashov E.M. (1985). *Analytical methods in the theory of thermal conductivity of solids*. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 480 p. (in Russian).
14. Bitsadze A.V. (1972). To the theory of equations of mixed type, the order of which degenerates along the line of change of type. *Continuum mechanics and related problems of analysis*. Moscow, pp. 42-47. (in Russian).
15. Ezaova A.G. (2009). Problem with nonlocal conditions on characteristics for a mixed third-order equation. Proceedings of higher educational institutions. *Izv. vuzov. Sev.-Kavk. region. Estestv. nauki (Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science)*, No. 3, pp. 14-17. (in Russian).
16. Irgashev Yu. (1976). Some boundary value problems for third order equations with multiple characteristics. *Boundary value problems for differential equations and their applications*. Tashkent, Fan Publ., pp. 17-31. (in Russian).
17. Shkhanukov M.Kh. (1982). On some boundary value problems for a third-order equation arising in the simulation of fluid filtration in porous spheres. *Dif. uravneniya*, vol. 18, No. 4, pp. 689-669. (in Russian).
18. Bzhikhatlov Kh.G. (1971). A boundary value problem for one degenerate hyperbolic equation and singular integral equations of the third order. *Dif. uravneniya*, vol. 7, No. 1, pp. 3-14. (in Russian).
19. Samko S.G., Kilbas A.A., Marichev O.I. (1987). *Integrals and derivatives of fractional order and some of their applications*. Minsk, Nauka i tekhnika Publ., 688 p. (in Russian).
20. Lebedev N.N. (1953). *Special functions and their applications*. Moscow, TTI Press, 379 p. (in Russian).
21. Bzhikhatlov Kh.G., Karasev I.M., Leskovsky I.P., Nakhushev A.M. (1972). *Selected questions of differential and integral equations*. Nalchik, KBSU Press, pp. 78-94. (in Russian).
22. Matveev V.N. (1967). *Methods of integration of ordinary differential equations*. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 565 p. (in Russian).
23. Ezaova A.G. (2011). On a nonlocal problem for a third-order mixed-type equation. *Izv. Kabardino-Balkarskogo gos. un-ta*, vol. 1, No. 4, pp. 26-31. (in Russian).
24. Dzshuraev T.D., Sopuev A., Mamadzhanov M. (1986). *Boundary value problems for equations of parabolic-hyperbolic type*. Tashkent, Fan Publ., 237 p. (in Russian).
25. Korzyuk V.I., Lemeshevsky S.V., Matus P.P. (2000). Solvability of the problem of conjugation of hyperbolic and parabolic equations with integro-differential conditions at the interface of the domains. *Analytical methods and differential equations. Proceedings of the Institute of Mathematics, Belarus National Academy of Sciences*, vol. 6, pp. 100-108. (in Russian).
26. Kумыkova S.K. (1979). A boundary value problem for a single degenerate hyperbolic equation in a characteristic biconvex. *Dif. uravneniya*, vol. 15, No. 1, pp. 79-91. (in Russian).
27. Eleev V.A., Kумыkova S.K. (2000). On some boundary value problems with displacement on characteristics for a mixed equation of hyperbolic-parabolic type. *Ukrainskii mat. zhurn.*, vol. 52, No. 5, pp. 707-716. (in Russian).

УДК 532.685

doi 10.18522/1026-2237-2021-3-25-31

ОБ ОСНОВНЫХ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЯХ И ПРИБЛИЖЕННОМ МЕТОДЕ ТЕОРИИ ФИЛЬТРАЦИИ

© 2021 г. А.А. Мусина¹¹Актюбинский региональный университет им. К. Жубанова, Актобе, Казахстан

BASIC MATHEMATICAL MODELS AND AN APPROXIMATE METHOD OF FILTRATION THEORY

A.A. Mussina¹¹Zhubanov Aktobe Regional University, Aktobe, Republic of Kazakhstan

Мусина Алла Александровна – магистр, Актюбинский региональный университет им. К. Жубанова, пр. А. Молдагуловой, 34, г. Актобе, 030000, Республика Казахстан, e-mail: alla.mussina@mail.ru

Alla A. Mussina - Master, Zhubanov Aktobe Regional University, A. Moldagulovoi Ave., 34, Aktobe, 030000, Republic of Kazakhstan, e-mail: alla.mussina@mail.ru

Определены основные понятия теории фильтрации, дан обзор существующих математических моделей неоднородных жидкостей в пористых средах. Рассмотрена задача Стефана. Количество научных работ, посвященных исследованию пористых структур, в последнее время увеличилось. Это связано с тем, что обозначились проблемы добычи нефти и урана, назрело решение экологических проблем. Поэтому требуется новый аппарат для разработки моделей фильтрации жидкостей. С появлением и развитием вычислительной техники стало проще решать задачи, которые требуют применения численных методов. Понимание движения флюидов и механизма растворения горных пород под действием кислот в гетерогенных пористых средах имеет огромное значение для добычи и производства нефти и эффективного управления этими процессами.

Исследована математическая модель теории изотермической фильтрации. Показаны возможные варианты разрешимости модели. Схема исследования состоит из вывода математической модели, постановки задачи, одного варианта решения, алгоритма численного метода решения задачи.

Ключевые слова: модель, изотермическая фильтрация, водонасыщенность, нефтенасыщенность, капиллярное давление, площадное заводнение, производные дробного порядка, задача Стефана, уравнения Маскета – Леверетта, пористость.

The article defines the basic concepts of filtration theory and provides an overview of the existing mathematical models of inhomogeneous liquids in porous media. The paper considers the Stefan problem. The number of scientific papers devoted to the study of porous structures has recently increased. This is primarily due to the fact that the problems of oil and uranium production have been identified, and the solution of environmental problems is overdue. Therefore, a new device is needed to develop models of liquid filtration. With the advent and development of computer technology, it has become easier to solve problems that require numerical methods for their solution. Understanding the movement of fluids and the mechanism of dissolution of rocks under the action of acids in heterogeneous porous media is of great importance for the extraction and production of oil and the effective management of these processes.

The article examines the mathematical model of the theory of isothermal filtration. Possible variants of the solvability of the model are shown. The research scheme consists of the output of a mathematical model, the formulation of the problem, one variant of the solution of the problem, the algorithm of the numerical method of solving the problem.

Keywords: model, isothermal filtration, water saturation, oil saturation, capillary pressure, areal flooding, fractional order derivatives, Stefan problem, Maske-Leverett equations, porosity.

Введение

Для решения современных проблем добычи нефти требуется создание и исследование новых математических моделей фильтрационных течений с учётом усложнённой структуры пористых сред. Для этого применяют линейный закон Дарси, обобщённый на случай анизотропной неоднородной пористой среды, характеризующейся тензором проницаемости. Компоненты тензора несимметричны и зависят от координат точки в среде. Возможность и необходимость использования такого обобщённого закона Дарси отмечены в работах Р. Коллинза. Однофазная задача Стефана является частным случаем двухфазной задачи Стефана, в которой температура одной из фаз тождественно равна постоянной температуре фазового перехода [1].

Обзор моделей

Н.Н. Веригиным впервые была предложена модель растворения твердого вещества из пористой среды одномерным фильтрационным потоком. В.С. Голубев и Г.Н. Кричевец разработали одномерную модель выщелачивания. В этой модели движущей силой реакции является разность между концентрацией раствора и текущей концентрацией компонента [2].

В макроскопических моделях каждая точка твердого скелета и жидкость в порах представляются как сплошная среда. Модели имеют сходные структуры и принципы. Р. Барридж и Дж. Б. Келлер были первыми исследователями, кто предложил описывать макроскопические математические модели фильтрации, опираясь на микроструктуру [2].

В 1937 г. была издана работа американского ученого М. Маскета. Корректность нелинейных краевых задач модели Маскета – Леверетта установлена в работах С.Н. Антонцева, В.Н. Монахова, А.В. Кажихова [2]. Численным исследованием этих задач занимались А.Н. Коновалов, Ж.Л. Коробицына, Б.И. Леви, Д.Ф. Пивень [3]. Кроме того, в [4] приведены некоторые данные с реального месторождения Каражанбас Мангистауской области.

Вывод математической модели

Задачи, в которых наряду с решениями дифференциальных уравнений необходимо найти и области, в которых определены рассматриваемые дифференциальные уравнения, называются задачами со свободными границами [5].

Вывод двумерных уравнений Маскета – Леверетта, проведенный в работе А.Н. Коновалова [6], будет дополнен учетом источников воды и нефти. Рассмотрим трехмерный случай с учетом гравитационных сил. Уравнение неразрывности с учетом пористости имеет вид

$$\frac{\partial m\rho}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho \mathbf{W}) = 0 \quad (1)$$

где $\mathbf{W}$ – вектор скорости фильтрации. По закону Дарси

$$\mathbf{W} = -\frac{k}{\mu} \operatorname{grad} \Phi, \quad (2)$$

где $\Phi = P + \rho gH$.

В случае постоянной пористости ($m = \text{const}$) система уравнений (1), (2) замыкается с помощью уравнения состояния $P = P(\rho)$, где ρ – плотность; P – давление; g – ускорение свободного падения; H – расстояние от рассматриваемой точки среды до некоторой фиксированной поверхности; μ – динамическая вязкость; k – проницаемость.

Рассмотрим совместное течение через пористую среду двух несмешивающихся жидкостей – нефти и воды. Насыщенность i -й фазы определится в этом случае как отношение $S_i = V_{\bullet,i} / V_{\bullet}$, $i=1, 2$.

Из этого следует, что $S_1 + S_2 = 1$.

Разность фазовых давлений – капиллярное давление $P_1 - P_2 = P_k(S)$, $S = S_2$.

Закон Дарси для многофазного течения имеет вид

$$\mathbf{W}_i = -k \frac{f_i(S)}{\mu_i} \operatorname{grad} \Phi_i, \quad i=1, 2, \quad (3)$$

где

$$\Phi_i = P_i + \rho_i g h, \quad i=1, 2, \quad (4)$$

$$f_1(S) = \begin{cases} 1 & 0 < S \leq \underline{S} \\ \left(\frac{\bar{S} - S}{\bar{S} - \underline{S}} \right)^3 & \underline{S} \leq S \leq \bar{S} \\ 0 & \bar{S} \leq S < 1 \end{cases} \quad (5)$$

$$f_2(S) = \begin{cases} 0 & 0 < S \leq \underline{S} \\ \left(\frac{S - \underline{S}}{\bar{S} - \underline{S}} \right)^3 & \underline{S} \leq S \leq \bar{S} \\ 1 & \bar{S} \leq S < 1, \end{cases}$$

$f_i(S)$ – относительные фазовые проницаемости, которые, как и капиллярное давление, определяются экспериментально [6].

Всюду ниже считаем обе жидкости несжимаемыми. Тогда из условия сохранения массы и учета источников воды и нефти получаем уравнения

$$m \frac{\partial S_i}{\partial t} + \operatorname{div} \mathbf{W}_i = q_i, \quad i=1, 2, \quad (6)$$

где S_1 – нефтенасыщенность; S_2 – водонасыщенность; q_i ($i=1, 2$) – соответствующие расходы нефти и воды.

Преобразуем уравнения (6). Подставим вместо $\mathbf{W}_i$ его значение из обобщенного закона Дарси (3):

$$-q_i + m \frac{\partial S_i}{\partial t} = \operatorname{div}(k_i \operatorname{grad} \Phi_i),$$

где $k_i = k \frac{f_i(S)}{\mu_i}$, $i=1, 2$.

Продифференцируем капиллярное давление $P_1 - P_2 = P_k(S)$, $S = S_2$ по t и учтем определение потенциала Φ_i из (4). Получим

$$\frac{\partial \Phi_1}{\partial t} - \frac{\partial \Phi_2}{\partial t} = P'_k(S) \frac{\partial S_2}{\partial t} = \frac{1}{S'} \frac{\partial S_2}{\partial t},$$

$$S' = \frac{dS}{dP_k}.$$

Так как $S_1 + S_2 = 1$, то $\frac{\partial S_1}{\partial t} + \frac{\partial S_2}{\partial t} = 0$.

Поэтому уравнения (6) преобразуются к виду

$$\begin{cases} -q_1 - mS' \left(\frac{\partial \Phi_1}{\partial t} - \frac{\partial \Phi_2}{\partial t} \right) = \operatorname{div}(k_1 \operatorname{grad} \Phi_1), \\ -q_2 + mS' \left(\frac{\partial \Phi_1}{\partial t} - \frac{\partial \Phi_2}{\partial t} \right) = \operatorname{div}(k_2 \operatorname{grad} \Phi_2). \end{cases} \quad (7)$$

В качестве искоемых функций выберем Φ , R :

$$\Phi = \frac{1}{2}(\Phi_1 + \Phi_2), \quad R = \frac{1}{2}(\Phi_1 - \Phi_2).$$

Пусть $M = k_1 + k_2$, $N = k_1 - k_2$.

Вычитая и складывая уравнения (7), получаем

$$\begin{cases} \operatorname{div} M \operatorname{grad} R + \\ + \operatorname{div} N \operatorname{grad} \Phi + q_1 - q_2 = \\ = -4mS' \frac{\partial R}{\partial t}, \\ \operatorname{div} N \operatorname{grad} R + \\ + \operatorname{div} M \operatorname{grad} \Phi + q_1 + q_2 = 0. \end{cases} \quad (8)$$

Математическая постановка задачи

Постановка задачи о фильтрации двухфазной несжимаемой жидкости в функциях Φ , R , а также в потенциалах Φ_i дана Дугласом, Писменом и Рэкфордом [2].

Введем вектор $\mathbf{q} = -(\mathbf{W}_1 + \mathbf{W}_2)$. Тогда

$$\mathbf{q} = k_1 \operatorname{grad} \Phi_1 + k_2 \operatorname{grad} \Phi_2 = M \operatorname{grad} \Phi + N \operatorname{grad} R$$

Подставим это выражение в первое из уравнений (8), одновременно заменив в правой части этого уравнения R на S . Получим

$$\operatorname{div} \frac{M^2 - N^2}{M} \operatorname{grad} R + \operatorname{div} \frac{N}{M} \mathbf{q} + q_1 - q_2 = -2m \frac{\partial S}{\partial t}$$

Из определения функции Баклея – Леверетта имеем

$$\varphi(S) = \frac{\mu_0 f_2(S)}{\mu_0 f_2(S) + f_1(S)}, \quad \mu_0 = \frac{\mu_1}{\mu_2}.$$

Отсюда $\frac{N}{M} = 1 - 2\varphi$.

Складывая уравнения (6) и учитывая, что $\frac{\partial S_1}{\partial t} + \frac{\partial S_2}{\partial t} = 0$, получаем $\operatorname{div} \mathbf{q} = -(q_1 + q_2)$.

Поэтому (8) принимает вид

$$\begin{aligned} & \frac{1}{2} \operatorname{div} \frac{M^2 - N^2}{M} \operatorname{grad} R - \frac{1 - 2\varphi}{2} (q_1 + q_2) - \\ & (\mathbf{q}, \operatorname{grad} \varphi) + \frac{1}{2} (q_1 - q_2) + m \frac{\partial S}{\partial t} = 0 \end{aligned}$$

Если исключить из рассмотрения гравитационные силы и учесть (3), то получим

$$m \frac{\partial S}{\partial t} - \operatorname{div}(\varphi \mathbf{q}) + \operatorname{div}(\varphi k_1 \operatorname{grad} P_k) - q_2 = 0 \quad (9)$$

Рассмотрим систему из уравнений (9) и 2-го из (8)

$$\begin{cases} m \frac{\partial S}{\partial t} - \operatorname{div}(\varphi \mathbf{q}) + \operatorname{div}(\varphi k_1 \operatorname{grad} P_k) - q_2 = 0 \\ \operatorname{div} N \operatorname{grad} R + \operatorname{div} M \operatorname{grad} \Phi + q_1 + q_2 = 0 \end{cases} \quad (10)$$

В качестве искоемых функций выберем S (водонасыщенность) и $\Phi = 0,5(P_1 + P_2)$ (суммарное давление).

Алгоритм численной реализации

Уравнения (10) решаются в два этапа [7]. На первом по заданному S_n из второго уравнения находится суммарное давление Φ_{n+1} , на втором – водонасыщенность S_{n+1} . Далее составлена программа, позволяющая проследить зависимость

вытеснения нефти от распределения водонасыщенности. На равномерной сетке $\{(x_i, y_j), x_i = i_h, y_j = j_h, i = 0, 30, j = 0, 20\}$ задаются 8 нагнетательных скважин с одинаковыми расходами воды q_2 (квадраты). В центре области находится эксплуатационная скважина с расходами нефти q_1 и воды q_2 , пропорциональными подвижности соответствующих фаз. Из (5) вычисляем $f_i(S)$. В процессе закачки воды распределение водонасыщенности имело вид, отображенный на рис. 1.

Из рис. 1 видно, что ее значение максимально в местах расположения нагнетательных скважин. Расчет был прерван при $t=0,2792$, шаг по времени $dt=0,000358$. В табл. 1 представлены значения в узлах (i, j) , где в силу симметрии $i=0$. $N_x/2, j=0$. $N_y/2$.

Соответствующее давление показано на рис. 2 и в табл. 2.

Далее было проведено моделирование фильтрации двухфазной несжимаемой жидкости на нерегулярной сетке. Для ее построения сначала на регулярной сетке расставляются скважины. Затем в параметрах сетки выставляем параметры нерегулярной сетки, а именно количество шагов от источника равно 1, количество узлов – 2. Это означает, что в одном шаге равномерной сетки вблизи скважин будут два узла или три отрезка. Причем чем ближе к источнику, тем меньше шаг.

Это приводит к существенному сгущению сетки вблизи скважин. Во время расчета программа выдала график водонасыщенности, изображенный на рис. 3. Приостановив расчет на определенный момент времени, сделали одномерный график, пред-

ставляющий собой разрез по линии, параллельной оси X, проходящей через добывающую и две нагнетательные скважины, как на рис. 4.

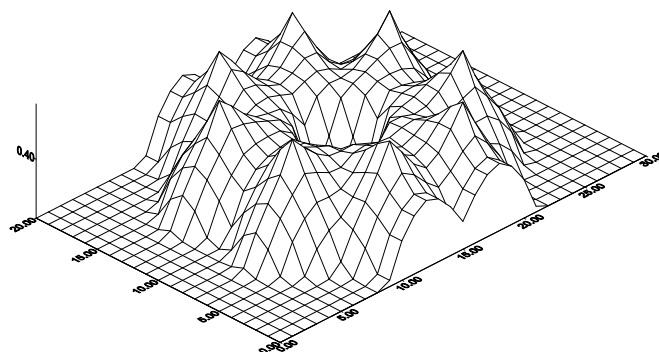


Рис. 1. Распределение водонасыщенности / Fig. 1. Water saturation distribution

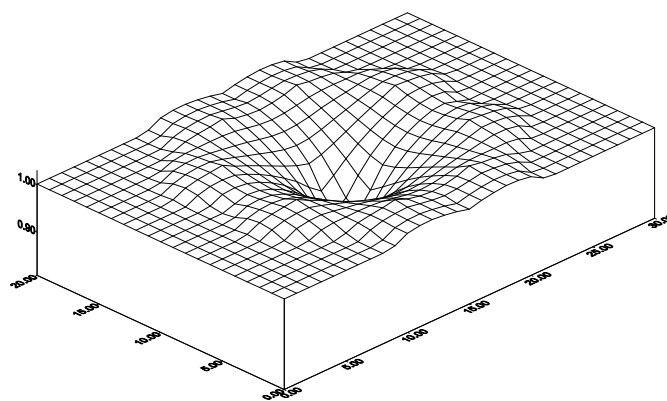


Рис. 2. Распределение давления / Fig. 2. Pressure distribution

Таблица 1

Водонасыщенность в узлах сетки / Water saturation in the grid nodes

I	J															
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
0	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,23	0,34	0,40	0,43	0,41	0,37	0,30
1	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,23	0,34	0,40	0,43	0,41	0,37	0,30
2	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,29	0,37	0,43	0,48	0,45	0,40	0,37
3	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,25	0,33	0,40	0,47	0,56	0,50	0,44	0,41
4	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,22	0,29	0,33	0,35	0,40	0,46	0,53	0,49	0,46	0,43
5	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,22	0,31	0,37	0,40	0,40	0,40	0,44	0,49	0,48	0,46	0,44
6	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,29	0,37	0,43	0,47	0,46	0,44	0,43	0,46	0,47	0,45	0,45
7	0,21	0,21	0,21	0,21	0,23	0,32	0,40	0,47	0,56	0,52	0,48	0,45	0,45	0,45	0,43	0,41
8	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,29	0,38	0,44	0,51	0,50	0,48	0,46	0,44	0,41	0,31	0,24
9	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,23	0,33	0,39	0,44	0,46	0,46	0,45	0,43	0,31	0,21	0,21
10	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,26	0,36	0,41	0,43	0,44	0,45	0,38	0,23	0,21	0,21

Таблица 2

Давление / Pressure

I	J															
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
0	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02	1,01
1	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02	1,01
2	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,01	1,02	1,02	1,03	1,02	1,02	1,01
3	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,01	1,02	1,02	1,02	1,03	1,02	1,01	1,01
4	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,01	1,02	1,02	1,02	1,02	1,01	1,01	1,00	1,00
5	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,02	1,02	1,02	1,02	1,01	1,01	1,00	1,00	0,99	0,99
6	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,01	1,02	1,02	1,02	1,02	1,01	1,00	0,99	0,98	0,97	0,97
7	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,02	1,02	1,03	1,03	1,02	1,00	0,99	0,98	0,96	0,95	0,94
8	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,01	1,02	1,02	1,02	1,01	1,00	0,98	0,96	0,94	0,92	0,90
9	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,02	1,02	1,01	1,00	0,99	0,97	0,95	0,92	0,89	0,87
10	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,01	1,02	1,01	1,00	0,99	0,97	0,94	0,90	0,87	0,81

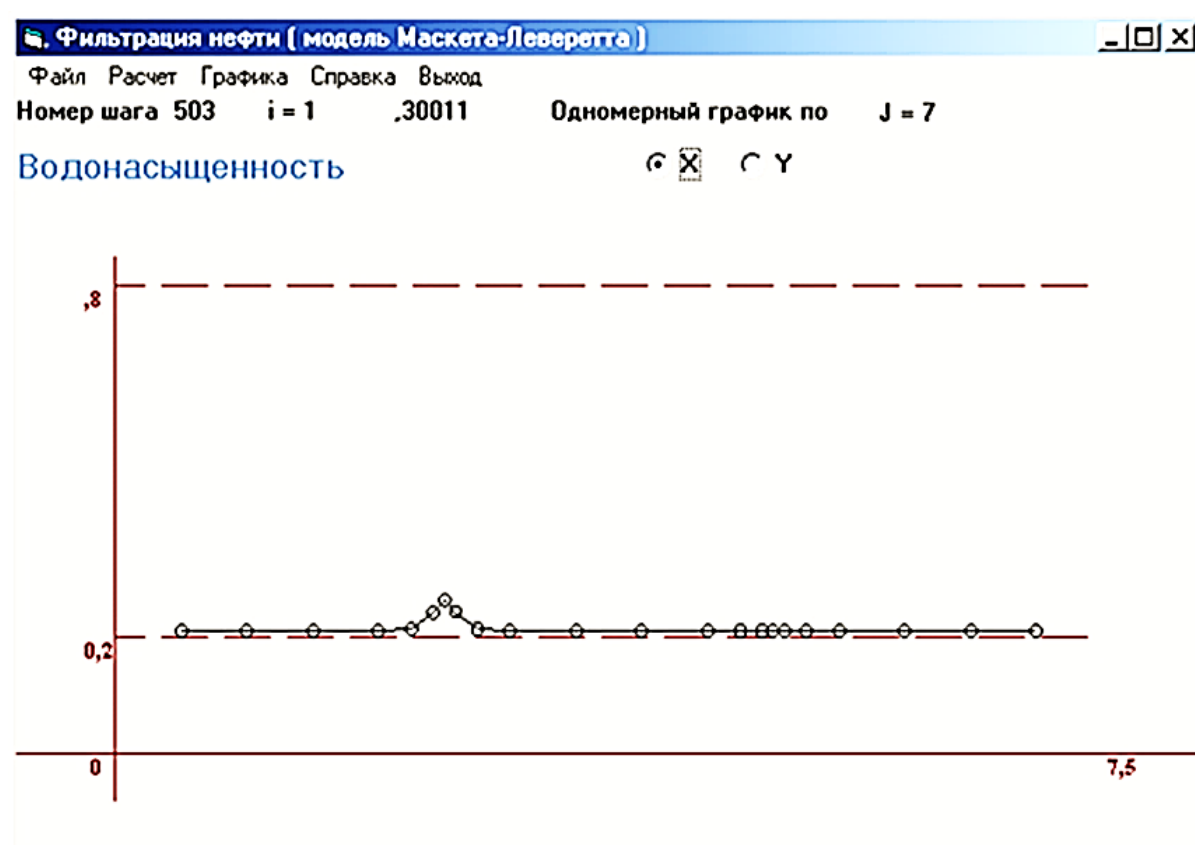


Рис. 3. График водонасыщенности / Fig. 3. Water saturation graph

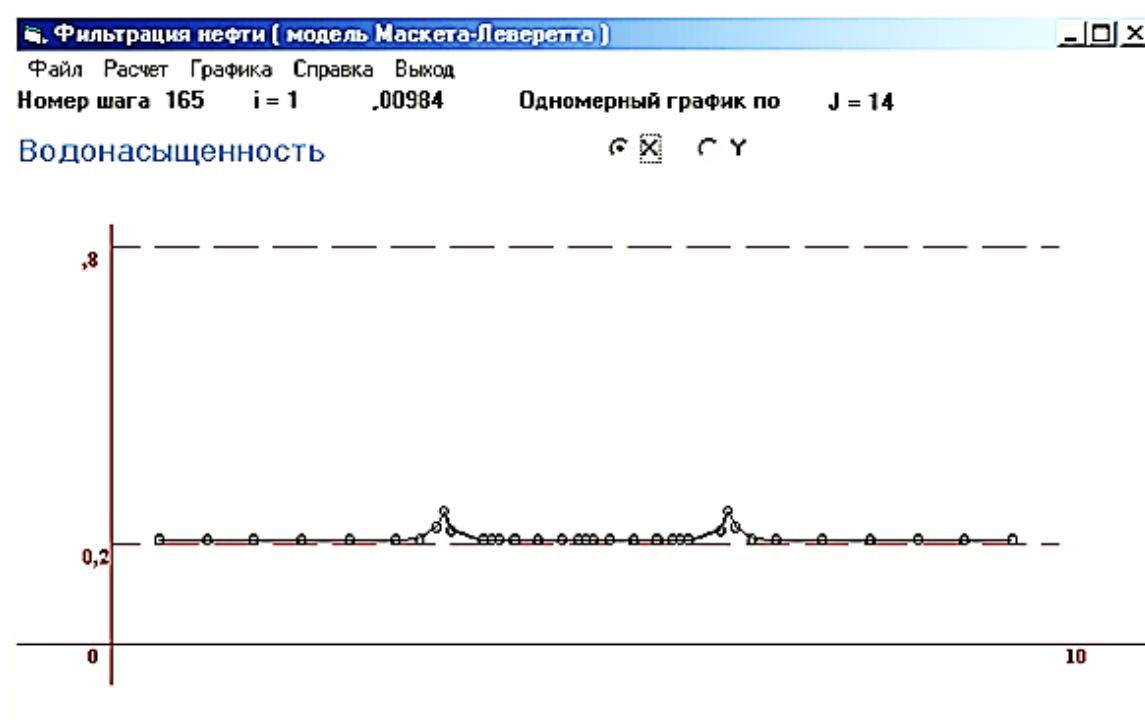


Рис. 4. Распределение водонасыщенности для нерегулярной сетки / Fig. 4. Water saturation distribution for an irregular grid

Выводы

Один из методов увеличения нефтеотдачи – заводнение нефтяных объектов. Вода, закачиваемая в пласт, выполняет две функции: поддержание пластового давления и вытеснение нефти к забоям добывающих скважин. Распределение водонасыщенности и нефтенасыщенности в этом случае, ввиду неоднородности коллектора, на разных участках объекта разработки существенно отличается. Это приводит к остаточным неизвлеченным запасам нефти. Существуют различные модели, которые позволяют оценить распределение этих остаточных запасов. Модели основаны на количественной оценке таких коэффициентов насыщенности.

Особенность данной изучаемой задачи заключается в том, что были построены вычислительные алгоритмы исходя из известных результатов работ [8], после этого были добавлены производные по времени от водонасыщенности.

При изучении данной математической модели исследованы также качественные свойства решений: асимптотическое поведение при неограниченном возрастании времени, периодичность по времени, автомодельность в двумерном случае. Эти свойства играют важную роль при построении вычислительных алгоритмов и численной реализации на ЭВМ конкретных задач.

Эксперимент показал, что использование нерегулярной сетки позволяет увеличить точность решения вблизи разрывов (скважин), не теряя при этом в скорости расчета. Это доказывает необходимость использования для такого рода задач нерегулярной сетки и устойчивой для такой сетки схемы переменных направлений.

Научная новизна: показаны возможные варианты разрешимости модели, реализована и экспериментально обоснована численная модель Маскета – Левретта, дополненная учетом источников воды и нефти.

Полученные результаты апробированы с реальными технологическими показателями нефтегазового месторождения Атырауской области Республики Казахстан. Для анализа, контроля и прогнозных расчетов вполне можно использовать полученные результаты. Предметом дальнейших исследований являются процессы неизотермической фильтрации.

Литература

1. Мейрманов А.М. Задача Стефана. Новосибирск: Наука, 1986. 239 с.
2. Багов Р.А., Цей Р. Об основных понятиях теории фильтрации и основных этапах ее развития // Вестн. Адыгейского гос. ун-та. Серия 4: Естественно-математические и технические науки. 2007. Т. 3, вып. 3. С. 266–267.

3. Пивень Д.Ф. Математические модели фильтрации жидкости. Орёл: Орловский гос. ун-т, 2015. 408 с.

4. Жумагулов Б.Т., Zubov H.B., Монахов В.Н., Смагулов Ш.С. Новые компьютерные технологии в нефтедобыче. Алматы: Гылым, 1996. 167 с.

5. Мейрманов А.М. О некоторых принципах моделирования задач фильтрации жидкости со свободной границей // Науч. ведомости. 2008. № 13. С. 58–72.

6. Коновалов А.Н. Задачи фильтрации многофазной несжимаемой жидкости. Новосибирск: Наука, 1988. 166 с.

7. Самарский А.А. Теория разностных схем. М.: Наука, 1989. 616 с.

8. Пеньковский В.И. Капиллярное давление, гравитационное и динамическое распределение фаз в системе вода – нефть – газ – порода // Прикладная механика и техн. физика. 1996. № 6. С. 20–30.

References

1. Meirmanov A.M. (1986). *Stefan's Problem*. Novosibirsk, Nauka Publ., 239 p. (in Russian).

2. Bagov R.A., Tsey R. (2007). On the basic concepts of the filtration theory and the main stages of its development. *Bulletin of the Adygeya State University, Series 4: Natural-Mathematical and Technical Sciences*, vol. 3, No. 3, pp. 266-267. (in Russian).

3. Piven D.F. (2015). *Mathematical models of liquid filtration*. Orel, Orel State University Press, 408 p. (in Russian).

4. Zhumagulov B.T., Zubov N.V., Monakhov V.N., Smagulov Sh. S. (1996). *New computer technologies in oil production*. Almaty, Gylym Publ., 167 p. (in Russian).

5. Meirmanov A.M. (2008). On some principles of modeling problems of liquid filtration with a free boundary. *Nauchnye vedomosti*, No. 13, pp. 58-72. (in Russian).

6. Kononov A.N. (1988). *Problems of filtration of a multiphase incompressible fluid*. Novosibirsk, Nauka Publ., 166 p. (in Russian).

7. Samarsky A.A. (1989). *Theory of difference schemes*. Moscow, Nauka Publ., 616 p. (in Russian).

8. Penkovsky V.I. (1977). Capillary pressure, gravitational and dynamic phase distribution in the "water-oil-gas-rock" system. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, No. 6, pp. 20-30. (in Russian).

Поступила в редакцию / Received

24 июня 2021 г. / June 24, 2021

УДК 517.5+519.4

doi 10.18522/1026-2237-2021-3-32-36

ОБ ОДНОМ ОБОБЩЕНИИ ОПЕРАТОРА СДВИГА

© 2021 г. Ю.С. Саранчук¹, А.А. Татаркин¹¹Кубанский государственный университет, Краснодар, Россия

A GENERALIZATION OF THE SHIFT OPERATOR

Yu.S. Saranchuk¹, A.A. Tatarkin¹¹Kuban State University, Krasnodar, Russia

Саранчук Юрий Сергеевич – аспирант, кафедра теории функций, Кубанский государственный университет, ул. Ставропольская, 149, г. Краснодар, 350040, Россия, e-mail: 89182859942@mail.ru

Yurii S. Saranchuk - Postgraduate, Department of Function Theory, Kuban State University, Stavropolskaya St., 149, Krasnodar, 350040, Russia, e-mail: 89182859942@mail.ru.

Татаркин Александр Александрович – аспирант, кафедра теории функций, Кубанский государственный университет, Ставропольская, 149, г. Краснодар, 350040, Россия, e-mail: tiamatory@gmail.com

Aleksandr A. Tatarkin - Postgraduate, Department of Function Theory, Kuban State University, Stavropolskaya St., 149, Krasnodar, 350040, Russia, e-mail: tiamatory@gmail.com

Известно несколько подходов к обобщению оператора сдвига в комплексной области. Конкретные процедуры обобщения приводят к существенно разным операторам типа сдвига даже в одной конкретной области комплексного анализа. В данной работе определен некоторый общий оператор типа сдвига. Изучены свойства этого оператора и рассмотрен вопрос преемственности данного определения. Свойства определенного оператора в известной мере повторяют свойства изученных ранее операторов типа сдвига. Это позволяет говорить о возможности продолжения основных результатов по спектральному синтезу в комплексной области на сверточные уравнения более общего вида.

Ключевые слова: оператор типа сдвига, q -сторонний сдвиг, π -сдвиг.

Several approaches are known to generalize the shift operator in the complex domain. Specific generalization procedures lead to significantly different operators of the shift type even in one specific area of complex analysis. In this paper, a certain general operator of the shift type is defined. The properties of this operator are studied and the question of the continuity of this definition is considered. The properties of a certain operator to a certain extent repeat the properties of the previously studied operators of the shift type. This allows us to speak of the possibility of extending the main results on spectral synthesis in the complex domain to convolutional equations of a more general form.

Keywords: shift type operator, q -sided shift, π -shift.

Введение

Пусть Ω_0, Ω – выпуклые области в комплексной плоскости $\mathbb{C}$, $\varepsilon > 0$, U_ε – круг $\{h : |h| < \varepsilon\}$. Будем считать, что $\Omega_0 + U_\varepsilon \subseteq \Omega$ и пространства голоморфных функций $O(\Omega_0)$, $O(U_\varepsilon)$, $O(\Omega)$ и $O(\mathbb{C})$ наделены топологиями равномерной сходимости на компактах. При фиксированном $h \in O(U_\varepsilon)$ оператор

$$T_h : O(\Omega) \rightarrow O(\Omega_0) \mid f(z) \rightarrow f(z+h)$$

принято называть оператором сдвига (на шаг h). Всякий линейный непрерывный функционал S на пространстве $O(\Omega_0)$ порождает свертку

$$M_S(f) : O(\Omega) \rightarrow O(U_\varepsilon) \mid f(z) \rightarrow \langle S, T_h(f) \rangle$$

функционала S и функции $f \in O(\Omega)$. Операторы свертки возникают в ходе решения многих прикладных задач. Кроме того, эти операторы имеют высокое теоретическое значение.

Первое обобщение указанной схемы проведено в [1, §7]. В этой работе основные результаты по оператору

свертки (например, аппроксимационная теорема) перенесены на случай оператора q -сторонней свертки, в основе определения которого лежит понятие q -стороннего сдвига $f(z) \rightarrow f(z + \omega^0 h) + \dots + f(z + \omega^{q-1} h)$, где $\omega = \exp \frac{2\pi i}{q}$. В работах [2, 3] эти исследования продолжены и основные результаты перенесены на более общий случай оператора q -стороннего сдвига

$$f(z) \rightarrow a_0 f(z + \omega^0 h) + \dots + a_{q-1} f(z + \omega^{q-1} h),$$

где $a_0, \dots, a_{q-1} \in \mathbb{C}$. Найдены, например, точные условия на коэффициенты уравнения

$$\langle S, a_0 f(z + \omega^0 h) + \dots + a_{q-1} f(z + \omega^{q-1} h) \rangle = 0,$$

$$f \in O(\Omega),$$

обеспечивающие выполнимость аппроксимационной теоремы при любом выборе выпуклых областей Ω_0, Ω и функционала S .

Другой подход к определению оператора типа сдвига осуществлен в [4, п. 2.3]. В этой работе определяется оператор π -сдвига (на шаг h)

$$f(z) \rightarrow \sum_{k=0}^{\infty} \frac{h^k}{k!} (s_k(D)f), \quad f \in O(\Omega),$$

где $s_k(D)$ – дифференциальные операторы, порождаемые функциями $s_k := \text{sym} z^k$; $\text{sym}: O(\mathbb{C}) \rightarrow O(\mathbb{C})$ – оператор π -симметризации; $\pi(z)$ – фиксированная целая рациональная функция. Оператор π -сдвига лежит в основе определения оператора π -свертки. В работе [4] основные свойства оператора свертки перенесены на случай оператора π -свертки.

Замечаем принципиальную разность подходов к определению операторов типа сдвига в работах [1–4]. Это означает, что общий единообразный подход к определению операторов типа свертки не найден. В этой статье авторы предлагают такой подход. Он позволяет определить более общий оператор типа сдвига, который соблюдает преобразование и в известной мере повторяет свойства оператора сдвига (свойства 1–8). Выполнимость указанных свойств позволяет распространить известные теоремы по экспоненциальному синтезу на уравнения типа свертки более общего вида, но это требует специального разговора.

Специальный непрерывный эндоморфизм целых функций

Рассмотрим отображение $z \rightarrow \pi(z)$, где $\pi(z)$ – фиксированная целая рациональная функция. Множество $G \subseteq \mathbb{C}$ называется π -симметричным, если

$G = \pi^{-1} \circ \pi(G)$. Комплексная функция g , определенная на π -симметричном множестве G , называется π -симметричной, если она представляется в виде композиции $g = \hat{g} \circ \pi$, где $\hat{g}$ – локально аналитическая на образе $\pi(G)$ функция. Если $g = \hat{g} \circ \pi$ и функция $\hat{g}$ локально аналитична на множестве $\pi(G)$, то функцию g называем локально аналитической π -симметричной. Символом $O_{\pi}(G)$ обозначим семейство всех π -симметричных функций на π -симметричном множестве G . Топология в пространстве $O_{\pi}(G)$ индуцируется из пространства $O(G)$ всех локально аналитических функций на множестве G .

Пусть G – открытое π -симметричное множество в $\mathbb{C}$. Для любой функции $g \in O(G)$ имеет место единственное π -симметричное представление [5, теорема 2.1]

$$g(z) = \sum_{p=0}^{q-1} z^p g_p(z), \quad g_p \in O_{\pi}(G). \quad (1)$$

Пусть $\{\pi_0(z), \dots, \pi_{q-1}(z)\}$ – произвольный набор многочленов, не все из которых тождественно равны нулю. Считаем, что степень $q_p := \deg \pi_p(z)$ полинома $\pi_p(z)$ не превосходит p . Рассмотрим линейный оператор A , действующий из пространства $O(\mathbb{C})$ в пространство $O(\mathbb{C})$ по правилу

$$A : g(z) \rightarrow \sum_{p=0}^{q-1} \pi_p(z) g_p(z), \quad (2)$$

где $g_p(z)$ – π -симметричный коэффициент представления (1). Стандартными приемами доказываются следующие свойства оператора A [6]:

1. Эндоморфизм $A : O(\mathbb{C}) \rightarrow O(\mathbb{C})$ является непрерывным.

2. $A(z^n)$ – многочлен, степень которого не превосходит n .

3. При любом $\varepsilon > 0$ выполняется неравенство

$$\lim_{n \rightarrow \infty, z \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \left(\frac{|A(z^n)|}{\exp \varepsilon |z|} \right)^{\frac{1}{n}} \leq \frac{1}{\varepsilon e}.$$

4. Если $D_h : O(\mathbb{C}) \rightarrow O(\mathbb{C})$ – оператор дифференцирования по переменной $h \in \mathbb{C}$, то для любого $z \in \mathbb{C}$ имеет место равенство

$$\pi(D_h) \circ A(e^{hz}) = \pi(z) A(e^{hz}).$$

Определение оператора π -сдвига

Пусть Ω_0, Ω – выпуклые области в комплексной плоскости $\mathbb{C}$, $\varepsilon' > 0$, $U_{\varepsilon'}$ – круг $\{h : |h| < \varepsilon'\}$. Будем считать, что $\Omega_0 + U_{\varepsilon'} \subseteq \Omega$. Пусть $\{\pi_0(z), \dots, \pi_{q-1}(z)\}$ – произвольный набор многочленов, не все из которых тождественно равны нулю. Считаем, что степень q_p полинома $\pi_p(z)$ не превосходит p . Рассмотрим линейный оператор $A : O(\mathbb{C}) \rightarrow O(\mathbb{C})$, действующий по правилу (2).

Выберем произвольное $h \in U_{\varepsilon'}$ и рассмотрим линейный дифференциальный оператор с постоянными коэффициентами

$$AT_h : f(z) \mapsto \sum_{n=0}^{\infty} \frac{A(e^{hz})^{(n)}(0)}{n!} (D^n f)(\zeta). \quad (3)$$

При любом $f \in O(\Omega)$ ряд (3) сходится равномерно по (ζ, h) на компактах из бицилиндра $\Omega_0 \times U_{\varepsilon'}$ при любом выборе выпуклых областей Ω_0 и Ω , удовлетворяющих условию $\Omega_0 + U_{\varepsilon'} \subseteq \Omega$ [2]. Это означает, что образ $AT_h(f)$ является аналитической функцией по переменной (ζ, h) на бицилиндре $\Omega_0 \times U_{\varepsilon'}$ при любом $f \in O(\Omega)$. Отсюда следует, что линейный оператор AT_h действует из пространства $O(\Omega)$ в пространство $O(\Omega_0)$. Оператор $AT_h : O(\Omega) \rightarrow O(\Omega_0)$, определенный по правилу (3), называем оператором π -сдвига (на шаг h).

Отметим основные свойства оператора $AT_h : O(\Omega) \rightarrow O(\Omega_0)$.

5. Характеристическая функция оператора π -сдвига $AT_h : O(\Omega) \rightarrow O(\Omega_0)$ совпадает с образом $A(e^{hz})$.

Дифференциальный оператор с постоянными коэффициентами, действующий из пространства $O(\Omega)$ в пространство $O(\Omega_0)$, называется оператором A -сдвига (на шаг h), если он непрерывен и его характеристическая функция совпадает с образом $A(e^{hz})$ [6]. В силу свойства 3 для любого $\varepsilon \in (0, \varepsilon')$ выполняется неравенство

$$\overline{\lim}_{n \rightarrow \infty, z \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \left(\frac{|A(z^n)|}{\exp \varepsilon |z|} \right)^{\frac{1}{n}} \leq \frac{1}{\varepsilon e}.$$

Отсюда следует справедливость следующих двух предложений.

6. Оператор π -сдвига $AT_h : O(\Omega) \rightarrow O(\Omega_0)$ является непрерывным.

7. Оператор π -сдвига $AT_h : O(\Omega) \rightarrow O(\Omega_0)$ является оператором A -сдвига.

В силу предложения 12 из [7] вытекает следующее свойство.

8. Оператор π -сдвига $AT_h : O(\Omega) \rightarrow O(\Omega_0)$ допускает представление

$$AT_h : f(z) \rightarrow \sum_{n=0}^{\infty} \frac{h^n}{n!} (A(z^n)(D)f)(\zeta). \quad (4)$$

При этом для любого $f \in O(\Omega)$ ряд (4) сходится равномерно по (ζ, h) на компактах из бицилиндра $\Omega_0 \times U_{\varepsilon'}$.

Преимственность определения

Покажем, что данное нами определение оператора π -сдвига развивает все разработанные ранее конкретные процедуры обобщения классического оператора сдвига

$$T_h : O(\Omega) \rightarrow O(\Omega_0) | f(z) \rightarrow f(z+h).$$

Здесь речь может идти только о двух процедурах, которые ранее были положены в основу определения оператора π -свертки и оператора q -сторонней свертки. Первая из этих процедур является более общей.

Во-первых, если $\pi(z)$ – произвольный многочлен степени q и

$$\pi_0(z) := \text{sym} z^0 \equiv s_0, \dots, \pi_{q-1}(z) := \text{sym} z^{q-1} \equiv s_{q-1}, \quad (5)$$

то

$$A(g(z)) := \sum_{p=0}^{q-1} \pi_p(z) g_p(z) = \sum_{p=0}^{q-1} s_p g_p(z) = \text{sym} g(z).$$

При этом $A(z^n) = \text{sym} z^n =: s_n(z)$. В силу (4)

$$\begin{aligned} AT_h(f(z)) &= \sum_{n=0}^{\infty} \frac{h^n}{n!} (A(z^n)(D)f)(\zeta) = \\ &= \sum_{n=0}^{\infty} \frac{h^n}{n!} (\text{sym} z^n)(D)f(\zeta) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{h^n}{n!} (s_n(D)f)(\zeta). \end{aligned}$$

Это означает, что при условии (5) оператор $AT_h : O(\Omega) \rightarrow O(\Omega_0)$ совпадает с оператором π -сдвига

$$AT_h(f) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{h^n}{n!} s_n(D)f,$$

определенным в [4].

Во-вторых, предположим, что $\pi(z) = z^q$. Если

$$\pi_0(z) = a_0 z^0, \dots, \pi_{q-1}(z) = a_{q-1} z^{q-1}$$

и не все коэффициенты $a_0, \dots, a_{q-1}$ равны нулю, то непрерывный эндоморфизм $A : O(\Omega) \rightarrow O(\Omega)$ принимает следующий вид:

$$A(g(z)) := \sum_{p=0}^{q-1} \pi_p(z) g_p(z) = \sum_{p=0}^{q-1} a_p z^p g_p(z).$$

Определим коэффициенты $b_0, \dots, b_{q-1} \in \mathbb{C}$ при помощи системы уравнений

$$b_k := \frac{1}{q} \sum_{p=0}^{q-1} \omega^{pk} a_p, \quad k \in \{0, \dots, q-1\},$$

где $\omega := \exp \frac{2\pi i}{q}$. Определитель матрицы

$$\mathbf{A} := \frac{1}{q} \begin{pmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ 1 & \omega^{-1} & \dots & \omega^{-(q-1)} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & \omega^{-(q-1)} & \dots & \omega^{-(q-1)(q-1)} \end{pmatrix}$$

этой системы уравнений совпадает с определителем Вандермонда и отличен от нуля. Отсюда вытекает, что не все коэффициенты $b_0, \dots, b_{q-1}$ равны нулю.

При этом по свойствам степеней ω

$$\sum_{p=0}^{q-1} \omega^{mp} = \begin{cases} 0, & \text{если } m \text{ не делится на } q, \\ q, & \text{если } m \text{ делится на } q. \end{cases}$$

Используя последнее соотношение, легко убедиться, что матрица

$$\mathbf{A}^{-1} := \begin{pmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ 1 & \omega^1 & \dots & \omega^{q-1} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & \omega^{q-1} & \dots & \omega^{(q-1)(q-1)} \end{pmatrix}$$

является обратной к матрице $\mathbf{A}$, значит, коэффициенты $a_0, \dots, a_{q-1}$ удовлетворяют системе уравнений

$$a_p = \frac{1}{q} \sum_{k=0}^{q-1} \omega^{-pk} b_k, \quad p \in \{0, \dots, q-1\}.$$

Следовательно,

$$\begin{aligned} A(g(z)) &= \sum_{p=0}^{q-1} a_p z^p g_p(z) = \\ &= \sum_{p=0}^{q-1} \left(\sum_{k=0}^{q-1} \omega^{pk} b_k \right) z^p g_p(z) = \\ &= \sum_{k=0}^{q-1} b_k \sum_{p=0}^{q-1} \omega^{kp} z^p g_p(z) = \sum_{k=0}^{q-1} b_k g(\omega^k z), \end{aligned}$$

при этом

$$A(e^{hz})^{(n)} = \sum_{k=0}^{q-1} b_k \left(e^{\omega^k h z} \right)^{(n)} = \sum_{k=0}^{q-1} b_k \omega^{kn} h^n e^{\omega^k h z},$$

поэтому

$$c_n := \frac{A(e^{hz})^{(n)}(0)}{n!} = \sum_{k=0}^{q-1} b_k \omega^{kn} h^n,$$

$$\begin{aligned} AT_h(f(z)) &= \sum_{n=0}^{\infty} c_n (D^n f)(z) = \\ &= \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{n!} \sum_{k=0}^{q-1} b_k \omega^{kn} h^n (D^n f)(z) = \\ &= \sum_{k=0}^{q-1} b_k \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(D^n f)(z)}{n!} \omega^{kn} h^n = \sum_{k=0}^{q-1} b_k f(z + \omega^k h). \end{aligned}$$

Это означает, что при $\pi(z) = z^q$ оператор π -сдвига $AT_h : O(\Omega) \rightarrow O(\Omega_0)$ является оператором q -стороннего сдвига

$$f(z) \rightarrow \sum_{k=0}^{q-1} b_k f(z + \omega^k h).$$

Литература

1. Шишкин А.Б. Спектральный синтез для оператора, порожденного умножением на степень независимой переменной // Мат. сб. 1991. Т. 182, № 6. С. 828–848.
2. Tatarkin A.A., Saranchuk U.S. Elementary solutions of a homogeneous q-sided convolution equation // Iss. Anal. 2018. Vol. 7, № 25. P. 137–152.
3. Татаркин А.А. О плотностях многочленов в специальном пространстве целых функций экспоненциального типа // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2021. № 2. С. 34–41.
4. Красичков-Терновский И.Ф. Спектральный синтез в комплексной области для дифференциального оператора с постоянными коэффициентами. IV. Синтез // Мат. сб. 1992. Т. 183, № 8. С. 23–46.
5. Красичков-Терновский И.Ф. Спектральный синтез в комплексной области для дифференциального оператора с постоянными коэффициентами. I. Теорема двойственности // Мат. сб. 1991. Т. 182, № 1. С. 1559–1588.
6. Шишкин А.Б. Экспоненциальный синтез в ядре оператора симметричной свертки // Записки науч. семинаров ПОМИ. 2016. Т. 447. С. 129–170.
7. Шишкин А.Б. О непрерывных эндоморфизмах целых функций // Мат. сб. 2021. Т. 212, № 4. С. 131–158.

References

1. Shishkin A.B. (1991). Spectral synthesis for an operator generated by multiplication by a power of the independent variable. *Mat. sb.*, vol. 182, No. 6, pp. 828–848. (in Russian).
2. Tatarkin A.A., Saranchuk U.S. (2018). Elementary solutions of a homogeneous q-sided convolution equation. *Iss. Anal.*, vol. 7, No. 25, pp. 137–152.

3. Tatarkin A.A. (2021). The density of polynomials in a special space of entire functions of exponential type. *Izv. vuzov. Sev.-Kavk. region. Estestv. nauki (Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science)*, No. 2, pp. 34-41. (in Russian).

4. Krasichkov-Ternovskii I.F. (1992). Spectral synthesis in a complex domain for a differential operator with constant coefficients. IV. Synthesis. *Mat. sb.*, vol. 183, No. 8, pp. 23-46. (in Russian).

5. Krasichkov-Ternovskii I.F. (1991). Spectral synthesis in a complex domain for a differential operator with constant coefficients. I. A duality theorem. *Mat. sb.*, vol. 182, No. 1, pp. 1559-1588. (in Russian).

6. Shishkin A. B. (2016). Exponential synthesis in the kernel of a symmetric convolution. *Zapiski nauch. seminarov POMI*, vol. 447, pp. 129-170. (in Russian).

7. Shishkin A. B. (2021). On continuous endomorphisms of entire functions. *Mat. sb.*, vol. 212, No. 4, pp. 131-158. (in Russian).

Поступила в редакцию / Received

26 мая 2021 г. / May 26, 2021

УДК 517.956

doi 10.18522/1026-2237-2021-3-37-41

СМЕШАННАЯ ЗАДАЧА ДЛЯ ВЫРОЖДАЮЩЕГОСЯ МНОГОМЕРНОГО ЭЛЛИПТИЧЕСКОГО УРАВНЕНИЯ

© 2021 г. А.К. Танирберген¹¹Актюбинский региональный университет им. К. Жубанова, Актюбе, Казахстан

A MIXED PROBLEM FOR A DEGENERATE MULTIDIMENSIONAL ELLIPTIC EQUATION

А.К. Tanirbergen¹¹ Zhubanov Aktobe Regional University, Aktobe, Republic of Kazakhstan,

Танирберген Айсулу Кобейсинкызы – докторант, Актюбинский региональный университет им. К. Жубанова, ул. Бр. Жубановых, 263, г. Актюбе, 030000, Республика Казахстан, e-mail: aisulu21@mail.ru

Aisulu K. Tanirbergen - Doctoral Student, Zhubanov Aktobe Regional University, Br. Zhubanovykh St., 263, Aktobe, 030000, Republic of Kazakhstan, e-mail: aisulu21@mail.ru

Корректность решения краевых задач на плоскости для эллиптических уравнений методом теории аналитических функций комплексного переменного хорошо изучена. Первая краевая задача, или задача Дирихле для многомерных эллиптических уравнений с вырождением на границе, достаточно полно исследована. Однако смешанная задача для указанных уравнений, как нам известно, изучена мало.

