

ИЗВЕСТИЯ
ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

*Северо-Кавказский
регион*

ЕСТЕСТВЕННЫЕ

НАУКИ

2017

2

Журнал основан в 1972 г. Ю.А. Ждановым

Главная редакция:

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

Редакционная коллегия:

В.И. Колесников – главный редактор, академик РАН, доктор техн. наук, профессор, Ростовский государственный университет путей сообщения, Россия
В.Е. Закруткин – председатель редколлегии, доктор геол.-мин. наук, профессор, Южный федеральный университет, Россия
В.А. Бабешко – академик РАН, доктор физ.-мат. наук, профессор, Кубанский государственный университет, Россия
Б.С. Карамурзов – доктор техн. наук, профессор, Кабардино-Балкарский государственный университет, Россия
Ю.Ф. Коробейник – доктор физ.-мат. наук, профессор, Южный федеральный университет, Россия
А.Г. Кусраев – доктор физ.-мат. наук, профессор, Южный математический институт ВНИЦ РАН, Россия
В.Г. Лобанов – доктор техн. наук, профессор, Кубанский государственный технологический университет, Россия
Г.Г. Матишов – академик РАН, доктор геол.-мин. наук, профессор, Южный научный центр РАН, Россия
В.И. Минкин – академик РАН, доктор хим. наук, профессор, Южный федеральный университет, Россия
М.Х. Рабаданов – доктор физ.-мат. наук, профессор, Дагестанский государственный университет, Россия
Э.З. Эмирбеков – доктор биол. наук, профессор, Южный федеральный университет, Россия
В.Н. Труфанов – зам. председателя редколлегии, доктор геол.-мин. наук, профессор, Южный федеральный университет, Россия
А.В. Абанин – доктор физ.-мат. наук, профессор, Южный федеральный университет, Россия
О.С. Безуглова – доктор биол. наук, профессор, Южный федеральный университет, Россия
Н.И. Бойко – доктор геол.-мин. наук, профессор, Южный федеральный университет, Россия
А.В. Бочкарев – доктор геол.-мин. наук, профессор, Российский государственный университет нефти и газа им. И.М. Губкина, Россия
В.В. Внуков – доктор биол. наук, профессор, Южный федеральный университет, Россия
Л.С. Ворович – кандидат физ.-мат. наук, доцент, Южный федеральный университет, Россия
О.Н. Демина – доктор биол. наук, профессор, Карачаево-Черкесский государственный университет, Россия
А.Г. Захаров – доктор техн. наук, профессор, Южный федеральный университет, Россия
Я.М. Ерусалимский – зам. председателя редколлегии, кандидат физ.-мат. наук, доктор техн. наук, профессор, Южный федеральный университет, Россия
М.И. Карякин – доктор физ.-мат. наук, доцент, Южный федеральный университет, Россия
С.Б. Климентов – доктор физ.-мат. наук, профессор, Южный федеральный университет, Россия
С.И. Колесников – кандидат геогр. наук, доктор с.-х. наук, профессор, Южный федеральный университет, Россия
Г.В. Куповых – доктор физ.-мат. наук, профессор, Южный федеральный университет, Россия
С.В. Курбатов – доктор хим. наук, профессор, Южный федеральный университет, Россия
А.М. Лерер – доктор физ.-мат. наук, профессор, Южный федеральный университет, Россия
В.А. Миноранский – доктор с.-х. наук, профессор, Южный федеральный университет, Россия
В.В. Онищенко – доктор геогр. наук, профессор, Карачаево-Черкесский государственный университет, Россия
О.В. Назаренко – кандидат геогр. наук, доцент, Южный федеральный университет, Россия
Г.В. Пироговская – доктор с.-х. наук, профессор, Институт почвоведения и агрохимии НАН РБ, Белоруссия
В.С. Рабинович – доктор физ.-мат. наук, профессор, Национальный политехнический институт, Мексика
А.К. Сагателян – доктор геол.-мин. наук, Центр эколого-ноосферных исследований НАН РА, Армения
Э.С. Сианисян – доктор геол.-мин. наук, профессор, Южный федеральный университет, Россия
Ю.А. Устинов – доктор физ.-мат. наук, профессор, Южный федеральный университет, Россия
П. Фатгаль – доктор наук, профессор, Университет Нанта, Франция
Ю.А. Федоров – доктор геогр. наук, профессор, Южный федеральный университет, Россия
А.Д. Хованский – кандидат геол.-мин. наук, доктор геогр. наук, профессор, Южный федеральный университет, Россия
С.П. Чернышева – кандидат физ.-мат. наук, доцент Южный федеральный университет, Россия

Учредители:

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

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

Подписано в печать 22.06.2017. Выход в свет 26.06.2017. Формат 60×84 1/8. Бумага офсетная.

Шрифт Times. Усл. печ. л. 16,97. Уч.-изд. л. 18,48. Тираж 250 экз. Заказ № 5840

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

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

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

Journal was founded in 1972 by Yu.A. Zhdanov

Main Edition:

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

Editorial Board:

V.I. Kolesnikov - Editor-in-Chief, Academician, Russian Academy of Sciences, Doctor of Technical Sciences, Professor, Rostov State Transport University, Russia
V.E. Zakrutkin - Chair of the Editorial Board, Doctor of Geology and Mineralogy, Professor, Southern Federal University, Russia
V.A. Babeshko - Academician, Russian Academy of Sciences, Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Kuban State University, Russia
B.S. Karamurzov - Doctor of Technical Sciences, Professor, Kabardino-Balkarian State University, Russia
Yu.F. Korobeinik - Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Southern Federal University, Russia
A.G. Kusraev - Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Southern Mathematical Institute, Vladikavkaz Scientific Center, Russian Academy of Sciences, Russia
V.G. Lobanov - Doctor of Technical Sciences, Professor, Kuban State Technological University, Russia
G.G. Matishov - Academician, Russian Academy of Sciences, Doctor of Geology and Mineralogy, Professor, Southern Scientific Center, Russian Academy of Sciences, Russia
V.I. Minkin - Academician, Russian Academy of Sciences, Doctor of Chemistry, Professor, Southern Federal University, Russia
M.H. Rabadanov - Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Dagestan State University, Russia
E.Z. Emirbekov - Doctor of Biology, Professor, Southern Federal University, Russia
V.N. Trufanov - Deputy Chair of the Editorial Board, Doctor of Geology and Mineralogy, Professor, Southern Federal University, Russia
A.V. Abanin - Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Southern Federal University, Russia
O.S. Bezuglova - Doctor of Biology, Professor, Southern Federal University, Russia
N.I. Boiko - Doctor of Geology and Mineralogy, Professor, Southern Federal University, Russia
A.V. Bochkarev - Doctor of Geology and Mineralogy, Professor, Gubkin Russian State University of Oil and Gas, Russia
V.V. Vnukov - Doctor of Biology, Professor, Southern Federal University, Russia
L.S. Vorovich - Candidate of Physics and Mathematics, Associate Professor, Southern Federal University, Russia
O.N. Dyomina - Doctor of Biology, Professor, Karachay-Cherkess State University, Russia
A.G. Zakharov - Doctor of Technical Sciences, Professor, Southern Federal University, Russia
Ya.M. Erusalimsky - Deputy Chair of the Editorial Board, Candidate of Physics and Mathematics, Doctor of Technical Sciences, Professor, Southern Federal University, Russia
M.I. Karjakin - Doctor of Physics and Mathematics, Associate Professor, Southern Federal University, Russia
S.B. Klimentov - Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Southern Federal University, Russia
S.I. Kolesnikov - Candidate of Geography, Doctor of Agricultural Science, Professor, Southern Federal University, Russia
G.V. Kupovykh - Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Southern Federal University, Russia
S.V. Kurbatov - Doctor of Chemistry, Professor, Southern Federal University, Russia
A.M. Lerer - Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Southern Federal University, Russia
V.A. Minoranskiy - Doctor of Agricultural Science, Professor, Southern Federal University, Russia
V.V. Onishchenko - Doctor of Geography, Professor, Karachay-Cherkess State University, Russia
O.V. Nazarenko - Candidate of Geography, Associate Professor, Southern Federal University, Russia
G.V. Pirogovskaya - Doctor of Agricultural Science, Professor, Institute of Soil Science and Agrochemistry, National Academy of Sciences of Belarus, Belarus
V.S. Rabinovich - Doctor of Physics and Mathematics, Professor, National Polytechnic Institute, Mexico
A.K. Saghatelyan - Doctor of Geology and Mineralogy, Center for Ecological and Noospheric Studies, National Academy of Sciences of Armenia, Armenia
E.S. Sianisyan - Doctor of Geology and Mineralogy, Professor, Southern Federal University, Russia
Yu.A. Ustinov - Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Southern Federal University, Russia
P. Fattal - PhD, Professor, University of Nantes, France
Yu.A. Fedorov - Doctor of Geography, Professor, Southern Federal University, Russia
A.D. Khovanskiy - Candidate of Geology and Mineralogy, Doctor of Geography, Professor, Southern Federal University, Russia
S.P. Chernysheva - Candidate of Physics and Mathematics, Southern Federal University, Russia

The Founders

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

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

Signed print 22.06.2017. The publication 26.06.2017. Format 60×84 1/8. Offset paper. Font Times.
Conv. print. sheets 16,97. Publ. sign. 18,48. Edition 250 copies. Order number 5840.

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

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

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

ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ РЕГИОН

IZVESTIYA VUZOV. SEVERO-KAVKAZSKII REGION

DOI 10.23683/0321-3005-2017-2

Регистрационный номер 011019
Комитета Российской Федерации по печати
Научно-образовательный и прикладной журнал
Издается с 1973 г.
Периодичность серии 4 номера в год
№ 2 (194) 2017 г.

Reg. No. 011019
Of the Committee of the Press of the Russian Federation
Scientifically educational and applied magazine
Was founded in 1973.
Period is 4 numbers per a year
No. 2 (194) 2017.

ЕСТЕСТВЕННЫЕ НАУКИ

NATURAL SCIENCE

СОДЕРЖАНИЕ

CONTENTS

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ

PHYSICAL AND MATHEMATICAL SCIENCES

- Ватульян А.О., Гусаков Д.В.* Исследование волновых процессов в неоднородном пористоупругом слое.....4
Золотов Н.Б., Пожарская Е.Д., Пожарский Д.А. К контактному задаче для цилиндра12
Коханенко В.Н., Кондратенко А.И., Косиченко М.Ю., Лидневский В.И., Келехсаев Д.Б. Решение задачи свободного растекания потока за безнапорными водопропускными отверстиями15
Хубежты Ш.С., Бесаева З.В. Приближенное решение сингулярного интегрального уравнения, не ограниченное на концах интегрирования, с применением рядов Чебышева.....26
Чебаков М.И., Данильченко С.А., Ляпин А.А. Контактная задача для упругого параллелепипеда при наличии трения и износа.....32

- Vatulyan A.O., Gusakov D.V.* Investigation of Wave Processes in an Inhomogeneous Porous Elastic Layer4
Zolotov N.B., Pozharskaya E.D., Pozharskii D.A. To Contact Problems for a Cylinder12
Kokhanenko V.N., Kondratenko A.I., Kosichenko M.Yu., Lidnevsky V.I., Kelekhsayev D.B. The Solution of the Problem of Free Spreading of the Water Stream Behind the Open Water Pipe.....15
Khubezhty Sh.S., Besaeva Z.V. Approximate Solution of Singular Integral Equations on the End of Unlimited Integration of Chebyshev Series.....26
Chebakov M.I., Danilchenko S.A., Lyapin A.A. Contact Problem for Elastic Block Taking into Account Friction and Wear32

БИОЛОГИЧЕСКИЕ НАУКИ

BIOLOGICAL SCIENCES

- Демина О.Н., Борлакова Ф.М., Узденов И.Р., Дмитриев П.А., Рогаль Л.Л.* Закономерности распределения травяной растительности Скалистого хребта38
Залибеков З.Г., Гамзатова Х.М. Типы опустынивания почв и критерии оценки деградационных процессов.....50
Колесников С.И., Дульцев А.Н., Вернигорова Н.А., Казеев К.Ш., Акименко Ю.В., Тер-Мисакянц Т.А. Биодиагностика устойчивости рисовых почв Кубани к химическому загрязнению57

- Demina O.N., Borlakova F.M., Uzdenov I.R., Dmitriev P.A., Rogal L.L.* Regularities of Distribution of Rocky Ridge Grassland Vegetation.....38
Zalibekov Z.G., Gamzatova H.M. The Types of Desertification of Soils and Criteria for the Evaluation of Degradation Processes50
Kolesnikov S.I., Dultsev A.N., Vernigorova N.A., Kazeev K.Sh., Akimenko Yu.V., Ter-Misakyants T.A. Biodiagnostics of Stability of Kuban's Rice Soils to Chemical Pollution57

Мамедова А.Д., Алиев Р.Т. Изменение содержания РНК и структурного состояния ДНК при засолении у сортообразцов хлопчатника вида *G. barbadense* L., отличающихся различной степенью устойчивости к стрессу 63

Мокриков Г.В., Казеев К.Ш., Акименко Ю.В., Колесников С.И. Влияние технологии прямого посева на эколого-биологические свойства чернозёмов 68

Mamedova A.D., Aliyev R.T. Changes in the Content of RNA and Structural State of the DNA Under Salinity in Variety Accessions of *G. barbadense* L. with the Different Level of Resistance to Stress 63

Mokrikov G.V., Kazeev K.Sh., Akimenko Yu.V., Kolesnikov S.I. Influence of No-Till on Ecological and Biological Properties of Chernozems 68

НАУКИ О ЗЕМЛЕ

SCIENCE OF EARTH

Бабаян Г.Г., Закруткин В.Е., Решетняк О.С., Саакян Г.А. Гидрохимические особенности рек Армении в зависимости от высотной зональности ландшафтов и типов природопользования в их бассейнах 75