В статье показана однозначная разрешимость и получен явный вид классического решения смешанной задачи в цилиндрической области для модельного вырождающегося многомерного эллиптического уравнения.

Ключевые слова: корректность, смешанная задача, вырождающееся уравнение, многомерные сферические функции, функция Бесселя.

The correctness of boundary value problems in the plane for elliptic equations by the method of the theory of analytic functions of a complex variable has been well studied. The first boundary value problem or the Dirichlet problem for multidimensional elliptic equations with degeneration on the boundary has been sufficiently analyzed. However, as we know, the mixed problem for the indicated equations has been studied very little.

This article shows the unique solvability and obtains an explicit form of the classical solution of the mixed problem in a cylindrical domain for a model degenerate multidimensional elliptic equation.

Keywords: correctness, mixed problem, degenerate equation, multidimensional spherical functions, Bessel function.

Введение

Первая краевая задача, или задача Дирихле для многомерных эллиптических уравнений с вырождением на границе, достаточно полно исследована [1–7]. Однако, насколько известно автору, смешанные задачи для вырождающихся многомерных эллиптических уравнений исследованы мало [8].

Корректность решения краевых задач на плоскости для эллиптических уравнений методом теории аналитических функций комплексного переменного хорошо изучена. При исследовании аналогичных вопросов, когда число независимых переменных больше двух, возникают трудности принципиального характера. Весьма привлекательный и удобный метод сингулярных интегральных

уравнений теряет свою силу из-за отсутствия сколько-нибудь полной теории многомерных сингулярных интегральных уравнений.

В данной статье, используя метод разложения по сферическим функциям, будет показана однозначная разрешимость и получен явный вид классического решения смешанной задачи в цилиндрической области для вырождающегося многомерного эллиптического уравнения.

Постановка задачи и результат

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

Части этих поверхностей, образующих границу ∂D_α области D_α , обозначим через $\Gamma_\alpha, S_\alpha, S_0$ соответственно.

В области D_α рассмотрим вырождающееся многомерное эллиптическое уравнение

$$g(t)\Delta_x u + u_{tt} = 0, \quad (1)$$

где Δ_x – оператор Лапласа по переменным $x_1, \dots, x_m, m \geq 2$; $g(t) > 0$ при $t > 0$ и может обращаться в нуль при $t = 0$. При этом $g(t) \in C([0, \alpha]) \cap C^2((0, \alpha))$.

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

Задача 1. Найти решение уравнения (1) в области D_α из класса $C(\overline{D}_\alpha) \cap C^2(D_\alpha)$, удовлетворяющее краевым условиям

$$u|_{S_0} = \tau(r, \theta), u_t|_{S_0} = \nu(r, \theta), u|_{\Gamma_\alpha} = \psi(t, \theta) \quad (2)$$

при $\tau(1, \theta) = \psi(0, \theta), \nu(1, \theta) = \varphi_t(0, \theta)$.

Отметим, что эта задача при $g(t) = t^p, p = \text{const} > 0$, изучена в [8].

Пусть $\{Y_{n,m}^k(\theta)\}$ – система линейно независимых сферических функций порядка $n, 1 \leq k \leq k_n, k_n = (n+m-3)!(2n+m-2)/(m-2)!n!, \theta = (\theta_1, \dots, \theta_{m-1})$.

Имеет место [9]

Лемма 1. Пусть $f(r, \theta) \in W_2^l(S_0)$, где $W_2^l(S_0), l = 0, 1, \dots$ – пространство Соболева. Если $l \geq m-1$, то ряд

$$f(r, \theta) = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{k=1}^{k_n} f_n^k(r) Y_{n,m}^k(\theta), \quad (3)$$

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

Лемма 2. Для того чтобы $f(r, \theta) \in W_2^l(S)$, необходимо и достаточно, чтобы коэффициенты ряда (3) удовлетворяли неравенствам

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

Через $\bar{\tau}_n^k(r), \bar{\nu}_n^k(r), \bar{\psi}_n^k(t)$ обозначим коэффициенты ряда (3), функций $\tau(r, \theta), \nu(r, \theta), \psi(t, \theta)$.

Справедлива

Теорема. Если

$$\tau(r, \theta), \nu(r, \theta) \in W_2^l(S_0), \psi(t, \theta) \in W_2^l(\Gamma_\alpha), l > \frac{3m}{2},$$

то задача 1 имеет решение, причем единственное.

Доказательство теоремы. В сферических координатах уравнение (1) имеет вид [9]

$$g(t) \left(u_{rr} + \frac{m-1}{r} u_r - \frac{1}{r^2} \delta u \right) + u_{tt} = 0, \quad (4)$$

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

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

Известно [9], что спектр оператора δ состоит из собственных чисел $\lambda_n = n(n+m-2), n = 0, 1, \dots$, каждому из которых соответствует k_n ортонормированных собственных функций $Y_{n,m}^k(\theta)$.

Так как искомое решение задачи 1 принадлежит классу $C(\overline{\Omega}_\alpha) \cap C^2(\Omega_\alpha)$, то его можно искать в виде

$$u(r, \theta, t) = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{k=1}^{k_n} \bar{u}_n^k(r, t) Y_{n,m}^k(\theta), \quad (5)$$

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

Подставив (5) в (4) и используя ортогональность сферических функций $Y_{n,m}^k(\theta)$ [10], получим

$$g(t) \left(\bar{u}_{nrr}^k + \frac{m-1}{r} \bar{u}_{nr}^k + \frac{\lambda_n}{r^2} \bar{u}_n^k \right) + \bar{u}_{nnt}^k = 0, \quad (6)$$

$$k = \overline{1, k_n}, n = 0, 1, \dots$$

При этом краевое условие (2) с учетом леммы 1 запишется в виде

$$\bar{u}_n^k(r, \theta) = \bar{\tau}_n^k(r), \quad \bar{u}_{nt}^k(r, 0) = \bar{v}_n^k(r), \bar{u}_n^k(1, t) = \psi_n^k(r), \\ k = \overline{1, k_n}, \quad n = 0, 1, \dots \quad (7)$$

В (6), (7) произведем замену переменных $\bar{v}_n^k(r, t) = \bar{u}_n^k(r, t) - \bar{\psi}_n^k(t)$.

$$g(t) \left(\bar{v}_{nr}^k + \frac{m-1}{r} \bar{v}_{nr}^k - \frac{\lambda_n}{r^2} \bar{v}_n^k \right) - \bar{v}_{nt}^k = \bar{f}_n^k(r, t), \quad (8)$$

$$\bar{v}_n^k(r, 0) = \tau_n^k(r), \quad \bar{v}_{nt}^k(r, 0) = v_n^k(r), \bar{v}_n^k(1, t) = 0, \\ k = \overline{1, k_n}, \quad n = 0, 1, \dots,$$

$$\bar{f}_n^k(r, t) = \frac{\lambda_n g(t)}{r^2} \psi_n^k - \psi_{nt}^k, \tau_n^k(r) = \bar{\tau}_n^k(r) - \psi_{1n}^k(0),$$

$$v_n^k(r) = \bar{v}_n^k(r) - \psi_{nt}^k(0).$$

Произведем замену $\bar{v}_n^k(r, t) = r^{\frac{(1-m)}{2}} v_n^k(r, t)$ в задаче (8). Получим

$$L v_n^k \equiv g(t) \left(v_{nr}^k + \frac{\bar{\lambda}_n}{r^2} v_n^k \right) + v_{nt}^k = f_n^k(r, t),$$

$$v_n^k(r, 0) = \tilde{\tau}_n^k(r), v_{nt}^k(r, 0) = \tilde{v}_n^k(r), v_n^k(1, t) = 0, \quad (9)$$

$$\bar{\lambda}_n = \frac{((m-1)(3-m) - 4\lambda_n)}{4},$$

$$f_n^k(r, t) = r^{\frac{(m-1)}{2}} \bar{f}_n^k(r, t),$$

$$\tilde{\tau}_n^k(r) = r^{\frac{(m-1)}{2}} \tau_n^k(r), \tilde{v}_n^k(r) = r^{\frac{(m-1)}{2}} v_n^k(r).$$

Решение задачи (9) ищем в виде

$$v_n^k(r, t) = v_{1n}^k(r, t) + v_{2n}^k(r, t), \quad (10)$$

где $v_{1n}^k(r, t)$ – решение задачи

$$L v_{1n}^k = f_n^k(r, t), \quad (11)$$

$$v_{1n}^k(r, 0) = v_{1nt}^k(r, 0) = 0, v_{1n}^k(1, t) = 0.$$

$v_{2n}^k(r, t)$ – решение задачи

$$L v_{2n}^k = 0, \quad (12)$$

$$v_{1n}^k(r, 0) = \tilde{\tau}_n^k(r), v_{2nt}^k(r, 0) = \tilde{v}_n^k(r) - v_{2n}^k(1, t) = 0.$$

Решение вышеуказанных задач рассмотрим в виде

$$v_n^k(r, t) = \sum_{s=1}^{\infty} R_s(r) T_s(t). \quad (13)$$

При этом пусть

$$f_n^k(r, t) = \sum_{s=1}^{\infty} a_{s,n}^k(t) R_s(r), \quad \tilde{\tau}_n^k(r) = \quad (14)$$

$$= \sum_{s=1}^{\infty} b_{s,n}^k R_s(r), \tilde{v}_n^k(r) = \sum_{s=1}^{\infty} e_{s,n}^k R_s(r).$$

Подставляя (13) в (11), с учетом (14) получим

$$R_{srr} + \frac{\bar{\lambda}_n}{r^2} R_s + \mu R_s = 0, \quad 0 < r < 1, \quad (15)$$

$$R_s(1) = 0, \quad |R_s(0)| < \infty,$$

$$T_{stt} - \mu g(t) T_s(t) = a_{s,n}(t), \quad 0 < t < \alpha, \quad (16)$$

$$T_s(0) = 0, T_{st}(0) = 0.$$

Ограниченным решением задачи (15) является [11]

$$R_s(r) = \sqrt{r} J_\nu(\mu_{s,n} r), \quad (17)$$

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

Задача (16) сводится к интегральному уравнению Вольтерра второго ряда относительно $T_s(t)$ [4].

$$T_{st}(t) - \mu_{s,n}^2 \times \\ \times \int_0^t (t - \xi) g(\xi) T_{sn}(\xi) d\xi = \int_0^t (t - \xi) a_{sn}^k(\xi) d\xi, \quad (18)$$

которое имеет решение, притом единственное.

Подставляя (17) в (14), получим

$$r^{-\frac{1}{2}} f_n^k(r, t) = \sum_{s=1}^{\infty} a_{s,n}^k(t) J_\nu(\mu_{s,n} r), \quad (19)$$

$$r^{-\frac{1}{2}} \tilde{\tau}_n^k(r) = \sum_{s=1}^{\infty} b_{s,n} J_\nu(\mu_{s,n} r),$$

$$r^{-\frac{1}{2}} \tilde{v}_n^k(r) = \sum_{s=1}^{\infty} e_{s,n}^k J_\nu(\mu_{s,n} r), \quad 0 < r < 1.$$

Ряды (19) – разложение в ряды Фурье – Бесселя [12], если

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

$$b_{s,n}^k(t) = 2 \left[J_{\nu+1}(\mu_{s,n}) \right]^{-2} \int_0^1 \sqrt{\xi} \tilde{\tau}_n^k(\xi) J_\nu(\mu_{s,n} \xi) d\xi, \quad (20)$$

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

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

Из (17), (18) получим решение задачи (11) в виде

$$v_{1n}^k(r, t) = \sum_{s=1}^{\infty} \sqrt{r} T_{s,n}(t) J_\nu(\mu_{s,n} r), \quad (21)$$

где $a_{s,n}^k(t)$ определяются из (14).

Далее, подставляя (17 в (12), с учетом (14)), будем иметь

$$V_{stt} - \mu_{s,n}^2 g(t) V_s = 0, 0 < t < \alpha, \quad (22)$$

$$V_s(0) = b_{s,n}^k, V_{s,n}(0) = e_{s,n}^k.$$

Произведя в (22) замену

$$G_{s,n}(t) = V_{s,n}(t) - b_{s,n}^k + e_{s,n}^k, \quad (23)$$

приходим к задаче

$$\begin{aligned} G_{stt} - \mu_{s,n}^2 g(t) G_{s,n} &= q_{s,n}^2(t), \\ G_s(0) &= 0, G_{s,n}(0) = 0, \end{aligned} \quad (24)$$

$$q_{s,n}^k(t) = \mu_{s,n}^2 (b_{s,n}^k + t e_{s,n}^k) g(t).$$

Задача (24) сводится также к интегральному уравнению (18), где вместо $a_{s,n}^k(t)$ берется $q_{s,n}^k(t)$.

Из (17), (18), (23) найдем решение задачи (12)

$$v_{2n}^k(r, t) = \sum_{s=1}^{\infty} \sqrt{r} V_{s,n}(t) J_v(\mu_{s,n} r), \quad (25)$$

где $b_{s,n}^k, e_{s,n}^k$ находятся из (20).

Таким образом, из (5), (10) получаем решение задачи 1 в виде

$$\begin{aligned} u(r, \theta, t) = & \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{k=1}^{k_n} \left\{ \Psi_n^k(t) + r^{\frac{(1-m)}{2}} [v_{1n}^k(r, t) + v_{2n}^k(r, t)] \right\} \times \\ & \times Y_{n,m}^k(\theta), \end{aligned} \quad (26)$$

где $v_{1n}^k(r, t), v_{2n}^k(r, t)$ находится из (21), (25).

Имеют место формулы [12, 13]

$$\begin{aligned} 2J_v'(z) &= J_{v-1}(z) - J_{v+1}(z), \\ J_v(z) &= \sqrt{\frac{2}{\pi z}} \cos\left(z - \frac{\pi}{2}v - \frac{\pi}{4}\right) + O\left(\frac{1}{z^{3/2}}\right), v \geq 0. \end{aligned} \quad (27)$$

Применяя признак Даламбера, (27), устанавливаем, что ряды (21), (25) и продифференцированные ряды сходятся абсолютно и равномерно.

Далее, используя формулу (27), оценки из [9]

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

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

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

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

а также леммы и ограничения на заданные функции $\tau(t, \theta), v(r, \theta), \psi(r, \theta)$, показываем, как в [7, 8], что полученное решение в виде (26) принадлежит классу $C(\overline{D}_\alpha) \cap C^2(D_\alpha)$.

Если в задаче 1 $\tau(t, \theta) = v(r, \theta) = \psi(r, \theta) \equiv 0$, то из леммы 1 следует, что $\bar{\tau}_n^k(r) = \bar{v}_n^k(r) = \bar{\psi}_n^k(t) \equiv 0$, $k = \overline{1, k_n}$, $n = 0, 1, \dots$. Отсюда и из интегрального уравнения (18) вытекает, что $T_s(t) \equiv 0, s = 1, 2, \dots$

Следовательно, учитывая представления (13) и (5), имеем, что $u(r, t, \theta) \equiv 0$, т.е. решение однородной задачи, соответствующей задаче 1, является тривиальным. Таким образом, единственность решения задачи 1 показана.

Теорема доказана полностью.

Литература

1. Смирнов М.М. Вырождающиеся эллиптические и гиперболические уравнения. М.: Наука, 1966. 292 с.
2. Терсенов С.А. Введение в теорию уравнений, вырождающихся на границе. Новосибирск: НГУ, 1973. 144 с.
3. Янушаускас А.И. Аналитическая теория эллиптических уравнений. Новосибирск: Наука, 1979. 190 с.
4. Бицадзе А.В. Некоторые классы уравнений в частных производных, М.: Наука, 1981. 448 с.
5. Олейник О.А., Радкевич Е.В. Уравнения с неотрицательной характеристической формой. М.: Изд-во МГУ, 2010. 354 с.
6. Алдашев С.А. Корректность задачи Дирихле в цилиндрической области для вырождающихся многомерных эллиптических уравнений // Мат. заметки. 2013. Т. 94, № 6. С. 936–939.
7. Алдашев С.А. Корректность задачи Дирихле в цилиндрической области для вырождающихся трехмерных эллиптических уравнений // Мат. журн. 2017. Т. 2 (64). С. 5–12.
8. Алдашев С.А. Корректность смешанной задачи для одного класса вырождающихся многомерных эллиптических уравнений // Науч. ведомости БелГУ. Математика и физика. 2019. Т. 51, № 2. С. 174–182.
9. Михлин С.Г. Многомерные сингулярные интегралы и интегральные уравнения. М.: Физматгиз, 1962. 254 с.
10. Михлин С.Г. Линейные уравнения в частных производных. М.: Высшая школа, 1977. 431 с.
11. Камке Э. Справочник по обыкновенным дифференциальным уравнениям. М.: Наука, 1965. 703 с.
12. Бейтмен Г., Эрдейи А. Высшие трансцендентные функции. Т. 2. М.: Наука, 1974. 295 с.
13. Тихонов А.Н., Самарский А.А. Уравнения математической физики. М.: Наука, 1966. 724 с.

References

1. Smirnov M.M. (1966). *Degenerate elliptic and hyperbolic equations*. Moscow, Nauka Publ., 292 p. (in Russian).

2. Tersenov S.A. (1973). *Introduction to the theory of equations degenerating at the boundary*. Novosibirsk, Novosibirsk State University Press, 144 p. (in Russian).
3. Yanushauskas A. I. (1979). *Analytical theory of elliptic equations*. Novosibirsk, Nauka Publ., 190 p. (in Russian).
4. Bitsadze A.V. (1981). *Some classes of partial differential equations*. Moscow, Nauka Publ., 448 p. (in Russian).
5. Oleinik O.A., Radkevich E.V. (2010). *Equations with a non-negative characteristic form*. Moscow, Moscow State University Press, 354 p. (in Russian).
6. Aldashev S.A. (2013). Correctness of the Dirichlet problem in a cylindrical domain for degenerate multidimensional elliptic equations. *Matematicheskie zametki*, vol. 94, No. 6, pp. 936-939. (in Russian).
7. Aldashev S.A. (2017). The correctness of the Dirichlet problem in a cylindrical domain for degenerate three-dimensional elliptic equations. *Mat. zhurnal*, vol. 2 (64), pp. 5-12. (in Russian).
8. Aldashev S.A. (2019). Posedness of the mixed problem for a class of degenerate multidimensional elliptic equations. *Nauch. vedomosti BELGU. Mathematics and physics*, vol. 51, No. 2, pp. 174-182. (in Russian).
9. Mikhlin S.G. (1962). *Multidimensional singular integrals and integral equations*. Moscow, Fizmatgiz Publ., 254 p. (in Russian).
10. Mikhlin S.G. (1977). *Linear partial differential equations*. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 431 p. (in Russian).
11. Kamke E. (1965). *Handbook of ordinary differential equations*. Moscow, Nauka Publ., 703 p. (in Russian).
12. Bateman G., Erdelyi A. (1974). *Higher transcendental functions*, vol. 2. Moscow, Nauka Publ., 295 p. (in Russian).
13. Tikhonov A.N., Samarsky A.A. (1966). *Equations of mathematical physics*. Moscow, Nauka Publ., 724 p. (in Russian).

Поступила в редакцию / Received

24 апреля 2021 г. / April 24, 2021

НАУКИ О ЗЕМЛЕ

SCIENCES OF EARTH

УДК 911.3:33+911.3:314 (571.53/.55+517.3)

doi 10.18522/1026-2237-2021-3-42-50

БАЙКАЛО-МОНГОЛЬСКИЙ ТРАНСПОРТНЫЙ КОРИДОР: ВЗАИМОСВЯЗЬ ПРОИЗВОДСТВА И НАСЕЛЕНИЯ*

© 2021 г. Н.В. Воробьев¹, А.Н. Воробьев¹, Н.А. Ипполитова¹¹Институт географии им. В.Б. Сочавы Сибирского отделения РАН, Иркутск, Россия

BAIKAL-MONGOLIAN TRANSPORT CORRIDOR: RELATIONSHIP OF PRODUCTION AND POPULATION

N.V. Vorobyev¹, A.N. Vorobyev¹, N.A. Ippolitova¹¹V.B. Sochava Institute of Geography, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia

Воробьев Николай Владимирович – кандидат географических наук, доцент, старший научный сотрудник, лаборатория экономической и социальной географии, Институт географии СО РАН, ул. Улан-Баторская, 1, г. Иркутск, 664033, Россия, e-mail: nikvlv54@gmail.com

Nikolay V. Vorobyev - Candidate of Geography, Associate Professor, Senior Researcher, Laboratory of Economic and Social Geography, V.B. Sochava Institute of Geography, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Ulan-Batorskaya St., 1, Irkutsk, 664033, Russia, e-mail: nikvlv54@gmail.com

Воробьев Александр Николаевич – кандидат географических наук, научный сотрудник, лаборатория картографии, геоинформатики и дистанционных методов, Институт географии СО РАН, ул. Улан-Баторская, 1, г. Иркутск, 664033, Россия, e-mail: Tore12@yandex.ru

Alexander N. Vorobyev - Candidate of Geography, Researcher, Laboratory of Cartography, Geoinformatics and Remote Sensing Methods, V.B. Sochava Institute of Geography, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Ulan-Batorskaya St., 1, Irkutsk, 664033, Russia, e-mail: Tore12@yandex.ru

Ипполитова Нина Александровна – кандидат географических наук, доцент, научный сотрудник, лаборатория экономической и социальной географии, Институт географии СО РАН, ул. Улан-Баторская, 1, г. Иркутск, 664033, Россия, e-mail: Nina-ip@list.ru

Nina A. Ippolitova - Candidate of Geography, Associate Professor, Researcher, Laboratory of Economic and Social Geography, V.B. Sochava Institute of Geography, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Ulan-Batorskaya St., 1, Irkutsk, 664033, Russia, e-mail: Nina-ip@list.ru

Целью настоящего исследования является выявление пространственно-временной взаимосвязи населения и производства урбанизированных территорий Байкало-Монгольского экономического коридора. Сквозные методы – статистический, картографический, сравнительно-географический – используются на всех стадиях исследования. За единицы наблюдения взяты: в России – городские округа и муниципальные районы, в Монголии – столичный город и аймаки. Основные результаты заключаются в выявлении главных урбанизированных ареалов, которые сформировались в местах максимальной концентрации населения: в Монголии – вокруг столичного города Улан-Батора, а в юго-восточной Сибири – вокруг региональных центров Иркутск, Улан-Удэ и Чита. Демографический потенциал Байкало-Монгольского транспортного коридора составляет более половины населения соответствующих регионов, при этом он воспроизводится и принимает мигрантов из периферийных территорий. Оцениваются конкурентные преимущества и возможности городов и районов. Повышение роли основных экономических центров объективно ведет к росту

* Исследование выполнено за счет средств государственного задания (№ госрегистрации темы: AAAA-A21-121012190019-9) и при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-55-44023 Монг_а.

соответствующих агломераций и наносит ущерб функционированию других городских поселений. На основе анализа хозяйственного комплекса изучаемой территории выделены отрасли индустриальной специализации, проведены типологии муниципальных образований региона по преобладанию основного вида деятельности в промышленности. Определяющими факторами социально-экономического развития городов являются эффекты экономико-географического положения и накопленного социально-экономического потенциала территории относительно сопредельных пространств.

Ключевые слова: объем промышленного производства, отрасли специализации, транспортный коридор, плотность населения, расселение, регион, Сибирь, Монголия.

The purpose of this study is to identify the spatio-temporal relationship between the population and production of the urbanized territories of the Baikal-Mongolian transport corridor. Cross-cutting methods - statistical, cartographic, comparative-geographical - are used at all stages of the study. The units of measurement taken are the following: in Russia - urban districts and municipal districts, in Mongolia - the capital city and aimags. The main results consist in identifying the main urbanized areas that have formed in places of maximum population concentration: around the capital city of Ulaanbaatar in Mongolia, and in southeastern Siberia around the regional centers of Irkutsk, Ulan-Ude and Chita. The demographic potential of the Baikal-Mongolian transport corridor is more than half of the population of the corresponding regions, while it reproduces and receives migrants from peripheral territories. Competitive advantages and opportunities of cities and regions are assessed as constituent parts of a single cross-border economic corridor. The increasing role of the main economic centers objectively leads to the growth of the corresponding agglomerations and damages the functioning of other urban settlements. Based on the analysis of the economic complex of the studied territory, the branches of industrial specialization are distinguished, the typologies of municipalities of the region are carried out according to the prevalence of the main activity in the industry. The determining factors of the social and economic development of cities are the effects of the economic and geographical location and the accumulated socio-economic potential of the territory in relation to adjacent spaces.

Keywords: industrial production volume, industry of specialization, transport corridor, population density, settlement, region, Siberia, Mongolia.

Введение

Научную основу работы составляют посвященные территориальной организации промышленности вопросы, рассмотренные в трудах П.Я. Бакланова, А.П. Горкина, В.М. Гохмана, Л.В. Смирнягина [1, 2]. При проведении исследований по определению хозяйственной специализации территорий авторы опирались на работы М.Г. Никитиной, В.Н. Лаженцева [3, 4], где в основу исследования положен системный анализ. Важную роль играют выполненные работы по определению хозяйственной специализации и территориальной структуры хозяйства и населения Байкальского региона [5–8].

В целом система городского расселения в зоне Транссиба хорошо развита по сравнению с другими сибирскими территориями, имеет относительно высокую плотность сети городских поселений, основные центры концентрации населения, современные производственные мощности и инновационные отрасли, обладает мощным научно-образовательным комплексом, выполняет транзитные и логистические функции транспорта, из региональных центров осуществляется и управление соответствующими регионами [9].

В Институте географии им. В.Б. Сочавы СО РАН неоднократно публиковались материалы комплексных географических исследований как природного, ресурсного, экономического, демографического и

экологического состояния всей Сибири [10, 11], так и характеристик территории, прилегающей к Транссибу, с учетом перспектив экономического коридора в целом [9, 12].

Методические вопросы и постановка проблемы

Модельный полигон исследования был представлен трансграничным Байкало-Монгольским транспортным коридором, соединяющим основные города юго-восточной Сибири и центральной Монголии посредством стыкующихся участков Транссибирской и Трансмонгольской железнодорожных магистралей. Российская часть территории исследования представляет собой субшироотно ориентированную полосу, примыкающую к Транссибу (называемую транспортным коридором), в которую входят 11 городских округов и 23 муниципальных района трех субъектов РФ (Иркутской области, Республики Бурятия и Забайкальского края), пересекаемых железной дорогой от Тайшета до Читы (1683 км). Расстояние между основными городами составляет: от Иркутска до Улан-Удэ – 456 км и от Улан-Удэ до Читы – 557 км. Монгольская часть территории исследования представляет собой субмеридионально ориентированную полосу, ответвляющуюся на юг от Транссиба в Улан-Удэ и простирающуюся на 657 км до Улан-Батора, в которую входят 5 аймаков северной и центральной частей Монголии.

Для соблюдения преемственности исследований авторы опирались на предшествующие научные публикации, касающиеся вопросов населения и промышленной специализации рассматриваемых территорий [6–8, 12–14]. Информационную основу работы составили статистические материалы Федеральной службы государственной статистики, Национальной статистической службы Монголии, официальные данные органов местного самоуправления. Единицами наблюдения, взятыми для исследования, являются городские округа и муниципальные районы России, а также столичный город и аймаки Монголии.

Цель настоящего исследования заключается во взаимосвязанном изучении производства и населения в городах юго-восточной Сибири и Монголии в пространственных рамках Байкало-Монгольского транспортного коридора. Исследовались размещение населения, сеть поселений, особенности социально-демографического состояния и изменений населения на территории Байкало-Монгольского транспортного коридора. На основе анализа промышленной специализации была проведена территориальная группировка рассматриваемых муниципальных образований, городских округов и аймаков по объему отгруженной продукции.

Результаты и обсуждение

Население и расселение. Современная демографическая динамика юго-восточной Сибири и Монголии, где проходит Байкало-Монгольский транспортный коридор, формируется под влиянием различных факторов: существующей системы расселения, геополитических факторов и этнонациональных особенностей.

Заселенность территории неравномерна, и контрастность в заселенности возрастает. Узкая полоса, которую составляют районы российской части транспортного коридора, имеет плотность населения 11,2 чел./км², что в 4 раза превышает среднюю плотность населения Байкальского региона (2,8 чел./км²). Соотношение плотности населения в монгольской части транспортного коридора к плотности населения Монголии более чем семикратное – 14,8 к 2,0 чел./км². Если площадь территории российской части транспортного коридора составляет 16,7 %, то численность населения – 65,9 % от соответствующих показателей сибирских регионов. В Монголии различия еще более контрастны: 7,9 % территории и 55,8 % населения страны находятся в полосе трансмонгольского транспортного коридора (табл. 1).

Таблица 1

Численность населения в транспортном коридоре и в регионах в целом в 2015–2019 гг. *
/ Population in the transport corridor and in the regions as a whole in 2015–2020

Регион	2015 г.			2019 г.		
	Всего, тыс. чел.	В том числе транспортный коридор		Всего, тыс. чел.	В том числе транспортный коридор	
		Тыс. чел.	Доля в регионе, %		Тыс. чел.	Доля в регионе, %
Иркутская область	2414,9	1681,5	69,6	2391,2	1691,6	70,7
Республика Бурятия	978,5	733,0	74,9	985,9	755,0	76,6
Забайкальский край	1087,4	470,6	43,3	1059,7	477,9	45,1
Байкальский регион	4480,8	2885,1	64,4	4436,8	2924,5	65,9
Монголия	2995,9	1753,6	58,5	3296,9	1840,2	55,8
Байкальский регион и Монголия, всего	7476,7	4638,7	62,0	7733,7	4764,7	61,6

* – составлено авторами на основе источников: Федеральная служба государственной статистики (Росстат) (URL: <https://rosstat.gov.ru>), Национальная статистическая служба Монголии (URL: <https://www.1212.mn>).

Городское население полностью доминирует, даже для Бурятии, где 4 муниципальных района возглавляют сельские населенные пункты, уровень урбанизации близкий к среднероссийскому (72,8 %) (табл. 2). Наибольшее число городов (15) и поселков городского типа (20) располагается в Иркутской об-

ласти, вдоль более чем 800-километрового участка железной дороги, где на территорию примыкающих районов приходится 157,4 тыс. км². Однако среднее расстояние между городскими поселениями на иркутском участке больше среднего по Транссибу.

Таблица 2

**Городское расселение в Байкало-Монгольском транспортном коридоре в 2020 г. /
Urban settlements in the Baikal-Mongolian transport corridor in 2020**

Единица расселения	Число городских поселений			
	Иркутская область	Республика Бурятия	Забайкальский край	Монголия
Городские округа	8	1	2	1 ^а
Города в составе районов	7	3	1	5 ^б
Поселки городского типа	20	5	4	—
Доля городского населения, %	85,4	72,8	85,9	91,1

Примечание. ^а – столичный город; ^б – города в составе аймаков.

Определяющее влияние на развитие сибирских регионов оказывают города-ядра транссибирского урбанизированного пространства – центры субъектов Федерации (Иркутск, Улан-Удэ, Чита). В Монголии в социально-демографическом отношении доминирует Улан-Батор, при этом монгольская столица превышает суммарное население всех трех региональных центров юго-восточной Сибири. На четыре города вместе приходится 62 % населения транспортного коридора. Социально-экономический потенциал главных городов юго-восточной Сибири и Монголии испытывает влияние мощного транспортно-географического фактора развития. Происходит усиленная поляризация развития центр – периферия в экономическом и социальном аспектах. Фактически вся периферия является миграционным донором для столичных городов, где происходит концентрация населения и большинства высокооплачиваемых видов деятельности.

По обе стороны российско-монгольской границы большинство территорий являются миграционными донорами. Миграционное перераспределение населения в монгольской части транспортного коридора является односторонним движением в пользу столицы Улан-Батора. В российской части транспортного коридора миграция идет в пользу региональных центров и их пригородных зон. Процессы урбанизации в Сибири и Монголии развивались асинхронно. Сибирь характеризовалась ускоренной урбанизацией в 1930–1960-е гг., в то время как в Монголии этот процесс был догоняющим. В целом Монголия переживает бурный демографический рост, который приобрел миграционное ускорение в столице Улан-Баторе, где прирост населения составил 169 % в 1990–2020 гг. Сибирские города растут медленно из-за исчерпания демографической составляющей урбанизации. В постсоветский период (1990–2020 гг.) прирост населения составил 7, 8 и 23 % в городах Иркутск, Чита и Улан-Удэ соответственно. Демографические процессы в начале XXI в. характеризуются низким уровнем

рождаемости, причины которого в доминировании современной модели малодетной семьи, уменьшении абсолютной численности репродуктивных контингентов женщин, откладывании или отказе от рождения детей в связи с социально-экономической нестабильностью. Регионы юго-восточной Сибири в целом имеют суженное воспроизводство населения, при этом на общем фоне выделяется только Республика Бурятия, имеющая высокую долю (30 %) титульного этноса в населении.

В целом система городского расселения в зоне Транссиба высокоразвита относительно других сибирских территорий, здесь отмечается относительно высокая плотность сети городских поселений, располагаются главные сибирские центры, концентрирующие население, современные производства и инновационные отрасли, осуществляются транзитные транспортные функции и управление сибирскими регионами.

Индустриальное производство. Основной наиболее плотный каркас расселения и хозяйственного освоения на территории трех сибирских регионов сформировался вдоль Транссиба, что определилось выгодным географическим положением относительно основных транспортных путей, а также наиболее благоприятными условиями как для проживания, так и для ведения хозяйства. Данная тенденция характерна не только для районов Сибири, но и для аймаков Монголии, где доминируют территории вдоль Трансмонгольской железнодорожной магистрали.

В пределах рассматриваемой полосы в 2019 г. было отгружено промышленной продукции на 2160,9 млрд руб., что составило 53,3 % (чуть более половины) общего объема промышленной продукции. Конечно, вклад рассматриваемых районов неоднозначен, лидером являются муниципальные образования (МО) Республики Бурятия (73,3 %), за которой следуют МО Иркутской области и Забайкальского края (41,1 и 37,2 % соответственно) (табл. 3).

Таблица 3

Объем отгруженной продукции в зоне транспортного коридора и в регионе в целом в 2015–2019 гг.*
/ The volume of products shipped in the transport corridor area and in the region as a whole in 2015-2019

Регион	2015 г.			2019 г.		
	Всего, млрд руб.	В том числе в транспортном коридоре		Всего, млрд руб.	В том числе в транспортном коридоре	
		млрд руб.	Доля в регионе, %		млрд руб.	Доля в регионе, %
Иркутская область	898,5	317,5	35,3	1259,6	555,9	41,1
Республика Бурятия	131,2	118,2	90,1	133,5	97,8	73,3
Забайкальский край	107,4	78,5	73,1	201,2	74,9	37,2
Байкальский регион	1137,1	514,2	45,2	1594,3	728,9	45,6
Монголия	334,6	308,4	92,2	566,6	423,3	74,7
Байкальский регион и Монголия, всего	1471,7	822,6	55,9	2160,9	1152,2	53,3

* – составлено авторами на основе источников: Федеральная служба государственной статистики (URL: <https://rosstat.gov.ru/>), Национальная статистическая служба Монголии (URL: <https://www.1212.mn>). Показатели по Монголии для сопоставимости пересчитаны в рубли (URL: <https://www.calc.ru/kotirovka-mongolskiy-tugrik.html>).

С 2015 по 2019 г. отмечается усиление доли транспортного коридора в Иркутской области (на 5,3 %) при снижении доли территорий транспортного коридора в Забайкальском крае (на 41,3 %), Монголии (на 17,5 %) и Республике Бурятии (на 16,8 %). Такое изменение вклада в объем отгруженной продукции рассматриваемых территорий связано с изменением структуры хозяйства регионов. В 2015–2019 гг. отмечается снижение доли обрабатывающей промышленности в валовом региональном продукте (ВРП). В Иркутской области лидирующие позиции принадлежат добывающей промышленности (31,5 %), в Забайкальском крае – транспорту (18,4 %) и добывающей промышленности (15,0 %), в Республике Бурятии – транспорту (10,8 %) и обрабатывающей промышленности (9,9 %) [7]. В регионах отмечается усиление добывающих и обслуживающих отраслей, деятельность которых находится в основном за пределами рассматриваемой территории, – это северные районы нефте- и золотодобычи, а также других видов горнодобывающей промышленности. В зависимости от объемов промышленного производства все рассматриваемые территориальные образования можно подразделить на 5 основных групп.

В первую группу с наиболее высокими показателями объемов промышленного производства (более 100 млрд руб.) вошли столица Монголии Улан-Батор и региональный центр Иркутск, именно в них имеется наиболее сложная структура промышленного производства. Промышленность Улан-Батора представлена машиностроением и металлообработкой, деревообрабатывающей, домостроительной и пищевой промышленностью. Улан-баторские ТЭЦ

вырабатывают 85 % электроэнергии страны. В Иркутске находятся предприятия машиностроения (Иркутский авиационный завод, Иркутский завод тяжелого машиностроения, Иркутский релейный завод и др.), предприятия электроэнергетики (Ново-Иркутская ТЭЦ и Иркутская ГЭС), а также предприятия строительной индустрии и пищевой промышленности.

Во вторую группу вошли три городские округа, один аймак и один муниципальный район (объем промышленного производства от 50 до 100 млрд руб.). Промышленное производство Читы и Улан-Удэ (административные центры Забайкальского края и Республики Бурятии соответственно) отличается большим видовым разнообразием (машиностроение, пищевая, промышленность строительных материалов, электроэнергетика). Общей чертой Ангарского городского округа и Шелеховского муниципального образования является четко выраженная специализация на обрабатывающей промышленности. В Ангарске – это нефтепереработка, которая служит основой развития химической промышленности, и энергетика, в Шелеховском – цветная металлургия, которая имеет экспортную направленность, а также энергетика. Также в эту группу входит аймак Орхон, специализирующийся на горнодобывающей деятельности с градообразующим предприятием «Эрдэнэт» (добыча и обогащение меди и молибдена).

К третьей группе было отнесено 12 территориальных образований с объемом промышленного производства от 5 до 50 млрд руб., однако данная группа внутри очень неоднородна. Отдельно выделяются моногорода (Саянск и Усолье-Сибирское –

химическая промышленность; Черемхово – угледобывающая). Промышленный профиль Усольского и Иркутского районов – пищевая промышленность, Тулунского – угледобыча, остальных – лесная и деревообрабатывающая промышленность. Основными отраслями промышленности аймака Дархан-Уул являются черная металлургия (завод по производству стали в г. Дархан), пищевая и промышленность строительных материалов, Сэлэнгэ – пищевая промышленность.

Четвертая группа – самая многочисленная, включающая 14 территориальных образований, объем промышленного производства составляет от 1 до 5 млрд руб. Все территориальные образования можно разделить на подгруппы по специализации: добывающие (добыча гипса, соли – Заларинский), обрабатывающие (пищевая промышленность) и не имеющие доминирующей отрасли промышленности (Слюдянский, Хилокский и др.). В аймаке Туве, кроме пищевой промышленности, осуществляется добыча золота.

Пятая группа включает территориальные образования с самыми низкими показателями объема про-

мышленного производства – менее 1 млрд руб. Основную роль играет сельскохозяйственное производство.

Взаимосвязи населения и производства проявляются в том, что основной демографический и производственный потенциал транспортного коридора сконцентрирован в четырех городах (Улан-Батор, Иркутск, Улан-Удэ и Чита): 62 % численности населения, 73 % объема производства. Остальные городские округа, кроме Ангарска, имеют весьма малое значение в демографических и экономических показателях (рис. 1). Коэффициент корреляции между численностью населения городов и объемом отгруженной продукции составляет +0,89. Сопоставление самостоятельных городских округов и группировки (с выделением 5 групп) территориальных образований показывает, что главные центры попадают только в первую или вторую группы. Сопряженное картографирование производственного потенциала и населения позволяет отобразить характерные черты пространственной организации хозяйства и населения транспортного коридора (рис. 2).

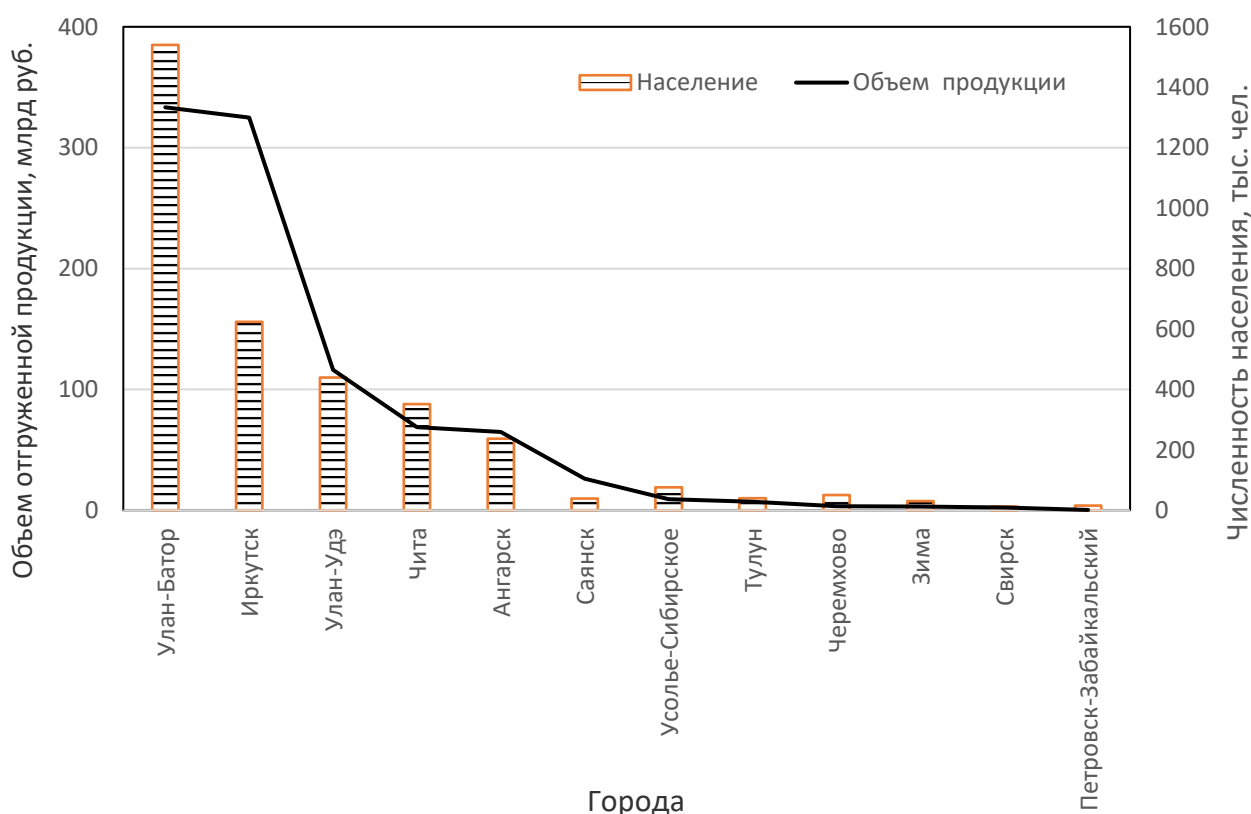


Рис. 1. Численность населения и объем отгруженной продукции в городах (составлено авторами)
/ Fig. 1. Population and volume of shipped products in cities (compiled by the authors)



Рис. 2. Промышленное производство на фоне плотности населения. Условные обозначения: аймаки Монголии: I – Сэлэнгэ; II – Дархан-Уул; III – Орхон; IV – Туве; V – Улан-Батор (столичный город); муниципальные районы России: 1 – Тайшетский; 2 – Нижнеудинский; 3 – Тулунский; 4 – Куйтунский; 5 – Зиминский; 6 – Заларинский; 7 – Аларский; 8 – Черемховский; 9 – Усольский; 10 – Иркутский; 11 – Ангарский (городской округ); 12 – Шелеховский; 13 – Слюдянский; 14 – Кабанский; 15 – Джидинский; 16 – Селенгинский; 17 – Прибайкальский; 18 – Иволгинский; 19 – Заиграевский; 20 – Тарбагатайский; 21 – Петровск-Забайкальский; 22 – Хилокский; 23 – Читинский; 24 – Кяхтинский / Fig. 2. Industrial production against the backdrop of population density. Aimags of Mongolia: I - Selenge; II - Darchan-Uul; III - Orkhon; IV - Tuve; V - Ulaanbaatar (capital city); municipal districts of Russia: 1 - Tayshetsky; 2 - Nizhneudinsky; 3 - Tulunsky; 4 - Kuysunsky; 5 - Ziminsky; 6 - Zalarinsky; 7 - Alarsky; 8 - Cheremkhovsky; 9 - Usolsky; 10 - Irkutsky; 11 - Angarsky (urban district); 12 - Shelekhovsky; 13 - Slyudyansky; 14 - Kabansky; 15 - Dzhidinsky; 16 - Selenginsky; 17 - Pribaikalsky; 18 - Ivolginsky; 19 - Zaigraevsky; 20 - Tarbagataisky; 21 - Petrovsk-Zabaikalsky; 22 - Khiloksky; 23 - Chitinsky; 24 - Kyakhtinsky

Прослеживается простое линейно-узловое устройство хозяйственно-расселенческих структур. Линейные элементы представлены Транссибирской магистралью, которая только в одном месте имеет ответвление на юг – в Монголию. Узловые элементы представлены крупными городами: во-первых, полуторамиллионным Улан-Батором; во-вторых, миллионным Иркутско-Черемховским урбанизированным районом; в-третьих, отдельными региональными центрами Улан-Удэ и Чита; в-четвертых, Эрдэнэтом, Дарханом и системой двух центров Зима – Саянск. Прочие города не могут претендовать на роль опорных центров в Байкало-Монгольском транспортном коридоре. Таким образом, определяющими факторами социально-экономического развития городов являются эффекты экономико-географического положения и накопленного социально-экономического и демографического потенциала относительно сопредельных пространств.

Заключение

Установлено, что, в отличие от депопулирующих периферийных территорий, в зоне транспортного коридора растет численность населения, миграционные потоки направлены в сторону монгольского столичного города и сибирских региональных центров и их пригородных зон. Иркутск находится на стадии субурбанизации, когда периферия агломерации растет быстрее, чем главный город. Урбанизационная концентрация (45 % населения Бурятии и Монголии) выражена в Улан-Удэ и Улан-Баторе. Чита не обладает столь яркими чертами урбанизации. Основным направлением развития системы расселения является стягивание демографического потенциала в немногочисленные центры и зоны их влияния в условиях депопуляции не только региональной периферии, но и большей части транспортного коридора.

Транспортный коридор, где выпускается более половины объема продукции, имеет высокий уровень индустриального развития. Ведущую роль играют такие отрасли, как электроэнергетика, нефтеперерабатывающая и химическая, машиностроение, цветная металлургия, лесная и деревообрабатывающая. Хозяйственная специализация регионов усиливается в ресурсно-сырьевом направлении. В Прибайкалье и Забайкалье вслед за ростом инвестиций в добывающие отрасли идет сдвиг в сторону горнодобывающего сектора экономики, также происходят территориальные сдвиги промышленности в менее освоенные, периферийные районы.

В сфере взаимосвязи населения и производства основной демографический (62 % численности населения) и производственный потенциал (73 %

объема производства) транспортного коридора сконцентрирован в четырех городах (Улан-Батор, Иркутск, Улан-Удэ и Чита). Сформированный человеческий потенциал, адаптированный к жизни и деятельности в сибирских климатических условиях, следует использовать для изменения сырьевой ориентации существующей региональной экономики. Использование возможностей Транссибирской и Трансмонгольской магистралей для функционирования международного транспортного коридора не только является средством решения транспортно-логистических проблем евразийского экономического пространства, но и позволяет развивать города как опорные центры территории.

Литература

1. Бакланов П.Я. Территориальные структуры хозяйства в региональном управлении. М.: Наука, 2007. 239 с.
2. Горкин А.П., Гохман В.М., Смирнягин Л.В. Территориально-производственная структура промышленности страны (на примере системы промышленности капиталистической страны) // Изв. РАН. Серия геогр. 1976. № 6. С. 107–114.
3. Никитина М.Г., Шутаева Е.А., Побирченко В.В. Системно-генетический подход в исследовании процесса общественной организации территории // Теория и практика общественного развития. 2016. № 10. С. 68–72.
4. Лаженцев В.Н. Территориальное развитие как экономико-географическая деятельность (теория, методология, практика) // Экономика региона. 2013. № 1. С. 10–20.
5. Безруков Л.А. Особенности территориальной хозяйственно-расселенческой структуры и перспективы пространственного развития Сибири // Наукосведение. 2014. № 6. URL: <http://naukovedenie.ru/PDF/05EVN614.pdf> (дата обращения: 04.04.2021).
6. Тараканов М.А. Закономерности и проблемы развития промышленности Иркутской области // Изв. ИГЭА. 2008. № 3 (59). С. 40–43.
7. Ippolitova N.A., Rogovskaya N.V. The Baikal Region: Economic Specialization // Environmental transformation and sustainable development in Asian region. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2021. Vol. 629. P. 012065. Doi 10.1088/1755-1315/629/1/012065.
8. Безруков Л.А. Трансформация структур хозяйства и населения Сибири на постсоветском этапе // География и природные ресурсы. 2020. № 4. С. 25–36. Doi 10.21782/GiPR0206-1619-2020-4(25-36).
9. Зона Транссиба как евразийский экономический коридор / отв. ред. Л.М. Корытный. Иркутск: Изд-во Ин-та географии им. В.Б. Сочавы СО РАН, 2016. 251 с.
10. География Сибири в начале XXI в.: в 6 т. Т. 3: Хозяйство и население / отв. ред. Н.М. Сысоева, С.В. Рященко. Новосибирск: Гео, 2014. 251 с.

11. Современная Россия: географическое описание нашего Отечества. Сибирь. М.: Паулсен, 2020. 512 с.

12. Vorobyev N.V., Vorobyev A.N., Enkh-Amgalan S. Demographic Dynamics of Cities in the Baikal-Mongolian Transport Corridor // Environmental transformation and sustainable development in Asian region. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2021. Vol. 629. P. 012056. Doi 10.1088/1755-1315/629/1/012056.

13. Экологический атлас бассейна озера Байкал / под ред. В.М. Плюснина, А.Р. Батуева, Л.М. Коротного. Иркутск: Изд-во Ин-та географии им. В. Б. Сохавы СО РАН, 2015. 145 с.

14. Жамьянова Ю.Б., Осодоев П.В. Демографический потенциал российско-монгольского приграничья в рамках экономического коридора Китай – Монголия – Россия // Успехи современного естествознания. 2019. № 11. С. 70–75. Doi 10.17513/use.37242.

References

1. Baklanov P. Ya. (2007) *Territorial structures of the economy in regional management*. Moscow, Nauka Publ., 239 p. (in Russian).

2. Gorkin A.P., Gokhman V.M., Smirnyagin L.V. (1976). Territorial-production structure of the country's industry (on the example of the industry system of a capitalist country). *Izv. RAN. Seriya geogr.*, No. 6, pp. 107-114. (in Russian).

3. Nikitina M.G., Shutaeva E.A., Pobirchenko V.V. (2016). Systemic-genetic approach in the study of the process of social organization of the territory. *Teoriya i praktika obshchestvennogo razvitiya*, No. 10, pp. 68-72. (in Russian).

4. Lazhentsev V.N. (2013). Territorial development as economic and geographical activity (theory, methodology, practice). *Ekonomika regiona*, No. 1, pp. 10-20. (in Russian).

5. Bezrukov L.A. (2014). Features of the territorial economic and settlement structure and the prospects for the spatial development of Siberia. *Naukovedenie*, No 6. Available at: <http://naukovedenie.ru/PDF/05EVN614.pdf> (accessed April 4, 2021). (in Russian).

6. Tarakanov M.A. (2008). Regularities and problems of industrial development in the Irkutsk region. *Izvestia IGEA*, No. 3 (59), pp. 40-43. (in Russian).

7. Ippolitova N.A., Rogovskaya N.V. (2021). The Baikal Region: Economic Specialization. *Environmental transformation and sustainable development in Asian region. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, vol. 629, p. 012065. Doi 10.1088/1755-1315/629/1/012065.

8. Bezrukov L.A. (2020). Transformation of the structures of the economy and population of Siberia at the post-Soviet stage. *Geografiya i prirodnye resursy*, No. 4. pp. 25-36. Doi 10.21782/GiPR0206-1619-2020-4(25-36) (in Russian).

9. *The Transsib zone as a Eurasian economic corridor*. (2016). L.M. Korytny (Ed.). Irkutsk, Sochava Institute of Geography Press, SB RAS, 251 p. (in Russian).

10. *Geography of Siberia at the beginning of the 21st century*. (2014). Vol. 3: Economy and population. N.M. Sysoeva, S.V. Ryashchenko (Eds.). Novosibirsk, Geo Publ., 251 p. (in Russian).

11. *Modern Russia: a geographical description of our Fatherland. Siberia*. (2020). Moscow, Paulsen Publ., 512 p. (in Russian).

12. Vorobyev N.V., Vorobyev A.N., Enkh-Amgalan S. (2021). Demographic Dynamics of Cities in the Baikal-Mongolian Transport Corridor. *Environmental transformation and sustainable development in Asian region. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, vol. 629, p. 012056. Doi 10.1088/1755-1315/629/1/012056.

13. *Ecological Atlas of the Lake Baikal Basin*. (2015). V.M. Plyusnin, A.R. Batuev, L.M. Korytny (Eds.). Irkutsk, Sochava Institute of Geography Press, SB RAS, 145 p. (in Russian).

14. Zhamyanova Yu.B., Osodoev P.V. (2019). Demographic potential of the Russian-Mongolian border area within the framework of the China-Mongolia-Russia Economic Corridor. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya*, No. 11, pp. 70-75. (in Russian).

УДК 551.521.3

doi 10.18522/1026-2237-2021-3-51-63

ИЗМЕНЧИВОСТЬ АЭРОЗОЛЬНОЙ ОПТИЧЕСКОЙ ТОЛЩИНЫ В ГОРНЫХ И ПРЕДГОРНЫХ РАЙОНАХ СЕВЕРНОЙ ОСЕТИИ ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

© 2021 г. *Е.С. Каменецкий¹, А.А. Радионов¹, В.Ю. Тимченко¹, О.С. Панаэтова¹*¹Южный математический институт Владикавказского научного центра РАН, Владикавказ, Россия

THE VARIABILITY OF AEROSOL OPTICAL THICKNESS IN MOUNTAINOUS AND FOOTHILL AREAS OF THE NORTH OSSETIA ACCORDING TO SATELLITE MEASUREMENTS

*E.S. Kamenetsky¹, A.A. Radionoff¹, V.Yu. Timchenko¹, O.S. Panaetova¹*¹Southern Mathematical Institute - the Affiliate of Vladikavkaz Scientific Center, Russian Academy of Sciences, Vladikavkaz, Russia

Каменецкий Евгений Самойлович – доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник, лаборатория математического моделирования, Южный математический институт ВНИЦ РАН, ул. Маркуса, 22, г. Владикавказ, РСО-Алания, 362027, Россия, e-mail: esk@smath.ru

Evgeniy S. Kamenetsky - Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Main Researcher, Laboratory of Mathematical Modeling, Southern Mathematical Institute - the Affiliate of Vladikavkaz Scientific Center, Russian Academy of Sciences, Markusa St., 22, Vladikavkaz, PNO-Alania, 362027, Russia, e-mail: esk@smath.ru

Радионов Анатолий Анатольевич – кандидат технических наук, научный сотрудник, лаборатория математического моделирования, Южный математический институт ВНИЦ РАН, ул. Маркуса, 22, г. Владикавказ, РСО-Алания, 362027, Россия, e-mail: aar200772@mail.ru

Anatoliy A. Radionoff - Candidate of Technical Sciences, Researcher, Laboratory of the Mathematical Modeling, Southern Mathematical Institute - the Affiliate of Vladikavkaz Scientific Center, Russian Academy of Sciences, Markusa St., 22, Vladikavkaz, PNO -Alania, 362027, Russia, e-mail: aar200772@mail.ru

Тимченко Василий Юрьевич – соискатель, лаборатория математического моделирования, Южный математический институт ВНИЦ РАН, ул. Маркуса, 22, г. Владикавказ, РСО-Алания, 362027, Россия, e-mail: timchenko.vasily@mail.ru

Vasily Yu. Timchenko - Competitor, Laboratory of Mathematical Modeling, Southern Mathematical Institute - the Affiliate of Vladikavkaz Scientific Center, Russian Academy of Sciences, Markusa St., 22, Vladikavkaz, PNO -Alania, 362027, Russia, e-mail: timchenko.vasily@mail.ru

Панаэтова Ольга Софокловна – аспирант, лаборатория математического моделирования, Южный математический институт ВНИЦ РАН, ул. Маркуса, 22, г. Владикавказ, РСО-Алания, 362027, Россия

Olga S. Panaetova - Postgraduate, Laboratory of Mathematical Modeling, Southern Mathematical Institute - the Affiliate of Vladikavkaz Scientific Center, Russian Academy of Sciences, Markusa St., 22, Vladikavkaz, PNO -Alania, 362027, Russia

Атмосферный аэрозоль является одним из показателей качества воздуха, влияющих на экологическую обстановку. Исследована аэрозольная оптическая толщина (АОТ) атмосферы в горных, предгорных и равнинных районах РСО-Алании (РФ) на основе спутниковых данных EOS Terra, Aqua. Для анализа выбирались несколько географических локаций, расположенных на разных высотах. Для каждой из локаций получены ежедневные ряды данных по АОТ, температуре воздуха и количеству осадков за 20 лет. Показаны результаты статистического анализа многолетних значений АОТ, температуры и количества осадков. Отмечены различия, наблюдающиеся во временных рядах АОТ в зависимости от высоты точки наблюдения. Между осредненными величинами имеется статистически значимая связь,

которая также зависит от высоты расположения локации и близости горных хребтов. Многолетние средние зависимости дают основание для прогноза величины АОТ на основании измеренной температуры на высоте 2 м для территорий, расположенных в сложном ландшафте на различных высотах.

Ключевые слова: MODIS, аэрозольная оптическая толщина, температура, количество осадков, регрессия, горные территории.

Atmospheric aerosol is one of the indicators of air quality that affects the environmental situation. The aerosol optical thickness (AOT) of the atmosphere is studied in the mountainous, foothill, and plain regions of Republic of North Ossetia-Alania (Russian Federation) based on satellite data EOS Terra, Aqua. Several geographical locations at different heights were selected for the analysis. Daily series of AOT, air temperature and precipitation data were obtained on period over 20 years for each point. The results of statistical analysis of long-term values of AOT, temperature and precipitation are shown. There is a statistically significant relationship between the averaged values, and there is also a dependence on the height of the location and the proximity of mountains. Long-term average dependencies provide a basis for predicting the AOT value based on the measured temperature at height of 2 m for territories located in a complex landscape at different altitudes.

Keywords: MODIS, aerosol optical thickness, temperature, precipitation, regression, mountain area.

Введение

Атмосферный аэрозоль является одним из важных параметров атмосферы и непосредственно связан с экологической обстановкой [1–4]. Пространственно-временные вариации АОТ определяются наличием аэрозолей различных типов, таких как пыль, дым, антропогенный аэрозоль, газово-пыльные выбросы вулканов, осадки [5, 6].

Для изучения этого параметра используются данные многолетнего мониторинга атмосферы, проводимые с наземных станций наблюдения, геофизических судов, самолетов-лабораторий [7–17]. Актуальной задачей является определение трендов изменения значений этого параметра с учетом пространственного распределения и сезонности [18, 19]. Одним из источников информации о свойствах оптических характеристик атмосферы являются данные комплексной программы EOS (Earth Observing System) спутниковой группировки космических аппаратов NASA Terra (<https://terra.nasa.gov>), Aqua (<https://aqua.nasa.gov>). После обработки [20] данные многоканальных спектрорадиометров MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer, <http://modis.gsfc.nasa.gov>) распространяются в свободном доступе в виде информационного продукта Level-2 [21]. Все снимки приведены к единому размеру массива 3600×1800 пикселей, угловое разрешение 1 пикселя составляет 0,1×0,1°, что соответствует пространственному размеру пикселей приблизительно 10×10 км для средних широт.

На основе спутниковых данных MODIS (EOS Aqua, Terra) исследовалось АОТ в горных и предгорных областях Тянь-Шаня [22], где показано, что многолетние временные ряды данных от наземной сети дистанционного зондирования

земли AERONET содержат периодически повторяющуюся сезонную компоненту. Сравнение спутниковых данных с результатами наземных измерений показывает хорошее согласие с коэффициентами корреляции, составляющими 0,85÷0,90.

Спутниковые данные MODIS использовались для анализа пространственного распределения и вариационных характеристик среднегодовой и сезонной температуры воздуха для горных районов на примере долины Цинхай-Тибетского плато [23]. Показан годовой ход температуры в зависимости от высоты места и удаленности от горных хребтов.

Анализ многолетних данных за 23 года наземной сети фотометров CE-318 (AERONET) и SP (ИОА СО РАН) для г. Томска показывает сезонную изменчивость АОТ [13]. Годовой ход АОТ характеризуется минимумом в осенне-зимний и максимумами в весенне-летний период.

Анализ данных спутника ENVISAT (прибор MERIS) по оптической толщине летних облаков над равнинной территорией полуострова Ямал представлен в [24]. Установлен вид функций плотности вероятности АОТ для участков, где модельные функции с подобранными значениями параметров хорошо описывают повторяемость в течение ряда лет.

Анализ пространственно-временных вариаций АОТ проведен в [25] по измерениям спектрометра MODIS для бассейна реки Янцзы. Корреляция между данными MODIS и измерениями наземной роботизированной сети (AERONET) оценивается коэффициентом корреляции 0,84. Среднее значение АОТ достигает своего максимума летом (0,68) и минимума зимой (0,50).

Простые модели радиационного воздействия атмосферных аэрозолей (ADRF) на основе данных

MODIS ИСЗ Aqua и Terra и AERONET для долины рек Инд и Ганг приведены в [26]. Оценена круглогодичная регрессия ADRF с коэффициентами корреляции Пирсона 0,66 и 0,65 соответственно.

Целью настоящей работы являются анализ и выяснение изменчивости АОТ в горных, предгорных и равнинных районах Главного Кавказского хребта Республики Северная Осетия – Алания на основе данных спутниковых измерений, а также выявления статистической взаимосвязи АОТ с температурой воздуха на высоте 2 м и количеством осадков.

Исходные данные

Ежедневные снимки АОТ по всей поверхности земного шара за период с 01.01.2000 по 31.12.2019 загружены с сайта NASA Earth Observations (<https://neo.sci.gsfc.nasa.gov>). Выбирались 7 географических локаций, каждая из которых расположена на территории РСО-Алании (РФ), на разной высоте и на различном удалении от горных хребтов. Географические координаты локаций для последующего использования при определении пикселя по снимку также определялись в десятичных долях градуса.

На равнинной территории выбирались две локации вблизи г. Моздока 43°42'00" с.ш., 44°42'00" в.д. и 43°47'60" с.ш., 44°42'00" в.д. и одна локация вблизи г. Беслана 43°12'00" с.ш., 44°36'00" в.д. Рельеф местности в этих локациях степной, высота над уровнем моря около 130 м. Расстояние от горного хребта до г. Беслана порядка 40 км и до г. Моздока – 130 км.

В предгорной части РСО-Алании выбирались локации вблизи г. Владикавказа 43°01'00" с.ш., 44°41'00" в.д. и 43°0'0.00" с.ш., 44°30'0.00" в.д. Высота здесь составляет около 600÷800 м над уровнем моря. Расстояние от горного хребта менее 10 км.

Для анализа данных в горной части республики выбран горнолыжный высокогорный курорт Цей 42°48'00" с.ш., 43°54'00" в.д., расположенный на северных склонах Большого Кавказа, у подножия г. Адайхох, в ущелье реки Цейдон, на высоте 1900–2200 м. Второй горной локацией выбиралось с. Фиагдон в Куртатинском ущелье с координатами 42°48'00" с.ш., 44°12'0.00" в.д., расположенное на высоте 1200÷1600 м. Обе эти локации расположены в высокогорных ущельях.

Для получения значений АОТ в выбранной точке местности использовались программное обеспечение пакетной обработки изображений ImageJ/Fiji (<https://imagej.net/ImageJ2>) и библиотека PIL (<https://python-pillow.org>). Обработывался весь массив суточных изображений АОТ за период с 01.01.2000 по 31.12.2019, для каждого снимка по координатам локации определялся один элементарный пиксель, характеризующий исследуемый

район, для которого определялось значение АОТ. Ежедневные ряды АОТ принимают значения в диапазоне от 0 до 255, что соответствует изменению от полностью прозрачной атмосферы до полностью запыленной атмосферы.

Ряды ежедневных данных приземной температуры на высоте 2 м и суточного количества осадков получены с информационного портала NASA (онлайн-сервис POWER Data Access Viewer, <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer>) и представляют собой ассимилированную климатическую модель Modern Era Retrospective-Analysis for Research and Applications (MERRA-2, <https://gmao.gsfc.nasa.gov/reanalysis/MERRA-2/>), базирующуюся на измерениях ближайших наземных пространственно разнесенных метеостанций, спутниковых наблюдениях и данных моделирования. Для каждой выбранной на основании координат локации строился временной ряд ежедневных значений температуры и количества осадков за период с 01.01.2000 по 31.12.2019.

Осредненные по времени для каждого дня года за период 20 лет, эти временные ряды называются далее годовыми средними. Эти годовые средние ряды каждой из характеристик дополнительно сглаживались по 15 точкам с использованием алгоритма скользящего среднего moving average библиотеки алгоритмов Numpy (<https://numpy.org>). Такие ряды называются далее средними сглаженными. Исходные, средние и средние сглаженные данные анализируются отдельно.

Результаты

Для равнинных (г. Моздок, г. Беслан), предгорных (г. Владикавказ) и горных (с. Цей, с. Фиагдон) районов средние сглаженные значения АОТ и температуры приведены на рис. 1. Из рис. 1б видно, что для АОТ имеется несколько пиковых значений, приходящихся на летний период.

Максимум АОТ для Владикавказа наблюдается в 200÷220-й день года (июль-август), тогда же достигается и максимальное значение осредненной температуры (23 °С). Локальные максимумы АОТ порядка четверти от максимального значения просматриваются в 90-й и 280-й день года. Длительность периода высоких значений АОТ составляет около 100 дней (со 170-го до 270-го дня) и попадает на летнее время.

Для Моздока и Беслана максимальные значения средней сглаженной АОТ в летний период наблюдаются со 120-го по 250-й день (порядка 20÷33) (рис. 1а, г). Они соизмеримы с максимальными значениями для Владикавказа, но отмечаются более продолжительное время. Длительность летнего периода высоких значений АОТ составляет 150 дней (со 130-го по 280-й день). Максимум

температуры регистрируется в Моздоке на 220-й день и составляет 27 °С, что заметно выше, чем во Владикавказе и Беслане.

В зимний период (с 0-го по 30-й и с 330-го по 365-й день) среднее сглаженное значение АОТ близко к нулю для всех рассмотренных локаций.

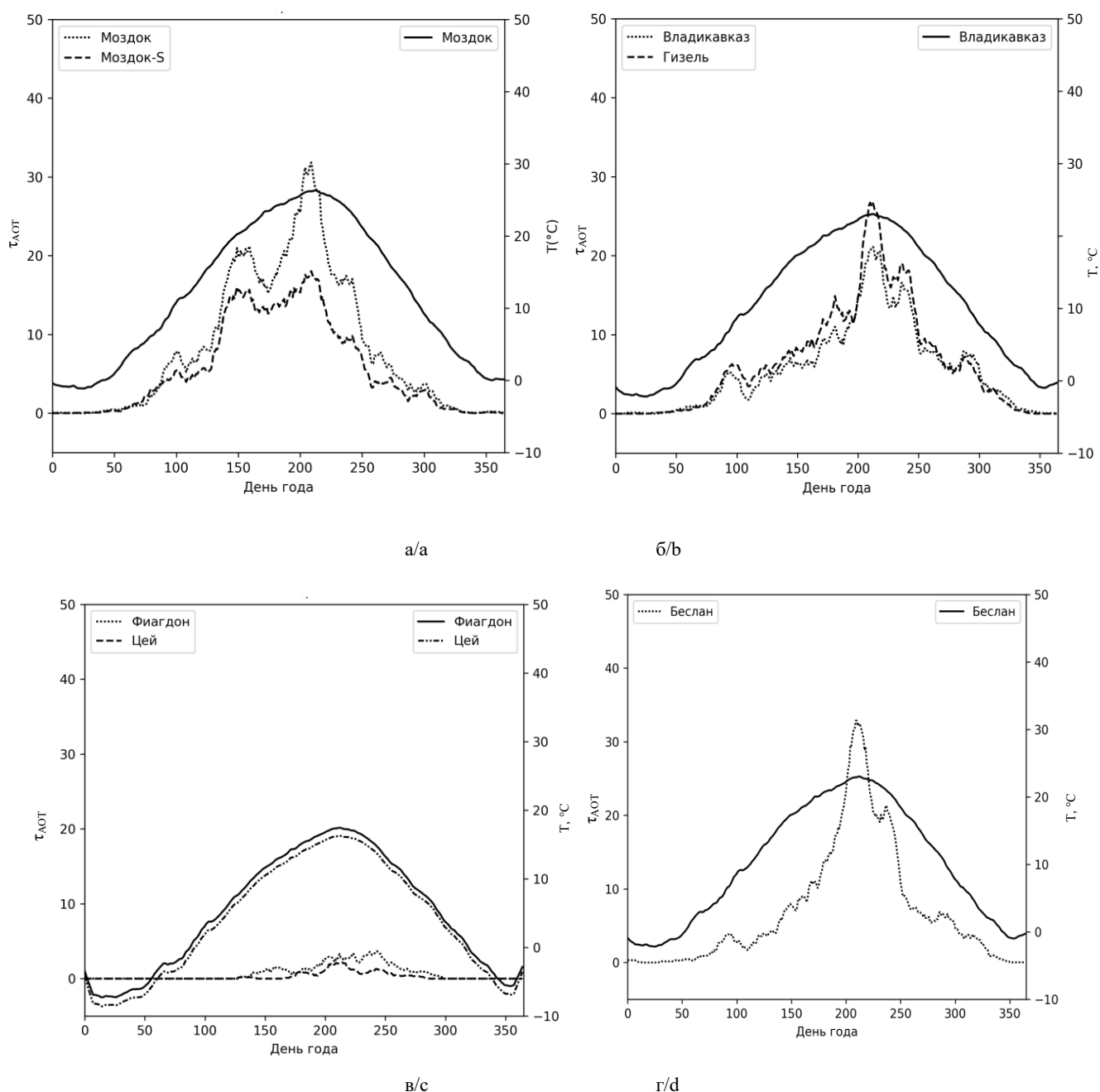


Рис. 1. Средние сглаженные значения АОТ ($\tau_{\text{АОТ}}$) и температура воздуха (T , °С) на высоте 2 м. Точечная и пунктирная кривые представляют АОТ, сплошная и штрихпунктирная кривые – температура на высоте 2 м по соответствующим точкам.

По оси абсцисс – дни года. По осям ординат слева – значение сглаженной осредненной АОТ, справа – температуры: а – 2 точки в районе Моздока; б – 2 точки в районе Владикавказа; в – Фиагдон и Цей; г – Беслан / Fig. 1. Average smoothed AOT ($\tau_{\text{АОТ}}$) and air temperature (T , °С) at a height of 2 m. The dotted and dashed curves represent AOT, the solid and dash-dotted curves are the temperature at a height of 2 m at the corresponding points. The days of the year are plotted along the abscissa.

Along the ordinate axes, the values of the smoothed averaged AOT are plotted on the left, and temperatures are plotted on the right: а - 2 points in the Mоздок area; б - 2 points in the Vladikavkaz area; в - Fiagdon and Tsey; д - Beslan

Для горных локаций (с. Цей и с. Фиагдон) средние сглаженные температуры максимальны между 120-м и 300-м днями с максимумами на 215-й и 240-й день года. В этот же период среднее значение АОТ положительное и по величине составляет около 2÷4, что на порядок меньше пикового значения АОТ для Владикавказа (где пик АОТ достигает 25) и Моздока (АОТ достигает 32). Положительные значения АОТ для Цей наблюдаются со 145-го по 300-й день. Средняя температура имеет пиковое значение 19 °С в 215-й день года, на 5 дней позже, чем в Моздоке, и примерно одновременно с пиком для Владикавказа.

На рис. 2 показаны средние сглаженные кривые АОТ и количества осадков для локаций Моздок и Вла-

дикавказ. Для Владикавказа количество осадков, превышающее 2 мм, приходится на период с 100-го по 200-й день. Локальный минимум кривой рис. 26 в 210-й день на графике осадков соответствует приблизительно неизменному значению АОТ, равному 10. Отметим рост количества осадков с одновременным увеличением АОТ в период с 30-го по 170-й день года. Для промежутка времени со 180-го по 250-й день увеличение АОТ соответствует уменьшению количества осадков. Для г. Моздока локальный максимум количества осадков соответствует локальному минимуму АОТ для 95, 140÷150, 220, 270-го дней. Для с. Цей в летний период в промежутке от 130-го по 280-й день наблюдается увеличение АОТ при уменьшении количества осадков.

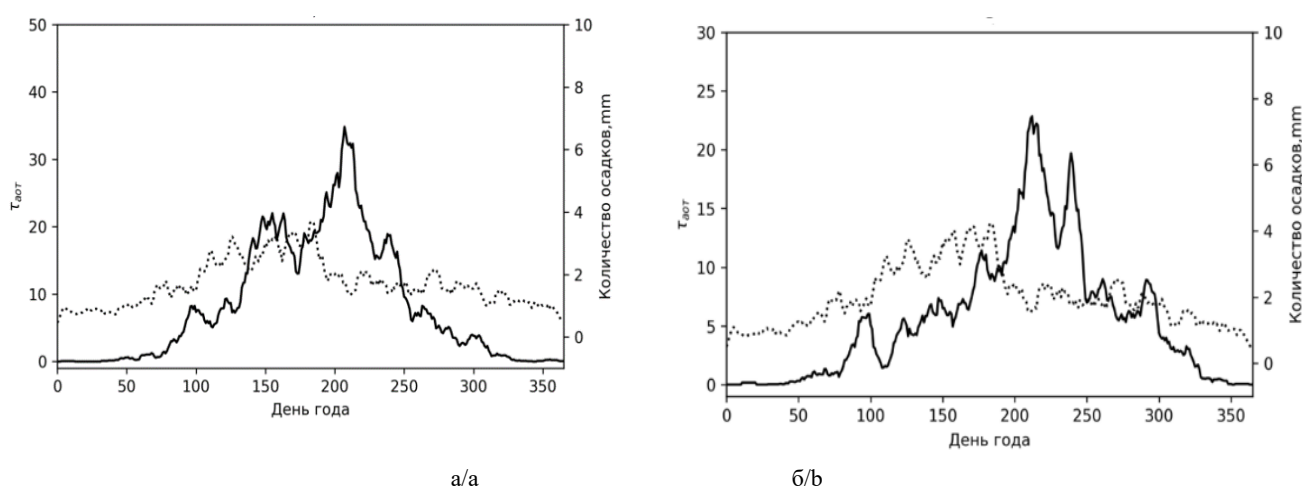


Рис. 2. АОТ и количество осадков. Сплошная кривая – АОТ, точечная кривая – количество осадков: а – для г. Моздока; б – для г. Владикавказа. По оси абсцисс отложены дни года. По осям ординат слева – значения сглаженной средней АОТ, справа – сглаженное среднее количество осадков, мм / Fig. 2. AOT and precipitation. The solid curve is AOT, the dotted curve is precipitation: a - for Muzdok; b - for Vladikavkaz. The days of the year are plotted along the abscissa. Along the ordinate axes on the left are the values of the smoothed average AOT, on the right is the smoothed average precipitation, mm

Статистический анализ

С использованием функции `numpy.corrcoef` библиотеки алгоритмов Numpy вычислялся коэффициент корреляции Пирсона R (линейный коэффициент корреляции в интервале от -1 до 1) между АОТ и температурой или количеством осадков, строилось уравнение одномерной линейной регрессии АОТ, определялись наклон и y-пересечение, а также *p*-value, характеризующая достоверность полученных результатов.

Владикавказ. Проверялась гипотеза об одномерной линейной регрессии:

$$\tau_{AOT} = a + x_1 T, \tau_{AOT} = b + x_2 V, \quad (1)$$

где $a = -0,4603$, $x_1 = 0,6892$, стандартная ошибка

0,0174; $b = -0,5709$, $x_2 = 3,5464$, стандартная ошибка 0,3429; T – температура, °С; V – количество осадков, мм. Коэффициент корреляции Пирсона для Владикавказа между сглаженной осредненной температурой и сглаженной осредненной АОТ составляет 0,9012, величина *p*-value – $6,99 \cdot 10^{-134}$. Коэффициент корреляции Пирсона между сглаженным средним количеством осадков и сглаженной средней АОТ составляет 0,4770, величина *p*-value – $3,84 \cdot 10^{-22}$. Примеры диаграмм рассеяния приведены в работе [27]. Гипотеза (1) выполняется удовлетворительно в интервале температур от 3 до 22 °С.

Также проверялась корреляция между средними несглаженными рядами данных. Корреляция между

средней температурой и средней АОТ составляет 0,7746, p -value – $3,16 \cdot 10^{-74}$. Корреляция между средним количеством осадков и АОТ равна 0,197, p -value – 0,00015. Обе эти цифры значительно меньше, чем для сглаженных средних данных.

Моздок. Одномерная линейная регрессия сглаженных средних рядов принималась в виде (1), где $a = -0,084$, $x_1 = 0,845$, стандартная ошибка 0,014; $b = -5,476$, $x_2 = 8,104$, стандартная ошибка 0,479. Коэффициент корреляции Пирсона между сглаженной средней температурой и сглаженной средней АОТ равен 0,91, p -value – $3,32 \cdot 10^{-141}$. Коэффициент корреляции Пирсона между сглаженным средним количеством осадков и сглаженной средней АОТ равен 0,6639, p -value составляет $9,53 \cdot 10^{-48}$. Гипотеза (1) выполняется удовлетворительно на интервале температур от 0 до 10 °С, несколько хуже на интервале с 17 до 26 °С. Для температур выше 17 °С просматриваются две группы значений АОТ, величины которых различаются приблизительно на 15 единиц АОТ.

Для средних несглаженных временных рядов корреляция АОТ и температуры составляет 0,812, p -value – $8,38 \cdot 10^{-87}$. Корреляция между неосредненным количеством осадков и АОТ равна 0,397, p -value составляет 0,0036.

Цей и Фиагдон. В гипотезе (1) значения величин составляют: $a = 0,12$, $x_1 = 0,042$, стандартная ошибка

0,002; $b = 0,448$, $x_2 = -0,074$, стандартная ошибка 0,0498. Коэффициент корреляции Пирсона между сглаженной средней температурой и сглаженной средней АОТ составляет 0,695, p -value равен $6,63 \cdot 10^{-54}$. Коэффициент корреляции Пирсона между сглаженным средним количеством осадков и сглаженной средней АОТ – 0,078, p -value равен 0,137.

Для средних несглаженных данных корреляция АОТ и температуры равна 0,397, корреляция между средним количеством осадков и АОТ – 0,047.

На рис. 3 приведены графики средней АОТ и его суммы со стандартным отклонением (квадратным корнем из дисперсии) для каждого дня года за период 20 лет. Для АОТ стандартное отклонение в некоторые дни достигает значений, по порядку величины сравнимых со средним значением в этот день, т.е. 100–200 %. Такой разброс вызван большой разрывностью рядов измерений АОТ прибором MODIS в разные дни года за длительный многолетний период, когда появление или отсутствие данных в конкретный день года носит вероятностный характер, зависит от погодных условий в день года, а также прохождением ИСЗ над данной точкой, наличием облачности, осадков, соответственно, может принимать или значимую величину, или пустое значение. По этой причине целесообразно рассматривать осредненные сглаженные ряды данных по сравнению с неосредненными.

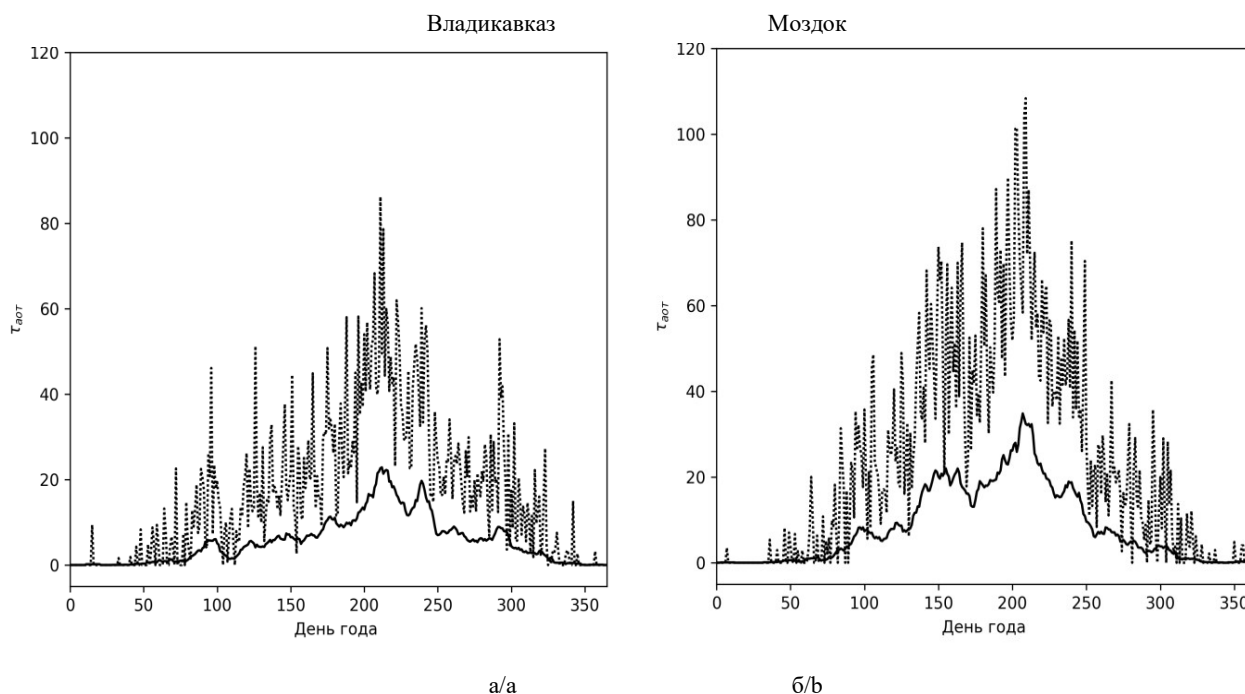


Рис. 3. Средние значения АОТ (сплошная кривая) и стандартного отклонения (пунктирная кривая) для каждого дня года: а – для г. Владикавказа, б – для г. Моздока / Fig. 3. Average values of AOT (solid line) and standard deviation (dashed line), for each day of the year: а - for Vladikavkaz, б - for Mozdok

Из сравнения графиков рис. 3 видно, что стандартное отклонение для г. Моздока, расположенного на равнине, может достигать больших значений по сравнению с г. Владикавказом, который расположен в предгорьях. Это может указывать на тот факт, что в пространственно близких локациях (расстояние между Моздоком и Владикавказом около 130 км) измеренное значение АОТ может отличаться существенно. При этом летние температуры в г. Моздоке на $1\div 4$ °C выше, чем в г. Владикавказе.

Для Моздока и Владикавказа можно отметить, что зимой как среднее, так и среднее в сумме со среднеквадратичным отклонением имеют малое значение. Зимой также наблюдаются низкие температуры. Это указывает на связь мгновенных значений АОТ с мгновенными величинами температуры.

Аналогичный график, построенный для горных локаций (с. Фиагдон и с. Цей), подтверждает такое предположение: АОТ там существенно ниже и ненулевые значения АОТ наблюдаются только летом, также и летние температуры там ниже.

На основе рассмотренных данных можно прийти к выводу, что содержание пыли в пограничном слое атмосферы выше при больших температурах и для локаций, расположенных ниже по высоте.

Изменения во времени

Для описания тенденций изменения во времени исследуемых рядов данных вводились интегральные характеристики I_n для каждого ряда данных.

Каждая интегральная характеристика I_n вычислялась как интеграл от кривой изменения ряда данных соответствующего параметра в течение годового интервала времени. Полученные годовые значения интегральных характеристик I_n образуют ряд из 20 значений АОТ, температуры и количества осадков для каждой локации, для которых проводился дальнейший статистический анализ. Линии тренда, построенные по этим 20 значениям I_n , показывают тенденции развития во времени для соответствующих величин.

В качестве модели определения изменчивости интегральной характеристики АОТ I_n за многолетний период проверялась гипотеза о линейной зависимости изменения интегральной характеристики АОТ от времени:

$$I_n = a \cdot t + b, \quad (2)$$

где a – безразмерный наклон линии тренда; b – y -пересечение линии (точка пересечения линии I_n с осью ординат); t – время, лет.

На рис. 4а показаны пример проведенных расчетов и линия тренда АОТ для локации г. Владикавказ, вычисленной по (2). Там же приведены пунктирной кривой несглаженные значения АОТ (отсчет ведется по левой шкале), кружками отмечены вычисленные годовые значения интеграла (отсчет ведется по правой шкале, точки на графике установлены в начале соответствующего года), сплошная линия показывает построенный по вычисленным параметрам тренд изменения I_n .

Из рис. 4а видно, что тренд АОТ ведет себя как возрастающая во времени величина. Угол наклона линии регрессии $a = 0,0559$, y -пересечение $b = 1807$, стандартная ошибка между 20-летними значениями и линией тренда равна 0,0552. Достоверность этой гипотезы равна 0,324.

На рис. 4б показан пример проведенных расчетов и линия тренда количества осадков для локации г. Владикавказ. Из рис. 4в видно, что количество осадков показывает уменьшение во времени с коэффициентом 0,029. Достоверность этой гипотезы равна 0,079.

На рис. 4в представлен пример проведенных расчетов и линия тренда температуры на высоте 2 м для локации г. Владикавказ. Из рис. 4в видно, что тренд температуры является возрастающим с коэффициентом 0,044. Достоверность этой гипотезы равна 0,094.

Характеристики построенных линий тренда для остальных рассмотренных локаций собраны в таблице. Отметим, что интегральные характеристики строились по исходным данным, которые не осреднялись и не сглаживались. Исходные данные, как это видно из рис. 4, не являются гладкими, особенно это касается измеренных значений АОТ.

Данные таблицы позволяют проанализировать вариации трендов с изменением высоты локации. Тренд температуры является возрастающим для всех локаций. Угол наклона тренда имеет ярко выраженную зависимость от высоты локации. Наименьший угол наклона 0,0251 вычисляется для Моздока, Владикавказ и Беслан с углом наклона 0,0445 расположены несколько выше. Село Фиагдон расположено на высоте 1200÷1600 м над уровнем моря и имеет угол наклона 0,0769. Расположенное на высоте 1900÷2200 м над уровнем моря с. Цей имеет угол наклона 0,0926.

При этом для горных локаций Цей и Фиагдон АОТ мала и значительную часть года близка к нулю. На основе этих данных можно считать, что тренды изменений температуры во времени отчетливее проявляются с увеличением высоты точки наблюдения.

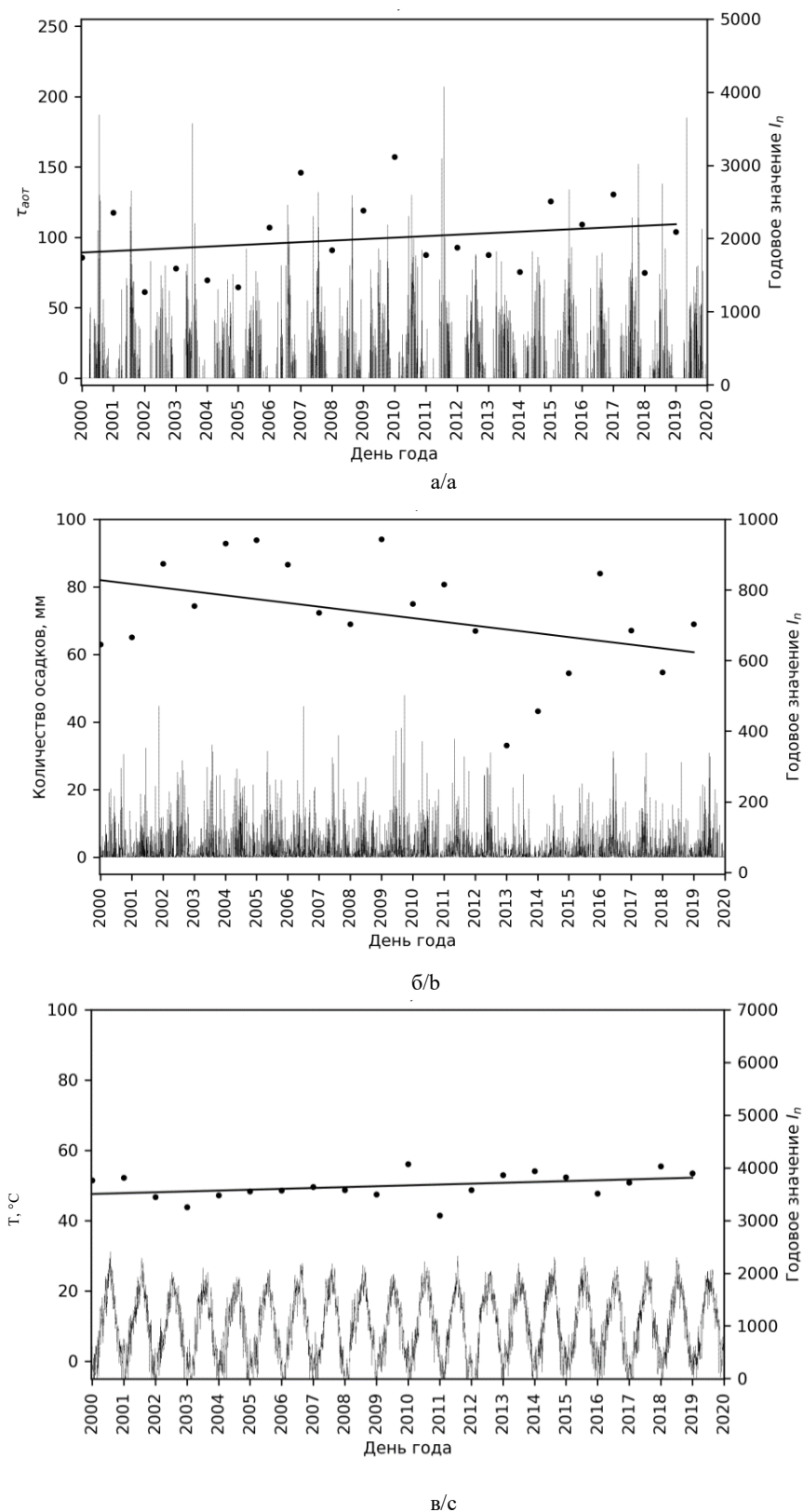


Рис. 4. Тренды изменений интегральных характеристик I_n по АОТ, температуре, количеству осадков в г. Владикавказе (по сравнению с годовым ходом несглаженных ежедневных неосредненных значений): а – АОТ; б – количество осадков; в – температура / Fig. 4. Trends of changes in the integral characteristics of I_n by AOT, temperature, precipitation in Vladikavkaz (in comparison with the annual variation of unsmoothed daily non-averaged values): a - AOT; b - precipitation; c - temperature

Временной тренд количества осадков является убывающим. Из данных таблицы также видно, что угол наклона линии тренда варьирует с высотой локации. Наименьший по модулю угол наклона ($-0,0277$) вычисляется для Моздока. Для Владикавказа и Беслана, которые расположены выше Моздока, угол наклона составляет $-0,0294$. Для с. Фиагдон $-0,0307$, а для с. Цей $-0,0352$.

Тренды изменения АОТ преимущественно положительными, но для Моздока являются отрицательными. И также демонстрируют связь с высотой локации. Угол наклона для Моздока ($0,0483$), Владикавказа ($0,0559 \div 0,0711$) и Беслана ($0,0709$) значительно выше, чем для высокогорных селений Фиагдон ($0,014$) и Цей ($0,0044$).

Параметры интегральных характеристик / Parameters of integral characteristics

Локация	Наклон линии регрессии	Пересечение линии регрессии	Корреляция R	p-значение вероятности	Стандартная ошибка
Интегральная характеристика АОТ					
Владикавказ	0,05594	1807,62	0,2322	0,3245	0,0552
Гизель	0,0711	2067,47	0,3110	0,1820	0,0512
Моздок	$-0,0546$	3216,05	$-0,1281$	0,5903	0,0996
Моздок-2	0,04826	1878,35	0,1978	0,4031	0,0564
Беслан	0,07088	2322,39	0,2696	0,2504	0,0597
Цей	0,00442	88,23	0,1123	0,6374	0,0092
Фиагдон	0,01397	219,44	0,1765	0,4568	0,0184
Интегральная характеристика температуры на высоте 2 м					
Владикавказ	0,0445	3503,74	0,3844	0,0942	0,0252
Гизель	0,0445	3503,74	0,3844	0,0942	0,0252
Моздок	0,0251	4333,97	0,2503	0,2872	0,0229
Моздок-2	0,0251	4333,97	0,2503	0,2872	0,0229
Беслан	0,0445	3503,74	0,3844	0,0942	0,0252
Цей	0,0926	1075,65	0,5899	0,0062	0,0299
Фиагдон	0,0769	1531,04	0,5530	0,0114	0,0273
Интегральная характеристика количества осадков					
Владикавказ	$-0,0294$	827,59	$-0,4014$	0,0794	0,0158
Гизель	$-0,0294$	827,59	$-0,4014$	0,0794	0,0158
Моздок	$-0,0277$	719,59	$-0,3970$	0,0830	0,0151
Моздок-2	$-0,0277$	719,59	$-0,3970$	0,0830	0,0151
Беслан	$-0,0294$	827,59	$-0,4014$	0,0794	0,0158
Цей	$-0,0352$	935,33	$-0,4338$	0,0560	0,0172
Фиагдон	$-0,0307$	854,49	$-0,4476$	0,0478	0,0145

Достоверность, показанная в предпоследнем столбце таблицы, для значений АОТ меньше и составляет от 0,1820 до 0,3245 для Владикавказа и Беслана, $0,4031 \div 0,5903$ – для Моздока, $0,4568 \div 0,6374$ – для горных районов Фиагдон и Цей, для которых также различается от высоты точки локации.

Обсуждение

При расстоянии между предгорной локацией г. Владикавказ и равнинной локацией г. Моздок порядка 130 км, различие в максимальной средней температуре составляет около 4 °С. Соответствующее превышение в количестве осадков равно 1 мм для интервала с 100-го по 200-й день года. Помимо высоты, на которой расположена локация, на полученные результаты могут влиять еще несколько факторов. Различия могут обуславливаться влиянием локальных метеоусловий, существенных в

предгорных районах, поступлением более холодного воздуха из Дарьяльского ущелья, обильным растительным покровом в предгорьях и т.п.

Для с. Цей, находящегося на высоте $1910 \div 2200$ м вблизи нетающих ледников, влияние горных метеоусловий существенно. Здесь максимальные летние температуры составляют 17 °С, при этом дней с количеством осадков более 2 мм наблюдается больше (с 60-го по 340-й день). Для Владикавказа, Моздока и Беслана количество таких дней меньше и составляет: с 100-го по 290-й для Владикавказа, с 100-го по 210-й для Моздока, с 100-го по 180-й для Беслана, с 100-го по 190-й для Фиагдона.

Для Владикавказа, Моздока и Беслана максимальное значение АОТ примерно одинаково и составляет $26 \div 32$. При этом период времени, когда наблюдаются такие значения АОТ для Моздока и Беслана, больше. Для с. Цей следует также отметить, что положительные значения АОТ наблюдаются только при температуре, превышающей +7 °С.

Для рассмотренных локаций АОТ уменьшается с увеличением высоты точки наблюдения. Широко известно уменьшение температуры с высотой в атмосфере [28], которое имеет понятный физический смысл. Сопоставление этих закономерностей может указывать (наряду с выполненным статистическим анализом), что две величины – АОТ и температура атмосферы – могут быть связаны.

Общее увеличение площади снежного покрова с высотой, уменьшение содержания в атмосфере горных территорий антропогенных выбросов, возможно, еще и трудности, связанные с измерениями, приводят к уменьшению измеренных значений АОТ в горных условиях.

Из рис. 1 видно, что в исследованных локациях измеренные величины АОТ и температуры на высоте 2 м ведут себя похожим образом. АОТ увеличивается с повышением температуры и уменьшается с понижением температуры для сглаженных средних рядов. Также следует отметить, что чем ниже летние температуры, тем АОТ меньше.

Дополнительную информацию о связи этих величин дают диаграммы рассеяния, построенные как

графики зависимости АОТ от температуры или от количества осадков. Примеры таких диаграмм приведены в работе [27]. Диаграммы рассеяния для Моздока и Беслана имеют разброс изменений АОТ на интервале температур $17\div 22\text{ }^{\circ}\text{C}$, который достигает 15 единиц. Для Владикавказа подобный разброс более узкий, порядка $3\div 5$ единиц. Для Цей осредненное значение АОТ имеет пиковое значение 1,8, разброс в диапазоне $0,7\div 1,2$.

Зависимости на графиках изменения АОТ и температуры на высоте 2 м в отдельные годы могут существенно отличаться от поведения средних за 20 лет измерений. В 2011 г. для Владикавказа наблюдалось несколько локальных максимумов АОТ (рис. 5). В 2007 г. для Беслана зафиксирован локальный максимум АОТ, практически вдвое превышающий среднее значение АОТ. Каждая кривая на рис. 5 сглаживалась методом скользящей средней по 15 точкам. Годовые ряды данных для АОТ и для температуры воздуха также имеют высокие значения коэффициента корреляции, которые лишь немного ниже значений, вычисляемых для средних сглаженных рядов данных.

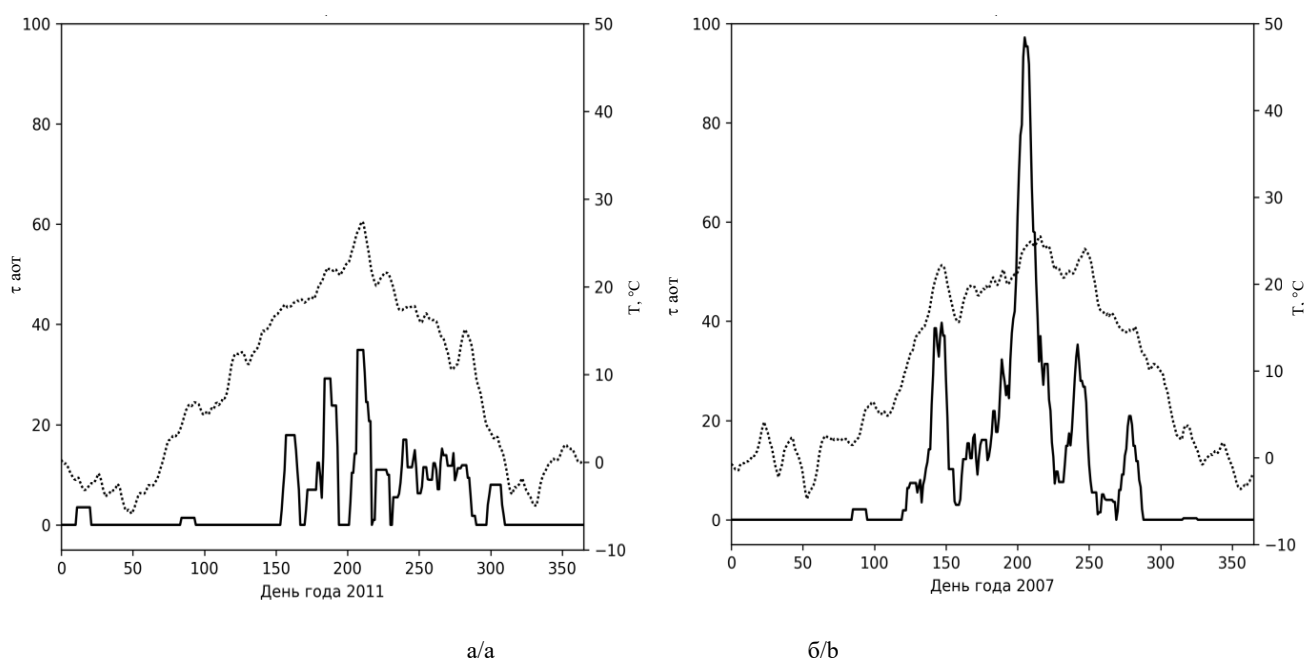


Рис. 5. Сглаженные АОТ и температура: а – за 2011 г. для Владикавказа; б – за 2007 год для Беслана
/ Fig. 5. Smoothed AOT and temperature: a - for 2011 for Vladikavkaz; b - for 2007 for Beslan

Закключение

В работе исследованы двадцатилетние ряды значений АОТ, количества осадков и приповерхностной температуры воздуха, полученные по спутниковым данным MODIS для горных и предгорных территорий

РСО-Алании за 2000–2019 гг. Показаны коэффициенты корреляции средних АОТ и температуры воздуха на высоте 2 м, средних АОТ и количества осадков, а также неосредненных данных для различных локаций.

Пространственно-временные вариации АОТ над регионом определяются не только атмосферными

аэрозолями (пыль, дым, антропогенный аэрозоль, газово-пепловые выбросы вулканов), но также могут быть связаны с такими метеорологическими параметрами, как температура и количество осадков в данной местности. В летнее время с ростом температуры АОТ в среднем повышается. Кроме того, имеет значение высота над уровнем моря исследуемого региона. С увеличением высоты можно ожидать уменьшения АОТ.

Эти наблюдения позволяют дать некоторый средний прогноз по АОТ в произвольной точке наблюдений, используя знания об измеренной температуре в этой точке, с учетом количества осадков. Для такого прогноза имеют значение высота точки над поверхностью и близость горных массивов.

Литература

1. Розенберг Г.В. Оптические исследования атмосферного аэрозоля // Успехи физ. наук. 1968. Т. 95, вып. 1. С. 159–208.
2. Гинзбург А.С., Губанова Д.П., Минашкин В.М. Влияние естественных и антропогенных аэрозолей на глобальный и региональный климат // Рос. хим. журн. (Журн. Рос. хим. об-ва им. Д.И. Менделеева). 2008. Т. 52, № 5. С. 112–119.
3. Чубарова Н.Е., Горбаренко Е. В., Незваль Е.И., Шиловцева О.А. Аэрозольные и радиационные характеристики атмосферы во время лесных и торфяных пожаров в 1972, 2002 и 2010 гг. в Подмоскowie // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2011. Т. 47, № 6. С. 790–804.
4. Кузьмина Ж.В. Анализ многолетних метеорологических трендов на юге России и Украины (от лесостепи до пустынь) // Аридные экосистемы. 2007. Т. 13, № 32. С. 47–61.
5. Бартенева О.Д., Никитинская Н.И., Сакунов Г.Г., Веселова Л.К. Прозрачность толщи атмосферы в видимой и ближней ИК-области спектра / под ред. А.И. Воскресенского, Е.О. Федоровой. Л.: Гидрометеоиздат, 1991. 223 с.
6. Тимофеев Ю.М. Исследование атмосферы Земли методом прозрачности. СПб.: Наука, 2016. 367 с.
7. Floutsi A.A., Korras-Carraca M.B., Matsoukas C., Hatzianastassiou N., Biskos G. Climatology and trends of aerosol optical depth over the Mediterranean basin during the last 12 years (2002–2014) based on Collection 006 MODIS-Aqua data // Science of the Total Environment. 2016. Vol. 551–552. P. 292–303. Doi 10.1016/j.scitotenv.2016.01.192.
8. Абдуллаев С.Ф., Назаров Б.И., Салихов Т.Х., Маслов В.А., Мадвалиев У. Взаимосвязь изменения температуры воздуха и оптической толщины аридного аэрозоля по данным AERONET // Докл. Академии наук Республики Таджикистан. 2011. Т. 54, № 12. С. 984–990.
9. Сакерин С.М., Горбаренко Е.В., Кабанов Д.М. Особенности многолетней изменчивости аэрозольной оптической толщи атмосферы и оценки влияния различных факторов // Оптика атмосферы и океана. 2008. Т. 21, № 7. С. 625–631.
10. Антонов С.А., Скрипчинский А.В. Использование данных дистанционного зондирования для многолетнего мониторинга за состоянием агроландшафта // Наука. Инновации. Технологии. 2018. № 2. С. 89–100. Doi 10.25930/ac93-5d05.
11. Mao K.B., Ma Y., Tan X.L., Shen X., Liu G., Li Z.L., Chen J.M., Xia L. Global surface temperature change analysis based on MODIS data in recent twelve years // Advances in Space Research. 2017. Vol. 59 (2). P. 503–512. Doi 10.1016/j.asr.2016.11.007.
12. Исаков А.А., Тихонов А.В., Ромашова А.В. Статистические характеристики спектральных зависимостей параметра конденсационной активности приземного аэрозоля // Вестн. ТГУ. 2013. Т. 18, вып. 4. С. 1383–1385.
13. Кабанов Д.М., Сакерин С.М., Турчинович Ю.С. Межгодовая и сезонная изменчивость аэрозольной оптической толщи атмосферы в районе г. Томска (1995–2018 гг.) // Оптика атмосферы и океана. 2019. Т. 32, № 7. С. 548–555.
14. Панченко М.В., Кабанов М.В., Пхалагов Ю.А., Белан Б.Д., Козлов В.С., Сакерин С.М., Кабанов Д.М., Ужегов В.Н., Щелканов Н.Н., Полькин В.В., Терпугова С.А., Толмачев Г.Н., Яушева Е.П., Аришинов М.Ю., Симоненков Д.В., Шмаргунов В.П., Чернов Д.Г., Турчинович Ю.С., Полькин В.В., Журавлева Т.Б., Насртдинов И.М., Зенкова П.Н. Комплексные исследования тропосферного аэрозоля в ИОА СО РАН (этапы развития) // Оптика атмосферы и океана. 2019. Т. 32, № 9. С. 703–716.
15. Сакерин С.М., Кабанов Д.М. Пространственно-временная изменчивость аэрозольной оптической толщи атмосферы на маршруте 42-го рейса НИС «Академик Борис Петров» // Оптика атмосферы и океана. 2018. Т. 31, № 1. С. 11–16.
16. Белан Б.Д., Зуев В.Е., Панченко М.В. Основные результаты самолетного зондирования аэрозоля в ИОА СО РАН (1981–1991 гг.) // Оптика атмосферы и океана. 1995. Т. 8, № 1–2. С. 131–156.
17. Русина Е.Н., Радионов В.Ф., Сибир Е.Е. Результаты мониторинга аэрозольной составляющей атмосферы в средних и высоких широтах и над акваторией Мирового океана // Проблемы Арктики и Антарктики. 2016. № 2. С. 5–15.
18. Панкратова Н.В., Ракитина А.В., Скороход А.И., Штабкин Ю.А., Ракитин В.С. Результаты сопоставления измерений аэрозольной оптической толщи (АОТ) орбитального спектрометра MODIS (Terra) с наземными измерениями AERONET и оценки трендов АОТ над Евразией // Турбулентность, динамика атмосферы и климата: материалы Междунар. конф. М.: Физматкнига, 2018. С. 156.