Власова А.Н. Методические подходы к ландшафтному планированию бассейна р. Салгир 84

Гамов М.И., Гордеев И.В. Основные факторы и экологические последствия самовозгорания отвалов угольных шахт Восточного Донбасса 92

Закруткин В.Е., Решетняк О.С., Бабаян Г.Г., Гибков Е.В., Саакян Г.А., Решетняк В.Н. Современный химический состав и тенденции пространственно-временной изменчивости качества речных вод Восточного Донбасса 101

Лещук С.И., Суркова И.В., Сенкевич Н.В. Взаимосвязь загрязнения окружающей среды и экологически обусловленной заболеваемости населения на территории техногенного загрязнения 110

Кошовский Т.С., Ткаченко О.В., Ткаченко А.Н., Цибарт А.С., Лычагин М.Ю. Полициклические ароматические углеводороды в аквадных ландшафтах дельты реки Дон в зимний период 118

Куранов Ю.В., Шарафутдинов В.Ф., Калабин В.В., Сианисян Э.С., Шлыгин Д.А. Особенности формирования залежей углеводородов и перспективы нефтегазности мезозойского комплекса вала Карпинского и Восточно-Маньчского прогиба в Республике Калмыкия 128

Мартышева Н.А., Хоружая Т.А. Особенности «цветения» воды Цимлянского водохранилища синезелёными микроводорослями 136

Babayan G.G., Zakrutkin V.E., Reshetnyak O.S., Sahakyan G.A. Hydrochemical Features of the Rivers of Armenia Depending on the Altitudinal Zonality of Landscapes and Types of Nature Use in Their Basins 75

Vlasova A.N. Methodological Approaches to Landscape Planning of Salgir River Basin 84

Gamov M.I., Gordeev I.V. The Main Factors and Ecological Effects of Spontaneous Combustion of Coal Mine Waste Dumps of the Eastern Donbass 92

Zakrutkin V.E., Reshetnyak O.S., Babayan G.G., Gibkov E.V., Sahakyan G.A., Reshetnyak V.N. Modern Chemical Composition and Trends of Spatial-Temporal Variability of the Water Quality of the Eastern Donbass Rivers 101

Leshchuk S.I., Surkova I.V., Senkevich N.V. Interrelation of Environmental Pollution and Environmentally Caused Morbidity in the Territory of Technogenic Pollution 110

Koshovskii T.S., Tkachenko O.V., Tkachenko A.N., Tsibart A.S., Lychagin M.Yu. Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Aquatic Landscapes of the Don River Delta in Winter 118

Kuranov Yu.V., Sharafutdinov V.F., Kalabin V.V., Sianisyan E.S., Shlygin D.A. The Features of Forming of Hydrocarbon Reservoirs and Petroleum Prospects of the Mesozoic Deposits of Karpinsky Ridge and East-Manych Trough in the Republic of Kalmykia 128

Martyshева N.A., Khoruzhaya T.A. Features of Water «Flowering» of Blue-Green Algae in Tsimlyansk Reservoir 136

НАУЧНАЯ ЖИЗНЬ

SCIENTIFIC LIFE

Авсянкин О.Г. VII Международная конференция «Современные методы и проблемы теории операторов и гармонического анализа и их приложения», посвященная памяти Н.К. Карапетянца (Ростов-на-Дону, 23–28 апреля 2017 г.) 142

Avsjankin O.G. VII International Conference «Modern Methods and Problems of Operator Theory and Harmonic Analysis and Their Applications» Dedicated to the Memory of N.K. Karapetjants (Rostov-on-Don, April 23–28, 2017) 142

НАШИ ЮБИЛЯРЫ

OUR PERSONS

Штейнберг Б.Я. Юбилей Якова Михайловича Ерусалимского (70 лет со дня рождения) 144

Steinberg B.Ya. Yakov Michailovich Erusalimsky (To the 70th Anniversary) 144

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ
PHYSICAL AND MATHEMATICAL SCIENCES

УДК 539.3

DOI 10.23683/0321-3005-2017-2-4-11

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЛНОВЫХ ПРОЦЕССОВ
В НЕОДНОРОДНОМ ПОРИСТОУПРУГОМ СЛОЕ***

© 2017 г. А.О. Ватульян^{1,2}, Д.В. Гусаков¹

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

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

**INVESTIGATION OF WAVE PROCESSES
IN AN INHOMOGENEOUS POROELASTIC LAYER**

A.O. Vatulyan^{1,2}, D.V. Gusakov¹

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

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

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

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

Гусаков Дмитрий Владимирович – аспирант, кафедра теории упругости, Институт математики, механики и компьютерных наук им. И.И. Воровича, Южный федеральный университет, ул. Мильчакова, 8а, г. Ростов-на-Дону, 344090, Россия, e-mail: gusakov.dv@yandex.ru

Dmitriy V. Gusakov – Postgraduate, Department of Elasticity Theory, Vorovich Institute of Mathematics, Mechanics and Computer Sciences, Southern Federal University, Milchakova St., 8a, Rostov-on-Don, 344090, Russia, e-mail: gusakov.dv@yandex.ru

Представлен метод исследования волновых полей в неоднородном пористоупругом слое из трансверсально-изотропного материала. Характеристики слоя считаются переменными по толщине. Для описания пористоупругого материала выбрана модель М.А. Био. К основным уравнениям, записанным в терминах «перемещения-давление», применяется интегральное преобразование Фурье. Решения преобразованной задачи строятся при помощи метода пристрелки. Обращение преобразования Фурье осуществлено численно и при помощи теории вычетов. В качестве вспомогательных задач исследована структура дисперсионного множества рассмотренной задачи и построены поля перемещений для упругого слоя с идентичными характеристиками. Проведен сравнительный анализ упругой и пористоупругой задач. Получены оценки относительной точности двух способов обращения преобразования. Исследовано влияние закона распределения материальных характеристик слоя на картину дисперсионного множества и полей смещений для пористоупругого слоя.

Ключевые слова: пористоупругость, колебания, слой, теория Био, теория вычетов, численный анализ.

* Работа выполнена при частичной поддержке программы фундаментальных исследований по стратегическим направлениям развития науки Президиума РАН «Фундаментальные проблемы математического моделирования».

A method for investigating wave fields in an inhomogeneous poroelastic layer of a transversely isotropic material is presented. The characteristics of the layer are considered to vary over thickness. To describe the poroelastic material, the model by M.A. Biot was chosen. The integral Fourier transform is applied to the basic equations written in terms of "displacement - pressure". The solutions of the transformed problem are constructed using the shooting method. The inversion of the Fourier transform performed numerically and using of the theory of residues. As auxiliary problems, the structure of the dispersion set of the considered problem is investigated and the displacement fields for an elastic layer with identical characteristics are constructed. A comparative analysis of the elastic and poroelastic problems is carried out. Estimates of the relative accuracy of the two methods of inversion of the transformation are obtained. The effect of the distribution law of the material characteristics of the layer on the dispersion set and displacement fields for the poroelastic layer is investigated.

Keywords: poroelasticity, vibrations, layer, Biot's theory, theory of residues, numerical analysis.

Введение

Расчет волновых полей, возникающих в протяженных твердых структурах, играет важную роль в оценке влияния материальных параметров на скорости и коэффициенты затухания. Данные о полях смещений в случае вынужденных колебаний слоя могут быть использованы для решения задач о восстановлении материальных характеристик. Исследование динамики протяженных волноводов берет свое начало в работах Рэлея [1] и Лэмба [2]. Ими были впервые получены выражения динамических характеристик для упругого однородного слоя, а также исследована структура дисперсионного множества для такого волновода. Результаты, полученные Рэлеем, Лэмбом и их последователями, стали основой для дальнейшего изучения динамического поведения упругих структур. Основные результаты развития теории колебаний упругих волноводов и примеры решения классических задач для них приведены в монографии [3].

Модель упругого материала может с различной степенью точности описывать поведение многих конструкционных материалов искусственного и естественного происхождения. Современные требования к точности расчета динамических характеристик зачастую приводят к ситуации, когда модели упругих материалов становятся неприменимы. В такой ситуации на первый план выходит вопрос о применении более точных и, как следствие, более сложных с математической точки зрения подходов. Теория пористоупругости, разработанная М. Био [4, 5], позволяющая учесть взаимодействие твердой и жидкой фаз в насыщенном жидкостью пористом материале, находит свое применение в подобных ситуациях. Наличие связующих слагаемых в определяющих соотношениях модели Био значительно повышает точность описания динамики пористоупругих тел и позволяет учесть диссипативную структуру возникающих волновых полей. Спектр применимости моделей пористоупругости достаточно широк и охватывает различные сферы – от геофизики [6, 7] до биомеханики [8, 9]. Основными направлениями в исследованиях пористоупругости

являются задачи об исследовании динамических свойств пористоупругих тел [10] и обратные задачи о восстановлении различных параметров [11].

В современной механике все чаще возникает потребность в учете неоднородных свойств материалов. Такой подход позволяет точнее оценить несущую способность и, как следствие, уменьшить массу и габаритные размеры конструкций и тел, изготовленных из таких материалов. Однако учет переменных характеристик материалов значительно усложняет процесс расчета полевых характеристик и делает невозможным построение точного аналитического решения в случае произвольного вида неоднородности. Во многих исследованиях для преодоления этой трудности авторы предпочитают рассматривать некоторый конкретный вид неоднородности, как, например, кусочно-постоянная [12] или линейная [13]. Такой подход позволяет получить аналитические решения, но только для некоторого ограниченного набора функций неоднородности.

В настоящей статье представлен метод построения волновых полей для неоднородного по толщине пористоупругого слоя из трансверсально-изотропного материала. Предложенный подход позволяет с единых позиций исследовать различные законы неоднородности, включая непрерывные и кусочно-постоянные. Такие законы неоднородности характерны для функционально-градиентных и слоистых материалов. К исходным уравнениям, записанным в терминах «перемещения – давление» [14], применено интегральное преобразование Фурье. В соответствии с методом пристрелки численно строятся решения вспомогательных задач Коши. Построение оригиналов решений осуществляется двумя способами: прямым численным интегрированием по формулам Филона [15] и при помощи теории вычетов. Применение теории вычетов требует информации о расположении особых точек подынтегральной функции. Для отыскания этих точек проведен спектральный анализ задачи о колебаниях неоднородного пористоупругого слоя. Приведено сравнение результатов работы двух методов путем построения полей смещений на верх-

ней границе слоя. Исследована зависимость структуры волновых полей от закона распределения материальных характеристик слоя. Проведена оценка точности и быстродействия предложенных вычислительных схем.

Постановка задачи

Рассмотрим колебания бесконечного трансверсально-изотропного пористоупругого слоя толщиной H , находящегося в состоянии плоской деформации. Уравнения движения и определяющие соотношения пористоупругости Био запишем в следующем виде [14]:

$$\begin{aligned} \sigma_{11} &= C_{11} \frac{\partial u_1}{\partial x_1} + C_{13} \frac{\partial u_3}{\partial x_3} - A_{11} p, \\ \sigma_{33} &= C_{13} \frac{\partial u_1}{\partial x_1} + C_{33} \frac{\partial u_3}{\partial x_3} - A_{33} p, \quad \sigma_{13} = C_{55} \left(\frac{\partial u_1}{\partial x_3} + \frac{\partial u_3}{\partial x_1} \right), \\ \frac{\partial \sigma_{11}}{\partial x_1} + \frac{\partial \sigma_{13}}{\partial x_3} &= \rho \frac{\partial^2 u_1}{\partial t^2}, \quad \frac{\partial \sigma_{13}}{\partial x_1} + \frac{\partial \sigma_{33}}{\partial x_3} = \rho \frac{\partial^2 u_3}{\partial t^2}, \\ \frac{\partial}{\partial x_1} \left(K_{11} \frac{\partial p}{\partial x_1} \right) + \frac{\partial}{\partial x_3} \left(K_{33} \frac{\partial p}{\partial x_3} \right) + \\ &+ \frac{\partial}{\partial t} \left(A_{11} \frac{\partial u_1}{\partial x_1} + A_{33} \frac{\partial u_3}{\partial x_3} \right) + \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\varphi^2}{R} p \right) = 0. \end{aligned} \quad (1)$$

Будем считать, что волновой процесс вызывается действием сосредоточенной вертикальной силы с амплитудой q , приложенной в начале координат, а нижняя грань закреплена и непроницаема:

$$\begin{aligned} \sigma_{13}(x_1, H, t) &= 0, \quad \sigma_{33}(x_1, H, t) = \\ &= q \delta(x_1) e^{-i\alpha t}, \quad p(x_1, H, t) = 0, \\ u_1(x_1, 0, t) &= 0, \quad u_3(x_1, 0, t) = 0, \quad \frac{\partial p}{\partial x_3}(x_1, 0, t) = 0. \end{aligned} \quad (2)$$

Отметим, что в силу линейности рассматриваемой задачи решения в случае задания нескольких нагрузок могут быть построены в виде линейной комбинации решений соответствующих задач, для которых при $x_3 = H$ будет задана только одна нагрузка. Для простоты последующих расчетов примем далее $q = 1$.

Если в уравнениях (1) положить равными нулю значения постоянных Био A_{ij} , краевая задача (1), (2) распадется на две независимые задачи о колебаниях упругого слоя и движении жидкости. Первую задачу будем в дальнейшем называть соответствующей упругой задачей.

Рассмотрим установившиеся колебания слоя. Неизвестные функции будем искать в виде

$$U(x_1, x_3, t) = \tilde{U}(x_1, x_3) e^{-i\alpha t}, \quad (3)$$

где $U(x_1, x_3, t) = (u_1, u_3, \sigma_{13}, \sigma_{33}, p, p')$ обозначает вектор решений краевой задачи (1), (2).