19. Mao K.B., Ma Y., Xia L., Chen W.Y., Shen X.Y., He T.J., Xu T.R. Global aerosol change in the last decade: An analysis based on MODIS data // *Atmospheric Environment*. 2014. Vol. 94. P. 680–686. Doi 10.1016/j.atmosenv.2014.04.053.
20. Remer L.A., Tanre D., Kaufman Y. Algorithm for remote sensing of tropospheric aerosol from MODIS // Collection 5. MODIS Algorithm Theoretical Basis Document No. ATBD-MOD-02 (2006). 87 p. URL: http://modis.gsfc.nasa.gov/data/atbd/atbd_mod02.pdf (дата обращения: 08.04.2020).
21. Levy R., Hsu C., et al. MODIS Atmosphere L2 Aerosol Product. NASA MODIS // Adaptive Processing System, Goddard Space Flight Center, USA. 2015. URL: http://dx.doi.org/10.5067/MODIS/MOD04_L2.006 (Terra). Doi 10.5067/MODIS/MYD04_L2.006 (Aqua).
22. Свєрдлик Л.Г. Сравнительный анализ многолетних наземных и спутниковых измерений аэрозольной оптической толщи над северным Тянь-Шанем // Вестн. КРСУ. 2017. Т. 17, № 12. С. 195–200.
23. Deng C., Zhang W. Spatiotemporal distribution and the characteristics of the air temperature of a river source region of the Qinghai-Tibet Plateau // *Environ. Monit. Assess.* 2018. Vol. 190. Art. No. 368. Doi 10.1007/s10661-018-6739-7.
24. Трошкин Д.Н., Павлов В.Е. Статистическая модель оптических толщ облаков в некоторых зонах региона полуострова Ямал по спутниковым данным // *Оптика атмосферы и океана*. 2018. Т. 31, № 11. С. 876–880.
25. Wang X., Guo Z., Wang Y., Chen Y., Sheng X., Xu H. Monitoring temporal-spatial variations of AOD over the Yangtze River Delta, China // *Stoch. Environ. Res. Risk Assess.* 2018. Vol. 32. P. 2619–2632. Doi 10.1007/s00477-018-1575-4.
26. Shrestha S., Peel M., Moore G. Development of a Regression Model for Estimating Daily Radiative Forcing Due to Atmospheric Aerosols from Moderate Resolution Imaging Spectrometers (MODIS) Data in the Indo Gangetic Plain (IGP) // *Atmosphere*. 2018. Vol. 9. Art. No. 405. Doi 10.3390/atmos9100405.
27. Каменецкий Е.С., Радионов А.А., Тимченко В.Ю., Панаэтова О.С. Об изменчивости аэрозольной оптической толщины в горных, предгорных и степных районах Северного Кавказа по данным спутниковых измерений MODIS // *Современные проблемы геологии, геофизики и геоэкологии Северного Кавказа: материалы конф. Грозный: АН Чеченской Республики*, 2020. Ч. 2. С. 424–431.
28. Gill A.E. *Atmosphere-Ocean Dynamics* // *International Geophysics Series*. 1982. Vol. 30. P. 662.
2. Ginzburg A. S., Gubanova D. P., Minashkin V. M. (2008). The impact of natural and anthropogenic aerosols on the global and regional climate. *Ros. khim. zhurn. (Zhurn. Ros. khim. ob-va im. D.I. Mendeleeva)*, vol. 52, No. 5, pp. 112–119. (in Russian).
3. Chubarova N.E., Gorbarenko E.V., Nezval E.I., Shilovtseva O. A. (2011). Aerosol and radiation characteristics of the atmosphere during forest and peat fires in 1972, 2002 and 2010 in the suburbs. *Izv. RAN. Fizika atmosfery i okeana*, vol. 47, No. 6. pp. 790–804. (in Russian).
4. Kuzmina Zh.V. (2007). Analysis of long-term meteorological trends in the south of Russia and Ukraine (from forest-steppe to deserts). *Aridnye ekosistemy*, vol. 13, No. 32, pp. 47–61. (in Russian).
5. Barteneva O.D., Nikitinskaya N.I., Sakunov G.G., Veselova L.K. (1991). *Transparency of the atmosphere in the visible and near IR region of the spectrum*. A.I. Voskresensky, E.O. Fedorova (Eds.). Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 223 p. (in Russian).
6. Timofeev Yu.M. (2016). *Study of the Earth's atmosphere by transparency*. St. Petersburg, Nauka Publ., 367 p. (in Russian).
7. Floutsi A.A., Korras-Carraca M.B., Matsoukas C., Hatzianastassiou N., Biskos G. (2016). Climatology and trends of aerosol optical depth over the Mediterranean basin during the last 12 years (2002–2014) based on Collection 006 MODIS-Aqua data. *Science of The Total Environment*, vol. 551–552, pp. 292–303. Doi 10.1016/j.scitotenv.2016.01.192.
8. Abdullayev S.F., Nazarov B.I., Salikhov T.Kh., Maslov V.A., Madvaliev U. (2011). The relationship between the change in air temperature and the optical thickness of the arid aerosol according to AERONET. *Dokl. Akademii nauk Respubliki Tadzhikistan*, vol. 54, No. 12, pp. 984–990. (in Russian).
9. Sakerin S.M., Gorbarenko E.V., Kabanov D.M. (2008). Features of long-term variability in the aerosol optical thickness of the atmosphere and assessment of the influence of various factors. *Optika atmosfery i okeana*, vol. 21, No. 7, pp. 625–631. (in Russian).
10. Antonov S.A., Skripchinsky A.V. (2018). The use of remote sensing data for many years of monitoring the state of the agricultural landscape. *Nauka. Innovatsii. Tekhnologii*, No. 2, pp. 89–100. Doi 10.25930/ac93-5d05. (in Russian).
11. Mao K.B., Ma Y., Tan X.L., Shen X., Liu G., Li Z.L., Chen J.M., Xia L. (2017). Global surface temperature change analysis based on MODIS data in recent twelve years. *Advances in Space Research*, vol. 59, iss. 2, pp. 503–512. Doi 10.1016/j.asr.2016.11.007.
12. Isakov A.A., Tikhonov A.V., Romashova A.V. (2013). Statistical characteristics of spectral dependencies of the condensation activity parameter of the ground-level aerosol. *Vestnik TSU*, vol. 18, No. 4, pp. 1383–1385. (in Russian).
13. Kabanov D.M., Sakerin S.M., Turchinovich Yu.S. (2019). Inter-annual and seasonal variability of the aerosol

References

1. Rosenberg G.V. (1968). Optical studies of atmospheric aerosol. *Uspekhi fiz. nauk*, vol. 95, iss. 1, pp. 159–208. (in Russian).

optical thickness of the atmosphere in the area of city Tomsk (1995-2018). *Optika atmosfery i okeana*, vol. 32, No. 7, pp. 548-555. (in Russian).

14. Panchenko M.V., Kabanov M.V., Pkhalagov Yu.A., Belan B.D., Kozlov V.S., Sakerin S.M., Kabanov D.M., Uzhegov V.N., Shchelkanov N.N., Polkin V.V., Terpugova S.A., Tolmachev G.N., Yausheva E.P., Arshinov M.Yu., Simonenkov D.V., Shmargunov V.P., Chernov D.G., Turchinovich Yu.S., Polkin Vas.V., Zhuravleva T.B., Nasrtdinov I.M., Zenkova P.N. (2019). Comprehensive studies of tropospheric aerosol in the IOA SB RAS (stages of development). *Optika atmosfery i okeana*, vol. 32, No. 9, pp. 703-716. (in Russian).

15. Sakerin S.M., Kabanov D.M. (2018). Spatial-temporal variability of the aerosol optical thickness of the atmosphere on the route of the 42nd flight of the NIS "Academician Boris Petrov". *Optika atmosfery i okeana*, vol. 31, No. 1, pp. 11-16. (in Russian).

16. Belan B.D., Zuev V. E., Panchenko M.V. (1995). The main results of aircraft aerosol sensing at the IOA SB RAS (1981-1991). *Optika atmosfery i okeana*, vol. 8, No. 1-2, pp. 131-156. (in Russian).

17. Rusina E.N., Radionov V.F., Sibir E.E. (2016). Results of monitoring the aerosol component of the atmosphere in medium and high latitudes and over the world ocean. *Problemy Arktiki i Antarktiki*, No. 2, pp. 5-15. (in Russian).

18. Pankratova N.V., Rakitina A.V., Skorokhod A.I., Shtabkin Yu.A., Rakitin V.S. (2018). Results of comparison of measurements of aerosol optical thickness (AOT) of an orbital spectrometer of MODIS (Terra) with land measurements of AERONET and assessment of trends of AOT over Eurasia. *Turbulence, Dynamics of the Atmosphere and Climate*. International Conference. Moscow, Fizmatkniga Publ., p. 156. (in Russian).

19. Mao K.B., Ma Y., Xia L., Chen W.Y., Shen X.Y., He T.J., Xu T.R. (2014). Global aerosol change in the last decade: An analysis based on MODIS data. *Atmospheric Environment*, vol. 94, pp. 680-686. Doi 10.1016/j.atmosenv.2014.04.053.

20. Remer L.A., Tanre D., Kaufman Y. (2006). Algorithm for remote sensing of tropospheric aerosol from

MODIS. *Collection 5. MODIS Algorithm Theoretical Basis Document No. ATBD-MOD-02*, 87 p. Available at: http://modis.gsfc.nasa.gov/data/atbd/atbd_mod02.pdf (accessed April 8, 2020).

21. Levy R., Hsu C., et al. (2015). MODIS Atmosphere L2 Aerosol Product. *NASA MODIS Adaptive Processing System*. Goddard Space Flight Center, USA. Doi 10.5067/MODIS/MYD04_L2.006 (Aqua).

22. Sverdlik L.G. (2017). Comparative analysis of long-term terrestrial and satellite measurements of aerosol optical thickness over northern Tian Shan. *Vestn. KRSU*, vol. 17, No. 12, pp. 195-200. (in Russian).

23. Deng C., Zhang W. (2018). Spatiotemporal distribution and the characteristics of the air temperature of a river source region of the Qinghai-Tibet Plateau. *Environ. Monit. Assess.*, vol. 190, art. No. 368. Doi 10.1007/s10661-018-6739-7.

24. Troshkin D.N., Pavlov V.E. (2018). Statistical model of optical cloud strata in some zones of the Yamal Peninsula region according to satellite data. *Optika atmosfery i okeana*, vol. 31, No. 11, pp. 876-880. (in Russian).

25. Wang X., Guo Z., Wang Y. et al. (2018). Monitoring temporal-spatial variations of AOD over the Yangtze River Delta, China. *Stoch. Environ. Res. Risk Assess.*, vol. 32, pp. 2619-2632. Doi 10.1007/s00477-018-1575-4.

26. Shrestha S., Peel M., Moore G. (2018). Development of a Regression Model for Estimating Daily Radiative Forcing Due to Atmospheric Aerosols from Moderate Resolution Imaging Spectrometers (MODIS) Data in the Indo Gangetic Plain (IGP). *Atmosphere*, vol. 9, art. No. 405. Doi 10.3390/atmos9100405.

27. Kamenetsky E.S., Radionoff A.A., Timchenko V.U., Panaetova O.S. (2020). On variability of aerosol optical thickness in mountain, foothill and plain areas of the Northern Caucasian based on satellite measurements MODIS. *Modern problems of geology, geophysics and geoecology of the North Caucasus*. Materials of the Conference. Grozny, Academy of Sciences, Chechen Republic, part 2, pp. 424-431. (in Russian).

28. Gill A.E. (1982). Atmosphere-Ocean Dynamics. *International Geophysics Series*, vol. 30, p. 662.

УДК 616.988.26

doi 10.18522/1026-2237-2021-3-64-73

ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА РИСКА БИОЛОГИЧЕСКОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ ТЕРРИТОРИИ РЕСПУБЛИКИ БАШКОРТОСТАН ПО ПРИРОДНО-ОЧАГОВЫМ ФАКТОРАМ

© 2021 г. Н.Г. Курамышина¹, А.Н. Елизарьев¹, Э.В. Нафикова¹,
И.В. Вдовина¹, Т.П. Смирнова¹, Н.Г. Кутлин²

¹Уфимский государственный авиационный технический университет, Уфа, Россия,

²Башкирский государственный университет (Бирский филиал), Бирск, Россия

GEOECOLOGICAL ASSESSMENT OF THE RISK OF BIOLOGICAL CONTAMINATION OF THE REPUBLIC OF BASHKORTOSTAN TERRITORY BY NATURAL AND FOCAL FACTORS

N.G. Kuramshina¹, A.N. Yelizariev¹, E.V. Nafikova¹, I.V. Vdovina¹, T.P. Smirnova¹, N.G. Kutlin²

¹Ufa State Aviation Technical University, Ufa, Russia,

²Bashkir State University (Birsk branch), Birsk, Russia

Курамышина Наталья Георгиевна – доктор биологических наук, профессор, кафедра безопасности производства и промышленной экологии, Уфимский государственный авиационный технический университет, ул. Карла Маркса, 12, г. Уфа, Республика Башкортостан, 450008, Россия, e-mail: n-kuramshina@mail.ru

Natalia G. Kuramshina - Doctor of Biological Sciences, Professor, Department of Industrial Safety and Industrial Ecology, Ufa State Aviation Technical University, Karla Marxa St., 12, Ufa, Republic of Bashkortostan, 450008, Russia, e-mail: n-kuramshina@mail.ru

Елизарьев Алексей Николаевич – кандидат географических наук, доцент, заведующий кафедрой безопасности производства и промышленной экологии, Уфимский государственный авиационный технический университет, ул. Карла Маркса, 12, г. Уфа, Республика Башкортостан, 450008, Россия, e-mail: elizariev@list.ru

Alexey N. Yelizariev - Candidate of Geography, Associate Professor, Head of the Department of Industrial Safety and Industrial Ecology, Ufa State Aviation Technical University, Karla Marxa St., 12, Ufa, Republic of Bashkortostan, 450008, Russia, e-mail: elizariev@list.ru

Нафикова Эльвира Валериевна – кандидат технических наук, доцент, кафедра безопасности производства и промышленной экологии, Уфимский государственный авиационный технический университет, ул. Карла Маркса, 12, г. Уфа, Республика Башкортостан, 450008, Россия, e-mail: vira2006@yandex.ru

Elvira V. Nafikova - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Industrial Safety and Industrial Ecology, Ufa State Aviation Technical University, Karla Marxa St., 12, Ufa, Republic of Bashkortostan, 450008, Russia, e-mail: vira2006@yandex.ru

Вдовина Ирина Валерьевна – кандидат технических наук, доцент, кафедра безопасности производства и промышленной экологии, Уфимский государственный авиационный технический университет, ул. Карла Маркса, 12, г. Уфа, Республика Башкортостан, 450008, Россия, e-mail: vdovina_iv@mail.ru

Irina V. Vdovina - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Industrial Safety and Industrial Ecology, Ufa State Aviation Technical University, Karla Marxa St., 12, Ufa, Republic of Bashkortostan, 450008, Russia, e-mail: vdovina_iv@mail.ru

Смирнова Татьяна Петровна – кандидат технических наук, доцент, кафедра безопасности производства и промышленной экологии, Уфимский государственный авиационный технический университет, ул. Карла Маркса, 12, г. Уфа, Республика Башкортостан, 450008, Россия, e-mail: tpsmirnova@mail.ru

Tatyana P. Smirnova - Candidate of Technical Sciences, Department of Industrial Safety and Industrial Ecology, Ufa state Aviation Technical University, associate Professor, Karla Marxa St., 12, Ufa, Republic of Bashkortostan, 450008, Russia, e-mail: tpsmirnova@mail.ru

Кутлин Николай Георгиевич – доктор биологических наук, профессор, кафедра биологии, экологии и химии, Башкирский государственный университет (Бирский филиал), ул. Интернациональная, 10, г. Бирск, Республика Башкортостан, 452450, Россия, e-mail: kutlin52@mail.ru

Nikolay G. Kutlin - Doctor of Biological Sciences, Professor, Department of Biology, Ecology and Chemistry, Bashkir State University (Birsky Branch), Internatsionalnaya St., 10, Birs, Republic of Bashkortostan, 452450, Russia, e-mail: kutlin52@mail.ru

Высокая значимость проблемы геморрагической лихорадки с почечным синдромом (ГЛПС) связана с масштабами распространения, поражением лиц активного возраста, длительным периодом снижения трудоспособности и высоким экономическим ущербом. Представлена оценка биологического загрязнения природно-очаговой вирусной инфекцией – ГЛПС в Республике Башкортостан (РБ). Наиболее активные очаги связаны с липовыми лесами, которые в республике преобладают. Показаны динамика и особенности заражения. Анализ геоэкологического состояния по ГЛПС показал, что на территории большинства районов республики существуют природно-очаговые инфекции ГЛПС. Наблюдается рост инфицированности грызунов вирусом ГЛПС, так, в 2016 г. он составлял 5,0 %, а в 2019 г. – 16,2. Рост заболеваемости населения имеет характерные эпидемиологические признаки для территории РБ, а увеличение районов высокого риска указывает на тенденции расширения и активизации в них очагов инфекции. При этом наблюдается рост заболеваемости, а заражение в 50 % случаев происходит при посещении лесов. В столице Башкортостана – городе Уфе, который расположен в зоне природного очага, – заболеваемость ГЛПС составляет почти 50 % всей территории республики. В связи с климатическими изменениями следует шире оценить многообразие экологических аспектов природно-очаговой инфекции ГЛПС, для противодействия их распространению, значительно усилить мероприятия по снижению этого опасного заболевания на территории РБ.

Ключевые слова: биологическое загрязнение, геморрагическая лихорадка с почечным синдромом, Республика Башкортостан, геоэкологическая оценка территории, природно-очаговые инфекции, эпидемиологический риск.

The high significance of the problem of hemorrhagic fever with renal syndrome (HFRS) is associated with the scale of spread, damage to persons of active age, a long period of reduced working capacity and high economic damage. The work presents an assessment of biological contamination by natural - focal viral infection - HFRS in the Republic of Bashkortostan (RB). The most active foci are associated with linden forests, which prevail in the republic. The work shows the dynamics and features of infection. Analysis of the geoecological state of the territory according to HFRS showed that in the territory of most regions of the republic there are natural-focal infections of HFRS. There is an increase in infection of rodents with the HFRS virus, so in 2016 it was 5.0 %, and in 2019 - 16.2 %. The increase in the incidence of the population has characteristic epidemiological signs for the territory of RB, and the increase in high-risk areas indicates trends in the expansion and activation of foci of infection in them. At the same time, there is an increase in incidence, and infection in 50 % of cases occurs when visiting forests. In the capital of Bashkortostan - the city of Ufa, which is located in the natural zone, the incidence of HFRS is almost 50 % of the entire territory of the republic. In connection with climate changes, the diversity of environmental aspects of natural-focal infection of HFRS should be more widely assessed to counter their spread and measures to reduce this dangerous disease in the RB should be significantly strengthened.

Keywords: biological contamination, hemorrhagic fever with renal syndrome, Republic of Bashkortostan, geoecological assessment of the territory, natural focal infections, epidemiological risk.

Введение

Высокая социальная значимость проблемы геморрагической лихорадки с почечным синдромом (ГЛПС) связана с масштабами распространения, поражением лиц активного возраста, а также с длительным периодом снижения трудоспособности [1, 2]. Экономический ущерб от ГЛПС в Российской Федерации составляет в среднем 9,4 млрд руб. в год и определяется затратами медицинской помощи, расходами на социальную помощь людям, получившим инвалидность. Масштаб социально-экономического ущерба связан с тем, что около 85 % заболевших – мужчины в возрасте от 20 до 50 лет [3].

Особую опасность представляет биологическое загрязнение среды возбудителями инфекционных и паразитарных болезней. Значительные изменения окружающей среды в результате антропогенного

воздействия приводят к непредсказуемым последствиям в поведении популяций возбудителей и переносчиков опасных для человека болезней [4–6].

Необходима пространственно-временная характеристика риска, которая невозможна без анализа эпидемиологической расшифровки причин, выявления факторов и групп риска [7].

В настоящее время ГЛПС, занимая ведущее место в структуре природно-очаговой заболеваемости вирусной этиологии в стране, является актуальной проблемой в области обеспечения благополучия населения. Наиболее сложная ситуация отмечается в субъектах Приволжского федерального округа (ПФО), где заболеваемость составляет 80 % от общероссийского показателя, что в 4 раза выше, чем в среднем по России [8–10].

Существует шесть вирусов – возбудителей ГЛПС, которые находятся в природе у шести разных

видов мышевидных грызунов, являющихся источниками заражения людей. Анализ заболеваемости ГЛПС в России показал, что 97,7 % всех случаев ГЛПС обусловлены вирусом Пуумала, что указывает на его ведущую роль у нас и в Европе. Основным резервуарным хозяином и источником заражения человека является рыжая полёвка [6, 11].

В настоящее время отсутствует даже тенденция к снижению заболеваемости ГЛПС, происходит расширение её ареала, участились вспышки этой инфекции, что свидетельствует о возрастающей социальной значимости этого вида биологического загрязнения [12].

Так, за период с 2000 по 2018 г. в России было зарегистрировано 137 430 случаев заболевания ГЛПС, включая 3300 детей в возрасте до 14 лет. У 570 больных ГЛПС заболевание закончилось летальным исходом. Более 98 % от общего числа случаев ГЛПС выявлено в европейской части РФ и около 2 % – в азиатской части. Эпидемиологический риск определяется как возможность осложнения эпидемиологической ситуации. Анализ заболеваемости в РФ свидетельствует о том, что эпидемиологическая обстановка по ГЛПС характеризуется постоянством и высокой напряженностью, а также превосходит заболеваемость в странах Европы в 3,2 раза [13–15].

В субъектах ПФО регистрируются крайне высокие показатели заболеваемости, а в отдельные годы и резкие подъемы (в 1997 г. в РБ – 9403 случая ГЛПС, в 2009 г. – 3257; в Республике Удмуртии в 2015 г. – 1748 случаев заболевания, в Саратовской области в 2014 г. – 1125) [6].

На территориях природных очагов ГЛПС находятся рекреационные, зелёные зоны городов, где сосредоточены объекты социального характера – спортивно-оздоровительные, детские лагеря, базы отдыха. Там же в настоящее время идёт активное строительство жилых объектов. Следует подчеркнуть, что профилактические меры – соблюдение общественной и личной гигиены – неспособны обеспечить безопасность населения [16].

В Республике Башкортостан (РБ) расположен активный очаг ГЛПС, на долю которого приходится от 40 до 60 % заболеваемости по России.

В связи с этим представляется актуальной геоэкологическая оценка этого вида биологического загрязнения, что необходимо для совершенствования мероприятий по его снижению на территории РБ.

Цель данной работы – пространственный анализ по уровню риска заражения и выявление особенностей потенциальной опасности природных очагов ГЛПС на территории Башкортостана в настоящий период.

Материалы и методы: материалы государственных докладов «О состоянии санитарно-эпидемиологического благополучия населения в Российской Федерации» по РБ; статистические сведения по заболеваемости ГЛПС, полученные эпидемиологическим методом исследования, согласно официальным отчетам и государственным источникам информации [17–19].

В работе была использована информация о заболеваемости ГЛПС в РБ (статистические формы отчетности № 1 «Сведения об инфекционных и паразитарных заболеваниях» и информационно-аналитические бюллетени Республиканского центра профилактики СПИД и инфекционных заболеваний за 2015–2019 гг.).

Определение активности очаговой территории по классификации, учитывающей уровень заболеваемости населения данной инфекцией: высокий – при заболеваемости от 10,0 и более на 100 тыс. населения; средний – от 1,0 до 9,0 и низкий – менее 1,0 на 100 тыс. населения [10]. Территория риска – это административная территориальная единица, характеризующаяся повышенным уровнем заболеваемости и распространенности ГЛПС.

Результаты и выводы

Башкортостан входит в состав ПФО и находится в южной части Уральских гор. Регион граничит: на севере – с Пермским краем и Свердловской областью, на востоке – с Челябинской областью, на юге – с Оренбургской областью, на западе – с Республикой Татарстан, на северо-западе – с Республикой Удмуртией. По количеству липовых лесов региону нет равных в России. Здесь сосредоточена треть липовых лесов страны, которые разрастаются и активно вытесняют некогда преобладавшие хвойные породы. Это создаёт прекрасные условия и кормовую базу для мелких млекопитающих – грызунов. В лесостепной и западной лесостепной зонах РБ и находятся наиболее активные очаги. Уровень заболеваемости ГЛПС связан с численностью переносчиков данного заболевания – мелких млекопитающих, также зависит от природных и погодных условий.

В Башкортостане можно выделить 10 территорий риска – районов с высоким уровнем ГЛПС. Так, в 2017 г. Нуримановский, Татышлинский и Аскинский районы показали заболеваемость ГЛПС выше республиканского уровня более чем в 5 раз, Краснокамский и Караидельский – в 3 раза, а Янаульский, Калтасинский, Балтачевский, Благоварский и Бураевский районы имели превышение от 2 до 2,7 раза (табл. 1, рис. 1) [17].

В связи с изменениями климата и обострением экологической обстановки в ряде регионов происходят значительные изменения численности мелких грызунов и млекопитающих. Основные переносчики ГЛПС – полёвка рыжая (*Myodes glareolus* Schreber, 1780), полёвка обыкновенная (*Microtus arvalis* Pallas, 1779), мышь лесная (*Apodemus uralensis*

Pallas, 1811), мышь полевая (*A. agrarius* Pallas, 1771), мышь желтогорлая (*A. flavicollis* Melchior, 1834), бурозубка обыкновенная (*Sorex araneus* Linnaeus, 1758), однако ведущая роль принадлежит полёвке рыжей. Границы природных очагов ГЛПС расширяются и вовлекают новые территории [10, 17].

Таблица 1

Территории Республики Башкортостан с риском высокой заболеваемости ГЛПС (на 100 тыс. чел.), 2017 г.
/ Risk areas of the Republic of Bashkortostan with a high incidence of HFRS (per 100 thousand people), 2017

Район	Показатель заболеваемости (ПЗ) на 100 тыс. чел.	Коэффициент превышения по РБ (ПЗ/ПЗ _{РБ})
Нуримановский	191,6	6,0
Татышлинский	183,3	5,7
Аскинский	169,6	5,3
Краснокамский	101,9	3,2
Караидельский	94,0	2,9
Янаульский	86,8	2,7
Калтасинский	84,7	2,6
Балтачевский	79,0	2,5
Благовещенский	72,9	2,3
Бураевский	67,7	2,1
Среднее по РБ	32,1	

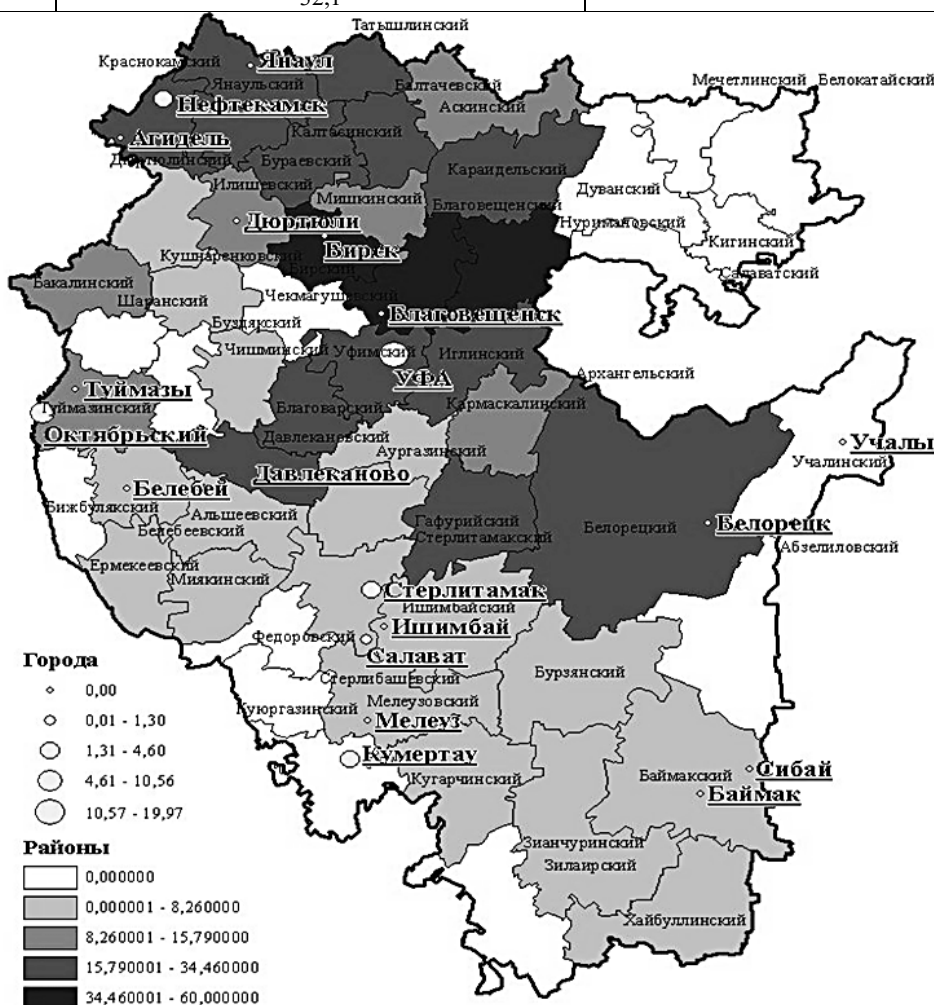


Рис. 1. Геоэкологическая оценка заболеваемости ГЛПС в Республике Башкортостан (на 100 тыс. чел.), 2017 г.
/ Fig. 1. Geoeological assessment of the incidence of HFRS in the Republic of Bashkortostan (per 100 thousand people), 2017

В 2018 г. республиканский показатель заболеваемости ГЛПС снизился до 27,1 на 100 тыс. чел., что ниже предыдущего года на 18 %, но очаги инфекции находились в 44 районах и 8 городах РБ.

Высокая активность очагов наблюдалась в 5 районах, где произошло значительное превышение республиканского показателя заболеваемости ГЛПС.

Выше в 5 и 4 раз в районах Аскинском, Мишкинском и в 3 раза в Краснокамском, Бирском, Благовещенском (табл. 2, рис. 2) [18]. В РБ средний показатель численности грызунов весной 2019 г. составил 7,0 %, осенью – 13,7. Это выше предыдущих лет (2018 г. – 10,8 %; 2017 г. – 12,9; 2016 г. – 7,9) и указывает на тенденцию их роста (табл. 3).

Таблица 2

Территории РБ с риском высокой заболеваемости ГЛПС (на 100 тыс. чел.), 2018 г.
/ Territories at risk of high incidence of HFRS of the Republic of Bashkortostan (per 100 thousand people), 2018

Район	Показатель заболеваемости (ПЗ) на 100 тыс. чел.	Коэффициент превышения по РБ (ПЗ/ПЗ _{РБ})
Аскинский	134,8	5,0
Мишкинский	116,7	4,3
Краснокамский	99,2	3,7
Бирский	91,4	3,4
Благовещенский	91,3	3,4
Нуримановский	64,1	2,4
Илишевский	59,3	2,2
Татышлинский	57,3	2,1
РБ	27,0	

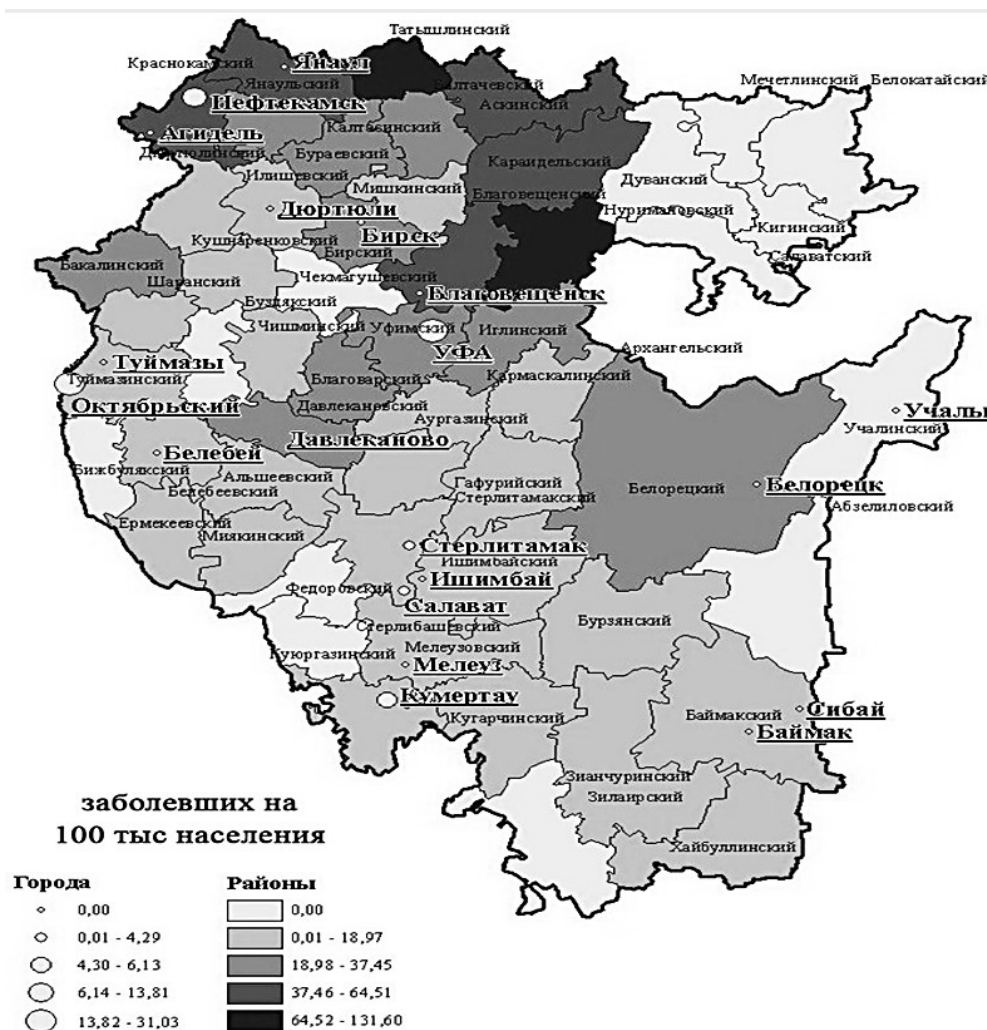


Рис. 2. Геоэкологическая оценка заболеваемости ГЛПС в РБ (на 100 тыс. чел.), 2018 г.

/ Fig. 2. Geoecological assessment of HPS incidence in Republic of Bashkortostan (per 100,000 population), 2018

Таблица 3

Динамика средних показателей численности мелких млекопитающих (грызунов)* в Республике Башкортостан за 2016–2019 гг. / Dynamics of average numbers of small mammals (rodents)* of the Republic of Bashkortostan for the years 2016–2019

Год	Средний показатель численности, %		Инфицированность, %
	Весна	Осень	
2019	7,0	13,7	16,2
2018	6,2	10,8	14,2
2017	5,9	12,9	8,7
2016	5,0	7,9	5,0

* – средний показатель численности грызунов, попавших в орудия отлова, на 100 ловушко-ночей [20].

Инфицированность грызунов вирусом ГЛПС продолжала увеличиваться и составила в 2019 г. 16,2, в 2018 г. – 14,2; в 2017 г. – 8,7; в 2016 г. – 5,0 %. В период с 2018 по 2019 г. возросла в 2,4 раза активность очагов ГЛПС на всей территории РФ, а заболеваемость составила более 14 000 чел. (рис. 3). В 2019 г. наибольшие показатели заболеваемости

(281,5) и коэффициент превышения (7,14) отмечались в Аскинском районе, также значительно проявили себя очаги ГЛПС в Нуримановском (216,0) и Мишкинском районах (208,0) при коэффициентах превышения 5,48 и 5,28 соответственно. Высокая заболеваемость наблюдалась и других районах РБ со стабильно напряжённой обстановкой по ГЛПС (табл. 4)..

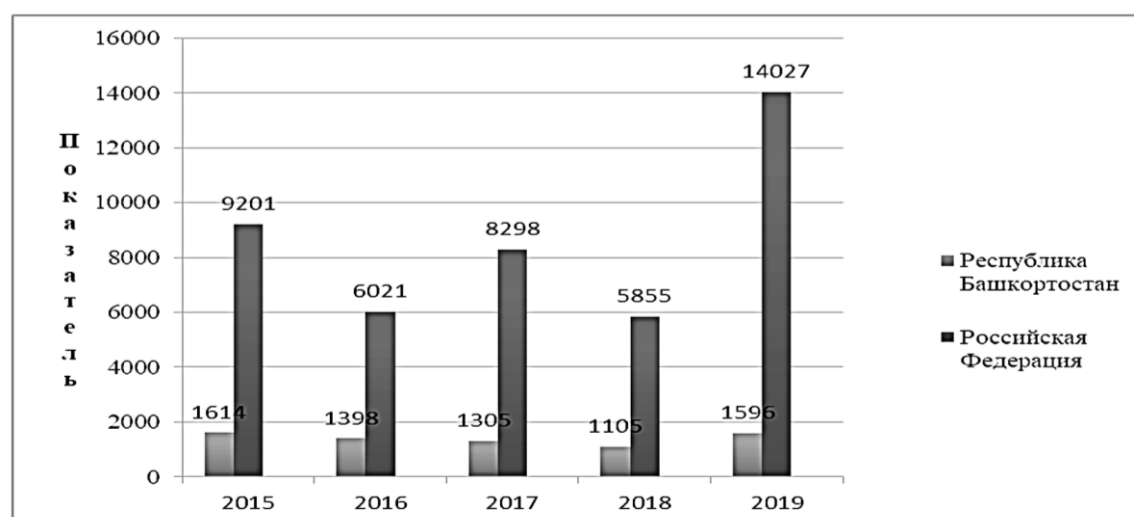


Рис. 3. Динамика заболеваемости ГЛПС в РФ и РБ [19]

/ Fig. 3. Dynamics of HFRS incidence in Russia and Republic of Bashkortostan [19]

Таблица 4

Территории Республики Башкортостан с риском высокой заболеваемости ГЛПС (на 100 тыс. чел.), 2019 г. / Territories at risk of high incidence of HFRS of the Republic of Bashkortostan (per 100 thousand people), 2019

Район	Показатель заболеваемости (ПЗ) на 100 тыс. чел.	Коэффициент превышения по РБ (ПЗ/ПЗРБ)
Аскинский	281,5	7,14
Нуримановский	216,0	5,48
Мишкинский	208,0	5,28
Краснокамский	131,8	3,34
Янаульский	129,9	3,30
Бирский	116,8	2,96
Татышлинский	116,3	2,95
Благоварский	91,8	2,33
Караидельский	88,3	2,24
Среднее по РБ	39,4	

Серьёзной проблемой для республики является расположенность столицы – города Уфы – в центре наиболее активного природного очага ГЛПС. Лесные массивы вокруг Уфы представлены широколиственными деревьями с преобладанием липы, наличие рек, озёр создает хорошие условия для мышевидных грызунов, и заражение происходит при посещении лесных массивов (более 50 % случаев).

Высокая заболеваемость ГЛПС отмечается и в районах вокруг Уфы [16]. Подъём заболеваемости ГЛПС в 2019 г. стал самым масштабным за последний пятилетний период, при этом наибольший показатель среди населения Уфы. В 2019 г. подъём заболеваемости ГЛПС наблюдался и в 55 районах РБ. Всего зарегистрировано 1596 случаев, показатель на 100 тыс. населения составил 39,4, что почти на 50 % выше уровня заболеваемости предыдущего года (2018 г. – 1105 случаев, 27,2; 2017 г. – 1305 случаев, 32,1) (рис. 4).

В РБ заболеваемость ГЛПС была в 4,1 раза выше показателей по РФ и на 3,1 % выше, чем в ПФО (табл. 5). Это свидетельствует о продолжении развития активности очага на территории РБ данной вирусной инфекции.

Одной из проблем в республике является рост поражения ГЛПС среди детей до 17 лет. В 2019 г. было 66 случаев, показатель заболеваемости составил 7,22 на 100 тыс. населения, что на 57,1 % больше заболеваемости предыдущего года (2018 г. – 42 случаев, 4,6; 2017 г. – 54 случаев, 6,0 на 100 тыс. детей) [19].

Анализ причин и условий заражения людей вирусом ГЛПС показал, что в основном это происходит при нарушении правил безопасности во время посещения лесных массивов (туризм, охота, рыбалка, сбор ягод и грибов, заготовка сена). Также заражение происходит осенью в бытовых условиях, в период миграции грызунов в жилые помещения частного сектора и составляет 49 %. Мужчины в возрасте от 20 до 50 лет составляют основную часть заболевших (70–90 %).

Сохраняется и традиционное распределение заболеваний по полу, так, соотношение мужчин и женщин составляет 76:24. По контингентам заболевшие распределяются: 47,0 – рабочие; 38,0 – неработающие и прочие; 6,0 – служащие; 6,0 – учащиеся и студенты; 3,0 % – работники сельского хозяйства. Также отличительной чертой ГЛПС в РБ является то, что городские жители составляют около 80 % всех заболевших.

Заключение

В настоящее время как в Российской Федерации, так и во всём мире актуальную проблему санитарно-эпидемиологического благополучия населения представляют природные очаги хантавирусных инфекционных болезней. Этому способствуют изменчивость их генома, появление новых типов и генетических вариантов с высокой вирулентностью в разных регионах. В последнее десятилетие на долю ГЛПС приходится около 90 % заболеваемости от природно-очаговых вирусных инфекционных болезней в РФ [1].

На территории большинства районов РБ существуют природно-очаговые инфекции вирусной ГЛПС. Наиболее активные очаги связаны с липовыми лесами, которые в республике преобладают. Наблюдается также и рост инфицированности грызунов вирусом ГЛПС, который составил в 2019 г. 16,2; в 2018 г. – 14,2; в 2017 г. – 8,7 и в 2016 г. – 5,0 %.

Рост заболеваемости в 2019 г. при отличительных особенностях имеет характерные эпидемиологические признаки для территории Башкортостана. Превышение среднереспубликанского показателя заболеваемости ГЛПС на территориях высокого риска – Аскинский, Нуримановский, Мишкинский, Краснокамский и Янаульский районы – подчеркивает тенденции расширения и активизации в них очагов инфекции.

Оценка геоэкологической ситуации по эпидемиологическому риску ГЛПС свидетельствует о том, что территория Башкортостана представляет собой природный очаг со средней и высокой эпидемической активностью, с характерным сезонным ростом заболеваемости населения в летне-осенний период. В республике заболеваемость связана с численностью и инфицированностью мышевидных грызунов.

Зоны очагов ГЛПС находятся на урбанизированных территориях, что способствует высокому контакту населения с источниками инфекции, а рост численности мелких млекопитающих и неблагоприятные погодно-климатические условия ведут к миграции их в антропогенные ландшафты. Резкое обострение ситуации в весенний период 2019 г. связано именно с благоприятными климатическими условиями многоснежной зимы.

В настоящее время неспецифическая профилактика ГЛПС, как разъяснительная работа, так и уничтожение грызунов, остается основной в борьбе с этой инфекцией. Осуществляется и контролируется

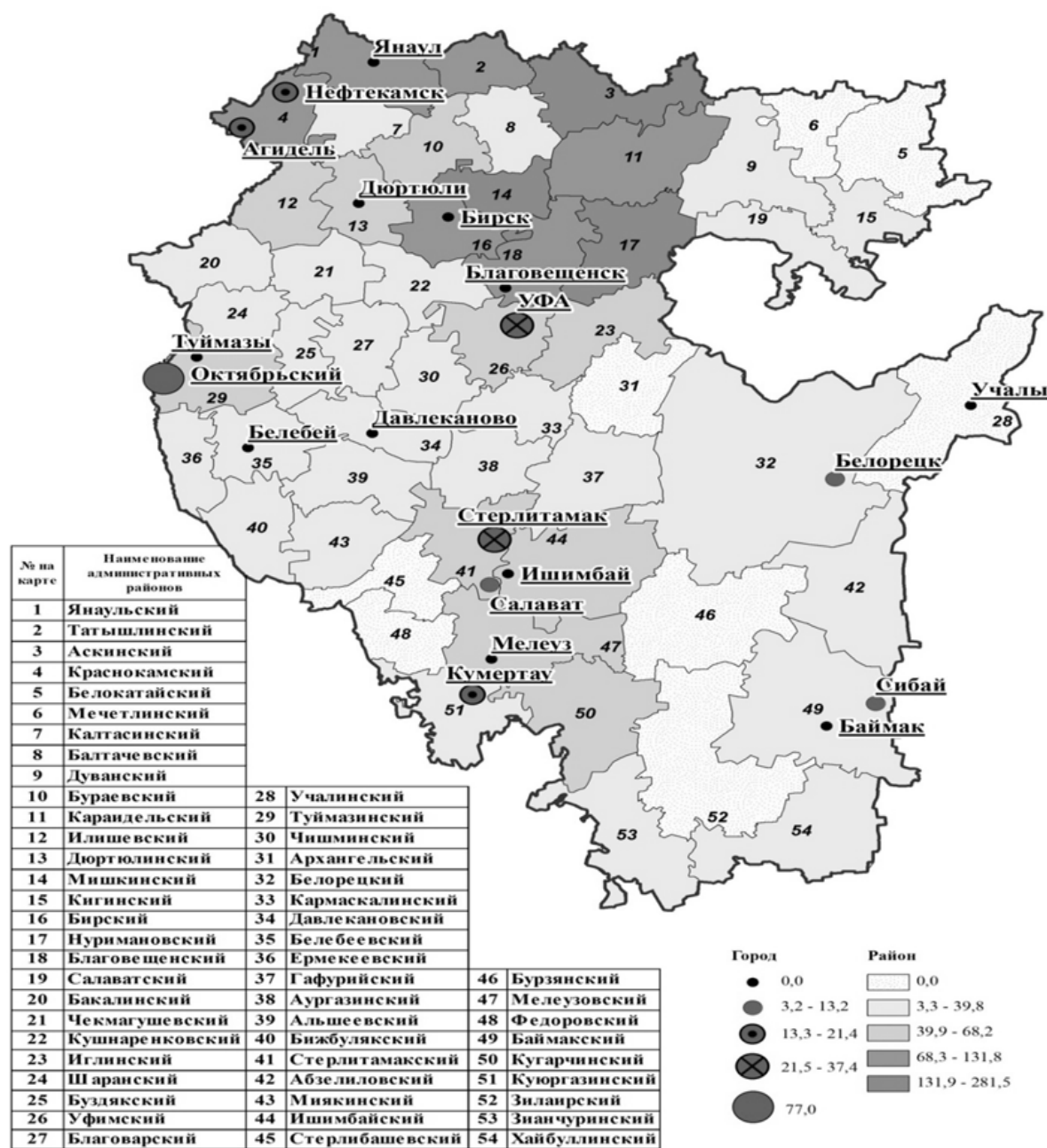


Рис. 4. Геоэкологическая оценка заболеваемости ГЛПС в РБ (на 100 тыс. чел.), 2019 г. / Fig. 4. Geoeological assessment of HFRS incidence in the Republic of Bashkortostan (per 100 thousand population), 2019

Таблица 5

Показатели заболеваемости ГЛПС в РБ, РФ и ПФО (2017–2019) / HFRS incidence rates in the Republic of Bashkortostan, the Russian Federation and the Volga Federal district (2017–2019)

Год	РФ		ПФО		РБ	
	Показатель заболеваемости на 100 тыс. чел. (ПЗ)					
	Всего, чел.	ПЗ	Всего, чел.	ПЗ	Всего, чел.	ПЗ
2019	14027	9,53	11316	38,24	1596	39,4
2018	5855	4,0	4541	15,3	1105	27,2
2017	8298	5,6	7145	24,0	1305	32,0

она службами центров Государственного санитарно-эпидемиологического надзора республики, что явно недостаточно. Наиболее эффективным методом является специфическая профилактика – это вакцинация населения на территориях расположения природных очагов ГЛПС. В связи с этим приоритетными являются промышленное освоение созданной в ФНЦИРИП им. М.П. Чумакова РАН и успешно прошедшей доклинические испытания вакцины против ГЛПС и скорейшее её внедрение в практику здравоохранения.

Необходим сопряженный анализ групп риска и пространственно-временных характеристик риска заболеваемости ГЛПС и ее следствий на территории республики. Следует вводить больше мероприятий для снижения этой крайне опасной инфекции, а также оценивать многообразие экологических аспектов природно-очаговой инфекции для противодействия их широкому распространению в районах РБ.

Литература

1. Евстропов В.М. Геоэкология и ее медицинские аспекты // Науч. альманах стран Причерноморья. 2019. № 3. С. 78–81.
2. Колчин Е.А., Бармин А.Н., Татаринцев С.А., Синцов А.В. Основные природно-очаговые заболевания территорий РФ: динамика, пространственно-временные закономерности // Естественные науки. 2017. № 3. С. 60–63.
3. О состоянии санитарно-эпидемиологического благополучия населения в РФ в 2019 г.: гос. докл. М.: Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, 2020. 299 с.
4. Gut A.K., Gut R., Rymar A., Woźniak-Kosek A. Hemorrhagic fever with renal syndrome (HFRS) in Poland // Przegl Epidemiol. 2018. Vol. 72 (4). P. 477–485.
5. Clement J., Maes P., Rans M.V. Hemorrhagic fever with renal syndrome in the New World, and Hantavirus pulmonary syndrome in the Old World. Paradi(se)gm lost or regained // Virus Res. 2014. Vol. 187. P. 55–80.
6. Бородин Ж.И., Царенко О.Е., Монахов К.М., Багаутдинова Л.И. Геморрагическая лихорадка с почечным синдромом – проблема современности // Архив внутренней медицины. 2019. № 6. С. 419–427.
7. Кураמיшина Н.Г., Тергулов Б.Ф. Оценка риска по биоагрессии (геморрагическая лихорадка с почечным синдромом) на территории РБ // Проблемы прогнозирования, предупреждения и ликвидации последствий ЧС: сб. материалов. Уфа: НИИБЖД, 2002. С. 303–306.
8. Асылгареева А.М., Мухаметзянов А.М., Кайдак Т.В., Кучимова Н.А., Гараева Л.Р. Эпидемиологическая характеристика вспышек инфекционных заболеваний на территории Республики Башкортостан // Мед. альманах. 2018. № 4. С. 56–60.
9. Кураמיшина Н.Г., Нафикова А.Х., Маннапова Р.Т., Губайдуллин Н.М. Экологическая характеристика природных очагов зооантропонозов трансформированных ландшафтов Республики Башкортостан. Уфа: Изд-во БГАУ, 2010. 238 с.
10. Иванова О.В., Рожкова Е.В., Газизов Р.Р., Казак А.А., Хисамиев И.И., Сыса А.М. Эпизоотологический мониторинг природных очагов ГЛПС в Республике Башкортостан // Геморрагическая лихорадка с почечным синдромом: эпидемиология, профилактика и диагностика на современном этапе: материалы науч.-практ. конф. Казань, 2019. С. 69–76.
11. Faber M., Krüger D.H., Auste B., Stark K., Hofmann J., Weiss S. Molecular and epidemiological characteristics of human Puumala and Dobrava-Belgrade Hantavirus infections, Germany, 2001 to 2017 // Euro Surveill. 2019. Vol. 24 (32).
12. Тарасов М. А. Эколого-эпизоотологический мониторинг в очагах опасных зоонозных болезней. Саратов: Амирит, 2016. 356 с.
13. Государственный доклад «О состоянии санитарно-эпидемиологического благополучия населения в Российской Федерации в 2017 году» по Республике Башкортостан. Уфа, 2017. 235 с.
14. Государственный доклад «О состоянии санитарно-эпидемиологического благополучия населения в Российской Федерации в 2018 году» по Республике Башкортостан. Уфа, 2018. 277 с.
15. Государственный доклад «О состоянии санитарно-эпидемиологического благополучия населения в Российской Федерации в 2019 году» по Республике Башкортостан. Уфа, 2019. 262 с.
16. Мочалкин П.А., Мочалкин А.П., Степанов Е.Г. Оценка потенциальной эпидемической опасности сопряженных очагов ГЛПС в г. Уфе // Пест-Менеджмент. 2014. № 1 (89). С. 11–15.
17. Материалы к государственному докладу «О состоянии санитарно-эпидемиологического благополучия населения в Российской Федерации в 2017 году» по Республике Башкортостан. Уфа: Управление Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека по Республике Башкортостан, Центр гигиены и эпидемиологии в Республике Башкортостан в 2017 году, 2018. 270 с.
18. Материалы к государственному докладу «О состоянии санитарно-эпидемиологического благополучия населения в Российской Федерации в 2018 году» по Республике Башкортостан. Уфа: Управление Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека по Республике Башкортостан, Центр гигиены и эпидемиологии в Республике Башкортостан, 2019. 277 с.
19. Материалы к государственному докладу «О состоянии санитарно-эпидемиологического благополучия населения в Российской Федерации в 2019 году» по Республике Башкортостан. Уфа: Управление Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека по Республике

Башкортостан, Центр гигиены и эпидемиологии в Республике Башкортостан, 2020. 262 с.

References

1. Evstropov V.M. (2019). Geocology and its medical aspects. *Nauchnyi al'manakh stran Prichernomor'ya*, No. 3, pp. 78-81. (in Russian).
2. Kolchin E.A., Barmin A.N., Tatarintsev S.A., Sintsov A.V. (2017). The main natural focal diseases of the territories of the Russian Federation: dynamics, spatial and temporal patterns. *Estestvennye nauki*, No. 3, pp. 60-63. (in Russian).
3. *On the state of sanitary and epidemiological welfare of the population in the Russian Federation in 2019: State report*. (2020). Moscow, Federal Service for Supervision of Consumer Rights Protection and Human Welfare Press, 299 p. (in Russian).
4. Gut A.K., Gut R., Rymarz A., Woźniak-Kosek A. (2018). Hemorrhagic fever with renal syndrome (HFRS) in Poland. *Przegl Epidemiol.*, vol. 72 (4), pp. 477-485.
5. Clement J., Maes P., Ranst M.V. (2014). Hemorrhagic fever with renal syndrome in the New World, and Hantavirus pulmonary syndrome in the Old World: Paradigm lost or regained. *Virus Res.*, vol. 187, pp. 55-80.
6. Borodina Zh.I., Tsarenko O.E., Monakhov K.M., Bagautdinova L. I. (2019). Hemorrhagic fever with renal syndrome - a problem of modernity. *Arkhiv vnutrennei meditsiny*, No. 6, pp. 419-427. (in Russian).
7. Kuramshina N.G., Teregulov B.F. (2002). Assessment of the risk of bio-contamination (hemorrhagic fever with renal syndrome) on the territory of the Republic of Bashkortostan. *Problems of forecasting, prevention and liquidation of consequences of emergencies*. Collection of materials of scientific and practical conference. Ufa, NIIBZhd Press, pp. 303-306. (in Russian).
8. Asylgareeva A.M., Mukhametzyanov A.M., Kaidanek T.V., Kuchimova N.A., Garaeva L.R. (2018). Epidemiological characteristics of outbreaks of infectious diseases on the territory of the Republic of Bashkortostan. *Meditsinskii al'manakh*. No. 4, pp. 56-60. (in Russian).
9. Kuramshina N.G., Nafikova A.Kh., Mannapova R.T., Gubaidullin N.M. (2010). *Ecological characteristics of natural foci of zoonoses in transformed landscapes of the Republic of Bashkortostan*. Ufa, BSAU Press, 238 p. (in Russian).
10. Ivanova O.V., Rozhkova E.V., Gazizov R.R., Kazak A.A., Khisamiev I.I., Sysa A.M. (2019). Epizootological monitoring of natural foci of HFRS in the Republic of Bashkortostan. *Hemorrhagic fever with renal syndrome: epidemiology, prevention and diagnosis at the present stage*. Collection of materials of scientific and practical conference. Kazan, pp. 69-76. (in Russian).
11. Faber M., Krüger D. H., Auste B., Stark K., Hofmann J., Weiss S. (2019). Molecular and epidemiological characteristics of human Puumala and Dobrava-Belgrade Hantavirus infections, Germany, 2001 to 2017. *Euro Surveill*, vol. 24 (32).
12. Tarasov M.A. (2016). *Ecological and epizootological monitoring in the foci of dangerous zoonotic diseases*. Saratov, Amirit Publ., 356 p. (in Russian).
13. *State Report "On the state of sanitary and epidemiological welfare of the population in the Russian Federation in 2017" for the Republic of Bashkortostan*. (2017). Ufa, 235 p. (in Russian).
14. *State Report "On the state of sanitary and epidemiological welfare of the population in the Russian Federation in 2018" for the Republic of Bashkortostan*. (2018). Ufa, 277 p. (in Russian).
15. *State Report "On the state of sanitary and epidemiological welfare of the population in the Russian Federation in 2019" for the Republic of Bashkortostan*. (2019). Ufa, 262 p. (in Russian).
16. Mochalkin P.A., Mochalkin A.P., Stepanov E.G. (2014). Assessment of the potential epidemic danger of conjugate foci of HFRS in Ufa. *Pest-Management*, No. 1 (89), pp. 11-15. (in Russian).
17. *Materials for the State Report "On the state of sanitary and epidemiological welfare of the population in the Russian Federation in 2017" for the Republic of Bashkortostan*. (2018). Ufa, Department of the Federal Service for Supervision of Consumer Rights Protection and Human Welfare in the Republic of Bashkortostan, Center for Hygiene and Epidemiology in the Republic of Bashkortostan, 270 p. (in Russian).
18. *Materials for the State Report "On the state of sanitary and epidemiological welfare of the population in the Russian Federation in 2018" for the Republic of Bashkortostan*. (2019). Ufa, Department of the Federal Service for Supervision of Consumer Rights Protection and Human Welfare in the Republic of Bashkortostan, Center for Hygiene and Epidemiology in the Republic of Bashkortostan, 277 p. (in Russian).
19. *Materials for the State Report "On the state of sanitary and epidemiological welfare of the population in the Russian Federation in 2019" for the Republic of Bashkortostan*. (2020). Ufa, Department of the Federal Service for Supervision of Consumer Rights Protection and Human Welfare in the Republic of Bashkortostan, Center for Hygiene and Epidemiology in the Republic of Bashkortostan, 262 p. (in Russian).

УДК 574.4

doi 10.18522/1026-2237-2021-3-74-79

ОСОБЕННОСТИ РАДИАЛЬНОГО ПРИРОСТА КУСТАРНИЧКОВ *BETULA NANA* И *SALIX LANATA* НА РАЗЛИЧНЫХ ЭЛЕМЕНТАХ ПРОФИЛЯ РЕЛЬЕФА В ЮЖНОЙ ТУНДРЕ ЯМАЛА

© 2021 г. И.В. Плотников¹¹Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, Россия

FEATURES OF THE RADIAL GROWTH OF SHRUBS *BETULA NANA* AND *SALIX LANATA* ON VARIOUS LANDSCAPE ELEMENTS IN THE SOUTHERN TUNDRA OF YAMAL

I.V. Plotnikov¹¹Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia

Плотников Илья Викторович – аспирант, кафедра геоэкологии и прикладной геохимии, Институт наук о Земле, Южный федеральный университет, ул. Зорге, 40, г. Ростов-на-Дону, 344090, Россия, e-mail: iv-44@bk.ru

Ilya V. Plotnikov - Postgraduate, Department of Geoecology and Applied Geochemistry, Institute of Earth Sciences, Southern Federal University, Zorge St., 40, Rostov-on-Don, 344090, Russia, e-mail: iv-44@bk.ru

Тундровые сообщества широко распространены в северной части России, в частности на полуострове Ямал в Западной Сибири, где и производились исследования. Для анализа использовались растения вида *Betula nana* и *Salix lanata*, данные виды являются одними из наиболее распространённых в южных тундрах Ямала. Площадки отбора проб располагались на различных морфологических частях рельефа с целью выделения закономерностей в распределении природных факторов, определяющих радиальный прирост стволов *Betula nana* и *Salix lanata*. На каждой из площадок отбиралось не менее 30 образцов каждого вида для получения достаточной выборки. Участки отбора располагались на различных морфологических частях рельефа. В ходе исследования выделялись общие тренды прироста, а также абсолютные значения прироста для периода 5 лет. Этот возраст соответствует минимальному возрасту отобранных растений. В результате получены данные о распределении и особенностях прироста кустарничков *Betula nana* и *Salix lanata* по рельефному профилю, выявлены наиболее и наименее благоприятные участки профиля для произрастания кустарничков. Проведено сравнение общих трендов радиального прироста, обнаружено более быстрое замедление прироста у *Betula nana*. Помимо этого, выявлено, что вид *Salix lanata* сильнее реагирует на механическое воздействие (зимник).

Ключевые слова: дендроэкология, тундра, растительные сообщества, радиальный прирост, *Betula nana*, *Salix lanata*.

Tundra communities are widespread in the northern part of Russia, in particular on the Yamal Peninsula in the registration of Siberia, where research was carried out. For the study, we used plants of the species *Betula nana* and *Salix lanata*, these species are among the most common in the southern tundra of Yamal. Sampling sites were located on various morphological elements of the relief with the identification of patterns in the distribution of natural resources that determine the radial growth of the trunks of *Betula nana* and *Salix lanata*. At each site, at least 30 samples of each species were taken to obtain a sufficient sample. The sampling sites were located on different morphological parts of the relief. In the course of the study, general growth trends are highlighted, as well as absolute values of growth for 5 years. This age corresponds to

the minimum age of the selected plants. As a result, data were obtained on the distribution and growth characteristics of *Betula nana* and *Salix lanata* shrubs along the relief profile; the most and least favourable areas of the profile for the growth of shrubs were identified. To compare the general trends of radial growth, a faster slowdown in growth was found in *Betula nana*. In addition, it was found that the species *Salix lanata* has a stronger effect on mechanical impact (winter road).

Keywords: dendroecology, tundra, plant ecosystems, radial growth, *Betula nana*, *Salix lanata*.

Введение

Тундровые растительные сообщества занимают значительные территории в Арктике. Однако растения данной зоны находятся в неблагоприятных условиях обитания, что обуславливается абиотическими факторами, такими как короткий вегетационный период, низкие зимние температуры, относительно низкие температуры вегетационного периода. Возрастание антропогенной нагрузки, разработка нефтегазовых месторождений и увеличение нагрузки, связанной с выпасом домашних оленей, могут привести к деградации естественной растительности. Поэтому изучение особенностей прироста и функционирования сообществ является важной научной задачей.

Исследование проводилось в южной тундровой зоне Ямала. Цель данного исследования состояла в выявлении закономерностей распределения значений абсолютного радиального прироста кустарничков в ландшафте южной тундры. Отдельно уделялось внимание выполнению задач, касающихся выявления особенностей распределения прироста по профилю рельефа, сравнения динамики прироста с возрастом для двух видов *Betula nana* и *Salix lanata*, выявления влияния механических нарушений на рост кустарничков.

Зона южных тундр Ямала представляет собой пологий холмистый тундровый ландшафт с множеством озер различного размера. В низинных участках территория заболочена и имеется сеть ручьев и небольших рек. Наиболее распространенными для данного района являются сообщества ерниково-кустарничково-лишайниково-зеленомошных тундр. Они расположены на пологих участках водоразделов, природно-территориальные комплексы отличаются средними или ухудшенными условиями дренажа, почвы тундровые криогенно-глеевые с включением щебня на суглинках и супесях. *Betula nana* и *Salix lanata* являются видами широко распространенными, кроме того, относительно большая толщина ствола делает их подходящими для проведения дендроэкологических исследований в зоне тундр [1].

Материалы и методы

Площадки отбора располагались на разных морфологических частях рельефа: плакорах, низинах, верхних и нижних частях склонов. Для получения достаточной выборки образцов на каждом исследуемом участке отбиралось не менее 30 растений. Делался срез нижней части ствола кустарничка, так как именно здесь можно получить наиболее достоверный и длинный временной ряд радиального прироста. Поперечные кольца считались сразу по нескольким радиусам, чтобы учесть частичные кольца и неравномерное распределение толщины кольца по сечению ствола [2–5].

Чтобы измерить размеры годовых колец, производился тонкий срез отобранного ствола кустарничка, образец смачивался водой для придания более контрастной окраски. Затем с помощью оптического микроскопа и камеры производилось получение цифрового увеличенного изображения, на котором четко выделялись годовые кольца кустарничков. После этого с помощью программы CooRecorder производилось измерение размера годовых колец, отражающих радиальный прирост растений. Обработывались данные в программе CDendro. На основе метода были получены данные об абсолютном и относительном радиальном приросте [6, 7].

Всего в рамках статьи представлены результаты исследования 13 площадок, компактно расположенных на разных морфологических частях рельефа, в радиусе 11 км от точки 67°41'20"С, 68°16'22"В.

На условия прироста растений влияют как внешние, так и внутренние факторы. Вклад индивидуальных внутренних факторов, действующих непосредственно на единичный организм в популяции, сводится к минимуму при достаточно крупной выборке.

Важнейшими факторами для развития и роста растения являются климат, условия увлажнения, поступление света. В условиях тундры также стоит отметить факторы, связанные с многолетней мерзлотой и поступлением питательных элементов. Благоприятность факторов, действующих на популяцию, способствует росту средних значений абсолютного прироста, наличие угнетающих факторов замедляет рост [8, 9].

Результаты

Возраст растений *Salix lanata* на исследуемых участках колеблется от 5 до 40 лет, в среднем составляет около 12 лет, у *Betula nana* эти значения ниже 5–20 лет, при среднем – 10 лет.

За первые 5 лет жизни радиальный прирост растений *Salix lanata* составил от 1,08 до 2,24 мм при среднем значении 1,54 мм. Что немного выше, чем значения прироста *Betula nana*, для которой средние значения составили 1,43 мм при разбросе от 0,92 до 2,11 мм. Большой разброс значений абсолютного прироста говорит также о повышенной чувствительности *Salix lanata* к внешним факторам окружающей среды. Для того чтобы сделать вывод о различиях между факторами прироста для двух видов, произведено сравнение относительной интенсивности радиального прироста на каждом участке. На рис. 1 представлен сравнительный график относительного прироста двух видов по отдельным площадкам отбора. За единицу принято усредненное значение прироста для конкретного вида за 5-летний период.

Исходя из данных прироста, можно обнаружить, что в большинстве случаев средние значения прироста для каждого из видов сходно изменяются при переходе от одной площадки к другой. Однако на некоторых пробных площадках значения отличаются, максимальное различие между приростом составило 28 % и характерно для участка № 1, расположенного в нижней части склона.

Предполагается, что относительно малая удаленность расположения пробных площадок друг от друга позволяет избежать существенных макрокли-

матических различий (количество осадков, температуры, поступление солнечной радиации), оказывающих прямое влияние на прирост растений. Но из-за различий рельефа распределение влаги, снежного покрова, ветровой нагрузки, многолетней мерзлоты происходит по-разному [10].

Рассмотрим различие в приросте двух видов кустарничков в зависимости от их распределения по элементам профиля, сгруппировав участки по местоположению на рельефном профиле. На рис. 2 информация о данных прироста кустарничков представлена в виде графиков.

Наибольших значений прирост кустарничков достигает в межвершинных понижениях, минимальных – в нижней части склона. При этом общие закономерности распределения средних значений абсолютного прироста по профилю для обоих видов схожи, что может быть связано с различной устойчивостью снежного покрова на участках, которые выполняют защитную функцию для кустарничков в зимний период, а также с увлажнением, которое избыточно в нижней части склона и в низинах, и поступлением питательных веществ из почвы.

Наиболее удачные для роста кустарничков условия складываются в межвершинных перевальных понижениях. Прирост на этих участках значительно выше, чем на иных, что может быть связано с накоплением здесь снега зимой, умеренным увлажнением и достаточным поступлением питательных элементов, развитым слоем почвы.

Несколько ниже значения прироста в верхних частях склонов. Благоприятные условия тут определяются умеренным увлажнением при наличии устойчивого снежного покрова в зимний период.

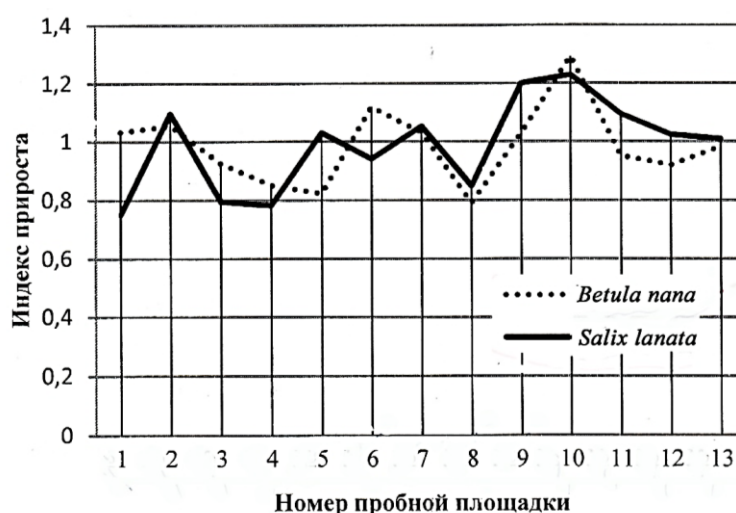


Рис. 1. Распределение прироста *Salix lanata* и *Betula nana* по участкам
/ Fig. 1. Distribution of the growth of *Salix lanata* and *Betula nana* for each plot

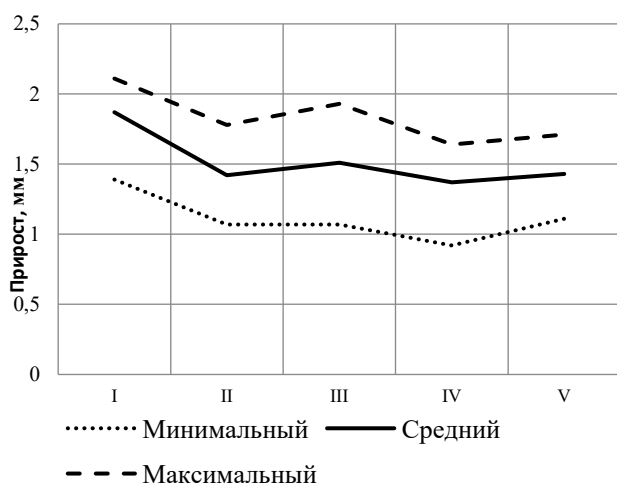
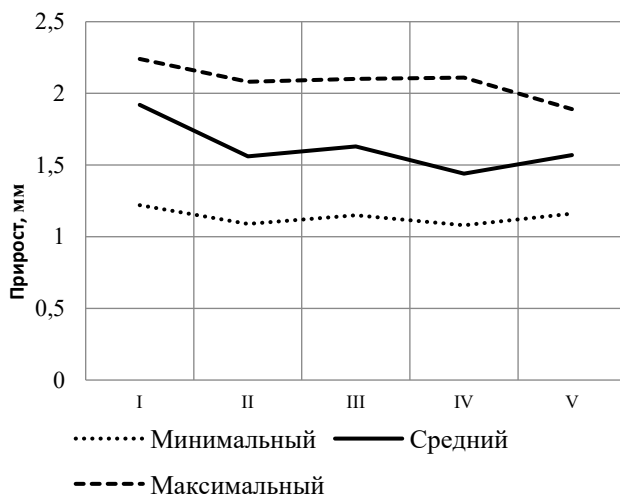
Betula nana*Salix lanata*

Рис. 2. Распределения значений прироста за 5-летний период, с указанием среднего значения по участкам, минимального и максимального прироста, зафиксированного на участках, сгруппированных в зависимости от расположения по профилю рельефа (I – межвершинные понижения; II – плакоры; III – верхние части склона; IV – нижние части склона; V – низинные участки) / Fig. 2. Distribution of increment values over a 5-year period, indicating the average value for the areas, the minimum and maximum increments recorded in the areas grouped depending on the location along the relief profile (I - inter-vertex depressions; II - flat interfluvial; III - upper parts of the slope; IV - the lower parts of the slope; V - low-lying areas)

Более низкие значения прироста выявлены на плакорах и в низинах. На плакорах в качестве негативного фактора выступает наибольшее воздействие ветра, в зимний период тут может происходить сдувание снежного покрова. На низинных участках прирост определяется высоким снежным

покровом, достаточным поступлением питательных элементов и развитым почвенным покровом при наличии негативных факторов, таких как чрезмерное увлажнение, особенно весной, когда снежный покров сходит.

В нижних частях склонов обнаружены минимальные значения прироста, что может быть связано с плохими почвенными условиями, выносом питательных элементов вниз по склону [1, 11].

Также стоит отметить межвидовые различия в интенсивности радиального прироста с возрастом у двух исследуемых видов кустарников. На рис. 3 показан усредненный график трендов интенсивности прироста на участках с течением времени.

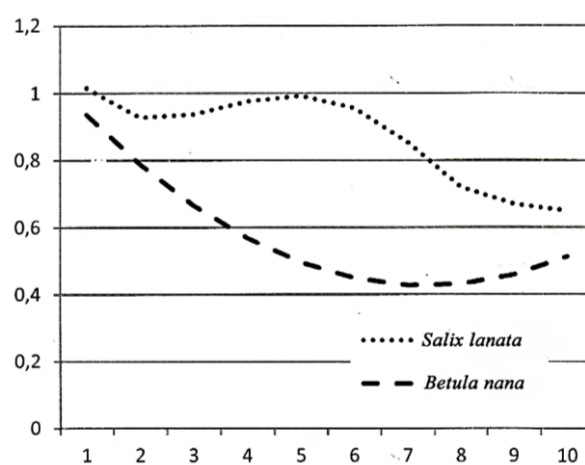


Рис. 3. Измерение тренда интенсивности радиального прироста с течением времени, за единицу приняты максимальные значения прироста, характерные для первого года роста кустарничка / Fig. 3. Measurement of the trend of the intensity of radial growth over time, the maximum values of the growth characteristic of the first year of shrub growth are taken as a unit

Выделяется, что прирост карликовой березки быстро замедляется, составляя к 5-му году жизни только половину от начального. В то время как рост ивы стабилен на большем отрезке времени, замедляясь за 10 лет до 0,6 от первоначального уровня. Связано это с особенностями роста кустарничков, а также их продолжительностью жизни. Стоит отметить для дальнейшего исследования, что первые годы жизни карликовой березки вносят основной вклад в общий радиальный радиус ствола.

Одни из наиболее явных антропогенных нарушений в тундрах – механические нарушения, связанные с проездом гусеничной и колесной техники. В связи с медленной скоростью восстановления растительных сообществ колеи от транспорта весьма заметны на местности. При проезде транспорта по тундре оказывается воздействие как на внешнюю

часть растений, так и на корневую систему и непосредственно почву. На рис. 4 проведено сравнение 5-летнего радиального прироста кустарничков, непосредственно произрастающих в зоне механического воздействия и растущих в 20 м в стороне от зимника.

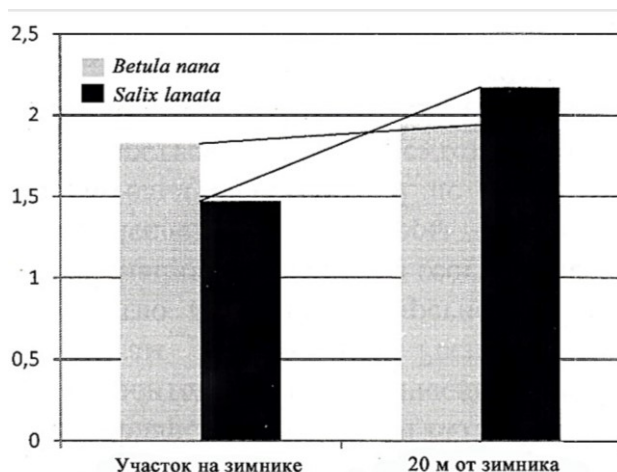


Рис. 4. Сравнение абсолютного 5-летнего прироста на зимнике и прироста на участке рядом / Fig. 4. Comparison of the absolute 5-year increment on the winter road and the increment on the site next to

По результатам отмечается снижение интенсивности прироста на участке, расположенном на зимнике, у обоих видов кустарничков, однако для *Salix lanata* влияние механического воздействия более ярко выражено – ее прирост замедлился почти в 1,5 раза. Предположительно это может быть связано с тем, что высота *Salix lanata* в сообществе выше, чем у *Betula nana*, из-за чего при проезде техники по тундре её органы повреждаются сильнее [12, 13].

Заключение

Выявленные закономерности распределения относительного радиального прироста кустарничков в южной тундре Ямала схожи для двух видов – *Betula nana* и *Salix lanata*. На большинстве участков они показывают схожую динамику, что говорит об однородном влиянии внешних факторов на прирост. Абсолютные значения прироста для вида *Salix lanata* несколько выше, чем для *Betula nana*.

При изучении распределения прироста по элементам профиля рельефа выявлено, что наилучшие условия для роста обоих видов складываются в межвершинных понижениях и верхних частях склонов, средние показатели характерны для плакоров и низин, самый медленный прирост – в нижней части склона. Данное распределение связано с различным

влиянием природных факторов – снежного покрова, увлажнения, ветра, поступления питательных веществ.

Вид *Betula nana* быстрее замедляет свой рост, в отличие от *Salix lanata*, что может быть связано с меньшей продолжительностью жизни растения, а также с другими особенностями роста и развития.

На зимнике наблюдается снижение интенсивности прироста обоих видов, при этом *Salix lanata* более выражено реагирует на механическое воздействие.

Литература

1. Телятников М.Ю. Особенности распределения тундровой растительности Сибирского сектора Арктики : дис. ... д-ра биол. наук. Новосибирск, 2005. 363 с.
2. Owczarek P., Opala-Owczarek M. Dendrochronology and extreme pointer years in the tree-ring record (AD 1951–2011) of polar willow from southwestern Spitsbergen (Svalbard, Norway) // *Geochronometria*. 2016. Vol. 43. Doi 10.1515/geochr-2015-0035.
3. Арефьев С.П., Цибульский В.Р., Антонюк А.Ю. Особенности анализа временных рядов прироста кустарников субарктической тундры полуострова Ямал // *Вестн. Тюменского гос. ун-та. Экология и природопользование*. 2017. Т. 3, № 2. С. 67–80.
4. Арефьев С.П. Фиксация потепления климата в древесно-кольцевых хронологиях кустарничков на севере Ямала и Гыданского полуострова // *Журн. Сибирского фед. ун-та. Биология*. 2015. Т. 8, № 4. С. 377–393.
5. Тишин Д.В., Чижикова Н.А. Дендрохронология. Казань: Казанский ун-т, 2018. 34 с.
6. Buchwal A., Rachlewicz G., Fonti P., Cherubini P., Gärtner H. Temperature modulates intra-plant growth of *Salix polaris* from a high Arctic site (Svalbard) // *Polar Biology*. 2013. Vol. 36.
7. Cook E., Briffa K., Shiyatov S., Mazepa V. Treering standardization and growth-trend estimation // *Methods of Dendrochronology. Applications in the Environmental Sciences*. Cook E., Kairiukstis L. (Eds.). Dordrecht: Kluwer Academic Publ. 1990. P. 104–162.
8. Кухта А.Е. Линейный прирост деревьев как индикатор состояния среды // *Сиб. экол. журн.* 2003. № 6. С. 767–771.
9. Павлов И.Н. Древесные растения в условиях техногенного загрязнения. Улан-Удэ: БНЦ СО РАН, 2005. 370 с.
10. Соколова Г.Г. Влияние высоты местности, экспозиции и крутизны склона на особенности пространственного распределения растений // *Acta Biologica Sibirica*. 2016. № 3. С. 34–45.
11. Николаев А.Н., Самсонова В.В. Влияние склоновых процессов на произрастание ивы на Ямале //

Вестн. Тюменского гос. ун-та. Экология и природопользование. 2012. № 12. С. 195–203.

12. Валеева Э.И., Московченко Д.В. Зональные особенности растительного покрова Тазовского полуострова и его техногенная трансформация // ВЭЛЛ. 2009. № 9. С. 174–190.

13. Елсаков В.В., Кулюгина Е.Е., Щанов В.М. Тренды изменений растительного покрова Югорского полуострова последнего десятилетия: сопоставление результатов дистанционных и полевых исследований // Геоботаническое картографирование. 2013. № 2013. С. 93–111.

References

1. Telyatnikov M.Yu. (2005). *Features of the distribution of tundra vegetation in the Siberian sector of the Arctic*. Dissertation Thesis. Novosibirsk, 363 p. (in Russian).

2. Owczarek P., Opała-Owczarek M. (2016). Dendrochronology and extreme pointer years in the tree-ring record (AD 1951–2011) of polar willow from southwestern Spitsbergen (Svalbard, Norway). *Geochronometria*, vol. 43. Doi 10.1515/geochr-2015-0035.

3. Arefiev S.P., Tsibulsky V.R., Antonyuk A.Y. (2017). Features of the analysis of time series of growth of shrubs in the subarctic tundra of the Yamal Peninsula. *Vestn. Tyumenskogo gos. un-ta. Ekologiya i prirodopol'zovanie*, vol. 3, No. 2, pp. 67–80. (in Russian).

4. Arefiev S.P. (2015). Fixation of climate warming in tree-ring chronologies of shrubs in the north of Yamal and the Gydan Peninsula. *Zhurn. Sibirskogo fed. un-ta. Biologiya*, vol. 8, No. 4, pp. 377–393. (in Russian).

5. Tishin D.V., Chizhikova N.A. (2018). *Dendrochronology*. Kazan, Kazan University Press, 34 p. (in Russian).

6. Buchwal A., Rachlewicz G., Fonti P., Cherubini P., Gärtner H. (2013). Temperature modulates intra-plant growth of *Salix polaris* from a high Arctic site (Svalbard). *Polar Biology*, vol. 36.

7. Cook E., Briffa K., Shiyatov S., Mazepa V. (1990). Treering standardization and growth-trend estimation. *Methods of Dendrochronology. Applications in the Environmental Sciences*. Cook E., Kairiukstis L. (Eds.). Dordrecht, Kluwer Academic Publ., pp. 104–162.

8. Kukhta A.E. (2003). Linear growth of trees as an indicator of the state of the environment. *Sib. ekol. zhurn.*, No. 6, pp. 767–771. (in Russian).

9. Pavlov I.N. (2005). *Woody plants in conditions of technogenic pollution*. Ulan-Ude, : BSC SB RAN Press, 370 p. (in Russian).

10. Sokolova G.G. (2016). The influence of the height of the area, exposure and steepness of the slope on the features of the spatial distribution of plants. *Acta Biologica Sibirica*, No. 3. (in Russian).

11. Nikolaev A.N., Samsonova V.V. (2012). Influence of slope processes on willow growth in Yamal. *Vestn. Tyumenskogo gos. un-ta. Ekologiya i prirodopol'zovanie*, No. 12, pp. 195–203. (in Russian).

12. Valeeva E.I., Moskovchenko D.V. (2009). Zonal features of the vegetation cover of the Taz Peninsula and its technogenic transformation. *VELL*, No. 9, pp. 174–190. (in Russian).

13. Elsakov V.V., Kulyugina E.E., Shchanov V.M. (2013). Trends of changes in the vegetation cover of the Yugorsk peninsula of the last decade: comparison of the results of remote sensing and field research. *Geobotanicheskoe kartografirovaniye*, No. 2013, pp. 93–111. (in Russian).

УДК 556.54 (98)

doi 10.18522/1026-2237-2021-3-80-86

МНОГОЛЕТНЯЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ИОННОГО СТОКА КРУПНЫХ РЕК АРКТИЧЕСКОЙ ЗОНЫ РОССИИ*

© 2021 г. О.С. Решетняк^{1, 2}¹Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, Россия,²Гидрохимический институт Росгидромета, Ростов-на-Дону, Россия

LONG-TERM VARIABILITY OF THE ION RUNOFF OF LARGE RIVERS IN THE ARCTIC ZONE OF RUSSIA

O.S. Reshetnyak^{1, 2}¹Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia,²Hydrochemical Institute, Roshydromet, Rostov-on-Don, Russia

Решетняк Ольга Сергеевна – кандидат географических наук, доцент, кафедра геоэкологии и прикладной геохимии, Институт наук о Земле, Южный федеральный университет, ул. Зорге, 40, г. Ростов-на-Дону, 344090, Россия; старший научный сотрудник, Гидрохимический институт Росгидромета, пр. Стачки, 198, г. Ростов-на-Дону, 344090, Россия, e-mail: olgarel@mail.ru

Olga S. Reshetnyak - Candidate of Geography, Associate Professor, Department of Geoecology and Applied Geochemistry, Institute of Earth Sciences, Southern Federal University, Zorge St., 40, Rostov-on-Don, 344090, Russia; Senior Researcher, Hydrochemical Institute, Roshydromet, Stachki Ave, 198, Rostov-on-Don, 344090, Russia, e-mail: olgarel@mail.ru

Важность исследования ионного стока рек и его изменчивости во времени определяется влиянием стока на прибрежные акватории и взаимосвязью с климатическими изменениями в Арктическом регионе.

Представлены многолетние данные о химическом стоке макрокомпонентов (хлориды, сульфаты, гидрокарбонаты, ионы кальция и магния) на замыкающих створах крупных арктических рек России – Печора, Уса, Енисей, Обь, Пур, Таз, Лена, Яна и Колыма. Расчет объемов и модулей химического стока выполнен на основе многолетней (1980–2018 гг.) гидрологической и гидрохимической информации государственной системы наблюдений Росгидромета.

Показано, что изменение абсолютных значений химического стока согласуется с водностью исследуемых рек, при этом наибольший вклад в ионный сток вносят гидрокарбонаты. Внутригодовое изменение водности рек и стока макрокомпонентов происходит синхронно, что свидетельствует об определяющей роли водного стока в формировании химического стока с водосборов крупных арктических рек.

Сравнение исследуемых рек по показателю модуля химического стока позволило классифицировать их на реки с низким, средним и высоким ионным стоком. Установлено, что максимальный сток макрокомпонентов происходит с водосбора р. Уса, что может быть связано с активными процессами химической денудации и изменениями климата.

Ключевые слова: химический сток, макрокомпоненты, модуль химического стока, арктическая зона, крупные арктические реки, антропогенное воздействие, изменение климата.

* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-05-60165.

Studies of river ion runoff and its temporal variability are important. It affects coastal waters and is interrelated with climatic changes in the Arctic region.

Long-term data on the chemical runoff of macrocomponents (chlorides, sulfates, hydrocarbonates, calcium and magnesium ions) at the outlet sections of large Arctic rivers in Russia - Pechora, Usa, Yenisei, Ob, Pur, Taz, Lena, Yana and Kolyma are given. The values of volumes and modules of chemical runoff were calculated on the basis of long-term (1980-2018) hydrological and hydrochemical information from the state observation system of Roshydromet.

It is shown that the change in the absolute values of the chemical runoff is consistent with the water inflow. Greatest contribution to the ionic runoff is made by hydrocarbonates. The intra-annual change in the water inflow and the macrocomponents runoff occurs synchronously. There is a decisive role of water runoff in the formation of chemical runoff from the catchments of large Arctic rivers.

Comparison of the chemical runoff modulus indicator made it possible to classify them into low, medium or high ionic runoff rivers. It was found that the maximum runoff of macrocomponents occurs from the catchment of the Usa river. It is may be due to active processes of chemical denudation and climate change.

Keywords: chemical runoff, macrocomponents, chemical runoff module, Arctic zone, large Arctic rivers, anthropogenic impact, climate change.

Введение

Результаты исследований глобальных климатических изменений показали, что на естественный фон атмосферы Земли в XX в. начал накладываться заметный положительный тренд температуры (около 0,6 °C за последние 100 лет), влияние которого не нарушает общий ход природной цикличности климата, но усиливает динамику потепления в теплые периоды и ослабляет падение глобальной температуры в периоды похолодания [1]. Арктический регион является одним из наиболее уязвимых, экосистемы здесь отличаются чрезвычайно высокой чувствительностью к климатическим флуктуациям, и все экологические последствия этих изменений будут проявляться здесь особенно быстро [2].

Одним из важных индикаторов климатических изменений в Арктическом регионе может служить речной сток и его изменчивость. Изучение взаимосвязи речного и химического стока в арктических областях имеет особую важность с точки зрения изучения других природных процессов, таких как изменение состава морских вод прибрежных территорий, повышение температуры многолетнемерзлых пород, взаимодействие поверхностных и подземных вод в криолитозоне, трансформация элементов в геохимических циклах и т.д. Водный сток арктических рек играет важную роль в гидрологическом режиме Северного Ледовитого океана и присутствующих береговой зоне процессах. Влияние речного стока распространяется на водный баланс, процессы опреснения, термический и ледовый режим океана и его частей [3].

Особую озабоченность вызывает тот факт, что в результате оттаивания вечной мерзлоты в поверхностные и грунтовые воды возможно попадание загрязняющих веществ и болезнетворных бактерий

(из-за наличия различных захоронений, могильников и т.п.). Также возможна так называемая глобальная вирусная инвазия, связанная с процессами таяния вечной мерзлоты и вероятностью палеовирусного загрязнения подземных вод (а впоследствии и поверхностных) [4]. Это может привести к формированию новой эпидемической обстановки, особенно в районах интенсивного использования населением подземных и поверхностных вод криолитозоны (зоны вечной мерзлоты) для питьевых целей.

Это обуславливает необходимость проведения масштабных междисциплинарных исследований возможных качественных и количественных изменений водных ресурсов (в том числе и ионного стока) в Арктическом регионе с целью разработки комплекса природоохранных и противоэпидемических мероприятий.

Материалы и методы исследования

Цель настоящего исследования – оценить многолетнюю изменчивость ионного стока крупных рек Арктической зоны России.

В качестве объектов исследования выбраны участки арктических рек на замыкающих створах (или устьевые участки) – р. Печора и её крупный приток р. Уса, в западной части арктической зоны – рр. Енисей, Обь, Пур, Таз, в восточной – рр. Лена, Яна и Колыма.

Исследование проведено на основе многолетней (1980–2018 гг.) гидрологической и гидрохимической информации государственной системы наблюдений Росгидромета. Периодичность гидрохимических наблюдений (и, соответственно, временное разрешение получаемых ежегодных данных) определяется категорией пунктов наблюдений, и для

большинства выбранных рек отбор проб осуществлялся в основные фазы водного режима реки, т.е. минимум 7 раз в год (частота отбора проб составляла 7–12 раз в год).

Рассматривая суммарный ионный сток по замыкающему створу реки, т.е. по нижнему створу реки, ограничивающему рассматриваемый бассейн, оценивается сток химических веществ, поступающих в целом с водосборной территории.

На основе данных о концентрациях химических веществ и значениях годового (или месячного) водного стока выполнен расчет химического стока арктических рек (стока растворенных веществ) за определенный временной период. Расчет проводили прямым методом по формуле [5]:

$$G = \sum_{i=1}^m Wi\bar{C}_i,$$

где G – количество перенесенного вещества за расчетный период, тыс. т; m – число интервалов расчетного периода; Wi – объем стока воды за i -й интервал расчетного периода, км³; $\bar{C}_i$ – средняя концентрация вещества за i -й интервал расчетного периода, мг/дм³.

Использование модуля стока химических веществ (отношение среднегодового объема химического стока к площади водосбора) позволяет сравнивать речные системы с различными объемами водного стока и площадями водосбора.

Результаты исследования и обсуждение

Определяющим фактором в изменчивости химического стока является водный сток. Чем он больше, тем, соответственно, большее количество растворенных веществ может быть вынесено рекой [6]. В данной работе рассматривается сток растворенных химических веществ (сток макрокомпонентов, или ионный сток) без стока взвешенных компонентов в речном стоке.

Водный сток рек в большей мере определяется природно-климатическими условиями. Однако из-за хозяйственной деятельности человека в совокупности с природными факторами сток многих рек за последние десятилетия претерпел существенные изменения.

Среднегодовое значение водного стока и объемов стока макрокомпонентов с водосборов крупных рек арктической зоны, составляющих ионный сток, приведены в табл. 1. По абсолютным значениям химического стока исследуемые реки можно классифицировать на реки с низким ионным стоком – это большинство исследуемых рек, и с высоким ионным стоком – рр. Обь, Енисей и Лена, что полностью согласуется с водностью рек.

Наибольший вклад в ионный сток всех изученных рек вносят гидрокарбонаты, составляя от 44 (р. Лена) до 69 % (р. Таз). Второй содоминирующий компонент ионного стока отличается: для рр. Печора и Уса – это ионы магния, рр. Обь и Енисей – ионы кальция и для остальных рек – сульфаты.

Таблица 1

Среднегодовое водное и ионное стоки с водосборов крупных рек Арктической зоны России (1980–2018 гг.) / Average long-term water inflow and ionic runoff from catchments of large rivers in the Arctic zone of Russia (1980–2018)

Река	Пункт наблюдений	Всток, км ³	Объем химического стока G, тыс. т				
			Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Mg ²⁺	Ca ²⁺
Печора	г. Нарьян-Мар	167,3	534,8	915,5	5784,1	1415,7	367,9
Уса	с. Усть-Уса	54,9	287,4	319,1	1384,2	408,8	110,9
Обь	г. Салехард	425,4	3223,4	6851,8	36063,2	2576,0	7632,3
Пур	пос. Самбург	26,6	94,4	418,2	735,4	70,6	123,5
Таз	пос. Красноселькуп	18,8	65,6	276,1	1639,2	129,6	264,3
Енисей	г. Игарка	720,1	6921,2	7902,4	40012,9	2876,9	11461,1
Лена	с. Кюсюр	606,9	8279,7	10122,9	23338,3	2639,3	8389,6
Яна	п. ст. Юбилейная	38,1	181,9	700,0	1543,9	147,1	512,6
Колыма	с. Колымское	63,4	440,4	722,3	1836,8	138,3	635,9

Примечание. Цветом выделена качественная характеристика ионного стока по абсолютным значениям:

	– низкий ионный сток;
	– средний ионный сток;
	– высокий ионный сток.

Во внутригодовой изменчивости химического стока исследуемые реки имеют схожие закономерности. В большинстве случаев для стока макрокомпонентов наблюдается совпадение максимумов кривых водного и химического стока с водосборных площадей арктических рек (рис. 1). В отдельных случаях происходит смещение максимумов

кривых, когда пик химического стока приходится на месяц раньше пика водного стока (рис. 2а) или на месяц позже (рис. 2б). Но, несмотря на такие незначительные смещения, можно говорить о том, что происходит синхронное внутригодовое изменение водного и химического стока крупных арктических рек.

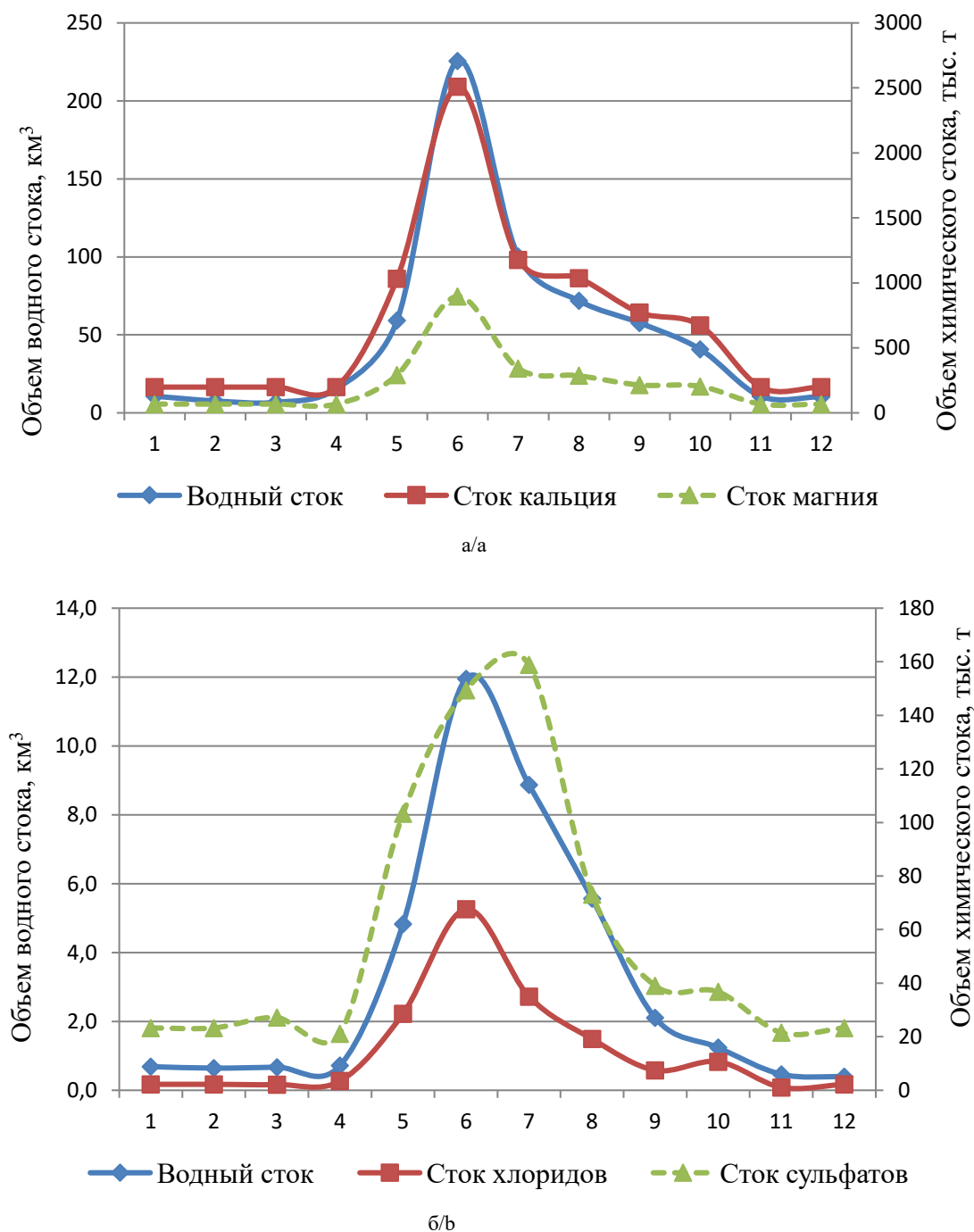


Рис. 1. Внутригодовое изменение водного и химического стока арктических рек при совпадении максимумов кривых (а – р. Пур; б – р. Лена) / Fig. 1. Intra-annual change in the water flow and chemical runoff of Arctic rivers with the coincidence of the maxima of the curves (a - the Pur river; b - the Lena river)

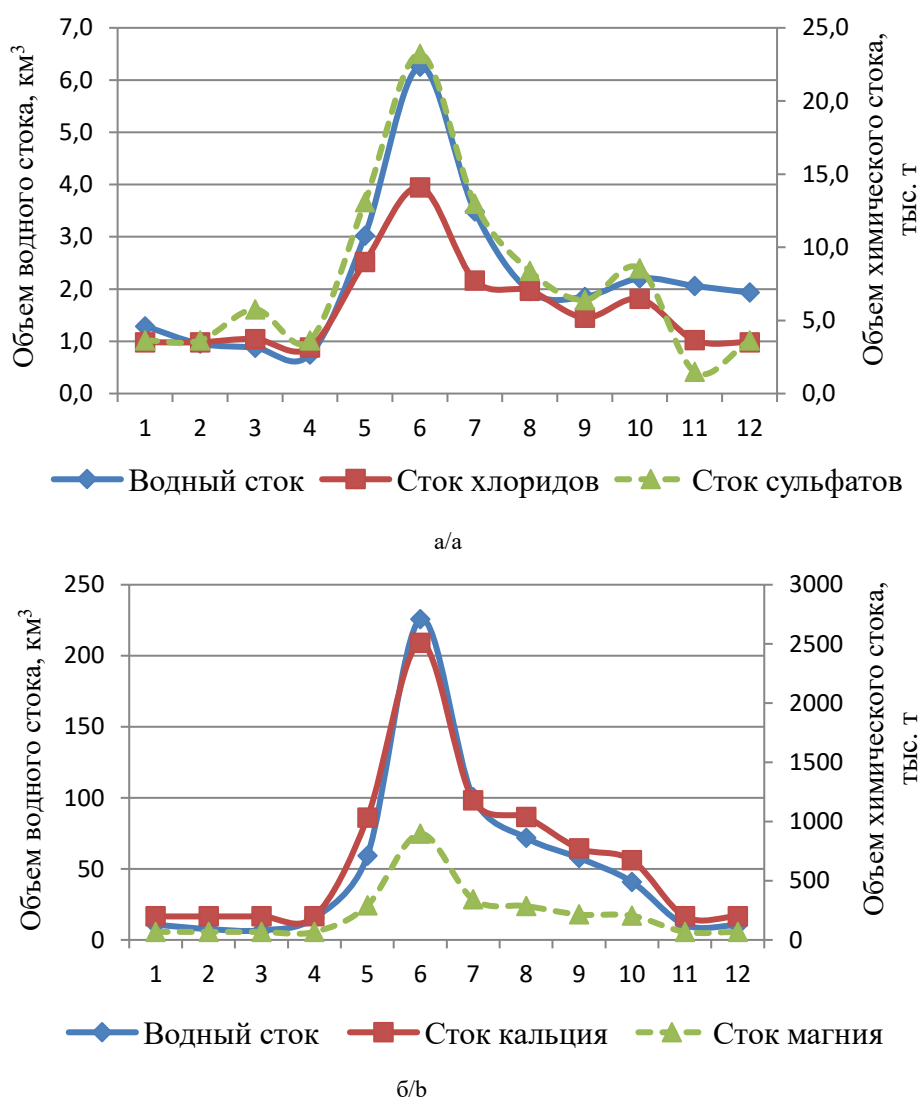


Рис. 2. Внутригодовое изменение водного и химического стока арктических рек при смещении максимумов кривых (а – р. Печора; б – р. Яна) / Fig. 2. Intra-annual change in the water flow and chemical runoff of Arctic rivers with a shift in the maxima of the curves (a - Pechora river; b - Yana river)

Поскольку рассматриваемые реки Арктической зоны России значительно отличаются друг от друга по величине водного стока, длине и площади водосбора, сравнение рек между собой проведено по удельному показателю – модулю химического стока. Среднегодовые значения модулей стока макрокомпонентов (т/км² в год) для рек арктической зоны приведены в табл. 2.

По удельным значениям химического стока исследуемые реки уже группируются (классифицируются) по-другому. К рекам с низким ионным стоком относятся Яна и Колыма, к группе со средним – большинство исследуемых рек, а с высоким ионным стоком – только река Уса. Повышен-

ный вынос макрокомпонентов в бассейне р. Уса может быть связан с активными процессами химической денудации.

Потепление климата, отмечающееся в Арктике в настоящее время, потенциально способно усилить химическую денудацию в бассейнах рек, частично или полностью расположенных в пределах многолетней мерзлоты.

Отмечается, что сокращение площади и мощности многолетнемерзлых пород сопровождается ослаблением барьера, препятствующего проникновению поверхностных вод в глубокие горизонты почв и разгрузке более минерализованных подземных вод в речное русло [7].

Таблица 2

Среднегодолетние значения модулей стока макрокомпонентов с водосборов крупных рек Арктической зоны России (1980–2018 гг.) / Average long-term values of the modules inflow of macrocomponents from the catchments of large rivers of the Arctic zone of Russia (1980-2018)

Река	Пункт наблюдений	Площадь водосбора, тыс. км ²	Модуль химического стока макрокомпонентов, т/км ² в год				
			Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Mg ²⁺	Ca ²⁺
Печора	г. Нарьян-Мар	312,0	1,71	2,93	18,5	4,54	1,18
Уса	с. Усть-Уса	75,1	3,83	4,25	18,4	5,44	1,48
Обь	г. Салехард	2 340	1,10	2,30	12,2	0,90	2,60
Пур	пос. Самбург	80,4	1,00	4,40	7,70	0,70	1,30
Таз	пос. Красноселькуп	87,2	0,80	3,20	18,8	1,50	3,00
Енисей	г. Игарка	2 440	2,80	3,20	16,4	1,20	4,70
Лена	с. Кюсюр	2 430	3,40	4,20	9,60	1,10	3,50
Яна	п. ст. Юбилейная	224	0,80	3,10	6,90	0,70	2,30
Колыма	с. Колымское	526	0,80	1,40	3,50	0,30	1,20

Примечание. Цветом выделена качественная характеристика ионного стока по удельным значениям:

	– низкий ионный сток;
	– средний ионный сток;
	– высокий ионный сток.