Построение решений

Одной из особенностей модели пористоупругости Био является значительная разница в порядках физических величин, входящих в определяющие соотношения. Для упрощения численных расчетов введем безразмерные параметры и функции аналогично [11]:

$$\begin{aligned} x_j &= \xi_j H; \quad \sigma_{j3} = C_m t_j; \quad u_j = v_j H; \quad p = w P^*; \\ \beta_j(\xi_3) &= \frac{A_{jj}(\xi_3 H) P^*}{C_m}; \quad \eta_j(\xi_3) = \frac{A_{jj}(\xi_3 H) H}{K_m P^*} \sqrt{\frac{C_m}{\rho}}; \\ \delta(\xi_3) &= \frac{\varphi^2 H}{K_m R(\xi_3 H)} \sqrt{\frac{C_m}{\rho}}; \quad \gamma_i(\xi_3) = \frac{C_{kl}(\xi_3 H)}{C_m}, \\ C_{11} &\rightarrow \gamma_1, \quad C_{33} \rightarrow \gamma_4, \quad C_{55} \rightarrow \gamma_5, \quad C_{13} \rightarrow \gamma_7, \\ \kappa^2 &= \frac{\rho \omega^2 H^2}{C_m}, \quad \mu_j(\xi_3) = \frac{K_{jj}(\xi_3 H)}{K_m}, \\ K_m &= K_{33}(H), \quad C_m = C_{33}(H). \end{aligned} \quad (4)$$

Применим интегральное преобразование Фурье по координате x_1 к краевой задаче (1), (2).

$$X(\alpha, \xi_3) = \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{U}(\xi_1, \xi_3) e^{i\alpha \xi_1} d\xi_1.$$

Здесь X – вектор Фурье преобразованных решений. Применение преобразования Фурье к исходным уравнениям и граничным условиям позволяет избавиться от производной по координате ξ_1 , $d/d\xi_1 \rightarrow -i\alpha$. С учетом соотношения (3) и введенных безразмерных величин (4) преобразованная краевая задача может быть записана в виде операторного пучка

$$X' = \left(L^0 + i\alpha L^{01} + i\kappa L^{02} + \alpha^2 L^{11} + \alpha\kappa L^{12} + \kappa^2 L^{22} \right) X,$$

где компоненты L^{ij} имеют вид

$$\begin{aligned} L_{13}^0 &= \frac{1}{\gamma_5}, \quad L_{24}^0 = \frac{1}{\gamma_4}, \quad L_{26}^0 = \frac{\beta_3}{\gamma_4}, \quad L_{65}^0 = \frac{1}{\mu_3}, \\ L_{12}^{01} &= 1, \quad L_{21}^{01} = \gamma_7, \quad L_{34}^{01} = \frac{\gamma_7}{\gamma_4}, \quad L_{36}^{01} = \frac{\gamma_7}{\gamma_4} \beta_3 - \beta_1, \quad L_{43}^{01} = 1, \\ L_{54}^{02} &= \frac{\mu_3}{\gamma_4}, \quad L_{56}^{02} = \delta + \frac{\mu_3}{\gamma_4} \beta_3, \quad L_{31}^{11} = \gamma_1 - \frac{\gamma_7}{\gamma_4}, \quad L_{43}^{11} = i, \\ L_{56}^{11} &= \mu_1, \quad L_{31}^{12} = -1, \quad L_{42}^{12} = -1, \quad L_{51}^{22} = -\eta_1 + \eta_3 \frac{\gamma_7}{\gamma_4}. \end{aligned} \quad (5)$$

Граничные условия (2) примут вид

$$\begin{aligned} X_3(\alpha, 1) &= 0, \quad X_4(\alpha, 1) = 1, \quad X_6(\alpha, 1) = 0, \\ X_1(\alpha, 0) &= 0, \quad X_2(\alpha, 0) = 0, \quad X_5(\alpha, 0) = 0. \end{aligned} \quad (6)$$

Краевую задачу (5), (6) будем решать методом пристрелки. Действуя аналогично [16], сформулируем и решим 3 вспомогательные задачи Коши со следующими начальными условиями:

$$X_3^{(j)}(\alpha, 0) = \delta_{1j}, X_4^{(j)}(\alpha, 0) = \delta_{2j}, X_6^{(j)}(\alpha, 0) = \delta_{3j}, \\ X_1^{(j)}(\alpha, 0) = 0, X_2^{(j)}(\alpha, 0) = 0, X_5^{(j)}(\alpha, 0) = 0, j = 1, 2, 3,$$

где $X^{(j)}$ – решения соответствующих задач Коши; δ_{ij} – дельта-символ Кронекера. Окончательное решение преобразованной задачи будет иметь вид линейной комбинации полученных решений

$$X = \sum_{j=1}^3 C_j X^{(j)}. \quad (7)$$

Для определения вектора коэффициентов C воспользуемся граничными условиями при $\xi_3=1$. Начальные условия вспомогательных задач Коши составлены таким образом, что решения каждой из них будут удовлетворять граничным условиям исходной задачи при $\xi_3=0$. Потребуем от линейной комбинации (7) удовлетворения граничным условиям при $\xi_3=1$. В результате получим систему линейных алгебраических уравнений

$$\mathbf{B}(\alpha, 1)\mathbf{C}(\alpha) = \mathbf{F}(\alpha), \quad (8)$$

$$\mathbf{B}(\alpha, \xi_3) = \begin{pmatrix} X_3^{(1)}(\alpha, \xi_3) & X_3^{(2)}(\alpha, \xi_3) & X_3^{(3)}(\alpha, \xi_3) \\ X_4^{(1)}(\alpha, \xi_3) & X_4^{(2)}(\alpha, \xi_3) & X_4^{(3)}(\alpha, \xi_3) \\ X_6^{(1)}(\alpha, \xi_3) & X_6^{(2)}(\alpha, \xi_3) & X_6^{(3)}(\alpha, \xi_3) \end{pmatrix},$$

$$\mathbf{F} = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}, \mathbf{C}(\alpha) = \begin{pmatrix} C_1(\alpha) \\ C_2(\alpha) \\ C_3(\alpha) \end{pmatrix}.$$

Поскольку решения строятся численно, отыскание решений задач Коши возможно только для фиксированной пары (α_0, κ_0) . Наличие диссипативных слагаемых в исходных уравнениях пористоупругости гарантирует, что решение существует для любой такой пары, если считать α_0 вещественным: иными словами, решения в трансформантах не будут иметь особенностей при $\alpha_0 \in \mathbb{R}$.

Совокупность особых точек решений поставленной задачи характеризует ее дисперсионное множество. Можно показать, что все точки дисперсионного множества в данном случае будут комплекснозначными. Таким образом, решения спектральной задачи для пучка (5) следует искать среди пар вида $(\alpha_r + i\alpha_i, \kappa_0)$. Отыскание таких точек осуществимо при помощи ранее построенных решений для вспомогательных задач Коши. Дисперсионное уравнение в таком случае получается из условия равенства нулю определителя $\det(\mathbf{B}(\alpha, 1))=0$.

Анализ структуры дисперсионного множества исследуемой задачи позволил сделать следующие выводы: 1. Дисперсионное множество для пористоупругого слоя состоит из двух семейств кривых, относящихся, соответственно, к распространению квазиупругих волн и волны давления. 2. В отличие от упругого случая все ветви дисперсионного множества имеют комплексную структуру. 3. Основное влияние на картину дисперсионного множества оказывают законы изменения упругих модулей C_{ij} .

Расчет волновых полей

Построение волновых полей для исходной задачи подразумевает обращение преобразования Фурье для полученных ранее решений. Поскольку с практической точки зрения интерес представляет информация о полях смещений на верхней границе слоя, представим их компоненты в виде интегралов

$$\tilde{U}(\xi_1, 1) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} X(\alpha, 1) e^{-i\alpha\xi_1} d\alpha, \quad (9)$$

где функция $X(\alpha, 1)$ может быть представлена в

$$\text{виде } X_j(\alpha, 1) = \frac{D_j(\alpha, 1)}{D_0(\alpha)}, \text{ причем } D_j, D_0 - \text{аналитические функции своих аргументов.}$$

Вычисление интегралов вида (9) может быть осуществлено численно. Учитывая тот факт, что подынтегральная функция в представлении (9) убывает при $|\alpha| \rightarrow \infty$, интегрирование по вещественной оси заменим интегрированием в конечных пределах $[-R_0, R_0]$, где R_0 определяется в серии вычислительных экспериментов.

В качестве альтернативы прямому численному интегрированию авторами применена теория вычетов. Информация о расположении простых полюсов подынтегральной функции в (9) позволяет определить набор точек, в окрестности которых требуется проводить вычисления. Пусть α^* – простой полюс вектор-функции $\mathbf{C}(\alpha)$, определяющей коэффициенты представления (7). Разложим все функции, входящие в соотношение (8), в ряды Лорана в окрестности α^* :

$$\mathbf{C}(\alpha) = \mathbf{C}_{-1} \frac{1}{\alpha - \alpha^*} + \mathbf{C}_0 + \mathbf{C}_1(\alpha - \alpha^*),$$

$$\mathbf{B}(\alpha) = \mathbf{B}_0 + \mathbf{B}_1(\alpha - \alpha^*) + \dots,$$

$$\mathbf{F}(\alpha) = \mathbf{F}_0 + \mathbf{F}_1(\alpha - \alpha^*) + \dots$$

Далее, приравнивая коэффициенты при одинаковых степенях $(\alpha - \alpha^*)$, получим

$$\mathbf{C}_{-1}\mathbf{B}_0 = 0, \mathbf{B}_0\mathbf{C}_0 + \mathbf{B}_1\mathbf{C}_{-1} = \mathbf{F}_0. \quad (10)$$

Из первого равенства (10) следуют условие для отыскания полюсов $\det \mathbf{B}_0=0$ и представление $\mathbf{C}_{-1}=\mathbf{Q}\mathbf{m}_0$, где \mathbf{m}_0 – собственный вектор матрицы \mathbf{B}_0 .

Для отыскания \mathbf{Q} обратимся ко второму равенству (10). Умножим обе его части скалярно на собственный вектор \mathbf{m}_0^* матрицы \mathbf{B}_0^* , где \mathbf{B}_0^* – матрица, сопряженная к \mathbf{B}_0 . Подстановка выражения для \mathbf{C}_{-1} в полученное соотношение дает

$$\begin{aligned} (\mathbf{B}_0\mathbf{C}_0, \mathbf{m}_0^*) + (\mathbf{B}_1\mathbf{C}_{-1}, \mathbf{m}_0^*) &= (\mathbf{F}_0, \mathbf{m}_0^*), \text{ откуда} \\ (\mathbf{C}_0, \mathbf{B}_0^*\mathbf{m}_0^*) + \mathbf{Q}(\mathbf{B}_1\mathbf{m}_0, \mathbf{m}_0^*) &= (\mathbf{F}_0, \mathbf{m}_0^*). \end{aligned} \quad (11)$$

Первое слагаемое в равенстве (11) равно нулю по свойству собственного вектора. Таким образом, получаем выражение для \mathbf{Q}

$$\mathbf{Q} = (\mathbf{F}_0, \mathbf{m}_0^*) / (\mathbf{B}_1\mathbf{m}_0, \mathbf{m}_0^*), \quad (12)$$

где $\mathbf{F}_0 = \mathbf{F}(\alpha^*)$, $\mathbf{B}_0 = \mathbf{B}(\alpha^*, 1)$, $\mathbf{B}_1 = \mathbf{B}'_\alpha(\alpha^*, 1)$.

Для вычисления постоянной матрицы \mathbf{B}_1 , входящей в соотношение (12), необходимо знать производную матричной функции $\mathbf{B}'_\alpha(\alpha^*, 1)$. Для ее определения добавим к краевой задаче (5), (6) уравнения и граничные условия, полученные путем дифференцирования по α исходных уравнений и граничных условий:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial \alpha} X' &= \\ &= \left(L^0 + i\alpha L^{01} + i\kappa L^{02} + \alpha^2 L^{11} + \alpha\kappa L^{12} + \kappa^2 L^{22} \right) \frac{\partial}{\partial \alpha} X + \\ &+ \left(iL^{01} + 2\alpha L^{11} + \kappa L^{12} \right) X, \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial \alpha} X_3(\alpha, 1) &= 0, \frac{\partial}{\partial \alpha} X_4(\alpha, 1) = 0, \frac{\partial}{\partial \alpha} X_6(\alpha, 1) = 0, \\ \frac{\partial}{\partial \alpha} X_1(\alpha, 0) &= 0, \frac{\partial}{\partial \alpha} X_2(\alpha, 0) = 0, \frac{\partial}{\partial \alpha} X_5(\alpha, 0) = 0. \end{aligned}$$

Решая модифицированную задачу (5), (6), (13), получим значения всех постоянных, входящих в равенство (12). В результате получаем формулу для вычисления интеграла (9)

$$\begin{aligned} \bar{U}(\xi_1, 1) &= -i \left[\sum_{|\alpha_n| < R} C^{(n)}(\alpha_n) X(\alpha_n, 1) e^{-i\alpha_n \xi_1} + \right. \\ &+ \left. \sum_{|\alpha_n| > R} C^{(n)}(\alpha_n) X(\alpha_n, 1) e^{-i\alpha_n \xi_1} \right], \text{ Im } \alpha_n < 0, \end{aligned} \quad (14)$$

где $\xi_1 > 0$, R_α – полуокружность в нижней части комплексной плоскости, радиус R которой выбран таким образом, что все вещественные корни определенной ранее соответствующей упругой задачи лежат внутри отрезка $[-R, R]$. Полюса α_n , лежащие в нижней полуплоскости вне контура R_α ,

соответствуют сильнозатухающим слагаемым в соотношении (14) в дальней зоне и не вносят значительных поправок в окончательные решения всюду, кроме непосредственной близости к источнику колебаний.