Результаты исследования многолетней динамики ионного стока рек бассейна р. Печора показали, что современные изменения климата слабо сказались на интенсивности химической денудации в бассейне р. Печора. В многолетнем аспекте изменения объемов и модулей ионного стока рек либо несущественны, либо по отдельным ионам отмечается их снижение [8].

Заключение

Проведенные исследования позволили сделать следующие выводы:

1. Формирование ионного стока арктических рек происходит в условиях повсеместного распространения мощного слоя многолетней мерзлоты и с огромных водосборных территорий. Основным фактором, определяющим величину ионного стока, является водность реки.

2. Изменение абсолютных значений химического стока арктических рек полностью согласуется с водностью рек. Основной вклад в ионный сток всех изученных рек вносят гидрокарбонаты. Изменение стока гидрокарбонатов может служить индикатором климатических изменений в Арктическом регионе.

3. Нарушений внутригодовой изменчивости стока макрокомпонентов не выявлено, что может свидетельствовать об отсутствии значительного влияния антропогенного фактора на ионный сток.

4. По показателю модуля химического стока исследуемые реки классифицируются на реки с

низким ионным стоком – рр. Яна и Колыма, средним – рр. Печора, Обь, Пур, Таз и Енисей, с высоким ионным стоком – р. Уса. Повышенный вынос макрокомпонентов с водосбора р. Уса может быть связан с активизацией химической денудации.

Таким образом, изменчивость ионного стока отражает естественные и антропогенные факторы формирования стока воды и содержания химических веществ в речных системах. Изучение сезонной и межгодовой изменчивости химического стока дает интегральное представление о роли хозяйственной деятельности на водосборных территориях, может быть использовано при оценке интенсивности диффузного стока, что особенно актуально для арктического района с повышенной уязвимостью наземных и водных экосистем при интенсивном хозяйственном освоении территории.

Литература

1. Диагностический анализ состояния окружающей среды Арктической зоны Российской Федерации: расширенное резюме / отв. ред. Б.А. Моргунов. М.: Научный мир, 2011. 200 с.
2. IPCC, 2001: Climate change 2001. The Scientific Basis. Contribution for working group 1 to the Third Assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / Eds. Houghton J.T., Ding Y., Griggs D.J., Noguer M., van der Linden P.J., Xiaosu D. Cambridge University Press, 944 p.
3. Шикломанов И.А., Шикломанов А.И. Изменение климата и динамика притока речных вод в Северный Ледовитый океан // Водные ресурсы. 2003. Т. 30, № 6. С. 645–654.

4. Эльпинер Л.И., Дзюба А.В. Медико-экологические аспекты деградации зоны многолетней мерзлоты: проблема палеовирусной контаминации // Гигиена и санитария. 2017. № 96 (8). С. 706–711.

5. Nikanorov A.M., Bryzgalo V.A., Kosmenko L.S., Reshetnyak O.S. The role of chemical river runoff in the anthropogenic transformation of the state of the aquatic environment in the Enisei mouth area // *Water Resources*. 2010. Vol. 37, № 4. P. 471–480.

6. Брызгало В.А., Никаноров А.М., Косменко Л.С., Решетняк О.С. Устьевые экосистемы крупных рек России: антропогенная нагрузка и экологическое состояние. Ростов н/Д.: Изд-во ЮФУ, 2015. 164 с.

7. Frey K. E., Siegel D.I., Smith L.C. Geochemistry of west Siberian streams and their potential response to permafrost degradation // *Water Resources Research*. 2007. Vol. 43, iss. 3. P. W03406. Doi 10.1029/2006WR004902.

8. Даниленко А.О., Решетняк О.С., Косменко Л.С., Кондакова М.Ю. Изменение интенсивности химической денудации на водосборе Печоры в условиях нестационарного климата и хозяйственной деятельности // *Water and Ecology*. 2020. № 4 (84). P. 38–49.

References

1. *Diagnostic analysis of the state of the environment in the Arctic zone of the Russian Federation (Extended summary)*. (2011). B.A. Morgunov (Ed.). Moscow, Nauchnyi mir Publ., 200 p. (in Russian).

2. IPCC, 2001: *Climate change 2001. The Scientific*

Basis. Contribution for working group 1 to the Third Assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Houghton J.T., Ding Y., Griggs D.J., Noguer M., van der Linden P.J., Xiaosu D. (Eds.). Cambridge University Press, 944 p.

3. Shiklomanov I.A., Shiklomanov A.I. (2003). Climate change and dynamics of river water inflow into the Arctic Ocean. *Vodnye resursy*, vol. 30, No. 6, pp. 645–654. (in Russian).

4. Elpiner L.I., Dzyuba A.V. (2017). Medical and ecological aspects of the degradation of the permafrost zone: the problem of paleoviral contamination. *Gigiena i sanitariya*, vol. 96 (8), pp. 706–711. (in Russian).

5. Nikanorov A.M., Bryzgalo V.A., Kosmenko L.S., Reshetnyak O.S. (2010). The role of chemical river runoff in the anthropogenic transformation of the state of the aquatic environment in the Enisei mouth area. *Water Resources*, vol. 37, No. 4, pp. 471–480.

6. Bryzgalo V.A., Nikanorov A.M., Kosmenko L.S., Reshetnyak O.S. (2015). *Ecosystems of the mouth areas of the large Russia river: anthropogenic load and ecological state*. Rostov-on-Don, Southern Federal University Press, 164 p. (in Russian).

7. Frey K.E., Siegel D.I., Smith L.C. (2007). Geochemistry of west Siberian streams and their potential response to permafrost degradation. *Water Resources Research*, vol. 43, iss. 3, P. W03406. Doi 10.1029/2006WR004902.

8. Danilenko A.O., Reshetnyak O.S., Kosmenko L.S., Kondakova M.Yu. (2020). Changes in the intensity of chemical denudation in the Pechora catchment under conditions of a non-stationary climate and economic activity. *Water and Ecology*, No. 4 (84), pp. 38–49. (in Russian).

УДК 594.15 471.24(262.81)
doi 10.18522/1026-2237-2021-3-87-92

ИЗУЧЕНИЕ РАКОВИННОГО ВЕЩЕСТВА СОВРЕМЕННЫХ И ПЛЕЙСТОЦЕНОВЫХ МОЛЛЮСКОВ РОДА *DIDACNA*

© 2021 г. *М.В. Хлопкова*¹

¹Прикаспийский институт биологических ресурсов Дагестанского федерального исследовательского центра РАН,
Махачкала, Россия

STUDY OF THE SHELL MATTER OF MODERN AND PLEISTOCENE MOLLUSCS OF THE GENUS *DIDACNA*

*M.V. Khlopkova*¹

¹Precaspian Institute of Biological Resources, Dagestan Federal Research Center, Russian Academy of Sciences,
Makhachkala, Russia

Хлопкова Марина Владимировна – кандидат биологических наук, научный сотрудник, лаборатория морской биологии, Прикаспийский институт биологических ресурсов, Дагестанский федеральный исследовательский центр РАН, ул. М. Гаджиева, 45, г. Махачкала, Республика Дагестан, 367000, Россия, e-mail: hlopkovam@mail.ru

Marina V. Khlopkova - Candidate of Biological Sciences, Researcher, Marine Biology Laboratory, Precaspian Institute of Biological Resources, Dagestan Federal Scientific Center, Russian Academy of Sciences, M. Gadzhieva St., 45, Makhachkala, Republic of Dagestan, 367025, Russia, e-mail: hlopkovam@mail.ru

Одним из способов исследования реакций морских беспозвоночных на внешние воздействия изменения температуры и солености является биогеохимический анализ скелетных частей, последовательно наращиваемых в течение онтогенеза и фиксирующих разнообразную информацию этих изменений. Наиболее изучены раковины моллюсков, панцири морских ежей и скелетные части кораллов. Сведения о химическом составе современных и ископаемых раковин моллюсков широко используются в решении геологических и биологических проблем, в том числе для определения температуры и солености древних морских бассейнов, изучения диагенеза карбонатных осадков и биохимической эволюции беспозвоночных.

Рентгеноструктурный анализ раковинного вещества дидакн, относящихся к семейству Cardiidae, показал арагонитовый состав. В работе проведено количественное определение элементов в раковинах моллюсков микрозондовым анализом точечного сканирования и спектрометрическим методом. Осуществлялся отбор проб в последовательных слоях роста раковины в пределах годового кольца, при этом удалось обнаружить сезонную динамику изменения стронция. Для дидакн стронций является основным элементом-индикатором сезонного и онтогенетического роста, включается в кристаллическую решетку арагонита и образует прочные соединения в процессе формообразования раковины в процессе жизни этих двустворок. Изучена вариабильность сезонных, онтогенетических и таксономических различий ряда элементов-индикаторов у ныне живущих и плейстоценовых двустворчатых моллюсков рода *Didacna*.

Ключевые слова: *Didacna*, Каспийское море, элементы-индикаторы, Sr, Mg, микрозондовый анализ.

One of the ways to study the reactions of marine invertebrates to the external effects of changes in temperature and salinity is the biogeochemical analysis of skeletal parts, which are consistently built up during ontogenesis and record a variety of information about these changes. The most studied shells of mollusks, sea urchin shells and skeletal parts of corals. Information about the chemical composition of modern and fossil mollusk shells is widely used in solving geological and biological problems, including determining the temperature and salinity of ancient marine basins, studying the diagenesis of carbonate sediments, and the biochemical evolution of invertebrates.

X-ray diffraction analysis of the shell matter of didacnae belonging to the Cardiidae showed an aragonite composition. The quantitative determination of elements in mollusk shells by microprobe analysis of spot scanning and spectrometric method is carried out. Samples were taken in successive layers of shell growth within the annual ring, and the seasonal dynamics of strontium changes were detected. For *Didacna*, strontium is the main element-indicator of seasonal and ontogenetic growth, is included in the crystal lattice of aragonite and forms strong compounds in the process of shell formation during the life of these

bivalves. The variability of seasonal, ontogenetic, and taxonomic differences in a number of indicator elements in living and Pleistocene bivalves of the genus *Didacna* was studied.

Keywords: *Didacna*, Caspian sea, elements-indicators, Sr, Mg, microprobes analysis.

При решении многих вопросов геохимической экологии и палеоэкологии необходимо оценивать степень сохранности первоначального состава исследуемых образцов скелетного вещества. В многочисленных исследованиях современных и ископаемых моллюсков обсуждаются устойчивость минерального и химического состава их раковин, применение этих данных для палеогеографических и палеоэкологических реконструкций [1–9], что является актуальным в настоящее время. Арагонит является малоустойчивой модификацией карбоната кальция, со временем он переходит в более термодинамически устойчивый кальцит. Сведения о минералогии неоднозначны, так как анализируются целые образцы без учета сезонных изменений состава раковин, образующихся последовательным наращиванием в течение года или нескольких лет. По мнению одних исследователей [4, 7], изменение содержания стронция в раковинах моллюсков указывает на направленность биогеохимической эволюции. Считается, что современные моллюски более избирательно, по сравнению с ископаемыми, извлекают стронций из морской воды. Доказательства этого видят в находках неперекристаллизованных раковин в отложениях от палеозоя до нашего времени и в постоянном уменьшении стронций-кальциевых отношений в арагонитовых раковинах моллюсков с ходом геологического времени. Однако другие авторы [8, 9] полагают, что при таком подходе биохимические факторы трудно дифференцировать от вторичных изменений. В связи с вышесказанным целью исследования было изучение минерального и химического состава раковин ископаемых и современных двустворок на примере каспийских моллюсков рода *Didacna*.

Методы исследований

По радиальным срезам раковин определены годовые и сезонные слои роста. Пробы отбирались из наружных частей створок по годовым и сезонным меткам с помощью зубной бормашины. На ДРОН-2 проведен рентгеноструктурный анализ в Институте геологии ДФИЦ РАН. Спектрометрическим анализом определялся Sr в раковинах на СПАРК-1-2М. Микронзондовый анализ раковинного вещества моллюсков методом точечного сканирования проведен в ГИН РАН.

Результаты исследований

Особенностью биогеохимических индикаторов является возможность изучения влияния факторов среды на рост в естественных условиях обитания животного и физиолого-биохимических характеристик вида на современном и ископаемом материале. Накопление Sr, Mn, Fe, Cu, Pb в биоценозах двустворок происходит в основном за счет биоминерализационного процесса.

Изучение диагенетических преобразований, сравнение среднего состава современных и ископаемых карбонатных скелетов усложнены значительными прижизненными индивидуальными изменениями химического состава раковин, различиями концентрирования элементов-примесей как разными моллюсками, так и особями одного вида [1–3, 5, 8].

Как показал рентгеноструктурный анализ, створки моллюсков рода *Didacna* сложены арагонитом, иногда наблюдаются следы кальцита, что говорит о диагенетических преобразованиях после нахождения раковин в грунтовых отложениях.

Нами изучено распределение элементов-примесей в современных и плейстоценовых раковинах дидакн по годовым слоям роста. Хорошо исследован процесс включения в раковинное вещество магния и стронция, которые изоморфно заменяют в кристаллической решетке карбонат кальция. Такие элементы, как Fe, Ba и Na, связываются как с карбонатной, так и с органической частью раковины.

Концентрация Mg в кальците, как правило, выше, чем в арагоните, а Sr активнее встраивается в кристаллическую решетку арагонита. Как представитель семейства *Cardiidae*, дидакны содержат повышенные концентрации стронция по сравнению с другими моллюсками – это объясняется арагонитовой кристаллической структурой раковинного вещества.

Связь с условиями роста морских беспозвоночных обнаруживают Sr, Mg, Na, Fe: наблюдается зональность, совпадающая с кольцами роста [1, 5]. Для стронция установлена отрицательная корреляция с соленостью [1, 9, 10]. Анализ примесей натрия, стронция, железа и магния позволил установить повышение их содержаний с возрастом в диагенетически неизменных раковинах (таблица, рис. 1). Многие пойкилотермные беспозвоночные компенсируют изменения температуры и солености среды сдвигом активности и метаболизма. Меняется и ионный состав внутривещной жидкости, в частности содержание кальция, магния, железа, калия, натрия, хлора [6, 9].

Содержание Mg, Fe, Na, %, в раковинах *Didacna* в онтогенезе и в сезоне
/ The content of Mg, Fe, Na, %, in the shells of *Didacna* in ontogenesis and in season

№	№ точки	Количество проб	Участок на срезе, возраст	Концентрация металлов, %			Mg/Fe	Сезон года
				Mg	Fe	Na		
1	1	3	Светлый слой, 2–3 года	0,11 (0,003)*	0,6 (0,002)	0,53 (0,003)	0,18	Весна
	2	2	Выход нижнего подслоя, 3,5 года	0,05 (0,005)	0,61 (0,002)	0,6 (0,004)	0,08	Зима
	3	4	Темный слой, 5 лет	0,11 (0,002)	0,23 (0,003)	0,57 (0,004)	0,48	Весна
	4	2	Темный, 8 лет	0,11 (0,004)	0,27 (0,002)	0,69 (0,005)	0,41	Весна
2	1	2	Светлый, 2–3 года	0,01 (0,005)	0,027 (0,004)	0,57 (0,003)	0,37	Осень
	2	4	Выход нижнего подслоя, 3,5 года	0,05 (0,002)	0,00	0,81 (0,004)	0**	Зима
	3	3	Переход светлого/темного, 5,5 года	0,05 (0,002)	0,05 (0,002)	0,51 (0,003)	1	Зима
	4	2	Темный слой, 9 лет	0,00	0,00	0,52 (0,002)	0	–
3	1	3	Темный	0,05 (0,001)	0,00	1,1 (0,005)	0	–
	2	3	Светлый	0,05 (0,001)	0,00	0,74 (0,003)	0	–
	3	3	Темный	0,03 (0,002)	0,09 (0,003)	1,23 (0,005)	0,33	Осень
	4	2	Переход светлого/темного	0,04 (0,003)	0,00	0,92 (0,004)	0	–
4	1	3	Светлый слой, 3 года	0,07 (0,004)	0,004 (0,002)	0,66 (0,003)	17,5	Осень
	2	2	Переход светлого/темного, 3,5 года	0,00	0,04 (0,003)	1,03 (0,004)	0	–
	3	2	Темный, 5,5 года	0,003 (0,002)	0,00	1,15 (0,005)	0	–
	4	2	Темный, 9 лет	0,09 (0,003)	1,89 (0,005)	0,92 (0,003)	0,05	–
5	1	4	Темный, 2 года	0,00	0,00	1,19 (0,004)	0	–
	2	3	Темный, 3 года	0,07 (0,002)	0,28 (0,004)	0,62 (0,003)	0,25	Весна
	3	3	Темный, 6 лет	0,02 (0,001)	0,09 (0,003)	0,61 (0,002)	0,22	Осень
	4	2	Переход темного/светлого, 8,5 года	0,04 (0,002)	0,31 (0,004)	1,28 (0,005)	0,13	Осень
6	1	2	Темный слой, 2 года	0,04 (0,002)	0,1 (0,002)	0,99 (0,004)	0,4	Весна
	2	3	Темный, 4 года	0,00	0,06 (0,003)	0,65 (0,004)	0	–
	3	4	Переход светлого/темного, 7,5 года	0,00	0,02 (0,001)	1,29 (0,005)	0	–
	4	4	Переход светлого/темного, 9,5 года	0,00	0,01 (0,001)	0,96 (0,005)	0	–

Примечание. Образцы № 1–5 – раковины *D. baeri* новокаспийских отложений дагестанского побережья; № 6 – раковины *D. baeri* с туркменского побережья Каспия; * – стандартные отклонения для средних величин; **Mg/Fe = 0; 1; 17 – отсутствие корреляционных связей, нарушение биологического контроля как следствие диагенеза.

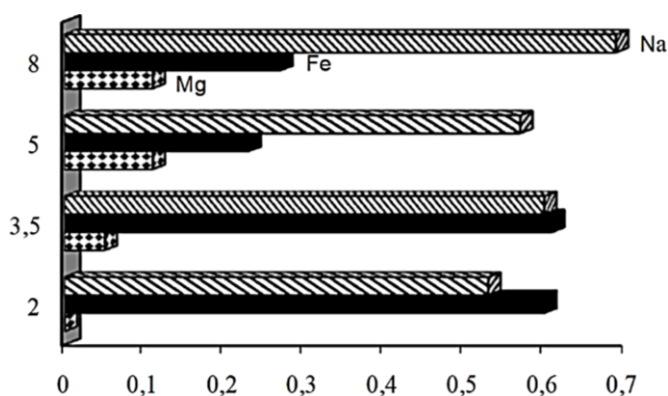


Рис. 1. Изменение концентрации микроэлементов в зависимости от возраста на примере двусторчатого моллюска *Didacna baeri*: по оси абсцисс – концентрация, %; по оси ординат – возраст, лет / Fig. 1. Changes in the concentration of trace-elements depending on age on the example of the bivalve mollusk *Didacna baeri* on the abscissa axis - concentration %; on the ordinate axis - age, years

В работе изучено накопление Sr, Mg, Fe и Na (%) в раковинах современных и плейстоценовых моллюсков рода *Didacna* в онтогенезе и по сезонам (таблица, рис. 1–4). Пробы отбирались в нарастающих слоях роста раковины, при этом удалось проследить сезонную вариабильность Sr. На рис. 2–4 показана сезонная и онтогенетическая динамика стронция у *Didacna*. Стронций, встраиваемый в структуру арагонита, повышает его устойчивость [10].

У тригоноидных моллюсков в онтогенезе (рис. 2) увеличивается амплитуда колебаний Sr в разных сезонах [10], в зимних слоях стронция накапливается больше. У моллюсков *Didacna* красной группы (рис. 3) максимум накопления Sr составляет 0,58 % в период половозрелости и снижается с возрастом.

Глубоководные катиллоидные дидакны – как молодь, так и половозрелые особи – обитают на одной

глубине, при стабильных условиях (рис. 4). В кальци-
товых раковинах концентрация Mg увеличивается с
возрастом, а у исследованных моллюсков прослежи-
вается ее повышение в жаркий период и в нерест.

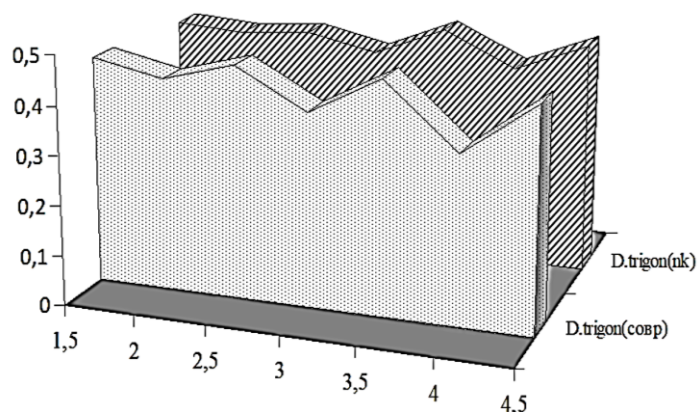


Рис. 2. Динамика накопления стронция с возрастом
и в зависимости от сезона у современного и новокаспий-
ского моллюска *Didacna trigonoides*: по оси абсцисс –
возраст, лет; по оси ординат – концентрация стронция, %
/ Fig. 2. Dynamics of strontium accumulation with age
and depending on the season in modern and (nk) molluscs
Didacna trigonoides on the abscissa axis - age, years;
on the ordinate axis - strontium concentration, %

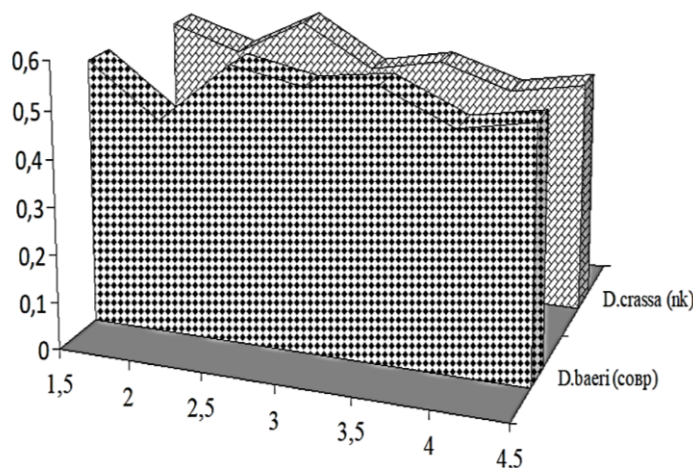


Рис. 3. Динамика накопления стронция с возрастом и
в зависимости от сезона у современного *Didacna baeri*
и новокаспийского моллюска *Didacna crassa*: по оси
абсцисс – возраст, лет; по оси ординат – концентрация
стронция, % / Fig. 3. Dynamics of strontium accumulation
with age and depending on the season in modern *Didacna*
baeri and (nk) molluscs *Didacna crassa* on the abscissa
axis - age, years; on the ordinate axis -
strontium concentration, %

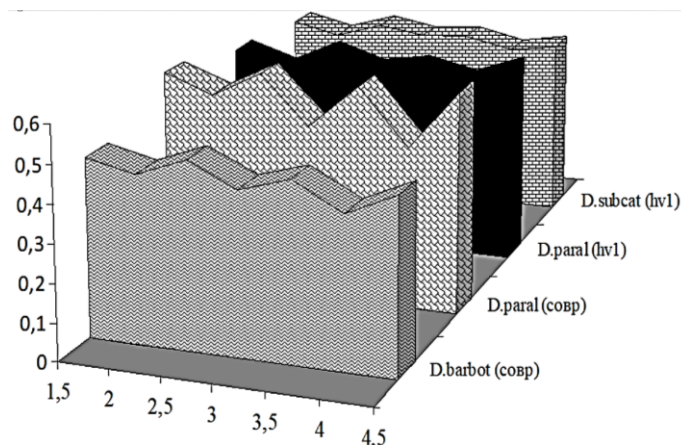


Рис. 4. Динамика накопления стронция с возрастом
и в зависимости от сезона у моллюсков группы
Catillus нижнехвалыинских *D. subcatillus*, *D. Parallella*,
современных *D. parallella*, *D. barbotdemarnyi* по оси
абсцисс – возраст, лет; по оси ординат – концентрация
стронция, % / Fig. 4. Dynamics of strontium accumulation
with age and depending on the season in the molluscs
of the group *Catillus* (hv1) *D. subcatillus*, *D. parallella*;
modern *D. parallella*, *D. barbotdemarnyi* on the abscissa
axis - age, years; on the ordinate axis -
strontium concentration, %

Выводы

1. Изучение раковинного вещества плейстоцено-
вых и современных моллюсков рода *Didacna* рентге-
нографическим и спектральным методами позволило
выявить степень его сохранности и диагенетических
изменений. Арагонит в большинстве исследованных
раковин устойчив, содержание элементов-примесей
(Na, Fe, Mg) в раковинном веществе более древних
моллюсков по сравнению с современными повыше-
но. В диагенетически измененных раковинах ко-
личество их, напротив, резко снижается.

2. Независимо от геологического возраста и от
групповой принадлежности *Didacna* прослежива-
ются определенные закономерности накопления
Sr. У галофильных крассоидных и катиллоидных
видов, обитающих на глубине, максимальное со-
держание Sr – в период половозрелости и снижа-
ется в онтогенезе. Для солоноватоводных мелко-
водных моллюсков тригоноидной и катиллоидной
групп характерны схожие графики колебаний
стронция в сезоне и онтогенезе, свидетельствующие
об одинаковых условиях обитания. У живых
дидакн накопление стронция напрямую зависит от
солёности и находится в обратной зависимости от

температуры. Накопление натрия больше зимой, весной его содержание снижается. С возрастом происходит накопление Na в раковине. Повышение концентрации Mg у исследованных моллюсков отмечается летом и при переходе к половозрелости. Содержание железа в годовых слоях роста современных и вымерших раковин дидакн с возрастом уменьшается, поэтому наиболее вероятной причиной изменения состава годовых слоев роста следует считать возрастные замедления скорости кальцификации.

3. Преимущества использования биогеохимических индикаторов – это возможность изучения влияния внешних условий на рост в естественной среде обитания животного и исследование физиолого-биохимических характеристик вида на современном и ископаемом материале. Описываемые по биогеохимическим индикаторам условия роста морских беспозвоночных отвечают динамике состояний в онтогенезе. Выявление специфической и неспецифической составляющих адаптивного роста по биогеохимическим индикаторам позволяет оценить вклад каждой из них, а также установить периодичность проявлений в процессах морфогенеза и роста.

Литература

1. Золотарев В.Н. Склерохронология морских двустворчатых моллюсков. Киев: Наукова думка, 1989. 112 с.
2. Демина Л.Л. Количественная оценка роли живого вещества в геохимической миграции микроэлементов в океане // Геохимия. 2015. Т. 53, № 3. С. 234–251.
3. Wanamaker A.D., Gillikin D.P. Strontium, magnesium, and barium incorporation in aragonitic shells of juvenile *Arctica islandica*: Insights from temperature controlled experiments // *Chemical Geology*. 2019. Vol. 526. P. 117–129. Doi 10.1016/j.chemgeo.2018.02.012
4. Poulain C., Gillikin D.P., Thébault J., Munaron J.M., Bohn M., Robert R., Paulet Y.M., Lorrain A. An evaluation of Mg/Ca, Sr/Ca, and Ba/Ca ratios as environmental proxies in aragonite bivalve shells // *Chemical Geology*. 2015. Vol. 396. P. 42–50. Doi 10.1016/j.chemgeo.2014.12.019.
5. Dodd J.R., Crisp E.L. Non-linear variation with salinity of Sr/Ca and Mg/Ca ratios in water and aragonitic bivalve shells and implications for paleosalinity studies // *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. 1982. Vol. 38. P. 45–56.
6. Sano Y., Kobayashi S., Shirai K., Takahata N., Matsumoto K., Watanabe T., Sowa K., Iwai K. Past daily light cycle recorded in the strontium/calcium ratios of giant clam shells // *Nature Communications*. 2012. № 3. P. 761. Doi 10.1038/ncomms1763.

7. Geeza T.J., Warner N.R., Gillikin D.P., Goodwin D.H., Evans S.D., Watters T. Controls on magnesium, manganese, strontium, and barium concentrations recorded in freshwater mussel shells from Ohio // *Chemical Geology*. 2019. Vol. 526. P. 142–152. Doi 10.1016/j.chemgeo.2018.01.001.

8. Chamberlayne B.K., Jonathan J.T., Bronwyn M.G. Environmental Controls on the Geochemistry of a Short-Lived Bivalve in Southeastern Australian // *Estuaries and Coasts*. 2020. № 43. P. 86–101. Doi 10.1007/s12237-019-00662-7.

9. Tynan S., Opdyke B.N., Walczak M., Eggins S., Dutton A. Assessment of Mg/Ca in *Saccostrea glomerata* (the Sydney rock oyster) shell as a potential temperature record // *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. 2016. № 484. P. 79–88. Doi 10.1016/j.palaeo.2016.08.009.

10. Гусейнов К.М., Хлопкова М.В., Гасанова А.И. Анализ распределения элементов-индикаторов в раковинах дидакн // Изв. Дагестанского гос. пед. ун-та. Естеств. и точн. науки. 2016. Т. 10, № 2. С. 22–27.

References

1. Zolotarev V.N. (1989). *Sclerochronology of marine Bivalves*. Kiev, Naukova dumka Publ., 112 p. (in Russian).
2. Demina L.L. (2015). Quantification of the role of organisms in the geochemical migration of trace metals in the ocean. *Geochemistry International*, vol. 53, No. 3, pp. 224–240.
3. Wanamaker A.D., Gillikin D.P. (2019). Strontium, magnesium, and barium incorporation in aragonitic shells of juvenile *Arctica islandica*: Insights from temperature controlled experiments. *Chemical Geology*, vol. 526, pp. 117–129. Doi 10.1016/j.chemgeo.2018.02.012.
4. Poulain C., Gillikin D.P., Thébault J., Munaron J.M., Bohn M., Robert R., Paulet Y.M., Lorrain A. (2015). An evaluation of Mg/Ca, Sr/Ca, and Ba/Ca ratios as environmental proxies in aragonite bivalve shells. *Chemical Geology*, vol. 396, pp. 42–50. Doi 10.1016/j.chemgeo.2014.12.019.
5. Dodd J.R., Crisp E.L. (1982). Non-linear variation with salinity of Sr/Ca and Mg/Ca ratios in water and aragonitic bivalve shells and implications for paleosalinity studies. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, vol. 38, pp. 45–56.
6. Sano Y., Kobayashi S., Shirai K., Takahata N., Matsumoto K., Watanabe T., Sowa K., Iwai K. (2012). Past daily light cycle recorded in the strontium/calcium ratios of giant clam shells. *Nature Communications*, No. 3, p. 761. Doi 10.1038/ncomms1763.
7. Geeza T.J., Warner N.R., Gillikin D.P., Goodwin D.H., Evans S.D., Watters T. (2019). Controls on magnesium, manganese, strontium, and barium concentrations recorded in freshwater mussel shells from Ohio. *Chemical Geology*, vol. 526, pp. 143–152. Doi 10.1016/j.chemgeo.2018.01.001.

8. Chamberlayne B.K., Jonathan J.T., Bronwyn M.G. (2020). Environmental Controls on the Geochemistry of a Short-Lived Bivalve in Southeastern Australian. *Estuaries and Coasts*, No. 43, pp. 86-101. Doi 10.1007/s12237-019-00662-7.

9. Tynan S., Opdyke B.N., Walczak M., Eggins S., Dutton A. (2016). Assessment of Mg/Ca in *Saccostrea glomerata* (the Sydney rock oyster) shell as a potential tem-

perature record. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, No. 484, pp. 79-88. Doi 10.1016/j.palaeo.2016.08.009.

10. Guseynov K.M., Khlopko M.V., Gasanova A. Sh. (2016). The analysis of the distribution of the elements - indicator in *Didakna* shells. *Izv. Dagestanskogo gos. ped. un-ta. Estestv. i tochn. nauki*, vol. 10, No. 2, pp. 22-27. (in Russian).

Поступила в редакцию / Received

21 апреля 2021 г. / April 21, 2021

БИОЛОГИЧЕСКИЕ НАУКИ**BIOLOGICAL SCIENCES**

УДК 597.2/5:574.622

doi 10.18522/1026-2237-2021-3-93-97

**К ИЗУЧЕНИЮ БИОЛОГИИ ВОБЛЫ *RUTILUS RUTILUS CASPICUS*
(JAKOWLEV, 1870) КРАЙНОВСКОГО ПРИБРЕЖЬЯ КАСПИЙСКОГО МОРЯ**© 2021 г. *А.Ш. Гасанова¹, К.М. Гусейнов¹, Р.М. Бархалов¹, М.В. Хлопкова¹*¹Прикаспийский институт биологических ресурсов

Дагестанского федерального исследовательского центра РАН, Махачкала, Россия

**THE STUDY OF THE BIOLOGY OF THE ROACH *RUTILUS RUTILUS CASPICUS*
(JAKOWLEV, 1870) IN THE KRAYNOVSKY COAST OF THE CASPIAN SEA***A.Sh. Gasanova¹, K.M. Guseynov¹, R.M. Barkhalov¹, M.V. Khlopkova¹*¹Precaspian Institute of Biological Resources, Dagestan Federal Research Centre, RAS, Makhachkala, Russia

Гасанова Айша Шарапатовна – кандидат биологических наук, доцент, старший научный сотрудник, Прикаспийский институт биологических ресурсов Дагестанского федерального исследовательского центра РАН, ул. М. Гаджиева, 45, г. Махачкала, Республика Дагестан, 367000, Россия, e-mail: kais61@mail.ru

Гусейнов Каис Магомедович – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, Прикаспийский институт биологических ресурсов Дагестанского федерального исследовательского центра РАН, ул. М. Гаджиева, 45, г. Махачкала, Республика Дагестан, 367000, Россия, e-mail: kais61@mail.ru

Бархалов Руслан Магомедович – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, Прикаспийский институт биологических ресурсов Дагестанского федерального исследовательского центра РАН, ул. М. Гаджиева, 45, г. Махачкала, Республика Дагестан, 367000, Россия

Хлопкова Марина Владимировна – кандидат биологических наук, научный сотрудник, Прикаспийский институт биологических ресурсов Дагестанского федерального исследовательского центра РАН, ул. М. Гаджиева, 45, г. Махачкала, Республика Дагестан, 367000, Россия, e-mail: hlopkovam@mail.ru

Aysa Sh. Gasanova - Candidate of Biological Sciences, Associate Professor, Senior Researcher, Precaspian Institute of Biological Resources, Dagestan Scientific Center, Russian Academy of Sciences, M. Gadzhieva St., 45, Makhachkala, Republic of Dagestan, 367000, Russia, e-mail: kais61@mail

Kais M. Guseynov - Candidate of Biological Sciences, Senior Researcher, Precaspian Institute of Biological Resources, Dagestan Scientific Center, Russian Academy of Sciences, M. Gadzhieva St., 45, Makhachkala, Republic of Dagestan, 367000, Russia, e-mail: kais61@mail.ru

Ruslan M. Barkhalov - Candidate of Biological Sciences, Senior Researcher, Precaspian Institute of Biological Resources, Dagestan Scientific Center, Russian Academy of Sciences, M. Gadzhieva St., 45, Makhachkala, Republic of Dagestan, 367000, Russia

Marina V. Khlopkova - Candidate of Biological Sciences, Senior Researcher, Precaspian Institute of Biological Resources, Dagestan Scientific Center, Russian Academy of Sciences, M. Gadzhieva St., 45, Makhachkala, Republic of Dagestan, 367000, Russia, e-mail: hlopkovam@mail.ru

Шельфовая зона западного побережья Каспия является одной из самых высокопродуктивных. Из 63 видов рыб, обитающих в Каспийском море, на крайновском побережье встречаются 34 вида, 42 % которых составляют карповые. Наиболее многочисленной является вобла *Rutilus rutilus caspicus* (Jakowlev, 1870), составляющая 50–86 % численности полупроходных и речных рыб. В статье представлены результаты исследований особенностей биологии воблы *Rutilus rutilus caspicus* крайновского побережья Каспия. Вобла присутствует в уловах постоянно. Ее возраст в сетях колеблется от 2 до 10 лет. На долю 3–5-леток приходится 81 %. Самки в уловах составляют 66, самцы – 34 %. Параметры уравнения Бергаланфи характеризуются следующими величинами: $L = 38,8$ см, $K = 0,12$, $t^{\circ} = -2,67$. Плодовитость воблы в среднем составляет 30,2 тыс. икринок. По мере роста воблы состав ее пищи меняется. Максимально накормлена вобла длиной 10–20 см.

Ключевые слова: Каспийское море, западное побережье, шельф, вобла *Rutilus rutilus caspicus*, биомасса, численность, плодовитость, упитанность, пищевой комок.

The offshore zone of the western coast of the Caspian Sea is one of the most highly productive. Of the 63 species of fish that live in the Caspian Sea, 34 species are found on the Krainovsky coast, 42 % of which are carp. The most numerous is the roach *Rutilus rutilus caspicus* (Jakowlev, 1870), which makes up 50–86 % of the number of semi-passerine and river fish. The article presents the results of studies of the peculiarities of the biology of the roach *Rutilus rutilus caspicus* of the Krainovsky coast of the Caspian Sea. The roach is noted in the catches constantly. Her age in the networks ranges from 2 to 10 years. The share of 3-5-year-olds accounts for 81 %. Females in catches make up 66 %, males - 34 %. The parameters of the Bertalanfi equation are characterized by the following values: $L = 38.8$ cm, $K = 0.12$, $t^{\circ} = -2.67$. The fecundity of the roach on average is 30.2 thousand eggs and tends to increase with increasing length and weight of the fish. As the roach grows, the composition of its food changes significantly. The maximum fed roach length from 10 to 20 cm.

Keywords: Caspian Sea, western coast, shelf, roach *Rutilus rutilus caspicus*, biomass, abundance, fertility, fatness, food bed.

Введение

Одной из основных составляющих частей рыбохозяйственного комплекса России является Западно-Каспийский регион, шельфовая зона которого – одна из самых высокопродуктивных.

Основную долю уловов прибрежного комплекса в Республике Дагестан составляют полупроходные и озерно-речные рыбы (лещ, вобла, сазан, щука, судак, сом, красноперка, окунь, карась и др.).

Между тем крайновское побережье Каспийского моря – важнейший рыбопромысловый район. Здесь обитают полупроходные, проходные и жилые формы рыб как генеративно-пресноводного происхождения, так и размножающиеся в море. На пастбища крайновского побережья с нижнетерских Аракумских и Каракольских нерестово-выростных водоемов скатывается для нагула молодь рыб.

Непостоянство уровня режима Каспия, изменение водности впадающих в него кавказских рек, гидростроительство, интенсификация природопользования, антропогенное загрязнение и биологические инвазии оказали существенное влияние на состояние прибрежных биологических сообществ.

Это определяет актуальность исследования состояния карповых видов крайновского побережья как основных промысловых видов рыб Западно-Каспийского региона в условиях динамики природных и интенсификации антропогенных факторов.

Материал и методика

Работы проводились с мая по сентябрь 2017, 2018 гг. на крайновском побережье Каспийского моря. Сбор и обработку материала осуществляли по традиционным методикам [1–9]. Для отлова рыб использовали ставные частиковые сети с ячейей 30–60 мм и мальковую волокушу длиной 15 м, с ячейей 6 мм и кутцом из газа № 7. Из уловов отбирали среднюю пробу. Ихтиологический материал фиксировали 4-процентным формалином. Для расчета абсолютной индивидуальной плодовитости из середины ястыка брали навеску икры массой 1 г. Характер роста рыб оценивали по уравнению Бергаланфи [7]. Возраст рыбы определяли по чешуе [10]. Обработку материала по питанию воблы проводили количественно-весовым методом. При определении видов беспозвоночных использовали Атлас беспозвоночных Каспийского моря [5], при вычислении индексов наполнения, процентного состава пищи – фактические веса кормовых организмов. Всего обработано более 1200 экз. воблы.

Результаты и обсуждение

Крайновское побережье Каспийского моря (юго-западная часть Северного Каспия) испытывает сильное влияние Среднего Каспия и речного стока Волги и Терека. Здесь также расположены устья сбросных

и коллекторных каналов терской дельтовой системы, собирающей воды с обширной территории орошаемого земледелия и развитой промышленности.

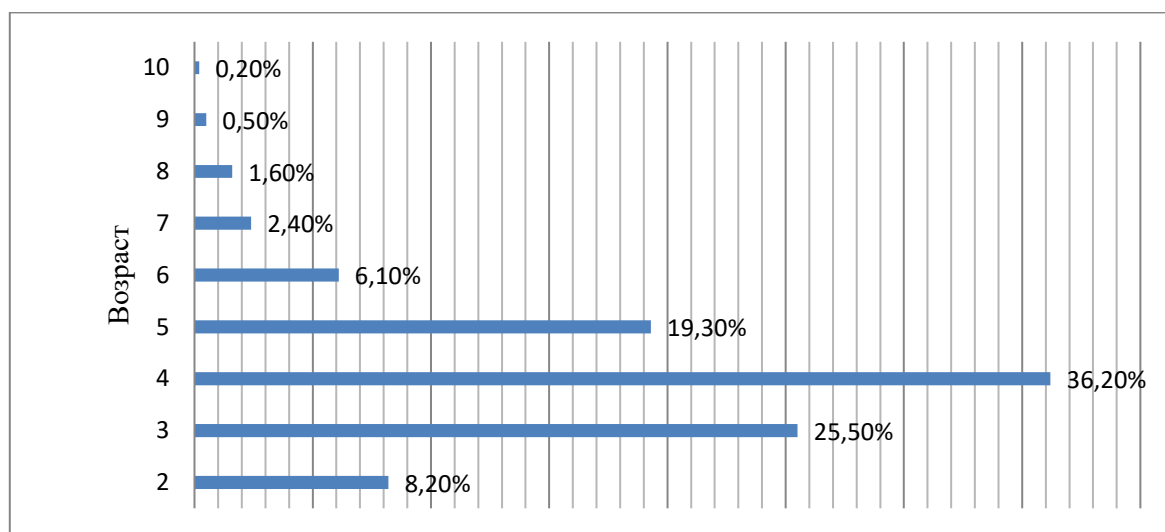
Дно ровное, пологое, образованное илистыми, илисто-песчаными и ракушечными грунтами, местами выходящими на поверхность глинистыми образованиями. Равномерный гидролого-гидрохимический режим вызван мелководностью и высокой гидродинамической активностью водных масс. Дефицита кислорода не наблюдается.

Из 63 видов рыб, обитающих в Каспийском море, на крайновском побережье встречаются 34 вида,

42 % которых составляют карповые. При этом наиболее многочисленной была вобла *Rutilus rutilus caspicus* (Jak.), составлявшая 50–86 % численности полупроходных и речных рыб.

Вобла (*Rutilus rutilus caspicus* Jakowlev, 1870) – полупроходная промысловая рыба. Распространена по всему дагестанскому побережью Каспийского моря. Обитает в слабо осолоненной воде, ограничиваясь изоголиной 7,5–8,0 ‰. Наибольшие скопления наблюдаются в зоне с соленостью 2,5–5 ‰.

В исследуемой акватории вобла в уловах встречается постоянно. Ее возраст в сетях колеблется от 2 до 10 лет. Доля 3–5-леток составляет 81 % (рисунок).



Возрастной состав воблы крайновского побережья, % / Age composition of the vobla on the Krainovsky coast, %

В половозрелую часть стада входят рыбы, начиная с длины (l) 15 см. Длина воблы в уловах колеблется от 3 до 29 см, 70 % – особи длиной 16–22 см. Самки в уловах составляют 66, самцы – 34 %. Масса самок несколько выше массы самцов (табл. 1).

Вобла имеет довольно хорошую упитанность, которая к осени возрастает (табл. 2). Уравнение Бергаланфи [7] характеризуется следующими величинами: $L = 38,8$ см, $K = 0,12$, $t^0 = -2,67$. Коэффициент зрелости самок воблы с мая по август колеблется (табл. 2).

Основная масса самок воблы в мае имеет половые продукты в стадии зрелости от III до VI, в июне-июле все особи находятся во II стадии, в середине августа начинается постепенный рост ооцитов, что приводит к увеличению массы гонад [8]. Плодовитость воблы в среднем составляет 30,2 тыс. икринок (табл. 3).

Таблица 1

Размерно-весовые показатели самок и самцов воблы / Size and weight parameters of roach females and males (weight, *m*, g), length, *l*, cm)

Длина особи <i>l</i> , см	Масса особи <i>m</i> , г		
	Самец, <i>N</i> = 111	Самка, <i>N</i> = 355	Средняя, <i>N</i> = 466
17	133	135	134
18	160	166	165
19	188	193	191
20	219	225	222
21	243	251	248
22	262	275	271
23	283	297	291
24	293	302	301
25	306	316	315
26	321	329	327
27	–	343	343
28	–	365	367
29	–	396	396

Таблица 2

Упитанность воблы (по Фультону) и коэффициент зрелости самок
/ Fatness of roach (according to Fulton), coefficient of maturity of roach females

Месяц	Упитанность воблы				Коэффициент зрелости самок			
	Мин.	Макс.	Средняя	N	Мин.	Макс.	Средний	N
Май	1,96	2,36	2,04	31	0,87	121,4	4,87	34
Июнь	2,01	2,49	2,112	30	0,34	0,69	0,51	30
Июль	2,17	2,64	2,33	30	0,43	0,57	0,46	30
Август	1,77	2,43	2,28	30	0,54	0,76	0,63	30
Сентябрь	2,08	2,51	2,43	30	–	–	–	–

Таблица 3

Абсолютная индивидуальная плодовитость воблы / Absolute individual fertility of roach

Масса особи, г	Количество особей	Средняя длина, см	Средняя масса, г	Плодовитость, тыс. шт. икринок		
				Минимальная	Максимальная	Средняя
100–150	9	17,6	134	8,20	24,91	16,31
151–200	13	19,1	172	12,41	33,72	20,00
201–250	30	21,4	236	15,72	42,42	31,01
251–300	10	23,6	264	26,41	44,70	36,02
301–350	5	25,6	341	36,74	58,91	48,21
351–400	4	28,1	366	49,90	71,70	59,40
	72					

Вобла – типичный бентофаг. По мере ее роста состав пищи существенно меняется. Пищевой комок рыб длиной 10–15 см состоит преимущественно из *Abra segmenta* Récluz, 1843, *Hediste diversicolor* Müller, 1776, *Rhithropanopeus harrisi* Gould, 1841, *Cerastoderma lamarki* Reeve, 1843 и *C. rhomboides* Lamarck, 1819, доля которых достигает 82,1 %.

У воблы длиной 15,1–20 см значимость в рационе моллюсков и червей сохраняется, а роль ракообразных уменьшается до 15 %. У особей длиной более 20 см потребление моллюсков возрастает до 75 %, одновременно происходит значительное уменьшение доли червей и ракообразных. Наибольшая частота встречаемости растительной пищи наблюдается у самых крупных экземпляров (табл. 4).

Таблица 4

Состав пищевого комка воблы / Composition of the food lump of roach

Кормовые организмы	Размерные группы воблы, см						
	3–10	10,1–15,0	15,1–20,0	> 20	10,1–15,0	15,1–20,0	> 20
<i>Черви:</i>	% по массе				Частота встречаемости		
нерейс	0,6	25,4	22,1	14,4	33,3	68,0	37,0
<i>Ракообразные:</i>							
остракоды	–	–	–	0,1	–	–	70,4
амфиподы	55,5	–	1,1	0,6	–	42,3	52,8
кумацеи	2,4	–	1,8	0,2	–	31,0	52,1
мизиды	4,1	0,6	1,6	–	8,1	10,1	–
декаподы	–	14,5	1,7	0,6	25,3	31,0	35,5
<i>Моллюски:</i>							
абра	–	35,5	36,3	39,6	66,6	70,6	38,3
церастодерма	–	12,0	15,0	21,7	55,5	58,8	72,4
гипанис	–	6,5	9,0	0,4	33,3	50,9	32,1
монодакна	–	1,9	4,8	14,8	44,4	22,1	14,1
пр. моллюски	–	–	3,5	2,6	–	4,8	8,3
<i>Насекомые</i>	18,5	–	0,1	–	–	5,9	–
<i>Растительность</i>	18,0	0,9	0,9	1,1	33,3	30,9	51,7
<i>Песок, грунт</i>	0,9	2,7	2,0	3,9	77,7	75,0	75,8
<i>Прочее</i>	–	–	0,1	–	–	8,8	–
N выборки (экз.)	31	31	33	30	–	–	–
Индекс наполнения кишечника, %	36,6	103,4	138,2	86,4	–	–	

Максимально накормлена вобла длиной от 10 до 20 см, тогда как индексы наполнения кишечника рыб самых крупных размеров более низкие.

Главной пищей молоди воблы (3–10 см) являются амфиподы. Однако по мере роста рыб потребление гаммарид и корофидов снижается с одновременным увеличением в рационе моллюсков. Второстепенное значение имеют хирономиды. Рыб с пустыми кишечниками всего 7 %.

Заключение

В исследуемый период на крайновском шельфе Каспийского моря вобла присутствует в уловах постоянно. Ее возраст в сетях колеблется от 2 до 10 лет, 72 % составляют особи 16–22 см. На долю 3–5-леток приходится свыше 80 %. Самки в уловах составляют 66, самцы – 34 %.

Параметры уравнения Берталяни характеризуются величинами: $L = 38,8$ см, $K = 0,12$, $t^{\circ} = -2,67$. Плодовитость воблы в среднем составляет 30,2 тыс. икринок. По мере роста воблы состав ее пищи меняется. Максимально накормлена вобла длиной от 10 до 20 см.

Литература

1. Шорыгин А.А. Питание и пищевые взаимоотношения рыб Каспийского моря. М.: Пищепромиздат, 1952. 268 с.
2. Правдин И.Ф. Руководство по изучению рыб. М.: Пищевая промышленность, 1966. 375 с.
3. Коблицкая А.Ф. Определение нереста пресноводных рыб. М.: Легкая и пищевая промышленность, 1966. 110 с.
4. Коблицкая А.Ф. Изучение молоди пресноводных рыб. М.: Легкая и пищевая промышленность, 1981. 189 с.
5. Атлас беспозвоночных Каспийского моря / под ред. Я.А. Бирштейна, Л.Г. Виноградова, Н.Н. Кондакова, М.С. Кун, Т.В. Астаховой, Н.Н. Романовой. М.: Пищевая промышленность, 1968. 416 с.
6. Методическое пособие по изучению питания и пищевых взаимоотношений рыб в естественных условиях. М.: Наука, 1974. 254 с.

7. Мина М.В., Клевезаль Г.А. Рост животных. Анализ на уровне организма. М.: Наука, 1976. 291 с.

8. Шихшабеков М.М. Методические указания по определению стадий зрелости гонад и половых продуктов некоторых промысловых рыб. М.: ВАСХНИЛ, 1980. 123 с.

9. Петлина А.П. Определитель плодовитости в стадии зрелости рыб. Томск: Изд-во Томск. гос. ун-та, 1987. 106 с.

10. Чугунова Н.И. Методика изучения возраста и роста рыб. М.: Советская наука, 1959. С. 6–33.

References

1. Shorygin A.A. (1952). *Nutrition and nutritional relationships of fish in the Caspian Sea*. Moscow, Pishchepromizdat Publ., 268 p. (in Russian).
2. Pravdin I.F. (1966). *Guide to the study of fish*. Moscow, Pishchevaya promyshlennost' Publ., 375 p. (in Russian).
3. Koblitskaya A.F. (1966.) *Determination of spawning of freshwater fish*. Moscow, Legkaya i pishhevaya promyshlennost' Publ., 110 p. (in Russian).
4. Koblitskaya A.F. (1981). *Study of juvenile freshwater fish*. Moscow, Legkaya i pishhevaya promyshlennost' Publ., 189 p. (in Russian).
5. *Atlas of invertebrates of the Caspian Sea*. (1968). Ya.A. Birshtein, L.G. Vinogradova, N.N. Kondakova, M.S. Kuhn, T.V. Astakhova, N.N. Romanova (Eds.). Moscow, Pishchevaya promyshlennost' Publ., 416 p. (in Russian).
6. *Methodological manual for the study of nutrition and food relationships of fish in natural conditions*. (1974). Moscow, Nauka Publ., 254 p. (in Russian).
7. Mina M.V., Klevezal G.A. (1976). *The growth of animals. Body-level analysis*. Moscow, 291 p. (in Russian).
8. Shikhshabekov M.M. (1980). *Guidelines for determining the stages of maturity of gonads and reproductive products of some commercial fish*. Moscow, Lenin All-Union Academy of Agricultural Sciences Press, 123 p. (in Russian).
9. Petlina A.P. (1987). *Determinant of fertility at the stage of fish maturity*. Tomsk, Tomsk State University Press, 106 p. (in Russian).
10. Chugunova N.I. (1959.) *Methodology for studying the age and growth of fish*. Moscow, Sovetskaya nauka Publ., pp. 6-33. (in Russian).