Наличие вещественных полюсов требует изменения контура интегрирования в формуле (14) для упругого слоя в соответствии с принципом предельного поглощения [17].

Результаты

Представленные методы позволяют производить расчет волновых полей для неоднородного трансверсально-изотропного пористоупругого слоя. Учет неоднородности материальных характеристик даёт возможность проанализировать зависимость структуры полей смещений от закона изменения модулей упругости, модулей Био и других параметров слоя. Немаловажно оценить степень влияния неоднородности тех или иных материальных свойств слоя на вид волновых полей на его верхней границе.

При расчетах были использованы следующие характерные для водонасыщенного грунта [14] значения материальных параметров:

$$\begin{aligned} C_{11} &= 11,2, \quad C_{13} = 6,98, \quad C_{33} = 21,1, \quad C_{55} = 2,02 \text{ МПа}, \\ R &= 143 \text{ МПа}, \quad A_{13} = 0,643, \quad A_{33} = 0,765, \\ \varphi &= 0,3, \quad \rho = 1750 \text{ кг/м}^3, \\ K_{13} &= 1,2 \cdot 10^{-9}, \quad K_{33} = 2,2 \cdot 10^{-8} \text{ кг/(м}^3 \cdot \text{с)}. \end{aligned}$$

Сравнение компонент полей смещений, вычисленных при помощи численного интегрирования и теории вычетов, показало их хорошее совпадение. Заметные расхождения результатов наблюдаются только вблизи источника. Расхождение результатов двух методов на удалении от источника не превышает 2%. Для повышения точности результатов вычислений в окрестности начала координат при помощи вычетов необходимо увеличить радиус R_α для учета большего числа полюсов подынтегральной функции.

Представленные на рис. 1 кривые соответствуют нормальным и касательным компонентам смещений для различных законов неоднородности упругих модулей C_{ij} . В качестве законов неоднородности выбраны функции различной структуры, при этом их средние значения по толщине слоя совпадают с таковыми в однородном случае. Линейный возрастающий и немонотонный законы таковы, что совпадают не только по среднему значению, но и по значениям на концах отрезков. Из рис. 1 видно, что компоненты смещений для этих законов отличаются только по амплитуде, в то время как для линейной

убывающей неоднородности наблюдается изменение не только амплитуды, но и длины волны. Для кусочно-постоянной неоднородности также наблюдается изменение длины волны, но противоположного характера. Помимо описанных выше свойств, вид функции неоднородности влияет на скорость затухания колебаний; возрастающие функции дают меньшее затухание по сравнению с аналогичными убывающими. Различия в перемещениях для неоднородностей, выбранных таким образом, показывают необходимость учета таковых при расчетах реальных материалов и конструкций.

В качестве законов неоднородности взяты функции:

линейная возрастающая:

$$\gamma_1(\xi_3) = 0,53 \cdot (0,4\xi_3 + 0,8),$$

$$\gamma_7(\xi_3) = 0,33 \cdot (0,3\xi_3 + 0,85),$$

$$\gamma_4(\xi_3) = 1 \cdot (0,2\xi_3 + 0,9),$$

$$\gamma_5(\xi_3) = 0,09 \cdot (0,6\xi_3 + 0,7),$$

линейная убывающая:

$$\gamma_1(\xi_3) = 0,53 \cdot (-0,4\xi_3 + 1,2),$$

$$\gamma_7(\xi_3) = 0,33 \cdot (-0,3\xi_3 + 1,15),$$

$$\gamma_4(\xi_3) = 1 \cdot (-0,2\xi_3 + 1,1),$$

$$\gamma_5(\xi_3) = 0,09 \cdot (-0,6\xi_3 + 1,3);$$

немонотонная:

$$\gamma_1(\xi_3) = 0,53 \cdot (1 - 0,2 \cos(3\pi\xi_3)),$$

$$\gamma_7(\xi_3) = 0,33 \cdot (1 - 0,15 \cos(3\pi\xi_3)),$$

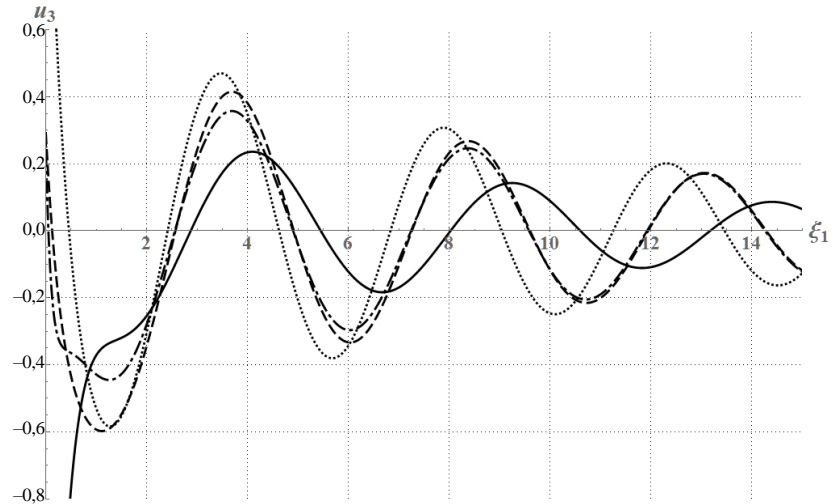
$$\gamma_4(\xi_3) = 1 \cdot (1 - 0,1 \cos(3\pi\xi_3)),$$

$$\gamma_5(\xi_3) = 0,09 \cdot (1 - 0,3 \cos(3\pi\xi_3));$$

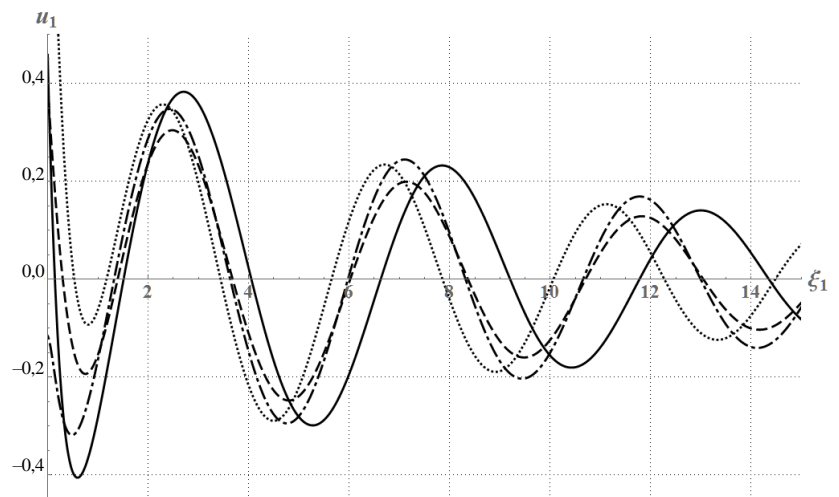
кусочно-постоянная:

$$\gamma_j(\xi_3) = \gamma_j \cdot \begin{cases} 1,2, & \text{при } 0 \leq \xi_3 < 0,2, \\ 0,8, & \text{при } 0,2 \leq \xi_3 < 0,4, \\ 0,7, & \text{при } 0,4 \leq \xi_3 < 0,6, \\ 1,25, & \text{при } 0,6 \leq \xi_3 < 0,8, \\ 1,05, & \text{при } 0,8 \leq \xi_3 \leq 1. \end{cases}$$

Наличие диссипативных слагаемых в уравнениях пористоупругости вносит значительные изменения в картину волновых полей. На рис. 2 представлено сравнение нормальной и касательной компонент смещений для пористоупругого и соответствующего ему упругого слоев. Важно отметить не только разницу в максимальных величинах



a / a



b / b

Рис. 1. Смещения u_i для различных законов неоднородности $i=3 - a$; $i=1 - b$: линейная убывающая (сплошная линия), линейная возрастающая (штриховая), немонотонная (штрихпунктирная), кусочно-постоянная (точечная)

/ Fig. 1. Displacements u_i for various laws of inhomogeneity $i=3 - a$; $i=1 - b$: linear decreasing (solid line), linear increasing (dashed), nonmonotonic (dash-dotted), piecewise constant (dotted)

нах смещений, но и наличие сильного затухания волнового поля в пористоупругом случае при удалении от источника.

В таблице приведены значения нескольких полюсов α_n при частоте $\kappa=1$ для упругого и пористоупругого случаев. Отметим, что в упругом случае существуют вещественные полюса, а комплексные образуют «комплексные четверки» вида $(\alpha_R + i\alpha_I)$, $(\alpha_R - i\alpha_I)$, $(-\alpha_R + i\alpha_I)$, $(-\alpha_R - i\alpha_I)$. В пористоупругом случае все полюса комплексные, однако, в отличие от упругого случая, образуют «комплексные пары» $(\alpha_R + i\alpha_I)$, $(-\alpha_R - i\alpha_I)$.

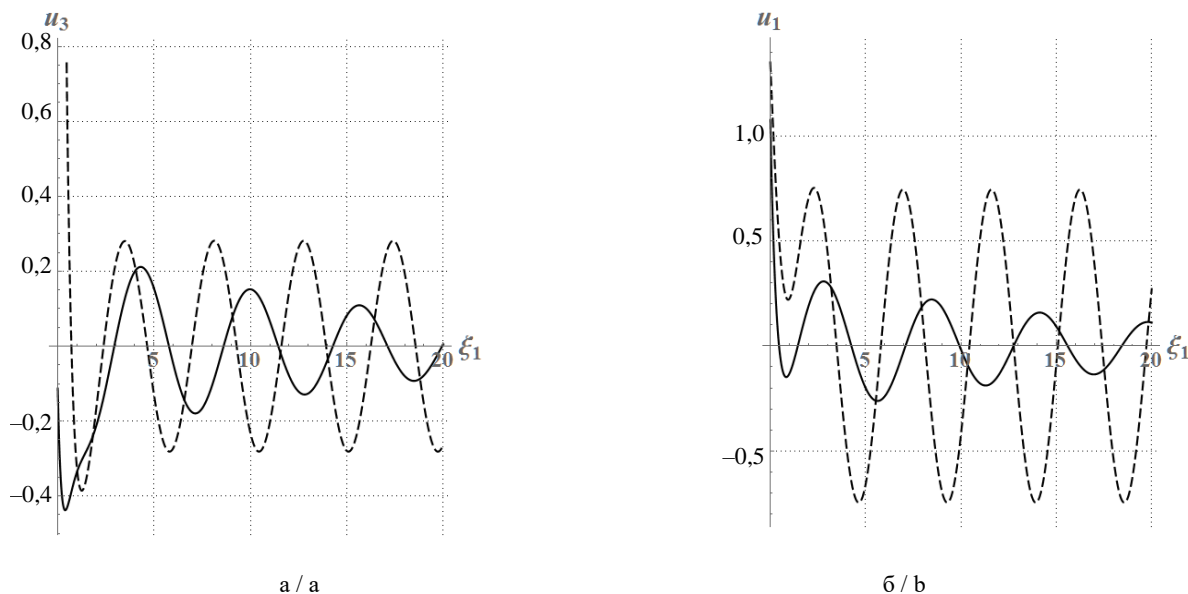


Рис. 2. Нормальные u_3 (а) и касательные u_1 (б) компоненты смещений для упругого (пунктирная линия) и пористоупругого (сплошная линия) слоев / Fig. 2. Normal u_3 (a) and tangential u_1 (b) displacement components for the elastic (dashed line) and porous (solid line) layers

Значения полюсов α_n в формуле (14) для упругого и пористоупругого слоев для $R = 5$ / The values of the poles α_n from relation (14) for the elastic and poroelastic layers for $R = 5$

| Упругий | Пористоупругий |
|-----------------|-----------------|
| -1,3538 | -1,1083-0,0583i |
| -0,9864-2,3879i | -1,1021-2,8021i |
| -3,7892i | 0,2667-3,3334i |
| -5,2424i | 0,5916-4,5833i |
| 0,9864-2,3879i | 0,9334-2,2813i |
| - | -4,0333-4,5334i |

Из таблицы видно, что значения 2 и 5, относящиеся в упругом случае к одной комплексной четверке, переходят в пористоупругом случае в две несимметричные точки, относящиеся к двум разным комплексным парам.

Заключение

Представлен метод расчета волновых полей в задаче о вынужденных колебаниях неоднородного трансверсально-изотропного пористоупругого слоя, закрепленного вдоль нижней грани. На основе предложенной вычислительной схемы проведены несколько серий расчетов, на основании которых получены оценки точности и быстродействия представленных алгоритмов, выявлены зависимости структуры волновых полей от законов неоднородности физических характеристик слоя, определена степень влияния каждой из характеристик. В качестве

вспомогательной задачи исследована структура дисперсионного множества рассмотренной задачи, проанализированы особенности его структуры, выявлено влияние законов неоднородности различных характеристик слоя.

Сравнение методов непосредственного численного интегрирования с приближенным вычислением интегралов при помощи теории вычетов показало: 1. Результаты, полученные двумя методами, имеют расхождение не более 2% всюду, кроме близкой к источнику зоны. 2. Точность каждого из алгоритмов определяется различными факторами. В случае численного интегрирования это – размер шага и геометрия контура интегрирования, при расчетах по формуле (14) – количество учитываемых полюсов и точность их отыскания на основе метода пристрелки.

Влияние законов неоднородности упругих модулей оказывает наиболее значительное влияние как на картину дисперсионного множества, так и на вид полей смещений. Сравнение решений для различных законов неоднородности, имеющих одинаковое усредненное значение, показало чувствительность исследуемой модели к закону распределения материальных характеристик.