УДК 574.58

doi 10.18522/1026-2237-2021-3-98-102

К ИЗУЧЕНИЮ БИОЭКОЛОГИИ КРЕВЕТОК КАСПИЯ

© 2021 г. К.М. Гусейнов¹, А.Ш. Гасанова¹, М.В. Хлопкова¹¹Прикаспийский институт биологических ресурсов
Дагестанского федерального исследовательского центра РАН, Махачкала, Россия

TO STUDY THE BIOECOLOGY OF CASPIAN SHRIMPS

K.M. Guseynov¹, A.Sh. Gasanova¹, M.V. Khlopkova¹

Precaspian Institute of Biological Resources, Dagestan Federal Research Centre, RAS, Makhachkala, Russia

Гусейнов Каис Магомедович – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, Прикаспийский институт биологических ресурсов Дагестанского федерального исследовательского центра РАН, ул. М. Гаджиева, 45, г. Махачкала, Республика Дагестан, 367000, Россия, e-mail: kais61@mail.ru

Kais M. Guseynov - Candidate of Biological Sciences, Senior Researcher, Precaspian Institute of Biological Resources, Dagestan Scientific Center, Russian Academy of Sciences, M. Gadzhieva St., 45, Makhachkala, Republic of Dagestan, 367000, Russia, e-mail: kais61@mail.ru

Гасанова Айша Шарапатиновна – кандидат биологических наук, доцент, старший научный сотрудник, Прикаспийский институт биологических ресурсов Дагестанского федерального исследовательского центра РАН, ул. М. Гаджиева, 45, г. Махачкала, Республика Дагестан, 367000, Россия, e-mail: kais61@mail.ru

Aysha Sh. Gasanova - Candidate of Biological Sciences, Associate Professor, Senior Researcher, Precaspian Institute of Biological Resources, Dagestan Scientific Center, Russian Academy of Sciences, M. Gadzhieva St., 45, Makhachkala, Republic of Dagestan, 367000, Russia, e-mail: kais61@mail

Хлопкова Марина Владимировна – кандидат биологических наук, научный сотрудник, Прикаспийский институт биологических ресурсов Дагестанского федерального исследовательского центра РАН, ул. М. Гаджиева, 45, г. Махачкала, Республика Дагестан, 367000, Россия, e-mail: hlopkovam@mail.ru

Marina V. Khlopkova - Candidate of Biological Sciences, Senior Researcher, Precaspian Institute of Biological Resources, Dagestan Scientific Center, Russian Academy of Sciences, M. Gadzhieva St., 45, Makhachkala, Republic of Dagestan, 367000, Russia, e-mail: hlopkovam@mail.ru

В Каспии обитают только два вида креветок: *Palaemon elegans* и *P. adspersus* (Crustacea, Decapoda: Palaemonidae), попавшие в Каспий в 1931–1934 гг. при интродукции кефалей. Данные по биологии этих видов креветок отражены лишь в работах Е.Н. Куделиной (1950) и М.П. Марочкиной (1980). Это определяет актуальность исследований современного состояния популяции креветок Каспия. Материал отбирали в различных районах акватории в Среднем Каспии в летне-осенний период.

Оба вида креветок обитают до пятиметровых глубин. *P. elegans* предпочитают прибрежные подводные предметы с густыми зарослями, *P. adspersus* – открытые мелководья с песчано-илистым грунтом. К северу от Махачкалы преобладает *P. elegans*, к югу численность обоих видов одинакова, на востоке доминирует *P. adspersus*. В статье представлена характеристика размножающихся самок, выявлена зависимость плодовитости от длины яйценосных самок. Абсолютная плодовитость возрастала с увеличением размеров самок. Рассчитаны уравнения регрессии, отражающие взаимосвязь между плодовитостью и длиной яйценосных самок *P. elegans* и *P. adspersus*, выражающиеся степенными уравнениями, соответственно: $E = 0,044947 \cdot L^{265356}$ и $E = 2,323 \cdot L^{17,4}$, где E – плодовитость; L – длина.

В октябре 2017 г., в мае и октябре 2018 г. ниже по течению р. Терек были найдены несколько экземпляров субтропической пресноводной креветки *Macrobrachium pirropense*. Вероятно, в скором будущем, видовой состав креветок Каспия пополнится еще одним видом.

Ключевые слова: Каспийское море, креветки, *P. elegans*, *P. adspersus*, распределение, численность, биомасса, генерация.

Only two species of shrimps live in the Caspian Sea: *Palaemon elegans* and *P. adspersus* (Crustacea, Decapoda: Palaemonidae), which were introduced to the Caspian Sea in 1931-1934 during the introduction of mullets. Data on the biology of these species of shrimps are reflected only in the works by E.N. Kudelina (1950) and M.P. Marochkina (1980). This determines the relevance of research on the current state of the Caspian shrimp population. The material was collected in various areas of the Middle Caspian Sea in the summer-autumn period.

Both species live up to five meters deep. *P. elegans* prefer coastal underwater objects with dense thickets, *P. adspersus* - open shallow waters with sandy-muddy soil. To the north of Makhachkala, *P. elegans* predominates, to the south, the number of both species is the same, and to the east, *P. adspersus* dominates. The characteristics of breeding females are presented, and the dependence of fecundity on the length of egg-bearing females is revealed. The absolute fecundity increased with the increase in the size of the females. Regression equations reflecting the relationship between fecundity and length of egg-bearing females of *P. elegans* and *P. adspersus* are calculated, expressed by power equations, respectively: $E = 0.044947 \cdot L^{265356}$ and $E = 2.323 \cdot L^{17.4}$, where: E - fecundity, L - length.

In October 2017, in May and October 2018, several specimens of the subtropical freshwater shrimp *Macrobrachium nipponense* were found downstream of the Terek River. Probably, in the near future, the species composition of the Caspian shrimp will be replenished with another species.

Keywords: Caspian Sea, shrimps, *P. elegans*, *P. adspersus*, distribution, abundance, biomass, generation.

Введение

В состав семейства Palaemonidae входит большое количество родов, распространенных во многих районах Мирового океана. В Каспийском море обитают только два вида креветок: *Palaemon elegans* и *P. adspersus* (Crustacea, Decapoda: Palaemonidae), попавшие в Каспий в 1931–1934 гг. при интродукции двух видов кефалей – *Mugil saliens* и *M. auratus* (Osteichthyes: Mugilidae) [1, 2].

Следует отметить, что, несмотря на более чем полувековой период обитания этих организмов в новом для них водоеме, вопросы их биоэкологии недостаточно исследованы. Данные по биологии креветок, обитающих в Каспии, отражены в работах [3, 4]. Это определяет актуальность исследований современного состояния популяции креветок Каспия.

Материал и методика

Материал отбирали в Среднем Каспии в летне-осенний период в 2018 и 2020 гг. Биологический анализ и морфометрию выполняли с использованием общепринятых методик [5–8].

Для выяснения характера распределения креветок проводились работы в шести районах дагестанского побережья Каспия над глубинами до 50 м.

Креветок сортировали по размерным группам (20–25, 25–30 мм и т.д.). После предварительного обсушивания на фильтровальной бумаге особей взвешивали на торсионных весах. Для каждой группы находили средние веса, которые использовали в дальнейшем при расчетах. Дополнительно с апреля по сентябрь работы проводили в Сулакском заливе и в Махачкалинском морском торговом порту. Рачков собирали с прибрежных камней и свай, считывали их численность и биомассу на 1 м².

Для отлова креветок использовали сачок из мельничного газа 135 мкм, диаметр входного отверстия – 28 см. Определение видовой принадлежности проводили под биноклем МБС-9. Для изучения личиночного развития самок креветок содержали в кристаллизаторах с морской водой. Всего взвешено и измерено 260 экз. креветок.

Результаты и обсуждение

Распределение и количественная характеристика. По данным Е.Н. Куделиной [3], в ставные неводы у берегов Среднего и Южного Каспия попадалось иногда более тысячи экземпляров креветок. Автор допускает, что оба вида креветок нашли благоприятные условия для развития в новом для них водоеме. Они расселились на западном и восточном побережье Среднего и Южного Каспия. Количество их стало настолько велико, что они входят в пищевой рацион различных рыб.

По нашим материалам, в распределении креветок отмечается следующая закономерность. Оба вида обитают до пятиметровой глубины. Излюбленным местом жизни *P. elegans* являются прибрежные подводные предметы с густыми зарослями водорослей. *P. adspersus* предпочитает открытые мелководья с песчано-илистым грунтом.

В уловы попадают оба вида, но в разных соотношениях. Так, к северу от Махачкалы преобладает *P. elegans*, к югу (устье р. Самур) численность обоих видов примерно одинакова, а в районе Апшерона (бухта Ильича) и на восточном побережье – от Шевченко до Красноводска – доминирует *P. adspersus*.

К сожалению, до сих пор не описаны методы количественного учета подобных бентических форм, и кроме сообщения «много», «мало» в литературе нет количественных данных о численности этих организмов.

Нами проведены исследования по данной проблеме, результаты которых представлены в табл. 1, 2.

Количественные значения популяций креветок в Махачкалинском порту и в Сулакском заливе приводятся в табл. 1. Среднегодовая биомасса (m) креветок составляет 54,4 г/м², численность (n) – 96 экз./м².

Таблица 1

Численность (n) и биомасса (m) креветок в западном прибрежье Среднего Каспия / Number and biomass of shrimps in the western coast of the Middle Caspian Sea

Месяц	n, m	Район популяции			Среднее
		1	2	3	
IV	n	102	115	76	98
	m	35,5	31	43	36,5
V	n	71	87	120	93
	m	33	35	76	48,6
VI	n	87	75	87	83
	m	67	51,1	71,3	63,3
VII	n	98	104	130	111
	m	56,3	49,0	79,9	61,7
VIII	n	117	87	95	100
	m	63	55,0	65,0	61,2
IX	n	100	91	81	91
	m	60,3	58,3	51,2	56,6
Среднее	n	96	93	98	96
	m	51,9	46,7	64,5	54,4

Примечание. n – численность, экз./м²; m – биомасса, г/м². Район популяции: 1 – Махачкалинский порт (*P. elegans*); 2 – Сулакский залив (*P. elegans*); 3 – Сулакский залив, рифы (*P. adspersus*).

Поведение. Креветки по способу движения относятся к подвижным беспозвоночным. При передвижении по грунту они опираются на три последние пары ходильных ног. Плавание осуществляется при помощи брюшных конечностей – плеопод. Первая пара грудных конечностей неподвижно висит, вторая прижата к телу.

Брюшные конечности, кроме того, выполняют и другие функции. Плеоподы второй пары – у самцов с копулятивным придатком, а у самок они служат для защиты и обеспечения нормального дыхания у потомства, которое вынашивается на брюшной стороне абдомена. При необходимости креветки ударом хвостового плавника отскакивают назад на довольно большое расстояние.

Для наблюдения за суточной активностью креветок в Сулакском заливе были установлены 5 ловушек разных форм с приманкой и без нее. Ночью креветки были обнаружены во всех ловушках, с максимальным количеством в 2 ч ночи. В ловушки попадалось примерно одинаковое количество креветок. Видимо, приманка не играла никакой роли

для привлечения животных. Днем в ловушках креветки не обнаружены, что говорит об их ночной активности.

Таблица 2

Характеристика размножающихся самок в западном прибрежье Среднего Каспия / Characteristics of breeding females in the western coast of the Middle Caspian Sea

Дата	N	<i>P. elegans</i>				
		1	2	3	4	5
21/IV	81	53	33,3	20,8	–	45,9
07/V	79	54	30,1	25,7	–	44,2
10/V	43	29	18,8	35,3	11,2	34,7
20/V	53	40	12,4	47,1	24,8	15,7
10/VI	52	43	20,8	49,1	30,1	–
25/VI	65	53	39,6	35,8	24,6	–
05/VII	43	43	39,6	55,8	2,3	–
20/VII	61	58	60,3	37,9	1,8	–
11/VIII	85	85	40,0	50,6	9,4	–
20/VIII	47	43	41,9	34,9	23,2	–
11/IX	123	123	1,6	11,4	87,0	–
20/IX	104	56	–	–	90,6	9,4
01/X	81	52	–	–	11,4	88,6
Дата	N	<i>P. adspersus</i>				
		1	2	3	4	5
22/IV	73	47	29,4	20,9	–	49,7
08/V	83	57	37,7	23,3	–	45,0
11/V	39	30	20,3	38,1	9,3	32,3
21/V	60	45	14,4	48,3	27,8	9,5
9/VI	51	43	22,6	43,1	34,3	–
24/VI	70	58	43,1	38,7	18,2	–
6/VII	58	56	37,6	57,8	4,6	–
21/VII	67	65	68,3	29,9	1,8	–
10/VIII	90	90	38,0	53,4	8,6	–
19/VIII	71	68	43,8	35,9	20,3	–
12/IX	89	86	3,6	15,7	80,7	–
21/IX	115	60	–	–	88,5	11,5
03/X	102	65	–	–	15,6	84,5

Примечание. N – количество самок, экз.; 1 – половозрелые, экз.; из них 2 – с эмбрионом, ранняя стадия, %; 3 – с эмбрионом, поздняя стадия, %; 4 – отметавшие, %; 5 – неоплодотворенные, без эмбрионов, %.

Наблюдения за пищевым поведением креветок проводили в аквариумах.

Креветки охотно поедали различные водоросли, предпочитая всё же животную пищу. Это подтверждает и анализ желудков креветок, пойманных в море.

За живыми беспозвоночными они охотятся очень активно из засады. Замечена их высокая реактивность, за счет чего они моментально могут схватить из засады клешнями любые быстродвигающиеся организмы (гаммариды, мизиды). Креветки активно употребляют в пищу также червей и личинок рыб.

Таким образом, креветок по способу питания можно отнести к всеядным животным с преимущественно хищным образом жизни.

Размножение и плодовитость. Е.Н. Куделина [3] отмечает, что размножение креветок в Каспийском море начинается в мае и продолжается до сентября, причем в мае самки с выметанными на плеоподы яйцами составляют лишь 8 % от общего количества. Минимальные размеры размножающихся самок 20–25, максимальные – 36 мм. По данным М.П. Марочкиной [4], креветки в Каспийском море размножаются с мая по октябрь.

Анализ полученных данных позволяет внести некоторые дополнения по этому вопросу.

В третьей декаде апреля при температуре воды 10–11 °С популяция креветок состояла из разноразмерных особей. Минимальная длина самок и самцов *P. elegans* достигала 24 и 21,5 мм, максимальная – 46 и 40 мм. Для *P. adspersus* минимальные размеры самок достигали 40 мм, максимальные – 75 мм, самцов – 35 и 65 мм. Самки креветок с выметанными яйцами составляли более 50 % от общего количества половозрелых самок, размеры которых колебались от 30 до 75 мм. Яйца были разной стадии зрелости – от еще несформировавшихся до хорошо развитых.

В первой декаде мая сборы проводились при температуре воды 11–12 °С. Размеры половозрелых особей самок почти не изменились, однако несколько увеличилось количество самок с эмбрионами в поздней стадии развития. Последующие сборы показали, что к концу мая яйценосные и отнерестившиеся самки *P. elegans* составляют уже 59 и 25 % соответственно, у *P. adspersus* – 66 и 28 %. При этом, процент отнерестившихся самок увеличивается до конца июня. Видимо, с середины мая до конца июня идет первая генерация этих организмов. Летом все половозрелые самки участвуют в размножении, а с конца августа до конца сентября появляются вторая генерация (табл. 2).

В небольшой выборке, полученной в ноябре и декабре при температуре воды 2–5 °С, особи с яйцами не обнаружены.

Плодовитость самок положительно коррелирует с их размерами [3] (табл. 3). Поскольку в сборах лишь единичные экземпляры размножающихся самок *P. elegans* достигали 30–36 мм, а *P. adspersus* – 40–54 мм, размерные группы для характеристики плодовитости у *P. elegans* начинались от размера особей более 40 мм, для *P. adspersus* – от 55 мм.

Таблица 3

Зависимость плодовитости от длины яйценосных самок креветок западного побережья Среднего Каспия / Dependence of fecundity on the length of egg-bearing female shrimps of the western coast of the Middle Caspian Sea

Длина самки L, мм	Количество яиц, n (min – max)	$\bar{X} \pm s_x$	Количество самок, N	Источник
<i>P. elegans</i>				
20–25	222–253	238		Е.Н. Куделина
25–30	284–593	414	5	»
30–35	383–647	560	10	»
35–40	575–1113	755	5	»
40–45	592–1708	1112,51±3,52	45	Наши данные
45–50	638–2265	1306,55±8,53	45	»
50 >	675–2522	1577,83±29,79	19	»
<i>P. adspersus</i>				
55–60	645–1819	1409,95±17,40	20	Наши данные
60–65	596–1856	1589,06±23,15	17	»
65–70	856–2051	1620,00±28,92	14	»
70–75	1226–3114	2189,00±20,79	10	»

Абсолютная плодовитость креветок возрастала с увеличением размеров самок. Такая закономерность наблюдается как для средних, так и для максимальных и минимальных показателей.

На основании полученных данных рассчитаны уравнения регрессии, отражающие взаимосвязь между плодовитостью и длиной яйценосных самок *P. elegans* и *P. adspersus*. Взаимосвязь выражается

степенными уравнениями, соответственно: $E = 0,044947 \cdot L^{265356}$ и $E = 2,323 \cdot L^{17,4}$, где E – плодovitость; L – длина.

Вероятно, в скором будущем видовой состав креветок Каспия пополнится еще одним видом. В октябре 2017 г., в мае и октябре 2018 г. ниже по течению р. Терек были найдены несколько экземпляров субтропической пресноводной креветки *Macrobrachium nipponense* (de Haan, 1849) (Decapoda, Crustacea, Palaemoninae) – вида с высоким адаптивным потенциалом [9, 10], нового для эстуарных экосистем Западного Каспия [11].

Литература

1. Карпевич А.Ф. Теория и практика акклиматизации водных организмов. М.: Пищевая промышленность, 1975. 432 с.
2. Карпинский М.Г. Об особенностях вселения морских видов в Каспий // Рос. журн. биол. инвазий. 2009. № 2. С. 2–8.
3. Куделина Е.Н. Наблюдение над биологией Каспийской креветки *Leander sguilla* // Тр. Касп. бассейна. филиала ВНИРО. Астрахань, 1950. Вып. XI. С. 235–264.
4. Марочкина М.П. К изучению биологии креветок Каспийского моря // Изв. АН АзССР. Сер. биол. наук. 1980. № 6. С. 91–96.
5. Атлас беспозвоночных Каспийского моря / Я.А. Бирштейн, Л.Г. Виноградова, Н.Н. Кондакова, М.С. Кун., Т.В. Астахова, Н.Н. Романова. М.: Пищевая промышленность, 1968. 416 с.
6. Буруковский Р.Н. Определитель креветок, лангустов и омаров. М.: Пищевая промышленность, 1974. 117 с.
7. Определитель пресноводных беспозвоночных России и сопредельных территорий. Т. 2: Ракообразные / под ред. С.Я. Цалолыхина. СПб.: Наука, 1995. 627 с.
8. Низяев С.А., Букин С.Д., Клитин А.К., Первеева Е.Р., Крутченко А.А., Абрамова Е.В. Пособие по изучению промысловых ракообразных дальневосточных морей России. Южно-Сахалинск: СахНИРО, 2006. 114 с.
9. Wong J.T.Y., McAndrew B.J. Selection for larval freshwater tolerance in *Macrobrachium nipponense* (De Haan) // *Aquaculture*. 1994. Vol. 88, No. 2. P. 151–156.
10. Кулеш В.Ф. Биологические основы тепловодной аквакультуры промысловых ракообразных: автореф. дис. ... д-ра биол. наук. Минск: НППЦ НАН Беларуси по биоресурсам, 2013. 43 с.

11. Афанасьев Д.Ф., Живоглядова Л.А., Небесихина Н.А., Магомедов М.А., Муталлиева Ю.К., Велбекова Б.Д., Мирзоян А.В. Обнаружение японской креветки *Macrobrachium nipponense* (de Haan, 1849) в нижнем течении реки Терек (бассейн Каспийского моря) // Рос. журн. биол. инвазий. 2020. № 2. С. 2–9.

References

1. Karpevich A.F. (1975). *Theory and practice of acclimatization of aquatic organisms*. Moscow, Pishchevaya promyshlennost' Publ., 432 p. (in Russian).
2. Karpinsky M.G. (2009). On the peculiarities of the invasion of marine species in the Caspian. *Ros. zhurn. biol. invazii*, No. 2, pp. 2-8. (in Russian).
3. Kudelina E.N. (1950). Observation of the biology of the Caspian shrimp *Leander sguilla*. *Proceedings of the Caspian Basin Branch of VNIRO*. Astrakhan, iss. XI, pp. 235-264. (in Russian).
4. Marochkina M.P. (1980.) On the study of the biology of shrimp in the Caspian Sea. *Izv. AN AzSSR, ser. biol. nauk*, No. 6, pp. 91-96. (in Russian).
5. *Atlas of invertebrates of the Caspian Sea*. (1968). Ya.A. Birshtein, L.G. Vinogradova, N.N. Kondakova, M.S. Kuhn., T.V. Astakhova, N.N. Romanov. Moscow, Pishchevaya promyshlennost' Publ., 416 p. (in Russian).
6. Burukovsky R.N. (1974). *Key to shrimp, lobster and lobster*. Moscow, Pishchevaya promyshlennost' Publ., 117 p. (in Russian).
7. *Keys to freshwater invertebrates in Russia and adjacent territories*. (1995). Vol. 2: Crustaceans. S.Ya. Tsalolikhin (Ed). Saint Petersburg, Nauka Publ., 627 p. (in Russian).
8. Nizyaev S.A., Bukin S.D., Klitin A.K., Perveeva E.R., Krutchenko A.A., Abramova E.V. (2006). *A guide for the study of commercial crustaceans of the Far Eastern seas of Russia*. Yuzhno-Sakhalinsk, Sakhalin Branch of the All-Russian Scientific Research Institute of Fisheries and Oceanography Press, 114 p. (in Russian).
9. Wong J.T.Y., McAndrew B.J. (1994). Selection for larval freshwater tolerance in *Macrobrachium nipponense* (De Haan). *Aquaculture*, vol. 88, No. 2, pp. 151-156.
10. Kulesh V.F. (2013). *Biological bases of warm-water aquaculture of commercial crustaceans*. Dissertation Thesis. Minsk, 43 p. (in Russian).
11. Afanasyev D.F., Zhivoglyadova L.A., Nebesikhina N.A., Magomedov M.A., Mutallieva Yu.K., Velibekova B.D., Mirzoyan A.V. (2020). Discovery of the Japanese shrimp *Macrobrachium nipponense* (de Haan, 1849) in the lower reaches of the Terek River (Caspian Sea basin). *Ros. zhurn. biol. invazii*, No. 2, pp. 2-9. (in Russian).

УДК 598.241.3

doi 10.18522/1026-2237-2021-3-103-110

ИЗМЕНЕНИЯ В КОМПЛЕКСЕ МЛЕКОПИТАЮЩИХ (MAMMALIA) НА ТЕРРИТОРИИ ЗАПОВЕДНИКА «РОСТОВСКИЙ» С СЕРЕДИНЫ XX ВЕКА

© 2021 г. В.А. Миноранский^{1, 2}, Ю.В. Малиновская^{1, 2}, А.В. Тихонов¹, В.И. Даньков², В.С. Киякова¹¹Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, Россия,²Ассоциация «Живая природа степи», Ростов-на-Дону, Россия

CHANGES IN THE MAMMALIAN COMPLEX (MAMMALIA) ON THE TERRITORY OF THE ROSTOV NATURE RESERVE SINCE THE MID-TWENTIETH CENTURY

V.A. Minoranskiy^{1, 2}, Yu.V. Malinovskaya^{1, 2}, A.V. Tikhonov¹, V.I. Dankov², V.S. Kilyakova¹¹Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia,²Association "Wild Nature of the Steppe", Rostov-on-Don, Russia

Миноранский Виктор Аркадьевич – доктор сельскохозяйственных наук, профессор, кафедра зоологии, Южный федеральный университет, пр. Стачки, 194/1, г. Ростов-на-Дону, 344090, Россия; председатель ассоциации «Живая природа степи», ул. Тельмана, 10, г. Ростов-на-Дону, 344011, Россия, e-mail: priroda.rostov@yandex.ru

Victor A. Minoranskiy - Doctor of Agricultural Sciences, Professor, Zoology Department, Southern Federal University, Stachki Ave, 194/1, Rostov-on-Don, 344090, Russia; Deputy Director for Science, Association "The Wild Nature of the Steppe", Telmana St., 10, Rostov-on-Don, 344011, Russia, e-mail: priroda.rostov@yandex.ru

Малиновская Юлия Валерьевна – аспирант, кафедра экологии и природопользования, Южный федеральный университет, пр. Стачки, 194/1, г. Ростов-на-Дону, 344090, Россия; научный сотрудник, ассоциация «Живая природа степи», ул. Тельмана, 10, г. Ростов-на-Дону, 344011, Россия, e-mail: mgingerm@yandex.ru

Yulia V. Malinovskaya - Postgraduate, Department of Ecology and Natural Resources Management, Southern Federal University, Stachki Ave, 194/1, Rostov-on-Don, 344090, Russia; Researcher, Association "The Wild Nature of the Steppe", Telmana St., 10, Rostov-on-Don, 344011, Russia, e-mail: mgingerm@yandex.ru

Тихонов Алексей Владимирович – кандидат биологических наук, доцент, кафедра зоологии, Южный федеральный университет, пр. Стачки, 194/1, г. Ростов-на-Дону, 344090, Россия, e-mail: shtirl.rsu@list.ru

Alexey V. Tikhonov - Candidate of Biological Sciences, Associate Professor, Department of Zoology, Southern Federal University, Stachki Ave, 194/1, Rostov-on-Don, 344090, Russia, e-mail: shtirl.rsu@list.ru

Даньков Василий Иванович – директор, ассоциация «Живая природа степи», ул. Тельмана, 10, г. Ростов-на-Дону, 344011, Россия, e-mail: priroda.rostov@yandex.ru

Vasily I. Dankov - Head of Association "The Wild Nature of the Steppe", Telmana St., 10, Rostov-on-Don, 344011, Russia, e-mail: priroda.rostov@yandex.ru

Киякова Валентина Сергеевна – магистр, кафедра зоологии, Южный федеральный университет, пр. Стачки, 194/1, г. Ростов-на-Дону, 344090, Россия, e-mail: vk_valusch@mail.ru

Valentina S. Kilyakova - Master, Department of Zoology, Southern Federal University, Stachki Ave, 194/1, Rostov-on-Don, 344090, Russia, e-mail: vk_valusch@mail.ru

Исследован комплекс млекопитающих на территории заповедника «Ростовский», расположенного в засушливых степях, в XX–XXI вв. и определены причины произошедших в нем изменений. Использованы наблюдения авторов с 1959 г., данные сотрудников заповедника, публикации по млекопитающим. Всего отмечено 46 видов млекопитающих. Под влиянием деятельности людей степные экосистемы претерпели глубокие трансформации, что привело к изменениям в численности, распределении и значении многих млекопитающих, к исчезновению одних и проникновению сюда других

видов. Создание заповедника «Ростовский» положительно отразилось на восстановлении биоценозов. Однако их состав отличается от такового в середине XX в. В XXI в. на степные экосистемы, в том числе млекопитающих, оказывают влияние активизация хозяйственной деятельности и климатические изменения.

Ключевые слова: заповедник «Ростовский», млекопитающие, XX–XXI вв., изменения, антропогенные и климатические факторы.

The complex of mammals on the territory of the Rostov Nature Reserve located in the arid steppes in the 20th–21st centuries was studied and the reasons for the changes that occurred in it were determined. We used the authors' observations since 1959, data from the staff of the Rostov Nature Reserve and publications on mammals. A total of 46 species of mammals were recorded. Under the influence of human activity steppe ecosystems underwent profound transformations, which led to changes in the number, distribution and importance of many mammals and to the disappearance of some and the penetration of other species here. The creation of the Rostov Nature Reserve has had a positive impact on the restoration of biocenoses. However, their composition differs from that of the mid-twentieth century. In the 21st century steppe ecosystems, including mammals, are affected by increased economic activity and climate change.

Keywords: Rostov Nature Reserve, mammals, 20th–21st centuries, changes, anthropogenic and climatic factors.

Введение

Территория, на которой расположен заповедник «Ростовский», до середины XX в. из-за дефицита пресной воды ограниченно использовалась людьми для животноводства. Это позволяло сохраняться здесь природной ксерофитной растительности и связанной с ней фауне. Обводнение степей привело к интенсивному развитию сельского хозяйства и перестройке экосистем. Для сохранения степного биоразнообразия и был создан заповедник «Ростовский». При поддержке ассоциации «Живая природа степи» и иных структур он наладил выполнение возложенных на него функций и в 2008 г. вошел во Всемирную сеть биосферных резерватов. Их деятельность направлена на мониторинг экосистем, установление происходящих в них изменений, выяснение причин этих изменений, разработку рекомендаций по оптимизации взаимоотношений человека с природой. В статье рассмотрены комплексы млекопитающих на занимаемой заповедником территории в последние 60 лет и произошедшие в них изменения. Приводятся основные причины этих изменений и меры по сохранению степного биоразнообразия.

Место и методы работы

Заповедник «Ростовский» организован 27.12.1995 на правом берегу оз. Маныч-Гудило на юго-востоке Ростовской области (РО). Его территория – 9531,5 га, охранной зоны – 74 350 га (создана 04.11.2000). На этой площади, далее называемой заповедником, наблюдения ведутся с середины XX в. В районе – жаркий засушливый климат, темно-каштановые и каштановые почвы с различной степенью засоленности, травянистая растительность пустынных степей [1]. В охранной зоне созданы полевые стационары ассоциации и Южного научного центра

РАН (ЮНЦ РАН). Сбор материала по наземным позвоночным на этой территории выполняется с середины XX в. [2, 3]. Авторы исследовали её по программам Wetlands International, различных региональных и федеральных природоохранных структур [4–8], участвовали в создании и работе заповедника и ассоциации. В последние десятилетия наблюдения за млекопитающими здесь ведут специалисты заповедника и ассоциации, сотрудники и студенты Ростовского государственного университета (РГУ, с 2006 г. – Южного федерального университета (ЮФУ)), ЮНЦ РАН, МГУ, РГАУ им. К.А. Тимирязева, ИПЭЭ им. А.Н. Северцова РАН, иных научных структур.

При написании статьи использованы исследования авторов с 1959 г., публикации о состоянии экосистем и млекопитающих в разные периоды, наблюдения сотрудников заповедника и ассоциации, летописи природы заповедника «Ростовский». Во время полевых работ применялись общепринятые методы учета млекопитающих (маршрутный учет нор и животных, выставление капканов, ловушек, ловчих цилиндров, др.).

Результаты и обсуждение

В прошлом рассматриваемая территория отличалась засушливыми условиями и острым дефицитом пресной воды. Современный уровень воды в оз. Маныч-Гудило сформировался к 1954 г. после наполнения его водой из р. Кубани. Минерализация воды в озере в районе заповедника составляла в 1952 г. – 24 г/л, 1953 г. – 11, 1959 г. – 15 г/л [9]. Домашние животные, включая овец, из озера воду не пили. Дефицит пресной воды сдерживал развитие сельского хозяйства, в том числе и животноводства.

Степные экосистемы сохраняли природное биоразнообразие, где успешно функционировали есте-

ственные механизмы устойчивости и саморегуляции. Они имели полноценные компоненты биоценозов, включающие все трофические и иные элементы живой природы. Крупные травоядные были представлены сайгаком (*Saiga tatarica* L.), небольшим количеством овец и лошадей. Сайгак заходил сюда в теплый период из соседней Калмыкии, где численность его в 1958–1959 гг. составляла 810–522 тыс. голов [10]. Его группы от 18–20 до 500–3000 особей, пасущихся в степи и приходящих пить воду на оз. Маныч-Гудило, мы регулярно наблюдали в мае – июле [3, 11]. В отдельные годы на рассматриваемой территории их количество доходило до 5–10 тыс. голов и более. Сайгаки играли важную роль в поддержании нормального состояния травостоя и стабильности экосистем. Из грызунов обычными, местами многочисленными, были малый суслик (*Spermophilus pygmaeus* Pall.), большой тушканчик (*Allactaga major* Pall.), тарбаганчик (*Pygeretmus pumilio* Kerr.), обыкновенный (*Cricetus cricetus* L.) и предкавказский (*Mesocricetus raddei* Nehring) хомяки, серый хомячок (*Cricetulus migratorius* Pall.), общественная полевка (*Microtus socialis* Pall.) [3], а около строений людей – серая крыса (*Rattus norvegicus* Berk.), домовая мышь (*Mus musculus* L.). Обитали емуранчик (*Stylodipus telum* Licht.), степная мышовка (*Sicista subtilis* Pall.), степная пеструшка (*Lagurus lagurus* Pall.), слепушонка (*Ellobius talpinus* Pall.) и обыкновенный слепыш (*Spalax micropthalmus* Güld.). Объектом охоты был заяц-русак (*Lepus europaeus* Pall.). Часто наблюдался ушастый ёж (*Hemiechinus auritus* Gmel.). К обычным хищникам относились корсак (*Vulpes corsae* L.), степной хорь (*Mustela eversmanii* Les.), ласка (*Mustela nivalis* L.). Встречались волк (*Canis lupus* L.), горноста́й (*Mustela erminea* L.), каменная куница (*Martes foina* Erxl.), перевязка (*Vormela peregusna* Güld.). Из птиц в степи гнездились степной орел (*Aquila nipalensis* Hodgson), курганник (*Buteo rufinus* Cretz.), степная пустельга (*Falco naumanni* Fleis.), филин (*Bubo bubo* L.) и иные хищники, которые в наши дни здесь не размножаются или относятся к редко гнездящимся видам.

Глубокие перестройки степные экосистемы начали претерпевать после принятия Правительством СССР 20.10.1948 постановления «О плане полезащитных лесонасаждений, внедрения травопольных севооборотов, строительства прудов и водоемов для обеспечения высоких и устойчивых урожаев в степных и лесостепных районах европейской части СССР». Его реализация охватывала десятки лет и приводила постепенно к большим изменениям в биоценозах. Обводнение, создание системы водохранилищ и прудов в 60–70-е гг. XX в. обеспечили

водой засушливые районы. Степи стали покрываться сетью полезащитных и иных древесных насаждений, в населенных пунктах появились парки, сады, другие насаждения. Начали формироваться не характерные для аридных ландшафтов условия, создающие среду для дендрофилов и лимнофилов, экологически пластичных видов. Сюда стали проникать и расселяться белогрудый еж – *Erinaceus roumanicus* Batt.-Ham., обыкновенная лисица – *Vulpes vulpes* L., енотовидная собака – *Nyctereutes procyonoides* Gray, малая лесная – *Sylvaeus uralensis* Pall. и желтобрюхая – *S. fulvipes* Ogn. мыши [12], водяная полевка – *Arvicola amphibius* L., ондатра – *Ondatra zibethicus* L. и иные не характерные для засушливых пустынных степей виды. Их количество и роль в биоценозах с годами возрастали, а многих не адаптированных к новым условиям и не выдерживающих конкуренции ксерофильных стенобионтов – сокращались.

Обводнение и облесение восточных районов РО привело к развитию животноводства и полеводства, притоку населения. В госплемзаводе «Орловский», на территории которого создали большую часть заповедника, в 1980-е гг. количество овец сильно превысило допустимые нормы и достигло 56 000, что вызвало антропогенное опустынивание степей [5, 13]. Экономические, социальные и иные изменения в стране в 80–90-е гг. XX в. усугубили ситуацию с охраной природы, привели к резкому падению животноводства (в 90-е гг. поголовье овец в госплемзаводе «Орловский» упало до 1 тыс.), глубокой перестройке степных биоценозов. Количество сайгаков на этой территории сократилось уже в 1970-е гг. (100±10) голов, а в 1980-е они практически не наблюдались. Ко времени организации заповедника многочисленной была общественная полевка, на некоторых участках часто встречались ушастый еж, тарбаганчик, малый суслик, лесные мыши и корсак. Довольно редкими, но широко распространенными в степи оставались степной хорь и большой тушканчик. Отмечались степная мышовка, емуранчик, горноста́й, перевязка, обыкновенный хомяк [6], на водоемах – ондатра и водяная полевка, изредка – енотовидная собака.

Перед созданием заповедника уже не встречались степная пеструшка и предкавказский хомяк. Их исчезновение на больших площадях некоторые зоологи связывают с климатическими изменениями, увеличением численности хищных птиц и иными факторами [14]. По нашему мнению, эти гипотезы нуждаются в дополнительном изучении. Ведущей остается деятельность людей, вызвавшая глубокую перестройку экосистем. Деградация степной растительности, обнищание населения, браконьерство

привели к резкому падению численности калмыцкой популяции сайгака [10, 11]. Он в районе заповедника практически перестал встречаться. На малого суслика и некоторых зверей, кроме отмеченных выше причин, негативно повлияла интенсивная борьба с ним и другими грызунами на протяжении ряда десятилетий с помощью зооцидов. Сокращение количества суслика отразилось на численности степного хорь и некоторых иных хищников (степной орел, курганник, др.). Это, а также конкуренция с лисицей отрицательно сказывались на численности корсака. Соотношение количества этих двух видов уже в 90-е гг. XX в. стало меняться в пользу лисицы (1:1 или 2:3). Белогрудый ёж начал вытеснять ушастого. Очень редко отмечался горноста́й, встречалась степная мышовка.

В первые годы создания заповедника и его буферной зоны внимание было уделено организационным вопросам, созданию заповедного режима. Начались сукцессионные процессы и восстановление степного травостоя. Лишь изредка здесь наблюдались группы сайгаков, заходящие из Калмыкии. Так, в мае 1999 г. около 1 тыс. ос. зашли в пос. Краснопартизанский, и от 4 до 17 антилоп летом держались на Стариковском и Краснопартизанском участках [7]. Сохранился тарбаганчик, причем в окрестности пос. Волочаевского, Рунного и в некоторых местах он оставался еще обычным. Наблюдался большой тушканчик, встречались колонии малого суслика. Очень редкими стали емуранчик, перевязка и степной хорь, отмечалась мышь-малютка (*Micromys minutus* Pall.) [6, 15].

Возросло количество белогрудого ежа и лисицы. Первый вид на значительной части территорий превышал численность ушастого ежа (до 5:1), хотя в ряде мест эти различия оставались небольшими (3:2) или отсутствовали. Многочисленной была общественная полевка, обычными – серый хомячок, малая лесная и степная (желтобрюхая) мыши, около водоемов с жесткой надводной растительностью – ондатра. На участках с мезофитной растительностью (около водоемов, древесных насаждений, иных местах) отлавливались малая (*Crocidura suaveolens* Pall.) и белобрюхая (*Crocidura leucodon* Herm.) белозубки. Нередко отмечалась обыкновенная полевка (*Microtus arvalis* Pall.), из которой с помощью кариологического анализа в те годы была выделена восточноевропейская полевка (*Microtus rossiaemeridionalis* Ogn.) [6, 16]. Её нахождение здесь позднее подтвердили ряд зоологов [17–19]. По данным В.В. Стахеева [15], серые полевки *Microtus arvalis* s.l. в долине Западного Маныча занимали по численности среди мелких млекопитающих 3-е место, уступая только домовую мышь и западнопалеарктическим лесным мышам.

В первое десятилетие XXI в. степной травостой восстановился, возросло биоразнообразие, увеличилась численность ряда исчезающих и редких видов [6, 7, 20, 21]. Однако степной травостой качественно отличался от такового середины XX в. Отсутствие сайгака, прекращение выпаса скота, обводнение и облесение степей создали хорошие условия для мезофитизации растительности и изменения состава травостоя, увеличения его густоты и высоты (на многих участках проективное покрытие составило 80–100 %). Это способствовало накоплению ветоши на поверхности земли, повышению влажности и снижению температуры в верхних слоях почвы. Обычными, широко распространенными, стали домовая мышь, малая и белобрюхая белозубки, заяц-русак, малая лесная и степная (желтобрюхая) мыши, общественная полевка, лисица и ряд других. Локально обычными оставались серый хомячок и слепушонка. Нередко еще наблюдался корсак [6]. Широко отмечался слепыш, а его череп часто встречался в гнездовых колониях чайки-хохотуньи (*Larus cachinnans* Pall.). Около водоемов обычной была ондатра, периодически наблюдалась енотовидная собака (в 2010 г. – в стационаре ассоциации, в 2011 г. – около хут. Рунного и т.д.). Отмечались особи европейского барсука (*Meles meles* L.). Изредка по древесным насаждениям в охранный зону заходила косуля (*Capreolus capreolus* L.). По берегам оз. Маныч-Гудило и иных водоемов, по лесополосам почти ежегодно бродил кабан (*Sus scrofa* L.). На территории заповедника чаще начал встречаться шакал (*Canis aureus* L.), хотя он оставался редким. Из Калмыкии в заповедник и его окрестности регулярно проникали волки, нанося ущерб овцам и иным животным. В охранный зоне в 2009 и 2011 гг. [19] и позже отмечались их логова. В окрестности пос. Волочаевского 29.09.2009 зашла молодая самка лоса (*Alces alces* L.). Обычными, местами многочисленными около строений людей, оставались серая крыса, домовая мышь, встречались каменная куница, ласка.

Более густая и высокая трава негативно повлияла на ряд обитателей засушливых степей, избегающих этого травостоя (малый суслик, большой тушканчик, тарбаганчик, степной хорь, др.). На отдельных участках (стационар ассоциации, Курников Лиман, х. Рунный, др.) некоторые из этих видов оставались еще обычными. Немногочисленной, но распространенной была слепушонка [15]. Корсак на фоне размножившейся лисицы и изменения травостоя становился немногочисленным. А.Д. Липкович видел корсака, задушенного лисицей (личное сообщение). Уже в первые годы XXI в. соотношение количества ушастого и белогрудого ежей в р-не заповедника составляло 1:5 в пользу последнего вида [7]. В статисти-

онаре ассоциации 30.06.2006 из отмеченных 14 ежей только 2 были ушастыми, 05.08.2006 из 18 – 2, 20.08.2006 из 17 – 2, 04.10.2006 из 8 – 2 ос.

Резко сократилось на юго-востоке РО поголовье сайгака, и в заповеднике он наблюдался очень редко. Около оз. Лопуховатого 24.08.2006 встречено 26 особей [11]; отмечались они на Стариковском участке (17.04.2009, др.); по данным инспектора А. Сушкова, одиночные особи здесь встречались ежегодно [19]. Для сохранения этого вида ассоциация в 2004 г. завезла в Центр редких животных европейских степей в х. Кундрюченский из Калмыкии 11 сайгаков. К 2009 г. их здесь было уже 70 [11].

Во второе десятилетие XXI в. на юго-востоке РО интенсифицируется хозяйственная деятельность (увеличиваются поголовье скота, распашка степи, применение пестицидов, др.), что усложняет соблюдение природоохранного режима. На территории госплемзавода «Орловский» количество овец возросло до 6 000, крупного рогатого скота – до 7 000. Если на участках с заповедным режимом охрана биоразнообразия соблюдалась, то в буферной зоне отмечались нарушения.

В XXI в. экологическая ситуация обостряется аридизацией климата [22, 23]. Заметные изменения в экосистемах начали проявляться с 2007 г. [24]. В дальнейшем произошло полное (пруды Крутик, Бубашовский, Чекина, др.) или частичное (лиманы Курников и Горький, пруды Круглый, Колесникова, др.) пересыхание водоемов. Последние годы также были с засушливыми и жаркими летними месяцами, теплыми зимами. Эти изменения совпали с активизацией хозяйственной деятельности. В районах расположения заповедника уже встречаются участки деградированных земель, где вся растительность или большая её часть уничтожена овцами, КРС, лошадьми.

В последние годы из мелких млекопитающих наиболее массовыми были малая белозубка, обыкновенная полевка, степная (желтобрюхая) и домовая мыши, на некоторых участках наблюдался серый хомячок [25]. Плотность зайца в 2019 г. составляла 5,5 ос/км², численность – 202 ос. На Стариковском участке в выводковой норе волка было 5 щенков. Из других хищников часто встречается лисица, и её соотношение с корсаком в 2014–2017 гг. составило 5:1 и меньше, а в 2019–2020 гг. – 10:1. Обычен шакал, встречается ласка, около строений людей – каменная куница, на Лысой горе отмечена степная мышь. Редкими в степи остаются барсук, большой тушканчик, тарбаганчик, малый суслик, степной хорь и перевязка, сократились количество и места обитания слепушонки. Небольшие колонии сусликов в начале второго десятилетия отмечены в стац-

онаре ассоциации, у оз. Лопуховатого, вблизи Стариковского участка. К концу этого десятилетия эти колонии исчезли. Пересыхание водоемов привело к снижению численности ондатры, водяной полевки. Соотношение особей ушастого и белогрудого ежей в 2014–2017 гг. было 1 к 8–10, а в 2019–2020 гг. ушастый еж встречался очень редко.

В стационаре ассоциации около 10 лет в полувольных условиях на площади 2 тыс. га успешно обитали и размножались куланы (*Equus hemionus* Pall.). В 2013 г. сюда завезли 4 лошадей Пржевальского (*Equus przewalskii* Poljakov). В последние годы их количество достигло 11–14. Здесь же обитают 70–80 сайгаков, бизоны (*Bison bison* L.) и другие животные. На стационаре ведутся работы по выяснению влияния лошадей, сайгаков и иных видов на травостой степи [26–29]. Дважды сотрудниками заповедника и ассоциации предпринимались попытки выпуска европейского байбака (*Marmota bobak* Mull.), но они оказались неудачными. В конце мая 2019 г. в стационаре опять выпустили 32 байбака из Чертковского р-на РО, которые держались на участке в 2020 и 2021 гг.

Обитателями заповедника являются и рукокрылые. Отмечены поздний кожан (*Eptesicus serotinus* Schr.) и средиземноморский нетопыр (*Pipistrellus kuhlii* Kuhl.) [30]. Эта группа заслуживает дополнительного изучения, так как в районах расположения заповедника отмечен еще ряд видов рукокрылых. Нуждаются в анализе и уточнении отдельные виды мышиных (Muridae) и некоторых других групп.

Заповедник имеет минимальную площадь, состоит из 4 (4591, 2182,5, 1768 и 990 га) обособленных, вытянутых цепочкой и расположенных в 5–25 км друг от друга участков в двух находящихся в местах интенсивной хозяйственной деятельности районах РО. Для дальнейшего сохранения биоразнообразия на рассматриваемой территории целесообразно её расширить, присоединив к заповеднику ряд ценных в природном отношении участков, на которых еще размножаются редкие и ценные позвоночные. Остров Прибрежный и Лысую гору необходимо присоединить к заповеднику. Негативно на животных влияет отсутствие буферной зоны в Ремонтненском районе РО, где имеются два участка заповедника. Исторически богатым биоразнообразием, включающим большое количество редких и исчезающих животных (степной хорь, большой тушканчик, тарбаганчик и т.д.), характеризовался район Курникова лимана [6–8]. Он не вошел в заповедник и его буферную зону. Весной 2021 г. Курников лиман заполнился водой и на нем скопилось много водоплавающих птиц (пеликаны, лебеди, гуси, утки, др.). Приехавшие охотники её распугали, и в 3-й декаде ап-

реля он был без птиц. Так в сезоны охоты происходит регулярно. Необходимо присоединить его к поведению или хотя бы к охранной зоне с запретом охоты.

На густозаселенной и интенсивно используемой людьми территории в окрестностях заповедника невозможно на ограниченной территории свободно содержать крупных животных. Целесообразно рассмотреть вопрос о естественной (острова, др.) или искусственной (огораживание) изоляции части охраняемой территории и организации биосферных участков с участием копытных и иных редких животных. В ассоциации в полувольных природных условиях обитают и размножаются лошади Пржевальского, сайгаки и иные копытные. Использование опыта ассоциации и Оренбургского заповедника по созданию полувольной популяции лошади Пржевальского положительно отразится на биоразнообразии в этом регионе.

Заключение

С 50-х гг. XX в. на территории, занимаемой заповедником «Ростовский», отмечено 46 видов млекопитающих, включая живущих в полувольных условиях кулана и лошадь Пржевальского. Они относятся к 16 семействам из 7 отрядов. За счет недостаточно изученных летучих мышей, возможно, землероек и некоторых иных групп этот список, вероятно, охватывает более 50 видов. В последнее десятилетие здесь отмечено 38 видов. Под влиянием деятельности людей и климатических колебаний естественные экосистемы степи и комплекс обитающих в них млекопитающих претерпели глубокие изменения. В различные периоды здесь исчезли предкавказский хомяк, емуранчик, степная пеструшка, горностай. Давно не отмечались мышь-малютка, обыкновенный хомяк и некоторые другие виды. Наиболее сильно в рассматриваемый период пострадали степные ксерофильные стенобионты. Сюда проникли многие дендрофилы и лимнофилы, экологически пластичные виды. В последние десятилетия ситуацию усугубляет аридизация климата, которая совместно с усилением хозяйственной деятельности, вызывая эффект синергизма, увеличивает негативное воздействие на экосистемы. Для успешного сохранения степного биоразнообразия необходимо расширение площади заповедника, создание его охранной зоны в Ремонтненском районе, повышенное внимание к изучению функционирования степных ООПТ, применение научно обоснованных систем ведения сельского хозяйства и природопользования в окрестностях заповедника, разработка и внедрение новых, адаптированных к современным условиям, дополнительных приемов охраны природы.

Литература

1. Агроклиматический справочник по Ростовской области. Ленинград: Гидрометеорол. изд-во, 1961. 206 с.
2. Петров В.С., Миноранский В.А. Летняя орнитофауна озера Маныч-Гудило и прилегающих степей // Орнитология. М.: МГУ, 1962. Вып. 5. С. 266–275.
3. Миноранский В.А. Маныч-Гудило // Природа. 1963. № 4. С. 74–80.
4. Редкие, исчезающие и нуждающиеся в охране животные Ростовской области / под ред. В.А. Миноранского. Ростов н/Д.: Изд-во Рост. ун-та, 1996. 440 с.
5. Миноранский В.А., Габунцина Э.Б. Уникальные экосистемы: озеро Маныч-Гудило. Элиста: Джангар, 2001. 239 с.
6. Миноранский В.А., Чекин А.В. Государственный степной заповедник «Ростовский». Ростов н/Д.: ЦВБП, 2003. 129 с.
7. Красная книга Ростовской области. Т. I: Редкие и находящиеся под угрозой исчезновения животные / под ред. В.А. Миноранского. Ростов н/Д.: Малыш, 2004. 364 с.
8. Водно-болотные угодья России. Т. 6: Водно-болотные угодья Северного Кавказа / под ред. А.Л. Мищенко. М.: Wetlands International, 2006. 316 с.
9. Круглова В.М. Пролетарское водохранилище. Ростов н/Д.: Изд-во Рост. ун-та, 1972. 180 с.
10. Близнюк А.И. Сайгак калмыцкой популяции. Элиста: Джангар, 2009. 544 с.
11. Миноранский В.А., Толчеева С.В. Вольерное содержание сайгака (*Saiga tatarica* L.). Ростов н/Д.: Ковчег, 2010. 288 с.
12. Лисовский А.А., Шефтель Б.И., Савельев А.П., Ермаков О.А., Козлов Ю.А., Смирнов Д.Г., Стахеев В.В., Глазов Д.М. Млекопитающие России: список видов и прикладные аспекты // Сб. тр. Зоол. музея МГУ. М., 2019. Т. 56. 191 с.
13. Зонн И.С. Республика Калмыкия – Хальмг-Тангч – европейский регион экологической напряженности // Биота и природная среда Калмыкии. М.; Элиста: Коркис, 1995. С. 6–18.
14. Липкович А.Д. Пульсации границ ареалов млекопитающих в степях Юга России и смена климатических фаз в XX столетии // Мониторинг природных экосистем долины Маныча: тр. Гос. природ. заповедника «Ростовский». Ростов н/Д.: Изд-во СКНЦ ВШ ЮФУ, 2010. Вып. 4. С. 148–160.
15. Стахеев В.В. Современное состояние и динамика фауны грызунов долины Западного Маныча // Современное состояние и технологии мониторинга аридных и семиаридных экосистем юга России. Ростов н/Д.: Изд-во ЮНЦ РАН, 2010. С. 165–174.
16. Миноранский В.А. Животный мир Ростовской области (состав, значение, сохранение биоразнообразия). Ростов н/Д.: ЦВБП, 2002. 360 с.

17. Стахеев В.В. О фауне грызунов заповедника «Ростовский» и сопредельных территорий // Териофауна России и сопредельных территорий: материалы Междунар. совещ. (VIII съезд Териологического общества), г. Москва, 31 января – 2 февраля 2007 г. М.: Товарищество научных изданий КМК, 2007. С. 480.

18. Брагин А.Е. К характеристике населения мелких мышевидных млекопитающих заповедника «Ростовский» // Успехи формирования и функционирования сети особо охраняемых природных территорий и изучение биологического разнообразия: материалы Междунар. науч.-практ. конф. Костанай: КГПИ, 2014. С. 106–110.

19. Брагин А.Е., Липкович А.Д. Аннотированный список млекопитающих гос. природного биосферного заповедника «Ростовский», его охранной зоны и сопредельных территорий // Тр. государственного природ. биосф. заповедника «Ростовский». Ростов н/Д.: Изд-во СКНЦ ВШ, 2012. Вып. 5. С. 178–189.

20. Клец Л.В. Итоги 20-летней деятельности государственного природного заповедника «Ростовский» // Тр. гос. природ. биосф. заповед. «Ростовский». Ростов н/Д.: Фонд науки и образования, 2016. Вып. 6. С. 5–12.

21. Миноранский В.А., Даньков В.И., Толчеева С.В., Малиновская Ю.В. Координирующая и объединяющая природоохранная деятельность ассоциации «Живая природа степи» в долине Западного Маныча // Тр. ЮНЦ РАН. Т. VII: Природные и антропогенные факторы в трансформации экосистемы Западного Маныча. Ростов н/Д.: Изд-во ЮНЦ РАН, 2018. С. 16–37.

22. Кузьмина Ж.В., Трешкин С.Е. Климатические изменения в бассейне Нижней Волги и их влияние на состояние экосистем // Аридные экосистемы. 2014. Т. 20, № 3. С. 14–32.

23. Дедова Э.Б., Гольдварг Б.А., Цаган-Манджиев Н.Л. Деградация земель Республики Калмыкия: проблемы и пути их восстановления // Аридные экосистемы. 2020. Т. 26, № 2. С. 63–71.

24. Миноранский В.А. Влияние погодных условий 2007 г. на животных в районе озера Маныч-Гудило // Актуальные вопросы экологии и охраны природы экосистем южного региона России и сопредельных территорий: материалы XXI Межреспуб. науч.-практ. конф. (Краснодар, 21 мая 2008 г.). Краснодар, 2008. С. 99–101.

25. Экологический вестник Дона «О состоянии окружающей среды и природных ресурсов Ростовской области в 2018 г.». Ростов н/Д., 2020. 372 с.

26. Minoransky V.A., Uzdennov A.M., Dankov V.I., Malinovskaya Yu.V. Restoration of Przewalski's horse (*Equidae*, *Perissodactyla*) at the breeding centre of the association «Wild Nature of Steppe», Russia // Nature Conservation Research. Заповедная наука. 2019. Vol. 4 (Suppl. 2). С. 89–93.

27. Казьмин В.Д., Абатуров Б.Д., Джапова Р.Р., Аюшева Е.Ч., Джапова В.В., Нохоева Д.В., Миноранский В.А., Медяников И.Н. Показатели пастбищной

экологии *Equus ferus przewalskii* (*Equidae*) в степях долины Западного Маныча (юго-восток Ростовской области, Россия) // Nature Conservation Research. Заповедная наука. 2019. Т. 4 (Suppl. 2). С. 72–77.

28. Абатуров Б.Д., Джапова Р.Р., Казьмин В.Д., Аюшева Е.Ч., Джапова В.В. Сравнительные особенности питания лошади Пржевальского *Equus przewalskii*, двугорбого верблюда *Camelus bactrianus* и сайгака *Saiga tatarica* на степном изолированном пастбище // Изв. РАН. Серия биологическая. 2019. № 6. С. 1–15.

29. Джапова В.В., Бембеева О.Г., Аюшева Е.Ч., Казьмин В.Д., Джапова Р.Р., Абатуров Б.Д. Кормовая избирательность полувольных бизонов (*Bison bison*) в дерновиннозлаковой степи долины Западного Маныча // Аридные экосистемы. 2020. Т. 26, № 4. С. 59–65.

30. Миноранский В.А., Малиновкин А.В. Ландшафтное распределение рукокрылых (*Chiroptera*) в Ростовской области // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2014. № 1. С. 84–87.

References

1. *Agroclimatic guide to the Rostov region*. (1961). Leningrad, Hydrometeorological Publishing House, 206 p. (in Russian).
2. Petrov V.S., Minoransky V.A. (1962). Summer avifauna of lake Mаныч-Gudilo and the adjacent steppes. *Ornithology*. Moscow, MGU Press, vol. 5, pp. 266-275. (in Russian).
3. Minoransky V.A. (1963). Mаныч-Gudilo. *Priroda*, No. 4, pp. 74-80. (in Russian).
4. *Rare, endangered and in need of the protection of animals Rostov region*. (1996). V. A. Minoransky (Ed.). Rostov-on-Don, Rostov University Press, 440 p. (in Russian).
5. Minoransky V.A., Gabunshchyna E.B. (2001). *Unique ecosystems: Lake Mаныч-Gudilo*. Elista, Dzhangar Publ., 239 p. (in Russian).
6. Minoransky V.A., Chekin A.V. (2003). *State steppe nature reserve "Rostovsky"*. Rostov-on-Don, CVVR Publ., 129 p. (in Russian).
7. *Red Book of the Rostov region*. (2004). Vol. I. Rare and endangered animals. V. A. Minoransky (Ed.). Rostov-on-Don, Malysh Publ., 364 p. (in Russian).
8. *Wetlands of Russia*. (2006). Vol. 6. Wetlands of the North Caucasus. A. L. Mishchenko (Ed.). Moscow, Wetlands International Publ., 316 p. (in Russian).
9. Kruglova V.M. (1972). *Proletarsk reservoir*. Rostov-on-Don, Rostov University Press, 180 p. (in Russian).
10. Bliznyuk A.I. (2009). *Saiga of the Kalmyk population*. Elista, Dzhangar Publ., 544 p. (in Russian).
11. Minoransky V.A., Tolcheeva S.V. (2010). *Aviary maintenance of saiga antelope (Saiga tatarica L.)*. Rostov-on-Don, Kovcheg Publ., 288 p. (in Russian).
12. Lisovsky A. A., Sheftel B. I., Savelyev A. P., Ermakov O. A., Kozlov Yu. A., Smirnov D. G., Staheev V. V., Glazov D. M. (2019). Mammals of Russia: list of types and

applied aspects. *Collection of works of the Zoological Museum of Moscow State University*. Moscow, vol. 56, 191 p. (in Russian).

13. Zonn I.S. (1995). Republic of Kalmykia - Halmg-Tangch - European region of ecological tension. *Biota and natural environment of Kalmykia*. Moscow, Elista, Korkis Publ., pp. 6-18. (in Russian).

14. Lipkovich A.D. (2010). Pulsations of the boundaries of the mammal ranges in the steppes of Southern Russia and the change of climatic phases in the 20th century. *Monitoring of natural ecosystems of the Manych Valley*: Rostov State Nature Reserve. Rostov-on-Don, North Caucasus Research Center of Higher School Press, Southern Federal University, vol. 4, pp. 148-160. (in Russian).

15. Staheev V.V. (2010). Modern state and dynamics of the rodent fauna of the Western Manych Valley. *Modern state and technologies of monitoring of arid and semiarid ecosystems of the South of Russia*. Rostov-on-Don, SSC Press, RAS, pp. 165-174. (in Russian).

16. Minoransky V. A. (2002). *The animal world of the Rostov region (composition, significance, conservation of biodiversity)*. Rostov-on-Don, CVVR Publ., 360 p. (in Russian).

17. Staheev V.V. (2007). About the rodent fauna of the Rostov Nature Reserve and adjacent territories. *Theriofauna of Russia and adjacent territories: Materials of the International meeting (VIII Congress of the Theriological Society)*, Moscow, January 31 - February 2, 2007. Moscow, Comradeship of Scientific Publications KMK, p. 480. (in Russian).

18. Bragin A.E. (2014). On the characteristics of the population of small mouse-like mammals of the Rostov Nature Reserve. *The success of the formation and functioning of the network of specially protected natural territories and the study of biological diversity*: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference. Kostanay, KSPI Press, pp. 106-110. (in Russian).

19. Bragin A. E., Lipkovich A. D. (2012). Annotated list of mammals of the Rostov State Natural Biosphere Nature Reserve, its protected zone and adjacent territories. *Proceedings of the Rostov State Nature Biosphere Reserve*. Rostov-on-Don, North Caucasus Research Center of Higher School Press, Southern Federal University, vol. 5, pp. 178-189. (in Russian).

20. Klets L.V. (2016). Results of 20-year activity of the Rostov State Nature Reserve. *Proceedings of the Rostov State Nature Biosphere Reserve*. Rostov-on-Don, Fond nauki i obrazovaniya Publ., iss. 6, pp. 5-12. (in Russian).

21. Minoransky V.A., Dankov V.I., Tolcheeva S.V., Malinovskaya Yu.V. (2018). Coordinating and unifying environmental activities of the Association "Wild Nature of the Steppe" in the Western Manych valley. *Proceedings*

of the SSC, RAS. Vol. VII: Natural and anthropogenic factors in the transformation of the ecosystem of Western Manych. Rostov-on-Don, SSC Press, RAS, pp. 16-37. (in Russian).

22. Kuzmina Zh.V., Treshkin S.E. (2014). Climatic changes in the Lower Volga basin and their impact on the state of ecosystems. *Aridnye ekosistemy*, vol. 20, No. 3, pp. 14-32. (in Russian).

23. Dedova E.B., Goldberg B.A., Tsagan-Mandzhiev N.L. (2020). Land degradation Republic of Kalmykia: problems and ways of their recovery. *Aridnye ekosistemy*, vol. 26, No. 2, pp. 63-71. (in Russian).

24. Minoransky V.A. (2008). Effect of weather conditions of 2007 in the area of lake Manych-Gudilo. *Topical issues of ecology and nature protection of ecosystems of the southern region of Russia and adjacent territories: materials of the XXI Inter-Academic Scientific and Practical Conference* (Krasnodar, May 21, 2008). Krasnodar, pp. 99-101. (in Russian).

25. *Ecological Bulletin of the Don "On the state of the environment and natural resources of the Rostov region in 2018"*. (2020). Rostov-on-Don, 372 p. (in Russian).

26. Minoransky V.A., Uzdenov A.M., Dankov V.I., Malinovskaya Yu.V. (2019). Restoration of Przewalski's horse (Equidae, Perissodactyla) at the breeding centre of the association «Wild nature of steppe», Russia. *Nature Conservation Research. Zapovednaya nauka*, vol. 4 (suppl. 2), pp. 89-93.

27. Kazmin V.D., Abaturov B.D., Dzhapova R.R., Ayusheva E.Ch., Dzhapova V.V., Nokhaeva D.V., Minoransky V.A., Medyanikov I.N. (2019). Indicators of pasture ecology of Equus ferus przewalskii (Equidae) in the steppes of the Western Manych Valley (South-East of the Rostov region, Russia). *Nature Conservation Research. Zapovednaya nauka*, vol. 4 (Suppl. 2), pp. 72-77. (in Russian).

28. Abaturov B.D., Dzhapova R.R., Kazmin V.D., Ayusheva E.Ch., Dzhapova V.V. (2019). Comparative features of nutrition of the Przewalski horse *Equus przewalskii*, the two-humped camel *Camelus bactrianus* and the Saiga *Saiga tatarica* on the steppe isolated pasture. *Izvestiya RAS. The biology series*, No. 6, pp. 1-15. (in Russian).

29. Dianova V.V., Bembeeva O.G., Ausheva H.E., Kazmin, V.D., Canova R.R., Abaturov B.D. (2020). Forage selectivity semi-bison (*Bison bison*) in feather-grass steppe valleys of the Western Manych. *Aridnye ekosistemy*, vol. 26, No. 4, pp. 59-65. (in Russian).

30. Minoransky V.A., Malinovkin A.V. (2014). Landscape distribution of bats (Chiroptera) in the Rostov region. *Izv. vuzov. Sev.-Kavk. region. Estestv. nauki (Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science)*, No. 1, pp. 84-87. (in Russian)

УДК 631.41

doi 10.18522/1026-2237-2021-3-111-116

ПОКАЗАТЕЛИ ХЕМОДЕСТРУКЦИОННОГО ФРАКЦИОНИРОВАНИЯ ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА ПОЧВ ПРИРОДНЫХ И АНТРОПОГЕННО ПРЕОБРАЗОВАННЫХ ЛАНДШАФТОВ ЮГА ПРИМОРЬЯ

© 2021 г. Л.Н. Пуртова¹¹Федеральный научный центр биоразнообразия наземной биоты Восточной Азии ДВО РАН, Владивосток, Россия

INDICATORS OF CHEMODESTRUCTIVE FRACTIONATION OF ORGANIC MATTER SOILS OF NATURAL AND ANTHROPOGENIC-TRANSFORMED LANDSCAPES OF THE SOUTH OF PRIMORYE

L.N. Purtova¹Federal Scientific Center of the East Asia Terrestrial Biodiversity, Far Eastern Branch, Russian Academy of Sciences,
Vladivostok, Russia

Пуртова Людмила Николаевна – доктор биологических наук, главный научный сотрудник, сектор органического вещества почв, Федеральный научный центр биоразнообразия наземной биоты восточной Азии ДВО РАН, пр. 100-летия Владивостока, 159, г. Владивосток, 690022, Россия, e-mail: Purtova@biosoil.ru

Lyudmila N. Purtova - Doctor of Biological Sciences, Main Researcher, Sector of Organic Substance, Federal Scientific Center of the East Asia Terrestrial Biodiversity, FEB, RAS, Stoletiya Vladivostoka Ave, 159, Vladivostok, 690022, Russia, e-mail: Purtova@biosoil.ru

Методом хемодеструкционного фракционирования (ХДФ) установлены различия в качественном составе органического вещества в почвах природных и антропогенно преобразованных ландшафтов на юге Приморья. Наиболее низкие показатели легкоокисляемой части (ЛОЧ) в составе органического вещества характерны для почв техногенных ландшафтов (эмбриоземов) с очень малым содержанием гумуса в связи с низкими запасами надземной фитомассы и поступлением свежего органического вещества растительного происхождения. Формирование эмбриоземов происходит в условиях хорошей дренированности с преобладанием окислительной обстановки. Эмбриоземам свойственна низкая обеспеченность гумуса азотом. Более высокие показатели ЛОЧ установлены для почв природных ландшафтов со средним содержанием гумуса (буроземы). В буроземах окислительные и элювиальные процессы уравновешены гумусообразованием. В почвах агрогенных ландшафтов (агротемногумусовые подбелы, агротемногумусовые глеевые) с низким содержанием гумуса доля ЛОЧ сокращалась и возрастала в составе почвенного органического вещества доля трудноокисляемой части. В агротемногумусовых глеевых почвах с посевами костреца из-за усиления процессов трансформации органического вещества и перехода органического вещества из трудноокисляемой в ЛОЧ зафиксировано ее возрастание. Исходя из полученных данных о качественном составе органического вещества, установлено, что в почвах природных ландшафтов (буроземах) доля ЛОЧ превышала таковую по сравнению с почвами агрогенных (агротемногумусовые подбелы, агротемногумусовые глеевые) и техногенных ландшафтов (эмбриоземы). Это свидетельствует о различиях в протекающих окислительных и гумусообразовательных процессах.

Ключевые слова: почвы, ландшафты, хемодеструкционное фракционирование, органическое вещество, азот, гумус.

The differences in the qualitative composition of organic matter in the soils of natural and anthropogenically transformed landscapes in the south of Primorye were established by the method of chemodestructive fractionation (CDF). The lowest indices of the easily oxidizable part (EOP) in the organic matter are typical for soils of technogenic landscapes (embryozems) with very low humus content due to low reserves of aboveground phytomass and the supply of fresh organic matter of plant origin. Embryozems are characterized by a low supply of humus with nitrogen. Higher EOP values are characteristic of soils of natural landscapes (burozems) with average humus content. In burozems, oxidative and eluvial processes are balanced by humus formation. In the soils of agrogenic landscapes (agro-dark-humus podbeles, agro-dark-humus gley soils)

with low humus content, the proportion of EOP decreased and, at the same time, the proportion of the hardly oxidized part in the composition of soil organic matter increased. Some increase in EOP was recorded in agro-dark-humus gley soils with rump crops, which is associated with the intensification of the transformation processes of organic matter and the transition of organic matter from the difficult-to-oxidize to the easily oxidized part. Based on the data obtained on the qualitative composition of organic matter, the CDF method implies that in the soils of natural landscapes (burozems), the proportion of EOP exceeded that in comparison with soils of agrogenic (agro-dark-humus podbely, agro-dark-humus gley) and tech-nogenic landscapes (embriozems). This indicates differences in the conditions of soil formation and the ongoing oxidative and humus-forming processes.

Keywords: soils, landscapes, chemodestructive fractionation, organic matter, nitrogen, humus.

Введение

Органическое вещество почв является ключевым компонентом, контролирующим большую часть её биогеоценотических и эколого-биосферных функций. Устойчивость почв к внешним воздействиям, минерализационно-иммобилизационная оборачиваемость биогенных элементов, дезактивизация токсических веществ, а также структура и биоразнообразие микробного сообщества прямо или косвенно связаны с запасами и качеством органического вещества [1]. Почвенное органическое вещество представляет собой сложный комплекс индивидуальных (неспецифических) соединений и гуминовых веществ, а также продуктов взаимодействия между собой и минеральной частью почв [2]. С гуминовыми веществами связана специфика почв. Гуминовые вещества являются генетически достаточно стабильными продуктами, с которыми связаны основные физико-химические свойства почв. При этом гумус выступает одним из ключевых звеньев глобального цикла углерода [3], а также является основным аккумулятором преобразованной солнечной энергии [4].

В настоящее время в составе органического вещества выделяют лабильную и стабильную части. Лабильные гумусовые вещества по элементному составу близки к новообразованным гумусовым кислотам, но при этом обладают специфическими особенностями – высокой теплотворной способностью, что позволяет их считать важной составляющей энергетического баланса почвы как источника для динамических биохимических процессов [5]. Для характеристики почв большое значение имеет не только общее содержание органического вещества, но и отношение легко- и трудноразлагаемых (лабильных и стабильных) соединений органических составляющих почв [6].

В работе В.Ф. Дричко с соавторами [7] изучены устойчивая и лабильная части гумуса на дерново-подзолистых почвах на основе использования математической модели, характеризующей процессы динамики состава почвы. Авторами выявлено наличие лабильного и устойчивого компонентов не только в

органическом веществе почв, но и во всех группах и фракциях гумусовых веществ. Величину лабильного компонента гумусовых веществ было предложено использовать в качестве показателя устойчивости почв к деградации. Для оценки содержания лабильных и стабильных частей почвенного органического вещества существуют разные методы, основанные на химическом разложении окислителя [1, 6, 8–11]. А.И. Поповым, В.П. Цыпленковым [12] разработан способ определения форм гумуса, основанный на выявлении различных по устойчивости к окислению компонентов почвенного органического вещества или частей макромолекул с применением серии растворов дихромата калия с одинаковой концентрацией окислителя, но с линейно возрастающей окисляющей способностью, – метод хемодеструкционного фракционирования (ХДФ). Окисляющая способность зависела от концентрации ионов гидроксония и задавалась разным количеством серной кислоты. При этом лабильные формы почвенного органического вещества окислялись растворами с низкой окисляющей способностью, а относительно стабильные – с высокой. Данный метод был апробирован на широком спектре почв Ленинградской, Белгородской и Херсонской областей и позволил определить интервалы легкоокисляемой (лабильной) части (ЛОЧ) и на её основе охарактеризовать дренированность почв и протекающий почвообразовательный процесс [6].

На территории Приморского края работы по изучению органического вещества почв на основе метода ХДФ не проводились. Между тем почвенный покров края весьма неоднороден по компонентному составу входящих в него почв, их физико-химическим показателям, в том числе и по содержанию гумуса [13, 14].

Для пахотных почв большое значение имеет не только гумусированность, но и отношение легко- и трудноразлагаемых (лабильных и стабильных) соединений их органической составляющей, исследуемое методом ХДФ.

Цель работы – установить различия в качественном составе органического вещества почв природных и антропогенно преобразованных ландшафтов на основе метода ХДФ.

Объект и методы исследований

В качестве объектов исследований использованы гумусовые и пахотные горизонты автоморфных почв: целинных (буроземы, р.1, р.2) и агрогенных. Исследованы полугидроморфные (агротемно-

гумусовые подбелы, р.3), гидроморфные (агротемногумусовые глеевые почвы, р.4). Названия почв приведены согласно классификации [15]. Из почв техногенных ландшафтов изучен эмбриозем инициальный. Местоположение разрезов указано в табл. 1.

Таблица 1

Исследуемые почвы и их местоположение / The studied soils and their location

№ разреза	Почва	Горизонт	Местоположение
1	Бурозем	AU	Приморский край, Хасанский р-н, мыс Гамова, средняя часть склона, заросли ольхи
2	Бурозем	AU	Там же, нижняя часть склона, заросли дуба монгольского
3	Агротемногумусовый подбел	PU	Приморский край, Уссурийский р-н, пос. Тимирязевский, пашня
4	Агротемногумусовая глеевая	PU	Там же, опытное поле с посевом костреца
5	Эмбриозем инициальный	C1	Приморский край, Партизанский р-н, рекультивируемые участки шахты ООО «Правобережное»

ХДФ качественного состава почвенного органического вещества проводили по методике, предложенной в [16]. Количество окисленного органического вещества определяли колориметрическим методом при длине волны 590 нм. Шкалу строили на основе приготовления растворов глюкозы [16]. Содержание гумуса определено по методу Тюрина, $N_{\text{общ}}$ – по Кельдалю [17].

Результаты и обсуждение

Исследованные почвы приурочены к Приморской юго-западной провинции, для которой свойственны высокие показатели среднегодовой нормы выпадения осадков (до 800 мм), радиационного баланса ($52,2 \text{ ккал/см}^2 \text{ г}$) и затрат энергии на почвообразование ($33,9 \text{ ккал/см}^2 \text{ г}$) [14]. Как показали результаты проведенных исследований, почвы суще-

ственным образом различаются по содержанию гумуса и азота (табл. 2).

В связи со значительным поступлением органического вещества с опадом и подстилкой наиболее гумусированы поверхностные горизонты буроземов. Судя по оценочным шкалам [18], содержание гумуса в буроземах, сформированных в средней части склона под зарослями ольхи, достигало средних величин. Обогащенность гумуса азотом (C:N) низкая, что свойственно грубому гумусу типа мор и модер. В буроземе, расположенном в нижней части склона под зарослями дуба монгольского, количество органического вещества возрастало. Связано это с его аккумуляцией в результате транзита вниз по склону и заторможенностью процессов трансформации органического вещества, о чем свидетельствовали очень низкие показатели обогащенности гумуса азотом.

Таблица 2

Содержание гумуса и азота (N) в почвах природных и антропогенно преобразованных ландшафтов юга Приморья / Humus and nitrogen content in the soils of natural and anthropogenic-transformed landscapes in the South of Primorye

№ разреза	Почва	Горизонт / мощность, см	Гумус	N _{общ}	C:N
			%		
			M±m		
1	Бурозем	AU/0–28	6,82±1,14	0,36±0,02	12,9
2	–	AU/0–15	12,2±1,50	0,53±0,03	15,6
3	Агротемногумусовый подбел	PU/0–20	3,55±0,18	0,24±0,01	10,0
4	Агротемногумусовая глеевая	PU/0–20	3,74±0,20	0,31±0,02	8,28
5	Эмбриозем инициальный*	C ₁ /0–6	1,81±0,16	0,10±0,01	12,2

Примечание. M±m, где M – среднее арифметическое; m – ошибка средней; * – использовано название почвы, предложенное В.А. Андрохановым с соавторами [19].

Согласно данным ХДФ, для этих типов почв свойственна более высокая доля части ЛОЧ (до 28 %). При этом у буроземов, сформированных под дубом монгольским в нижней части склона, из-за боль-

шего поступления опада в связи с его аккумуляцией и транзита вниз по склону доля ЛОЧ превышала таковую по сравнению с буроземами, расположенными в средней части склона (табл. 3).

Таблица 3

Качественный состав органического вещества в почвах природных и антропогенных ландшафтов Приморья
/ **Qualitative composition of organic matter in the soils of natural and anthropogenic landscapes of Primorye**

№ разреза	Почва	Горизонт	Состав органического вещества		
			Легкоокисляемое	Среднеокисляемое	Трудноокисляемое
			M±m		
1	Бурозем	AU	25 ±1,20	32 ±1,60	43 ±2,15
2	Бурозем	AU	28 ±1,40	32 ±1,50	40 ±2,00
3	Агротемногумусовый подбел	PU	21 ±1,00	32 ±1,60	47 ±2,30
4	Агротемногумусовая глеевая	PU	24 ±1,20	36 ±1,80	40 ±1,90
5	Эмбриозем инициальный	CI	14 ±0,70	32 ±1,50	54 ±2,70

Примечание. M±m, где M – среднее арифметическое; m – ошибка средней.

Доля ЛОЧ, позволяющая охарактеризовать качественный состав почвенного органического вещества, указывала на умеренную дренированность почв, при которой окислительные и элювиальные процессы уравновешены гумусообразованием. Доля ЛОЧ буроземов, сформированных под ольхой в средней части склона, более низкая (25 %) в связи с нахождением их в условиях хорошей дренированности, которые, судя по оценочным градиентам [6], приводят к преобладанию окислительных и элювиальных процессов.

В почвах агрогенно преобразованных ландшафтов (агротемногумусовые подбелы) в связи с усилением процессов минерализации органического вещества количество гумуса снизилось. Обогащенность гумуса азотом горизонта PU достигала средних значений (C:N=10.0). Это характерно для большинства почв пахотного фонда Приморья [13]. Длительное сельскохозяйственное использование почв привело к возрастанию доли трудноокисляемых соединений. Уменьшение доли ЛОЧ до 21 % указывало на нарушение процессов трансформации почвенного органического вещества и в данном случае свидетельствовало о снижении темпов новообразования гуминовых кислот.

В агротемногумусовых глеевых почвах с посевами костреца процесс новообразования гуминовых кислот, судя по данным ХДФ, несколько усилился. Доля ЛОЧ возросла с 21 до 24 %, а доля трудноокисляемых соединений снизилась с 47,0 до 40,0 %. На наш взгляд, это связано с усилением процессов минерализации трудноокисляемых фракций почвенного органического вещества в связи с активизацией процессов его трансформации микрофлорой. Обогащенность гумуса азотом соответствовала уровню средних значений.

Почвы техногенных ландшафтов (эмбриоземы инициальные) сформированы на отвальных породах рекультивируемых участков с низкими запасами надземной фитомассы, что существенно сдерживало поступление свежего органического вещества растительного происхождения и тормозило протекание процессов гумусообразования. Содержание гумуса было очень малое, а обогащенность гумуса азотом – низкая, что свойственно для эмбриоземов инициальных, сформированных на отвальных породах техногенных ландшафтов юга Дальнего Востока [20]. Согласно полученным данным ХДФ, в качественном составе органического вещества по сравнению с почвами природных и агрогенных ландшафтов значительно выше доля трудноокисляемых органических соединений (табл. 3). Связано это с более медленным процессом разложения органического вещества и накоплением растительных остатков. При этом доля ЛОЧ в составе почвенного органического вещества была очень низкой (14 %), что указывало на формирование почв в хороших условиях дренированности и преобладание в них окислительных условий.

Выводы

1. Использование метода ХДФ позволило установить различия в качественном составе органического вещества в почвах природных и антропогенно преобразованных ландшафтов. Судя по доле ЛОЧ в составе органического вещества наиболее низкие её показатели характерны для почв техногенных ландшафтов – эмбриоземов инициальных с очень малым содержанием гумуса и низкой обеспеченностью гумуса азотом. Формирование эмбриоземов происхо-

дило в условиях хорошей дренированности с преобладанием окислительной обстановки.

2. Более высокие показатели ЛОЧ (из-за значительного поступления органического вещества с опадом и подстилкой) свойственны почвам природных ландшафтов (буроземам) со средним содержанием гумуса. В буроземах окислительные и элювиальные процессы уравновешены гумусообразованием.

3. В почвах агрогенных ландшафтов (агротемно-гумусовые подбелы) с низким содержанием гумуса отмечено сокращение доли ЛОЧ и возрастание в составе почвенного органического вещества трудноокисляемой части. Некоторое возрастание ЛОЧ в агротемногумусовых глеевых почвах с посевами костреца связано, на наш взгляд, с усилением процессов трансформации органического вещества и его переходом из более трудноокисляемой в ЛОЧ.

4. Исходя из полученных данных о качественном составе органического вещества, определяемого методом ХДФ, следует, что почвы природных ландшафтов (буроземы), агрогенных (агротемногумусовые подбелы, агротемногумусовые глеевые) и техногенных ландшафтов (эмбриоземы инициальные) различались в основном по содержанию доли легко- и трудноокисляемого органического вещества. Все это свидетельствует о различиях в условиях формирования почв, протекании окислительных и гумусообразовательных процессов и складывающейся экологической обстановке.

Литература

1. Семенов В.М., Кравченко И.К., Иванникова Л.А., Кузнецова Т.В., Семенова Н.А., Гисперт М., Пардини Дж. Экспериментальное определение активного органического вещества в некоторых почвах природных и сельскохозяйственных экосистем // Почвоведение. 2006. № 3. С. 282–292.
2. Попов А.И., Чертов О.Г. Биогеоценотическая роль органического вещества почв // Вестн. С.-Петерб. ун-та. Сер. 3: Биология. 1996. Вып. 2. С. 88–97.
3. Кудяров В.Н. Роль почв в круговороте углерода // Почвоведение. 2005. № 8. С. 915–923.
4. Ковда В.А. Биомасса и гумусовая оболочка суши. Биосфера и её ресурсы. М.: Наука, 1974. С. 133–150.
5. Рукангатабара Хамуду. Сравнительная характеристика лабильных гумусовых веществ целинных почв: автореф. дис. ... канд. биол. наук. М.: МГУ, 2006. 18 с.
6. Попов А.И., Русаков А.В. Хемодеструкционное фракционирование органического вещества почв // Почвоведение. 2016. № 6. С. 663–670.

7. Дричко В.Ф., Бакина Л.Г., Орлова Н.Е. Устойчивая и лабильная части гумуса дерново-подзолистой почвы // Почвоведение. 2013. № 1. С. 41–47.

8. Козут Б.М., Булкина Л.Ю. Сравнительная оценка воспроизводимости методов определения лабильных форм гумуса черноземов // Почвоведение. 1987. № 4. С. 143–145.

9. Jankauskas B., Slepeliene A., Jankauskiene G., Fullen M.A., Booth C.F. A comparative study of analytical methodologies to determine the soil organic matter content of Lithuanian Eutric Albeluvisols // Geoderma. 2006. Vol. 136. P. 763–773.

10. Marriot E.E., Wander M. Qualitative and quantitative differences in particulate organic matter fractions in organic and conventional farming systems // Soil Biol. Biochemistry. 2006. Vol. 38, № 7. P. 1527–1536.

11. Marriott E.E., Wander M.M. Total and labile soil organic matter in organic and conventional farming systems // Soil Sci. Soc. Am. J. 2006. Vol. 70, № 3. P. 950–959.

12. Пат. РФ № 4921349(004478). Способ определения форм гумуса / Попов А.И., Цыпленков В.П. приоритет от 11.01.91, действует с 1994 г.

13. Хавкина Н.В. Гумусообразование и трансформация органического вещества в условиях переменного глеевого почвообразования. Владивосток: Изд-во ПГСХА, ДВО ДОП РАН, 2004. 270 с.

14. Пуртова Л.Н., Костенков Н.М. Содержание органического углерода и энергозапасы в почвах природных и агрогенных ландшафтов юга Дальнего Востока России. Владивосток: Дальнаука, 2009. 121 с.

15. Классификация и диагностика почв России. Смоленск: Ойкумена, 2004. 341 с.

16. Цыпленков В.П. Быстрый колориметрический метод определения содержания гумуса в почвах и почвенных растворах // Почвоведение. 1963. № 10. С. 91–95.

17. Орлов Д.С., Гришина Л.А. Практикум по химии гумуса: учеб. пособие. М.: Изд-во МГУ, 1981. 272 с.

18. Орлов Д.С., Бирюкова О.Н., Розанова М.С. Дополнительные показатели гумусного состояния почв и их генетических горизонтов // Почвоведение. 2004. № 8. С. 918–926.

19. Андроханов В.А., Куляпина Е.Д., Курачев В.М. Почвы техногенных ландшафтов: генезис и эволюция. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2004. 149 с.

20. Kostenkov N.M., Komachkova I.V., Purtova L.N. Soils of technogenic landscapes in the Far East: the Luchegorsk and Pavlovsk coal strip mines // Eurasian Soil Science. 2013. Vol. 46, No 11. P. 1049–1058.

References

1. Semenov V.M., Kravchenko I.K., Ivannikova L.A., Kuznetsova T.V., Semenova N.A., Gispert M., Pardini J. (2006). Experimental determination of active organic matter in some soils of natural and agricultural ecosystems.

Eurasian Soil Science, vol 39, No. 3, pp. 251-260. Doi 10.1134/S1064229306030033.

2. Popov A.I., Chertov O.G. (1996). Biogeocenotic role of soil organic matter. *Bulletin of St. Petersburg University. Ser. 3. Biology*, No. 2, pp. 88-97. (in Russian).

3. Kudeyarov V.N. (2005). The role of soils in the carbon cycle. *Eurasian Soil Science*, vol. 38, No. 8, pp. 808-815.

4. Kovda V.A. (1974). *Biomass and humus shell of land. Biosphere and its resources*. Moscow, Nauka Publ., pp. 133-150. (in Russian).

5. Rukangatabara Hamudu. (2006). *Comparative characteristics of labile humic substances of virgin soils*. Dissertation Thesis. Moscow, 18 p. (in Russian).

6. Popov A.I., Rusakov A.V. (2016). Chemodestructive fractionation of soil organic matter. *Eurasian Soil Science*, vol. 49, No. 6, pp. 606-612. Doi: 10.7868/S0032180X16060101.

7. Drichko V.F., Bakina L.G., Orlova N.E. (2013). Stable and labile parts of humus in sod-podzolic soil. *Eurasian Soil Science*, vol. 46 (1), No. 1, pp. 37-43. Doi 10.7868/S0032180X12110032.

8. Kogut B.M., Bulkina L.Yu. (1987). Comparative assessment of the reproducibility of methods for determining the labile forms of humus in chernozems. *Soil Science*, No. 4, pp. 143-145. (in Russian).

9. Jankauskas B., Slepeliene A., Jankauskiene G., Fullen M.A., Booth C.F. (2006). A comparative study of analytical methodologies to determine the soil organic matter content of Lithuanian Eutric Albeluvisols. *Geoderma*, vol. 136, pp. 763-773. Doi 10.1016/j.geoderma.2006.05015/.

10. Marriot E.E., Wander M. (2006). Qualitative and quantitative differences in particulate organic matter fractions in organic and conventional farming systems. *Soil Biol. Biochemistry*, vol. 38, No. 7, pp. 1527-1536. Doi 10.1016/j.soilbio. 2005.11.09.

11. Marriott E.E., Wander M.M. (2006). Total and labile soil organic matter in organic and conventional farming systems. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, vol. 70, No. 3, pp. 950-959. Doi 10.2136/sssaj 2005.0241.

12. Certificate, no. 4921349 (004478). The method for determining the forms of humus. A.I. Popov, V.P. Tsyplenkov. 11.01.91. (in Russian).

13. Khavkina N.V. (2004). *Humus formation and transformation of organic matter under conditions of variable gley soil formation*. Vladivostok, Primorskaya State Academy of Agriculture Press, FEB, RAS, 270 p. (in Russian).

14. Purtova L.N., Kostenkov N.M. (2009). *Organic carbon content and energy reserves in soils of natural and agrogenic landscapes in the south of the Russian Far East*. Vladivostok, Dal'nauka Publ., 121 p. (in Russian).

15. *Classification and diagnostics of soils in Russia*. (2004). Smolensk, Oikumena Publ., 341 p. (in Russian).

16. Tsyplenkov V.P. (1963). Rapid calorimetric method for determining the humus content in soils and soil solutions. *Soil Science*, No. 10, pp. 91-95. (in Russian).

17. Orlov D.S., Grishina L.A. (1981). *Practicum on humus chemistry*. Textbook manual. Moscow, Moscow State University Press, 272 p. (in Russian).

18. Orlov D.S., Biryukova O.N., Rozanova M.S. (2004). Revised system of the humus status parameters of soils and their genetic horizons. *Eurasian Soil Science*, vol. 37, No. 8, pp. 798-805.

19. Androkhonov V.A., Kulyapina E.D., Kurachev V.M. (2004). *Soils of technogenic landscapes: Genesis and evolution*. Novosibirsk, SB RAS Press, 149 p. (in Russian).

20. Kostenkov N.M., Komachkova I.V., Purtova L.N. (2013). Soils of technogenic landscapes in the Far East: the Luchegorsk and Pavlovsk coal strip mines. *Eurasian Soil Science*, vol. 46, No. 11, pp. 1049-1058. Doi 10.1134/S1064229313110057.

НАШИ ЮБИЛЯРЫ

OUR PERSONS

doi 10.18522/1026-2237-2021-3-117-120

СТЕФАН ГРИГОРЬЕВИЧ САМКО (к 80-летию со дня рождения)

STEFAN GRIGORIEVICH SAMKO (on the Occasion of His 80th Birthday)

Стефан Григорьевич Самко родился 28 марта 1941 г. в Ростове-на-Дону в семье преподавателей университета Григория Петровича и Валентины Степановны Самко.

После окончания средней школы № 1 г. Ростова-на-Дону в 1958 г. он поступил на физико-математический факультет Ростовского государственного университета (РГУ) (ныне Южный федеральный университет). Это было время интенсивного развития науки и подъема образования в РГУ, и ростовская математическая школа находилась под сильным влиянием исследований выдающегося отечественного математика проф. Ф.Д. Гахова и его учеников.

В 1964 г. Стефан Самко поступил в аспирантуру РГУ. После её окончания в 1967 г. он защитил диссертацию «Общее сингулярное уравнение и обобщенное уравнение Абеля», посвящённую исследованию разрешимости некоторых интегральных уравнений первого рода, таких как обобщенное интегральное уравнение Абеля, которое является примером оператора дробного порядка. На кафедре дифференциальных уравнений мехмата РГУ Стефан Григорьевич прошел путь от ассистента до профессора и заведующего кафедрой. За время работы он разработал и прочел ряд общих и специальных курсов, среди которых «Математический анализ», «Дифференциальные уравнения», «Уравнения математической физики», «Обобщенные функции», «Сферические гармоники», «Интерполяция линейных операторов». Судя по отзывам студентов, его лекции всегда были чрезвычайно увлекательными, материал излагался легко, но с

исключительной математической точностью формулировок и доказательств. В это же время продолжают научные исследования в духе развития тематики кандидатской диссертации, которые привели С.Г. Самко к исследованиям в области дробного исчисления, начиная с одномерной теории и затем к многомерным обобщениям.

Интерес к пространствам дробной гладкости соболевского типа, возникающим в многомерном дробном исчислении, сблизил Стефана Григорьевича с П.И. Лизоркиным из Математического института им. В.А. Стеклова РАН (МИАН), который существенно повлиял на его дальнейшие научные изыскания. С.Г. Самко принял активное участие в работе известного семинара в МИАН под руководством академика С.М. Никольского, а через некоторое время, в 1979 г., защитил в этом учреждении докторскую диссертацию «Методы обращения операторов типа потенциала и уравнения с инволютивными операторами». Диссертация С.Г. Самко посвящена разработке аппарата гиперсингулярных интегралов и исследованию соответствующих операторных уравнений. В ней он заложил основы нового направления исследований, связанного с дробным интегро-дифференцированием как в одномерном, так и в многомерном случаях.

Влияние С.Г. Самко на развитие области одномерного и многомерного дробного исчисления отражено в его монографии «Гиперсингулярные интегралы и их обобщения» (издание РГУ, 1984, переиздана за границей в 2001 г.) и книге энциклопедического типа «Дробные интегралы и производные», написанной совместно с проф. О.И. Мариче-

вым и проф. А.А. Килбасом (1993). Последняя книга уникальна, поскольку содержит практически все типы и конструкции дробного исчисления, известные со времен Эйлера и Лиувилля, и актуальную информацию в этой области, а также глубокий анализ истории развития и этапов теории.

Немало сил отдал С.Г. Самко работе со студентами и формированию коллектива сотрудников мехмата в родном университете. С 1979 по 1981 г. С.Г. Самко – декан механико-математического факультета Ростовского госуниверситета, а с 1989 по 1998 г. – заведующий кафедрой дифференциальных и интегральных уравнений РГУ, на которой им был организован семинар «Линейные операторы в функциональных пространствах», ставший одним из центров формирования научных кадров факультета. В 1981 г. ему присвоено ученое звание профессора. Огромны его заслуги в формировании кадров высшей квалификации на посту председателя диссертационного совета в РГУ (1980–2001).

С.Г. Самко сотрудничает со многими учеными во всем мире по различным математическим вопросам, исследуя задачи в новых областях. Он – хороший друг, сохранивший связи и отношения со своей страной и коллегами. Исследовательский тандем С.Г. Самко – Н.К. Карапетянц показал окружающим пример длительной искренней дружбы и плодотворной научной работы. Широко известны их совместные работы в области сингулярных интегральных уравнений с карлемановским сдвигом, а затем и с общим подходом к уравнениям с инволютивными операторами. Часть этих исследований опубликована в книге Н.К. Карапетянца, С.Г. Самко «Уравнения с инволютивными операторами и их приложения» (издание РГУ, 1988, переиздана за границей в 2000 г. издательством Birkhäuser под названием *Equations with Involution Operators*).

В 1994 г. С.Г. Самко начал работу в Университете Алгарве (г. Фаро, Португалия). Здесь продолжились его научные исследования, а огромный опыт и авторитет позволили ему стать президентом ученого совета математического факультета этого университета в 2003–2005 гг.

Стефан Григорьевич Самко – один из ведущих ученых мира в области дробного исчисления и его приложений. Он был председателем международного программного комитета I семинара «Дробное дифференцирование и его приложения – 2004» (*Workshop on Fractional Differentiation and its Applications*), Бордо, Франция, 19–21 июля 2004 г., и почетным председателем международного программного комитета II семинара «Дробное диффе-

ренцирование и его приложения – 2006», Порту, Португалия, 19–21 июля 2006 г.

Отметим также короткое, но важное сотрудничество С.Г. Самко с проф. Б. Россом, сложившееся в то время, когда Стефан Григорьевич был профессором Фулбрайта в Университете Нью-Хейвена, США. Одним из прорывных результатов в области дробного исчисления, полученным вместе с проф. Э.-Р. Лавом и Б. Россом, стал аналог примера Вейерштрасса. Построен пример функции, имеющей в каждой точке дробные производные порядка меньше единицы, но нигде не имеющей первой производной. Также С.Г. Самко и Б. Росс ввели и изучили дробные интегралы типа Римана – Лиувилля переменного порядка, что можно рассматривать как первые шаги в важнейшей для него в последние два десятилетия области исследований.

С.Г. Самко является одним из пионеров в области анализа переменных показателей: ему, его последователям и ученикам удалось получить здесь ряд важных результатов. Например, он доказал теорему Соболева в пространствах Лебега с переменным показателем (1998) и показал плотность гладких функций в пространствах Соболева с переменным показателем (1999).

Его интересы в этой современной области исследований связаны с изучением операторов гармонического анализа в различных общих пространствах функций с нестандартным ростом. Это включает исследования операторов в пространствах Лебега, Гёльдера, Соболева с переменным показателем, в пространствах Лоренца, Орлича, типа Морри и Кампанато и многих других, а также сингулярных интегралов и сингулярных интегральных уравнений в таких пространствах, изучение потенциалов Рисса и Бесселя, максимальных и дробных операторов, других классических операторов гармонического анализа. Существенная часть последних исследований С.Г. Самко в области нестандартных пространств и интегральных операторов в них отражена в вышедшей в 2016 г. двухтомной монографии, написанной С.Г. Самко совместно с В. Кокилашвили, А. Месхи и Х. Рафайро: *Integral operators in non-standard function spaces, vol. 1: Variable exponent Lebesgue and Amalgam Spaces* и *Integral operators in non-standard function spaces, vol 2: Variable Exponent Hölder, Morrey-Campanato and Grand Spaces*.

Научные интересы С.Г. Самко очень широки, он постоянно открывает новые области исследований. Его недавние работы были посвящены теории функций и операторов в комплексном анализе, а общие энциклопедические знания и навыки всегда

позволяют ему рассматривать проблему с новой точки зрения и находить нестандартные подходы и решения.

С.Г. Самко воспитал множество учеников и последователей и создал научную школу мирового масштаба. Он являлся научным руководителем большого числа кандидатских, PhD и докторских диссертаций, его ученики сейчас успешно реализуют себя в разных странах мира. Стефан Григорьевич продолжает работать и поддерживать с ними отношения, делясь знаниями и бесценным опытом.

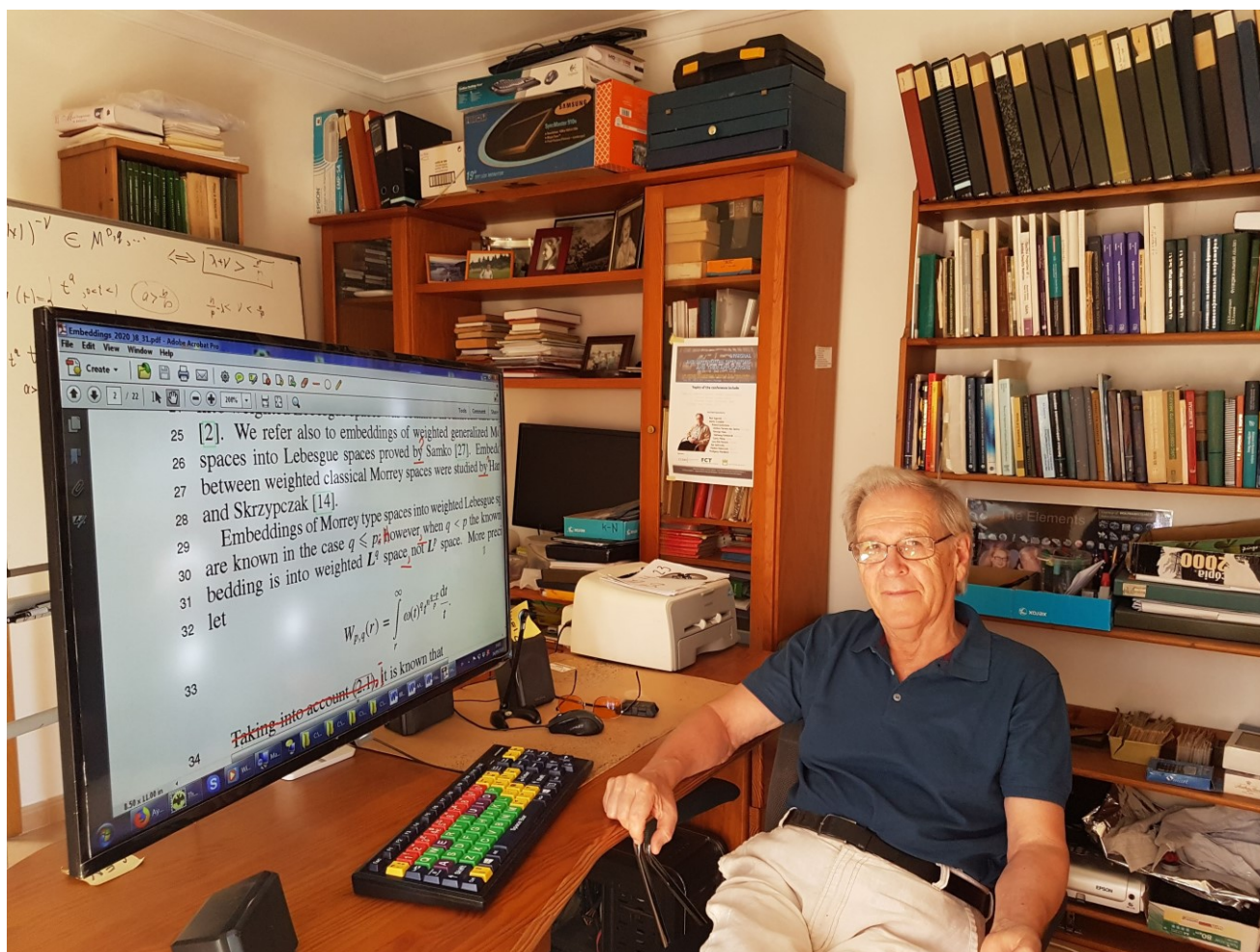
Стефан Григорьевич – прекрасный собеседник, рассказчик и ценитель тонкого юмора.

Он – автор более 300 научных работ и 6 монографий. С 1978 г. он состоит в числе организаторов конференций в России (СССР – до 1991 г.), США, Японии, Франции, Италии, Турции, Великобритании, Португалии и Бразилии; является членом редколлегий 13 международных научных журналов;

координатор нескольких крупных российских и европейских грантов в области математики, в том числе проекта INTAS, который объединил четыре группы исследователей из Финляндии, Португалии, Грузии, Азербайджана.

23–26 августа 2021 г. в Южном федеральном университете состоялась Международная научная конференция «Современные методы и проблемы теории операторов и гармонического анализа, и их приложения – X (ОТНА-2021)», посвященная 80-летию юбилею С.Г. Самко (<http://otha.sfedu.ru/conf2021/>).

Конференция ОТНА-2021 была организована Региональным научно-образовательным математическим центром ЮФУ (<https://rmc.sfedu.ru/>) при содействии Института математики, механики и компьютерных наук (<http://www.mmcs.sfedu.ru/>) и научной группы ISAAC-ОТНА (<http://otha.sfedu.ru/isaac/>) и проходила преимущественно в очном формате с ограниченным числом онлайн-лекций.



Тематика серии международных конференций ОТНА связана с различными областями фундаментальной математики: аспектами гармонического анализа и теории операторов, теории аппроксимаций, теории уравнений в частных производных, математическим моделированием в естественных науках и их приложениями. В течение работы конференции, кроме пленарных заседаний, работали три секции: анализа, дифференциальных уравнений и математической физики, вероятностно-аналитических моделей и методов. Программа конференции включала в себя доклады десятков математиков из Австрии, Армении, Беларуси, Болгарии, Израиля, Италии, Испании, Мексики, ОАЭ, Польши, Португалии, России, Японии.

В рамках работы конференции было проведено еще несколько мероприятий:

1. Ежегодная торжественная церемония вручения премии Международного математического общества ISAAC для молодых ученых.

2. Презентация научного журнала Journal of Mathematical Sciences издательства «Шпрингер». Презентацию провели ответственный редактор по математике и прикладным наукам издательства Birkhäuser/Springer К. Хайне и главный редактор журнала д.ф.-м.н., проф. А.Н. Карапетянц.

3. Презентация книги проф. Х.Р. Малонека (Португалия) и проф. Я.М. Ерусалимского (ЮФУ) «Эта “простая” и “красивая” математика».

М.И. Карякин, А.Н. Карапетянц, А.О. Ватульян

Редакция журнала от имени всех коллег и друзей, учеников, сотрудников мехмата ЮФУ желает Стефану Григорьевичу дальнейших блестящих достижений в математике, крепкого здоровья и благополучия, успехов в начинаниях и талантливых учеников!

**НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
«ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ.
СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ РЕГИОН. ЕСТЕСТВЕННЫЕ НАУКИ»**

Рецензируемый журнал «Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки» продолжает приём работ. Он имеет статус центрального издания и включён в перечень ВАК по следующим отраслям:

- физико-математические науки (математика, механика);
- науки о Земле.

Принимаются работы и по другим отраслям науки. Также печатаются материалы в разделах «Заметки о книгах», «Научная жизнь», «Штрихи к портрету».

Журнал издается с периодичностью 4 номера в год. С электронной версией можно ознакомиться на сайте Научной электронной библиотеки http://elibrary.ru/title_about.asp?id=7362. Опубликованные статьи индексируются в российских и международных электронных библиотеках и наукометрических базах данных: РИНЦ (RSCI), РУКОНТ, «Киберленинка», ЭБС «Университетская библиотека онлайн», Ulrich, EBSCO, Chemical Abstracts. Журнал включен в Russian Science Citation Index на платформе Web of Science.

Авторы, сохраняя за собой авторские права на работу и передавая журналу «Известия вузов. Северо-Кавказский регион» право первой публикации, автоматически принимают на себя обязательство не печатать её ни полностью, ни частично в каком-либо издании без указания ссылки на оригинальную публикацию в этом журнале.

Издательские услуги оплачиваются организацией или автором после утверждения статьи на редколлегии.

Оформление работ осуществляется согласно правилам:

1. Представляется статья в электронном виде. Перед заголовком указать индекс УДК.
2. Текст должен быть набран в редакторе Microsoft Office Word 2000, 2003, 2007, 2010, 2016 через 1,5 интервала, шрифтом Times New Roman, размером 14 пт, страницы пронумерованы.
3. Сопроводительное или рекомендательное письмо, если статья представляется от организации. Экспертное заключение.
4. Полное название организации и ее адрес на русском и английском языках.
5. Сведения об авторах с указанием адреса, по которому будет вестись переписка, на русском и английском языках.
6. Название статьи и фамилии авторов на русском и английском языках.
7. Аннотация на русском и английском языках (1000–1500 знаков / 150–200 слов).
8. Ключевые слова на русском и английском языках (8–10 слов).

Журнал распространяется по подписке через объединённый каталог «Пресса России», интернет-каталог «Пресса по подписке». Подписной индекс – 70415 (подписка на полугодие). В неподписной период отдельные номера журнала за нынешний и прошлые годы можно приобрести в редакции.

Адрес для переписки: 344006, г. Ростов-на-Дону, ул. Б. Садовая, 105/42, ЮФУ, редакция журнала «Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки».

Тел./факс главной редакции (863) 218-40-00, добавочный 11-093, 11-094.

E-mail: izvestiya@sfedu.ru

Адрес в Интернете: www.izvestiya.sfedu.ru