Литература

1. Rayleigh J.W. The theory of sound. London: Macmillan, 1877. 370 p.
2. Lamb H. The dynamical theory of sound. London: E. Arnold, 1910. 328 p.

3. Гринченко В.Т., Мелешко В.В. Гармонические колебания и волны в упругих телах. Киев : Наукова думка, 1981. 284 с.

4. Biot M.A. Generalized theory of acoustic propagation in porous dissipative media // *J. Acoustic. Soc. Am.* 1962. № 34. P. 1254–1264.

5. Biot M.A. Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid // *J. Acoustic. Soc. Am.* 1956. № 28. P. 168–191.

6. Zheng C., Kouretzis G.P., Sloan S.W., Liu H., Ding X. Vertical vibration of an elastic pile embedded in poroelastic soil // *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2015. № 77. P. 177–181.

7. Chen S., Abousleiman Y. Stress analysis of borehole subjected to fluid injection in transversely isotropic poroelastic medium // *Mechanics Research Communications*. 2016. № 73. P. 63–75.

8. Cowin S.C. Bone poroelasticity // *J. of Biomechanics*. 1999. № 32. P. 217–238.

9. Svanadze M., Scalia A. Mathematical problems in the coupled linear theory of bone poroelasticity // *Comput. Math. Appl.* 2013. № 66. P. 1554–1566.

10. Ватульян А.О., Ляпин А.А. Об обратных коэффициентах задач пороупругости // *Изв. РАН МТТ*. 2013. № 2. С. 114–121.

11. Ватульян А.О., Нестеров С.А. Об особенностях идентификации неоднородных пороупругих характеристик полого цилиндра // *Проблемы прочности и пластичности*. 2016. № 1. С. 22–29.

12. De Ryck L., Groby J.P., Leclaire P., Lauriks W., Wirgin A., Depollier C., Fellah Z. Acoustic wave propagation in a macroscopically inhomogeneous porous medium saturated by a fluid // *Appl. Phys. Lett.* 2007. № 90.

13. Liao-Liang Ke, Yue-Sheng Wang, Zi-Mao Zhang. Love waves in an inhomogeneous fluid saturated porous layered half-space with linearly varying properties // *Soil Dyn. and Earthquake Eng.* 2006. № 26. P. 574–581.

14. Coussy O. *Mechanics and Physics of Porous Solids*, Wiley, 2010. 296 p.

15. Калиткин Н.Н. Численные методы. М. : Наука, 1978. 512 с.

16. Ватульян А.О., Гусаков Д.В. Колебания неоднородного пористоупругого слоя // *Экол. вестн. науч. центров ЧЭС*. 2014. № 4. С. 21–28.

17. Ворович И.И., Бабешко В.А. Динамические смешанные задачи теории упругости для неклассических областей. М. : Наука, 1979. 320 с.

References

1. Rayleigh J.W. *The theory of sound*. London, Macmillan, 1877, 370 p.

2. Lamb H. *The dynamical theory of sound*. London, E. Arnold, 1910, 328 p.

3. Grinchenko V.T., Meleshko V.V. *Garmonicheskie kolebaniya i volny v uprugikh telakh* [Harmonic oscillations and waves in elastic bodies]. Kiev, Naukova dumka, 1981, 284 p.

4. Biot M.A. Generalized theory of acoustic propagation in porous dissipative media. *J. Acoustic. Soc. Am.* 1962, No. 34, pp. 1254-1264.

5. Biot M.A. Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid. *J. Acoustic. Soc. Am.* 1956, No. 28, pp. 168-191.

6. Zheng C., Kouretzis G.P., Sloan S.W., Liu H., Ding X. Vertical vibration of an elastic pile embedded in poroelastic soil. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2015, No. 77, pp. 177-181.

7. Chen S., Abousleiman Y. Stress analysis of borehole subjected to fluid injection in transversely isotropic poroelastic medium. *Mechanics Research Communications*. 2016, No. 73, pp. 63-75.

8. Cowin S.C. Bone poroelasticity. *J. of Biomechanics*. 1999, No. 32, pp. 217-238.

9. Svanadze M., Scalia A. Mathematical problems in the coupled linear theory of bone poroelasticity. *Comput. Math. Appl.* 2013, No. 66, pp. 1554-1566.

10. Vatul'yan A.O., Lyapin A.A. Ob obratnykh koeffitsientnykh zadachakh porouprugosti [On inverse coefficient problems of poroelasticity]. *Izv. RAN MTT*. 2013, No. 2, pp. 114-121.

11. Vatul'yan A.O., Nesterov S.A. Ob osobennostyakh identifikatsii neodnorodnykh porouprugikh kharakteristik pologo tsilindra [On the features of identification of heterogeneous poroelastic characteristics of a hollow cylinder]. *Problemy prochnosti i plastichnosti*. 2016, No. 1, pp. 22-29.

12. De Ryck L., Groby J.P., Leclaire P., Lauriks W., Wirgin A., Depollier C., Fellah Z. Acoustic wave propagation in a macroscopically inhomogeneous porous medium saturated by a fluid. *Appl. Phys. Lett.* 2007, No. 90.

13. Liao-Liang Ke, Yue-Sheng Wang, Zi-Mao Zhang. Love waves in an inhomogeneous fluid saturated porous layered half-space with linearly varying properties. *Soil Dyn. and Earthquake Eng.* 2006, No. 26, pp. 574-581.

14. Coussy O. *Mechanics and Physics of Porous Solids*. Wiley, 2010, 296 p.

15. Kalitkin N.N. *Chislennye metody* [Numerical methods]. Moscow, Nauka, 1978, 512 p.

16. Vatul'yan A.O., Gusakov D.V. Kolebaniya neodnorodnogo poristouprugogo sloya. *Ekol. vestn. nauch. tsentrov ChES*. 2014, No. 4, pp. 21-28.

17. Vorovich I.I., Babeshko V.A. *Dinamicheskie smeshannye zadachi teorii uprugosti dlya neklassicheskikh oblastei* [Dynamic mixed problems of the theory of elasticity for nonclassical domains]. Moscow, Nauka, 1979, 320 p.

К КОНТАКТНЫМ ЗАДАЧАМ ДЛЯ ЦИЛИНДРА*

© 2017 г. Н.Б. Золотов¹, Е.Д. Пожарская¹, Д.А. Пожарский¹

¹Донской государственный технический университет, Ростов-на-Дону, Россия,

TO CONTACT PROBLEMS FOR A CYLINDER

N.B. Zolotov¹, E.D. Pozharskaya¹, D.A. Pozharskii¹

¹Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russia

Золотов Никита Борисович – студент, Донской государственной технической университет, пл. Гагарина, 1, г. Ростов-на-Дону, 344000, Россия, e-mail: zolotov.nikita.borisovich@gmail.com

Nikita B. Zolotov – Student, Don State Technical University, Gagarina Sq., 1, Rostov-on-Don, 344000, Russia, e-mail: zolotov.nikita.borisovich@gmail.com

Пожарская Елизавета Дмитриевна – студент, Донской государственной технической университет, пл. Гагарина, 1, г. Ростов-на-Дону, 344000, Россия, e-mail: pozharskaya.elizaveta@rambler.ru

Elizaveta D. Pozharskaya – Student, Don State Technical University, Gagarina Sq., 1, Rostov-on-Don, 344000, Russia, e-mail: pozharskaya.elizaveta@rambler.ru

Пожарский Дмитрий Александрович – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой прикладной математики, Донской государственной технической университет, пл. Гагарина, 1, г. Ростов-на-Дону, 344000, Россия, e-mail: pozharda@rambler.ru

Dmitry A. Pozharskii – Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Head of the Department of Applied Mathematics, Don State Technical University, Gagarina Sq., 1, Rostov-on-Don, 344000, Russia, e-mail: pozharda@rambler.ru

В условиях осевой симметрии изучена контактная задача линейной теории упругости о действии жесткого кольцевого бандажа конечной длины на бесконечный полый круговой цилиндр. Интегральное уравнение этой задачи получено при помощи преобразования Фурье. Для символа ядра интегрального уравнения контактной задачи предложена новая аппроксимация, которая эффективна при любой толщине стенок полого цилиндра. На основе этой аппроксимации получено сингулярное асимптотическое решение, а также сделаны расчеты контактного давления и его интегральной характеристики для цилиндров с тонкими стенками. Важно, что параметры аппроксимации находились при помощи численного метода Монте-Карло. Данный метод особо эффективен при большом числе неизвестных параметров, возникающих именно для тонкостенных цилиндров. Ранее для аналогичных задач использовалась аппроксимация суммой двух разных функций, что приводило лишь к приближенному решению функционального уравнения, которое возникает в методе Винера – Хопфа. Более простая аппроксимация ранее применялась для сплошного цилиндра. Также изучался случай конечного полого цилиндра при скользящей заделке его торцов. Найденное решение может быть применено для анализа прочности трубопроводов при укреплении их бандажами.

Ключевые слова: контактная задача, упругий полый цилиндр.

The axially symmetric contact problem of the linear elasticity theory is investigated on the interaction between a rigid annular sleeve of finite length and an infinite hollow circular cylinder. The integral equation of the problem is derived by using a Fourier transformation. A new approximation for the kernel symbol of the integral equation of the problem is suggested to be effective for any cylinder wall thickness. On the basis of this approximation a singular asymptotic solution is constructed, the contact pressure and its integral characteristic are calculated for thin-walled cylinders. It is important that the parameters of the approximation are calculated with the help of the numerical Monte Carlo method. This method is especially fruitful for a big number of unknown parameters arising for thin-walled cylinders. Earlier for similar problems an approximation in the form of a sum of two different functions has been used giving only an approximate solution of the functional equation in the Wiener - Hopf method. A more simple approximation was used for a solid cylinder. The case of a finite hollow cylinder with end-walls subject to sliding support has been previously considered. The solution constructed can be useful for strength analysis of pipelines in contact with sleeves.

Keywords: contact problem, elastic hollow cylinder.

* Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект 15-01-00331).

Исследована осесимметричная контактная задача теории упругости о взаимодействии жесткого кольцевого бандажа конечной длины с бесконечным полым круговым цилиндром. Предложена новая аппроксимация символа ядра интегрального уравнения (ИУ) этой задачи, эффективная при любой толщине стенок цилиндра. На основе этой аппроксимации получено сингулярное асимптотическое решение, сделаны расчеты интегральной характеристики контактного давления для тонкостенных цилиндров. Ранее для аналогичных задач использовалась аппроксимация суммой двух функций, приводящая лишь к приближенному решению функционального уравнения, возникающего в методе Винера – Хопфа [1]. Более простая аппроксимация применялась для сплошного цилиндра [2]. Изучался случай конечного полого цилиндра [3].

В цилиндрических координатах r, z рассмотрим полый упругий цилиндр $\{\rho_1 \leq r \leq \rho, |z| < \infty\}$ с модулем сдвига G и коэффициентом Пуассона ν . На цилиндр с натягом δ надет жесткий кольцевой бандаж шириной $2a$; остальная часть его поверхности свободна от напряжений. При помощи преобразования Фурье сведем задачу к ИУ относительно контактного давления $\sigma_r(\rho, z) = -q(z)$ ($|z| \leq a$), которое после введения безразмерных обозначений

$$x = \frac{z}{a}, \quad u = \rho s, \quad \lambda = \frac{\rho}{a}, \quad \varphi(x) = \frac{q(z)}{\theta},$$

$$f = \frac{\delta}{a}, \quad \theta = \frac{G}{1-\nu}, \quad k = \frac{\rho_1}{\rho}$$

запишем в виде

$$\int_{-1}^1 \varphi(\xi) K \left(\frac{x-\xi}{\lambda} \right) d\xi = \pi f \quad (|x| \leq 1), \quad (1)$$

$$K(t) = \int_0^\infty L(u) \cos ut du, \quad L(u) = \frac{L_1(u)}{2(1-\nu)L_2(u)},$$

$$L_1(u) = (\Omega_1 - \omega_1)^2 - 4f_1 - 2f_2 - 2f_3,$$

$$L_2(u) = -(\Omega_1 - \omega_1)^2 + 4f_1(1 - \omega_1\Omega_1) + 2f_2(1 - \Omega_1^2) + 2f_3(1 - \omega_1^2) - 4f_1^2 + 4f_2f_3,$$

$$f_1 = \frac{u^2}{4(1-\nu)} [k^2(\omega_0\Omega_0 + \omega_1\Omega_1) - (\omega\Omega + 1)],$$

$$f_2 = \frac{u^2}{4(1-\nu)} [k^2(\omega_0^2 - \omega_1^2) - (\omega^2 - 1)],$$

$$f_3 = \frac{u^2}{4(1-\nu)} [k^2(\Omega_0^2 - \Omega_1^2) - (\Omega^2 - 1)],$$

$$\omega = \frac{I_0}{I_1}, \quad \omega_0 = \frac{I_0^*}{I_1}, \quad \omega_1 = \frac{I_1^*}{I_1},$$

$$\Omega = \frac{K_0}{K_1}, \quad \Omega_0 = \frac{K_0^*}{K_1}, \quad \Omega_1 = \frac{K_1^*}{K_1},$$

$$I_n = I_n(u), \quad K_n = K_n(u),$$

$$I_n^* = I_n(ku), \quad K_n^* = K_n(ku), \quad n = 0, 1.$$

Здесь $I_n(u), K_n(u)$ – модифицированные функции Бесселя. В пределе при $k \rightarrow 0$ ИУ (1) совпадает с известным ИУ для сплошного цилиндра [1–3]. Параметры k и λ характеризуют соответственно толщину стенок цилиндра и относительную ширину бандажа.

Функция-символ $L(u)$ характеризуется следующим асимптотическим поведением в нуле и бесконечности:

$$L(u) = A + o(1) \quad (u \rightarrow +0),$$

$$A = \frac{1}{2(1+\nu)} + \frac{k^2}{(1-\nu^2)(1-k^2)}; \quad (2)$$

$$L(u) = \frac{1}{u} + \frac{D}{u^2} + o(u^{-2}) \quad (u \rightarrow +\infty), \quad D = 1 - 2\nu.$$

При достаточно малых λ для решения ИУ (1) применим сингулярный асимптотический метод [2]. Для факторизации функции $L(u)$ аппроксимируем ее на действительной оси с учетом свойств (2) выражением ($G_m \neq G_n$ при $m \neq n$)

$$L^*(u) = \frac{\sqrt{u^2 + B^2}}{u^2 + C^2} \times \exp \left(\frac{D}{\sqrt{u^2 + E^2}} \right) \prod_{m=1}^M \frac{(u^2 + A_0^2 G_m^2)}{(u^2 + G_m^2)},$$

$$\frac{B}{C^2} \exp \left(\frac{D}{E} \right) A_0^{2M} = A, \quad E > 1. \quad (3)$$

Для нахождения параметров аппроксимации (3) использовался метод Монте-Карло, слабо зависящий от значения M . При росте M наблюдается увеличение точности аппроксимации. При возрастании k построение аппроксимации (3) усложняется (например, при $k=0,1$ для достижения погрешности $\theta = 1\%$ достаточно взять лишь $M=1$).

В таблице при $\nu=0,3, E=1,1, M=4$ даны значения параметров аппроксимации (3) и ее относительная погрешность θ для тонкостенного цилиндра ($k \geq 0,9$). Значения D и C находятся соответственно по последним равенствам (2) и (3).

Параметры аппроксимации и характеристика / The parameters of approximation and characterization

| <i>k</i> | <i>B</i> | <i>A</i> ₀ | <i>G</i> ₁ | <i>G</i> ₂ | <i>G</i> ₃ | <i>G</i> ₄ | θ, % | <i>P/f</i> |
|----------|----------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|------|------------|
| 0,90 | 1,536 | 2,873 | 7,414 | 7,151 | 6,625 | 7,150 | 7,0 | 1,60 |
| 0,91 | 1,550 | 2,951 | 6,957 | 6,964 | 7,915 | 7,819 | 7,0 | 1,42 |
| 0,92 | 1,633 | 3,048 | 8,739 | 8,036 | 7,578 | 7,249 | 6,5 | 1,25 |
| 0,93 | 1,746 | 3,163 | 8,622 | 7,998 | 8,489 | 8,785 | 6,0 | 1,09 |
| 0,94 | 1,906 | 3,271 | 9,257 | 9,713 | 8,371 | 9,626 | 6,0 | 0,925 |
| 0,95 | 2,016 | 3,542 | 12,736 | 8,335 | 10,572 | 9,682 | 6,0 | 0,764 |
| 0,96 | 2,209 | 3,709 | 14,537 | 11,753 | 9,997 | 9,897 | 5,5 | 0,605 |
| 0,97 | 2,566 | 3,910 | 11,866 | 11,432 | 15,655 | 14,825 | 6,0 | 0,450 |
| 0,98 | 2,580 | 4,480 | 8,899 | 18,720 | 19,862 | 20,001 | 8,5 | 0,296 |
| 0,99 | 4,003 | 5,564 | 15,701 | 16,339 | 35,844 | 41,186 | 11,0 | 0,144 |

В результате главный член асимптотического решения ИУ (1) при малых λ можно построить в форме

$$\varphi(x) = \frac{f}{\lambda} \left[\omega\left(\frac{1+x}{\lambda}\right) + \omega\left(\frac{1-x}{\lambda}\right) - A^{-1} \right] \quad (|x| \leq 1),$$

$$\omega(s) = \frac{W(s) + I(s)}{\sqrt{A}}, \quad (4)$$

$$I(s) = -\frac{D^s}{\pi_0} \int W(s - \tau) K_0(E\tau) d\tau,$$

$$W(s) = \frac{\exp(-Bs)}{\sqrt{\pi s}} + \frac{C}{\sqrt{B}} \operatorname{erf}(\sqrt{Bs}) + \sum_{m=1}^M T_m R(A_0 G_m, s),$$

$$R(F, s) = \frac{F - C}{\sqrt{B - F}} \exp(-Fs) \operatorname{erf}(\sqrt{(B - F)s}) + \frac{C}{\sqrt{B}} \operatorname{erf}(\sqrt{Bs}),$$

$$T_m = \prod_{n=1}^M (G_n - A_0 G_m) \left[A_0^{M+1} G_m \prod_{n=1, n \neq m}^M (G_n - G_m) \right]^{-1}.$$

Здесь $\operatorname{erf}(x)$ – интеграл вероятностей; $K_0(t)$ – модифицированная функция Бесселя. На основании формул (4) для интегральной характеристики решения получим выражение

$$\frac{P}{f} = \frac{1}{f} \int_{-1}^1 \varphi(x) dx = \frac{2}{\sqrt{A}} [Z(\eta) + J(\eta)] - \frac{\eta}{A},$$

$$J(s) = -\frac{D^s}{\pi_0} \int Z(s - \tau) K_0(E\tau) d\tau, \quad \eta = \frac{2}{\lambda}, \quad (5)$$

$$Z(s) = \frac{C}{\sqrt{B}} \left[\left(s - \frac{1}{2B} + \frac{1}{C} \right) \operatorname{erf}(\sqrt{Bs}) + \sqrt{\frac{s}{\pi B}} \exp(-Bs) \right] + \sum_{m=1}^M T_m Q(A_0 G_m, s),$$

$$Q(F, s) = \frac{C}{\sqrt{B}} \left[\left(s - \frac{1}{2B} + \frac{1}{C} - \frac{1}{F} \right) \operatorname{erf}(\sqrt{Bs}) + \sqrt{\frac{s}{\pi B}} \exp(-Bs) \right] - \left(1 - \frac{C}{F} \right) \frac{\exp(-Fs)}{\sqrt{B - F}} \operatorname{erf}(\sqrt{(B - F)s}).$$

В последней колонке таблицы даны значения характеристики (5) при λ=0,25. Как показывает численный анализ, при λ<1 погрешность формул (4), (5) менее (7+θ) %. Для сплошного цилиндра (k=0) в окрестности значения λ=2 наблюдалось сближение сингулярного и регулярного асимптотических решений [2]. При возрастании k (утончении стенок цилиндра) контактное давление снижается. Развита методика позволяет получить явное решение контактной задачи практически для любых значений k. Отметим, что при k≥0,98 полый цилиндр можно считать цилиндрической оболочкой.

Литература

1. Развитие теории контактных задач в СССР / под ред. Л.А. Галина. М. : Наука, 1976. 493 с.
2. Александров В.М., Пожарский Д.А. Об одном асимптотическом методе в контактных задачах // Прикладная математика и механика. 1999. Т. 63, вып. 2. С. 295–302.
3. Александров В.М., Чебаков М.И. Аналитические методы в контактных задачах теории упругости. М. : Физматлит, 2004. 301 с.

References

1. Razvitie teorii kontaknykh zadach v SSSR [The development of the theory of contact problems in the USSR]. Ed. L.A. Galin. Moscow, Nauka, 1976, 493 p.
2. Aleksandrov V.M., Pozharskii D.A. Ob odnom asimptoticheskom metode v kontaknykh zadachakh [On an asymptotic method in contact problems]. *Prikladnaya matematika i mekhanika*. 1999, vol. 63, No. 2, pp. 295-302.
3. Aleksandrov V.M., Chebakov M.I. *Analiticheskie metody v kontaknykh zadachakh teorii uprugosti* [Analytical methods in contact problems of the theory of elasticity]. Moscow, Fizmatlit, 2004, 301 p.

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ СВОБОДНОГО РАСТЕКАНИЯ ПОТОКА ЗА БЕЗНАПОРНЫМИ ВОДОПРОПУСКНЫМИ ОТВЕРСТИЯМИ

© 2017 г. В.Н. Коханенко¹, А.И. Кондратенко², М.Ю. Косиченко¹, В.И. Лидневский¹, Д.Б. Келехсаев¹

¹Южно-Российский государственный политехнический университет
(НПИ) им. М.И. Платова, Новочеркасск, Россия,

²Российский государственный аграрный университет – Московская
сельскохозяйственная академия им. К.А. Тимирязева, Москва, Россия

THE SOLUTION OF THE PROBLEM OF FREE SPREADING OF THE WATER STREAM BEHIND THE OPEN WATER PIPE

V.N. Kokhanenko¹, A.I. Kondratenko², M.Yu. Kosichenko¹, V.I. Lidnevsky¹, D.B. Kelekhayev¹

¹Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI), Novochoerkassk, Russia,

²Russian State Agrarian University - Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Moscow, Russia

Коханенко Виктор Николаевич – доктор технических наук, профессор, кафедра общинженерных дисциплин, Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) им. М.И. Платова, ул. Просвещения, 132, г. Новочеркасск, Ростовская обл., 346428, Россия, e-mail: super-viktorkrutoi2013@yandex.ru

Viktor N. Kokhanenko – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Common Engineering Disciplines, Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI), Prosvesheniya St., 132, Novochoerkassk, Rostov Region, 346428, Russia, e-mail: super-viktorkrutoi2013@yandex.ru

Кондратенко Анатолий Иванович – кандидат технических наук, профессор, кафедра инженерных конструкций, Российский государственный аграрный университет – Московская сельскохозяйственная академия им. К.А. Тимирязева, ул. Тимирязевская, 49, г. Москва, 127550, Россия, e-mail: ai_kondratenko@mail.ru

Anatoly I. Kondratenko – Candidate of Technical Sciences, Professor, Department of Engineering Designs, Russian State Agrarian University - Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Timiryazevskaya St., 49, Moscow, 127550, Russia, e-mail: ai_kondratenko@mail.ru

Косиченко Михаил Юрьевич – кандидат технических наук, доцент, кафедра прикладной математики, Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) им. М.И. Платова, ул. Просвещения, 132, г. Новочеркасск, Ростовская обл., 346428, Россия

Michail Yu. Kosichenko – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Applied Mathematics, Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI), Prosvesheniya St., 132, Novochoerkassk, Rostov Region, 346428, Russia

Лидневский Валерий Иванович – старший преподаватель, кафедра общинженерных дисциплин, Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) им. М.И. Платова, ул. Просвещения, 132, г. Новочеркасск, Ростовская обл., 346428, Россия, e-mail: 69077@mail.ru

Valery I. Lidnevsky – Senior Lecturer, Department of Common Engineering Disciplines, Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI), Prosvesheniya St., 132, Novochoerkassk, Rostov Region, 346428, Russia, e-mail: 69077@mail.ru

Келехсаев Дмитрий Борисович – аспирант, кафедра общинженерных дисциплин, Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) им. М.И. Платова, ул. Просвещения, 132, г. Новочеркасск, Ростовская обл., 346428, Россия

Dmitry B. Kelekhayev – Postgraduate, Department of Common Engineering Disciplines, Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI), Prosvesheniya St., 132, Novochoerkassk, Rostov Region, 346428, Russia

Выведены уравнения движения двумерного в плане бурного водного потока в плоскости годографа скорости. Полученная система уравнений в частных производных является линейной в отличие от системы уравнений в физической плоскости течения потока. Приведен метод поиска аналитических решений полученной системы уравнений, заключающийся в разделении переменных в системе, ряде замен, приводящих уравнения к табличным (справочным). В итоге решение системы уравнений сведено к решению гипергеометрического уравнения. При различных условиях разделения переменных получены аналитические группы решений, позволяющие ставить и решать аналитически различные граничные задачи по течению двумерных в плане потенциальных водных потоков.

Корректно поставлена и решена граничная задача по растеканию потенциального водного потока в широко отводящее русло за безнапорной водопропускной трубой прямоугольного сечения. Решение может использоваться для определения параметров потока в окрестности выхода потока из трубы в широкое гладкое русло, так как при этом силы сопротивления потоку со стороны дна русла малы (они увеличиваются далее вниз по течению потока с уменьшением глубины) и ими можно пренебречь. Задача решается сначала в плоскости годографа скорости. Далее интегрированием связей перехода в физическую плоскость определяются параметры потока в физической области течения потока.

Полученные в работе аналитические формулы позволяют определить весь спектр параметров потока, при этом сходимость между модельными и натурными или экспериментальными параметрами значительно превышает сходимость параметров по ранее известным методам.

Ключевые слова: водный поток, бурный поток, потенциальный поток, двухмерный в плане водный поток, годограф скорости, плоскость годографа скорости, система дифференциальных уравнений в частных производных, линейная система уравнений, метод разделения переменных, гипергеометрическое дифференциальное уравнение, граничная задача.

The equations of the movement of a rough water stream, two-dimensional in plan, in the plane of hodograf speed are received. This system of the equations of the movement of a stream is linear system of the equations in private derivatives unlike system of the equations in the physical plane of a current of a stream. The method of search of analytical decisions of system of the equations in the speed hodograf plane, which consists in division of variables in system and in search of a number of the replacements, leading the received equations to tabular (reference) is given in article. As a result, the decision of system of the equations is consolidated to the solution of the hypergeometric equation. Under various conditions of division of variables the analytical groups of decisions, allowing to put and solve analytically various boundary problems of a current of potential water streams, two-dimensional in plan, were received.

The boundary task of spreading of a potential water stream to widely taking away course behind a free-flow water throughput pipe of rectangular section is correctly set and solved in this work. The decision can be used for determination of parameters of a stream in the vicinity of an exit of a stream from a pipe to the wide smooth course as thus forces of resistance to a stream from a bottom of the course are small (they increase further downstream a stream with reduction of depth) and they can be neglected. The problem is solved at first in the plane of a hodograf speed and further stream parameters in physical area of a current of a stream are defined by integration of communications of transition to the physical plane.

The analytical formulas received in work allow to determine all range of parameters of a stream, thus convergence between model and natural or experimental parameters considerably exceeds convergence of parameters on earlier known methods.

Keywords: water stream, rough stream, potential stream, water stream two-dimensional in the plan, hodograf of speed, the plane of hodograf speed, system of the differential equations in private derivatives, linear system of the equations, a method of division of variables, the hypergeometrical differential equation, a boundary task.

Введение

Цель работы – получение уравнений движения потока, допускающих аналитические решения в наиболее удобном виде, и решение граничной задачи свободного растекания потока с использованием плоскости годографа скорости.

Решение этой задачи является актуальным вследствие необходимости повышения адекватности параметров модельного и реального потоков, удобства пользования аналитическими формулами для различных параметров потока.

От качества модельных параметров потока зависит надёжность крепления водопропускных сооружений в окрестности выхода потока из безнапорного отверстия. Установка различных гасителей кинетической энергии потока также зависит от точечных и интегральных параметров свободно растекающегося потока.

Достижение цели в работе осуществляется решением задач, важных как в теоретическом плане,

так и в практическом аспекте, потому что в первом приближении на выходе потока из трубы в широкое гладкое отводящее русло силами сопротивления потоку можно пренебречь и считать его потенциальным [1].

Уравнения движения потенциального двухмерного в плане бурного водного потока

В работе [1] приведены уравнения движения двухмерного потока

$$\begin{cases} X - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} - T_x = \frac{du_x}{dt}; \\ Y - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} - T_y = \frac{du_y}{dt}; \\ Z - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} - T_z = \frac{du_z}{dt}, \end{cases} \quad (1)$$

где u_x , u_y , u_z – проекции вектора скорости жидкой частицы потока на оси декартовой системы коор-

динат Ox, Oy, Oz ; ρ – плотность потока; T_x, T_y, T_z – компоненты сил сопротивления потоку, отнесённых к единице массы жидкости; X, Y, Z – компоненты объёмных сил.

Эти уравнения получены из уравнений Л. Эйлера [2], учитывающих силы сопротивления.

Уравнение неразрывности для несжимаемой жидкости двухмерных в плане открытых потоков имеет вид [1]

$$\frac{\partial}{\partial x}(hu_x) + \frac{\partial}{\partial y}(hu_y) = 0, \quad (2)$$

где h – местная глубина потока.

Для установившегося потока при вертикальном направлении оси Oz и действии в жидкости единственной объёмной силы – силы тяжести – система (1) примет вид

$$\begin{cases} -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} - T_x = u_x \frac{\partial u_x}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_x}{\partial y} + u_z \frac{\partial u_x}{\partial z}; \\ -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} - T_y = u_x \frac{\partial u_y}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_y}{\partial y} + u_z \frac{\partial u_y}{\partial z}; \\ -g - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} - T_z = u_x \frac{\partial u_z}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_z}{\partial y} + u_z \frac{\partial u_z}{\partial z}. \end{cases} \quad (3)$$

В силу предпосылки о малости вертикальных составляющих скоростей и ускорений, все инерционные члены, содержащие u_z и её производные, могут быть отброшены. Может быть исключена из рассмотрения и вертикальная составляющая T_z , зависящая от величины u_z . В таком случае третье уравнение системы (3) примет вид

$$\frac{\partial p}{\partial z} = -\rho g, \quad (4)$$

где g – ускорение силы тяжести.

Интегрируя (4) и учитывая, что на свободной поверхности потока $z = z_n$ и $p = p_n = const$, приходим к гидростатическому закону распределения давлений $p - p_n = \gamma(z_n - z)$, где γ – удельный вес жидкости.

Обозначая через z_0 координату дна водотока, для составляющих градиента давления получаем выражения $\frac{\partial p}{\partial x} = \gamma \frac{\partial}{\partial x}(z_0 + h)$ и $\frac{\partial p}{\partial y} = \gamma \frac{\partial}{\partial y}(z_0 + h)$.

Тогда систему динамических уравнений движения двухмерного потока при $z_0 = const$, $T_x = T_y = 0$ можно записать в виде

$$\begin{cases} u_x \frac{\partial u_x}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_x}{\partial y} = -g \frac{\partial h}{\partial x}; \\ u_x \frac{\partial u_y}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_y}{\partial y} = -g \frac{\partial h}{\partial y}. \end{cases} \quad (5)$$

Присоединяя к системе (5) уравнение неразрывности (2), получим для случая плоского горизонтального дна русла без учёта сил сопротивления потоку замкнутую относительно функций $u_x = u_x(x, y)$, $u_y = u_y(x, y)$, $h = h(x, y)$ существенно нелинейную систему уравнений в частных производных:

$$\begin{cases} u_x \frac{\partial u_x}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_x}{\partial y} + g \frac{\partial h}{\partial x} = 0; \\ u_x \frac{\partial u_y}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_y}{\partial y} + g \frac{\partial h}{\partial y} = 0; \\ \frac{\partial}{\partial x}(hu_x) + \frac{\partial}{\partial y}(hu_y) = 0. \end{cases} \quad (6)$$

Для потенциального потока из условия отсутствия вихря

$$\frac{\partial u_x}{\partial y} - \frac{\partial u_y}{\partial x} = 0 \quad (7)$$

получим систему

$$\begin{cases} \frac{\partial(hu_x)}{\partial x} + \frac{\partial(hu_y)}{\partial y} = 0; \\ u_x = \frac{\partial \varphi}{\partial x}; \quad u_y = \frac{\partial \varphi}{\partial y}; \quad \frac{v^2}{2g} + h = H_0, \end{cases} \quad (8)$$

где $\varphi = \varphi(x, y)$ – потенциальная функция.

Система (8) – существенно нелинейная система уравнений математической физики [3] относительно функций $h = h(x, y)$ и $\varphi = \varphi(x, y)$, которая сводится к одному уравнению относительно функции $\varphi = \varphi(x, y)$ [1]. Вводя обозначение $c = \sqrt{gh}$, после преобразований получим уравнение для потенциальной функции в виде [1]

$$\begin{aligned} & \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} \left[c^2 - \left(\frac{\partial \varphi}{\partial x} \right)^2 \right] - \\ & - 2 \frac{\partial \varphi}{\partial x} \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial y} \cdot \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} \left[c^2 - \left(\frac{\partial \varphi}{\partial y} \right)^2 \right] = 0. \end{aligned} \quad (9)$$

Это известное уравнение приведено в [1]. Оно не отличается по внешнему виду от аналогичного уравнения для потенциала скорости плоского безвихревого потока газа. Данное уравнение приводят многие исследователи по гидравлике плановых потоков [4–9].

Для функции тока аналогично выводится уравнение

$$\begin{aligned} & \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} \left[1 - \frac{1}{c^2 h^2} \left(\frac{\partial \psi}{\partial y} \right)^2 \right] + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} \left[1 - \frac{1}{c^2 h^2} \left(\frac{\partial \psi}{\partial x} \right)^2 \right] + \\ & + \frac{2}{c^2 h^2} \cdot \frac{\partial \psi}{\partial x} \cdot \frac{\partial \psi}{\partial y} \cdot \frac{\partial^2 \psi}{\partial x \partial y} = 0. \end{aligned} \quad (10)$$

Уравнения (9), (10) для бурных потоков относятся к гиперболическому типу, и их аналитические решения до настоящего времени не найдены, так как они являются существенно нелинейными. При решении практических граничных задач по течению бурных потоков используются связи между характеристиками в физической плоскости течения потока и в плоскости годографа скорости, а также интеграл Бернулли.

Перейдём от системы уравнений движения двухмерного потенциального потока в физической области течения потока

$$\begin{cases} u_x = \frac{\partial \varphi}{\partial x}; & u_y = \frac{\partial \varphi}{\partial y}; \\ \frac{h}{h_0} u_x = \frac{\partial \psi}{\partial y}; & \frac{h}{h_0} u_y = -\frac{\partial \psi}{\partial x}; \\ \frac{v^2}{2g} + h = H_0, \end{cases} \quad (11)$$

где существование функции тока ψ следует из условия (2), к уравнениям в плоскости годографа скорости [10–12]. Получим систему уравнений математической физики в плоскости годографа скорости:

$$\begin{cases} \frac{\partial \varphi}{\partial \theta} = \frac{2h_0}{H_0} \cdot \frac{\tau}{1-\tau} \cdot \frac{\partial \psi}{\partial \tau}; \\ \frac{\partial \varphi}{\partial \tau} = \frac{h_0}{2H_0} \cdot \frac{3\tau-1}{\tau(1-\tau)^2} \cdot \frac{\partial \psi}{\partial \theta}, \end{cases} \quad (12)$$

где $\tau = \frac{v^2}{2gH_0}$; θ – угол наклона вектора скорости жидкой частицы к продольной оси Ox .

Для бурных потоков $\tau \in \left(\frac{1}{3}; 1\right)$.

Система (12) совместно с интегралом Бернулли $h = H_0(1-\tau)$ позволяет ставить и решать граничные задачи по течению потенциальных, бурных, двухмерных в плане открытых стационарных водных потоков. Это уже система квазилинейных уравнений в частных производных, которая позволяет получить группы частных аналитических решений и пользоваться ими при решении граничных задач [13].

Дифференцируя первое уравнение системы (12) по переменной τ , второе – по переменной θ и приравнявая частные производные, получим следующее уравнение математической физики относительно функции $\psi = \psi(\tau, \theta)$:

$$\frac{\partial}{\partial \tau} \left\{ \frac{2\tau}{1-\tau} \cdot \frac{\partial \psi}{\partial \tau} \right\} + \frac{1-3\tau}{2\tau(1-\tau)^2} \cdot \frac{\partial^2 \psi}{\partial \theta^2} = 0. \quad (13)$$

При этом установлена комплексная связь между планом течения потока и плоскостью годографа

скорости в виде обобщённой связи между сопряжённой скоростью и производной от комплексного потенциала по координате [10, 11]:

$$dz = \left(d\varphi + i \frac{h_0}{h} d\psi \right) \frac{1}{v} e^{i\theta}, \quad (14)$$

где $z = x + iy$; $i = \sqrt{-1}$.

Следовательно, решив граничную задачу в плоскости годографа скорости, можно, пользуясь связью (14), решить её и в физической плоскости течения водного потока.

Заметим также, что уравнение (13) и система (12) по внешнему виду совпадают с соответствующим уравнением и системой уравнений С.А. Чаплыгина для течения совершенного газа [10, 11, 14]:

$$\begin{cases} \frac{\partial \varphi}{\partial \theta} = \frac{2\tau}{(1-\tau)\beta} \cdot \frac{\partial \psi}{\partial \tau}; \\ \frac{\partial \varphi}{\partial \tau} = -\frac{1-(2\beta+1)\tau}{2\tau(1-\tau)^{\beta+1}} \cdot \frac{\partial \psi}{\partial \theta}; \end{cases} \quad (15)$$

$$\frac{\partial}{\partial \tau} \left\{ \frac{2\tau}{(1-\tau)\beta} \cdot \frac{\partial \psi}{\partial \tau} \right\} + \frac{1-(2\beta+1)\tau}{2\tau(1-\tau)^{\beta+1}} \cdot \frac{\partial^2 \psi}{\partial \theta^2} = 0. \quad (16)$$

Сравнивая уравнения (13) и (16), видим, что их внешний вид совпадает при $\beta = 1$, а системы (12) и (15) совпадают при $\beta = 1$ с точностью до постоянного множителя.

Заметим также, что метод поиска групп аналитических решений для (12) и (13) можно заимствовать из теории С.А. Чаплыгина [14].

Это метод разделения переменных и сведения решения уравнения в частных производных (13) рядом замен к решению известного в математической литературе [3] гипергеометрического уравнения.

Приведём уравнение (16) к виду, более удобному для его классификации

$$\tau \frac{\partial^2 \psi}{\partial \tau^2} + \frac{1}{1-\tau} \cdot \frac{\partial \psi}{\partial \tau} + \frac{1-3\tau}{4\tau(1-\tau)} \cdot \frac{\partial^2 \psi}{\partial \theta^2} = 0. \quad (17)$$

Это – линейное дифференциальное уравнение в частных производных второго порядка [3] вида:

$$a_{11} \frac{\partial^2 \phi}{\partial \tau^2} + 2a_{12} \frac{\partial^2 \phi}{\partial \tau \partial \theta} + a_{22} \frac{\partial^2 \phi}{\partial \theta^2} + B = 0, \quad (18)$$

где a_{11} , a_{12} , a_{22} и B – функции от τ , θ , φ , $\frac{\partial \phi}{\partial \tau}$, $\frac{\partial \phi}{\partial \theta}$.

Для уравнения (18) $\phi = \psi(\tau, \theta)$; $a_{11} = \tau$; $a_{12} = 0$; $a_{22} = \frac{1-3\tau}{4\tau(1-\tau)}$; $B = \frac{1}{1-\tau} \cdot \frac{\partial \psi}{\partial \tau}$.

Уравнение (17) является линейным гиперболическим при $a_{11}a_{22} - a_{12}^2 = -\frac{3\tau-1}{4(1-\tau)} < 0$, т.е. при

$\frac{1}{3} < \tau \leq 1$ для бурных потоков, причём справедлива формула $Fr = \frac{2\tau}{1-\tau}$; $Fr \in (1; \infty)$, где Fr – критерий Фруда [1, 2].

Для уравнения (18) характеристики имеют вид [10, 11]:

$$\theta = \pm \left(-\arctg \sqrt{\frac{3\tau-1}{1-\tau}} + \sqrt{3} \arctg \frac{1}{\sqrt{3}} \sqrt{\frac{3\tau-1}{1-\tau}} \right) + C_{1,2} \quad (19)$$

или $\theta + f(\tau) = C_1$ – для первого семейства;

$\theta - f(\tau) = C_2$ – для второго семейства, где

$$f(\tau) = \arctg \sqrt{\frac{3\tau-1}{1-\tau}} - \sqrt{3} \arctg \frac{1}{\sqrt{3}} \sqrt{\frac{3\tau-1}{1-\tau}}.$$

Метод разделения переменных для решения уравнения (13)

Для решения уравнения (13) будем искать функцию в виде произведения двух функций [10, 11, 13]:

$$\psi(\tau, \theta) = \psi_1(\tau) \cdot \psi_2(\theta). \quad (20)$$

Получим
$$\frac{\frac{d}{d\tau} \left\{ \frac{\tau}{1-\tau} \cdot \frac{d\psi_1(\tau)}{d\tau} \right\}}{\frac{1-3\tau}{4\tau(1-\tau)^2} \psi_1(\tau)} = - \frac{\frac{d^2\psi_2(\theta)}{d\theta^2}}{\psi_2(\theta)}.$$

Так как левая часть уравнения – функция аргумента τ , а правая – θ , то обе части уравнения можно положить постоянными, равными ω , следовательно, получим два обыкновенных дифференциальных уравнения:

$$\begin{cases} \frac{d}{d\tau} \left\{ \frac{\tau}{1-\tau} \cdot \frac{d\psi_1(\tau)}{d\tau} \right\} = \omega \frac{1-3\tau}{4\tau(1-\tau)^2} \psi_1(\tau); \\ \frac{d^2\psi_2(\theta)}{d\theta^2} + \omega \psi_2(\theta) = 0. \end{cases} \quad (21)$$

При $\omega = n^2 > 0$ второе уравнение (21) переписывается в виде

$$\frac{d^2\psi_2(\theta)}{d\theta^2} + n^2\psi_2(\theta) = 0. \quad (22)$$

Его решение $\psi_2(\theta) = A \sin(n\theta + \lambda)$, где A, λ – произвольные постоянные.

Первое уравнение (21) преобразуется к виду

$$\frac{d}{d\tau} \left\{ \frac{\tau}{1-\tau} \cdot \frac{d\psi_1}{d\tau} \right\} - n^2 \cdot \frac{1-3\tau}{4\tau(1-\tau)^2} \psi_1 = 0. \quad (23)$$

Применительно к уравнению (23) полагаем $n = 2k - 1, k = 1, 2, 3, \dots$ В этом случае уравнение (23) переписывается в виде

$$\frac{d}{d\tau} \left\{ \frac{\tau}{1-\tau} \cdot \frac{d\psi_1}{d\tau} \right\} - (2k-1)^2 \cdot \frac{1-3\tau}{4\tau(1-\tau)^2} \psi_1 = 0. \quad (24)$$

Совершим замену $\psi_k = z_k = \tau^{k-\frac{1}{2}} \cdot Y_k$. В результате приходим к уравнению

$$\tau \cdot (1-\tau) \cdot \frac{d^2 Y_k}{d\tau^2} + [2k - (2k-1)\tau] \cdot \frac{dY_k}{d\tau} + k(2k-1)Y_k = 0. \quad (25)$$

Решением (25) является гипергеометрический ряд

$$Y^{(1)} = F(a, b, c, \tau) = 1 + \frac{ab}{c} \tau + \frac{1}{2!} \cdot \frac{a(a+1)b(b+1)}{c(c+1)} \tau^2 + \dots$$

$Y_k^{(1)} = F(a_k, b_k, 2k, \tau)$ – первое решение уравнения (25), причём

$$\begin{cases} c_k = 2k; & -a_k \cdot b_k = k(2k-1); \\ 2k-1 = a_k + b_k + 1. \end{cases} \quad (26)$$

Из системы (26) определяются коэффициенты

$$a_k, b_k, c_k: \quad a_k = k-1 + \sqrt{3k^2 - 3k + 1};$$

$$b_k = k-1 - \sqrt{3k^2 - 3k + 1}; \quad c_k = 2k.$$

Второе линейно независимое решение уравнения (25) определяется выражением

$$Y_k^{(2)} = \tau^{1-2k} F(a_k + 1 - 2k, b_k + 1 - 2k, 2 - 2k, \tau).$$

Определим аналитические решения уравнения (25), в которых гипергеометрический ряд обрывается ($k = 1; a_1 = 1; b_1 = -1; c = 2$).

$$\text{Тогда } Y_1^{(1)} = 1 - \frac{\tau}{2}, \text{ а } \psi_1^{(1)} = \sqrt{\tau} \cdot \left(1 - \frac{\tau}{2} \right).$$

Второе линейно независимое решение уравнения (25) определяется выражением

$$Y_1^{(2)} = \tau^{-1} \cdot F(0, -2, 0, \tau) = \frac{1}{\tau}, \text{ а } \psi_1^{(2)} = \frac{1}{\sqrt{\tau}}.$$

Возвращаясь к решению уравнения (13), получим $\psi^{(1)} = A_1 \cdot \sqrt{\tau} \cdot \left(1 - \frac{\tau}{2} \right) \sin(\theta + \lambda)$,

$$\psi^{(2)} = A_2 \cdot \frac{1}{\sqrt{\tau}} \cdot \sin(\theta + \lambda).$$

Читателям показан пример разделения переменных при $n = 1$. Этими решениями будем пользоваться в решении задачи свободного растекания потенциального бурного потока. Случай разделения переменных при $n = 2k, k = 0, 1, 2, \dots$ подробно описан в работах [10, 11]. Заметим, что λ можно положить равным нулю, а можно определять решение уравнения (22) в виде $\psi_2(\theta) = \sin(\lambda - \theta)$, где λ – произвольная постоянная.

Заметим, что при $n = 1$ уравнение (24) принимает вид

$$\frac{d^2\psi_1}{d\tau^2} + \frac{1}{\tau(1-\tau)} \cdot \frac{d\psi_1}{d\tau} + \frac{3\tau-1}{4\tau^2(1-\tau)}\psi_1 = 0. \quad (27)$$

Для бурного потока при $\frac{1}{3} < \tau \leq 1$ коэффициен-

ты $a_1(\tau) = \frac{1}{\tau(1-\tau)}$; $a_2(\tau) = \frac{3\tau-1}{4\tau^2(1-\tau)}$ будут неотрицательными.

Авторами статьи найдено решение уравнения (27) в виде

$$\psi = C \frac{(1-\tau)^2}{\tau^{1/2}} \sin(\theta_{\max} - \theta). \quad (28)$$

Оно позволит далее корректно поставить граничную задачу свободно растекающегося потока в плоскости годографа скорости.

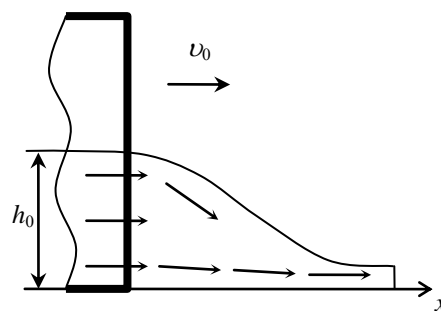
Граничные задачи свободного растекания потенциального бурного потока за безнапорной трубой прямоугольного сечения

Основные свойства потока. Схема растекания потока приведена на рис. 1.

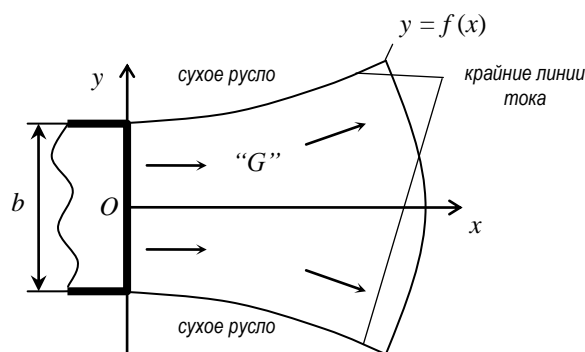
Поток, вытекая из прямоугольной трубы, при заданных значениях h_0, b, v_0 в безнапорном режиме имеет практически равномерную эпюру распределения скоростей на вертикали на выходе из трубы, а потом растекается до бесконечности в широкое гладкое горизонтальное русло. При этом крайние линии тока отделяют поток от сухого русла. Поток симметричен относительно оси Ox .

Задача заключается в том, чтобы определить параметры потока в области G и форму (уравнения) крайних линий тока. К параметрам потока в области G относятся $h = h(x, y)$ – местная глубина потока; $v = v(x, y)$ – модуль вектора скорости; $\theta = \theta(x, y)$ – угол между направлением вектора скорости и осью Ox симметрии потока; b – ширина трубы; h_0 – глубина потока на его выходе из трубы, причём $h_0 < h_{тр}$ (режим безнапорный); v_0 – величина скорости на выходе потока из трубы; $\theta = 0$ – угол направления вектора скорости на его выходе из трубы. Поток бурный: $F_0 = \frac{v^2}{gh_0} > 1$.

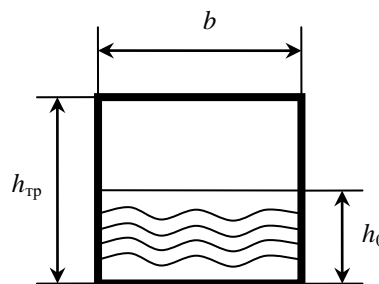
Полагаем поток потенциальным, бурным, следовательно, не учитываются как силы внутреннего, так и внешнего сопротивления потоку. Выявим основные свойства бурного потока при его свободном растекании. Для выявления этого полагаем его одномерным.



а / а



б / б



в / в

Рис. 1. Схема растекания потока: а – вертикальный разрез по оси симметрии потока; б – план растекания потока; в – поперечное сечение потока и трубы / Fig. 1. The scheme of spreading of the flow: а – vertical section on the axis of symmetry of the flow; б – plan of the spreading of the stream; в – cross-section of flow and pipe

Основное свойство потока при входе в расширение: кинетичность потока увеличивается. При этом справедливы следующие уравнения:

$$\frac{v^2}{2g} + h = \frac{v_0^2}{2g} + h_0 = H_0 \text{ – уравнение Бернулли,} \quad (29)$$

$$Q = vhb' = v_0h_0b \text{ – уравнение неразрывности.} \quad (30)$$

Здесь b' – ширина живого сечения потока; v – средняя скорость в живом сечении потока; h – средняя глубина потока в живом сечении.

Введём параметр кинетичности потока $\tau = \frac{v^2}{2gH_0}$ и преобразуем уравнения (29), (30) к

$$\text{виду } h = H_0(1 - \tau), \quad b' = \frac{Q}{\tau^{1/2} \sqrt{2gH_0} \cdot H_0(1 - \tau)}.$$

Функция $f(\tau) = \frac{1}{\tau^{1/2}(1 - \tau)}$ монотонно возрастает при увеличении τ от τ_0 до 1. Следовательно, b монотонно увеличивается, глубина потока $h = H_0(1 - \tau)$ монотонно убывает от h_0 до 0, скорость потока $v = \tau^{1/2} \cdot \sqrt{2gH_0}$ монотонно возрастает от v_0 до $v_{\max} = \sqrt{2gH_0}$.

Докажем, что угол θ монотонно увеличивается от нуля до θ_{\max} вдоль крайней верхней линии тока $y = f(x)$.

$$\text{Угол } \theta_{\max} = C_1 + (\sqrt{3} - 1) \frac{\pi}{2}, \text{ где}$$

$$C_1 = \arctg \sqrt{\frac{3\tau_0 - 1}{1 - \tau_0}} - \sqrt{3} \arctg \sqrt{\frac{3\tau_0 - 1}{3(1 - \tau_0)}},$$

определяется из уравнения эллипсоиды первого семейства (19), проходящей через точку $\theta = 0, \tau = \tau_0$ и точку $\theta = \theta_{\max}, \tau = 1$. При этом угол вдоль крайней линии тока совпадает с углом вдоль характеристики первого семейства при $\tau = 1$, так как волновой угол (угол между характеристикой и линией тока)

$$\alpha = a_k \sin \sqrt{\frac{1 - \tau}{2\tau}} \rightarrow 0 \text{ при } \tau \rightarrow 1.$$

Введём в рассмотрение радиус живого сечения потока R (рис. 2).

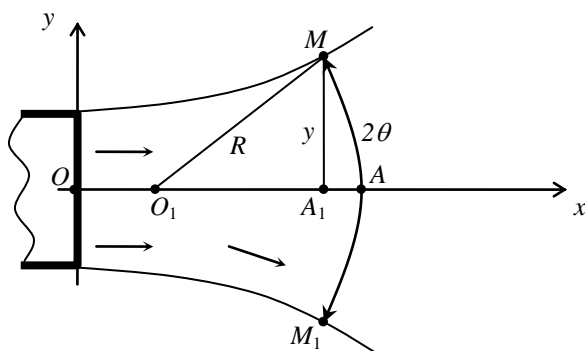


Рис. 2. К течению одномерного потока $b' = 2R\theta$
 / Fig. 2. To flow one-dimensional flow $b' = 2R\theta$

Так как функция b' – монотонно возрастающая вниз по течению потока, то монотонно возрастающей будет и функция $y = R \sin \theta$, а следовательно,

$\frac{dy}{dx} = \text{tg } \theta$ будет также функцией монотонно возрастающей.

Граничная задача в физической плоскости течения потока. Поток в области G (рис. 1) удовлетворяет следующей системе уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} H_0 = \frac{v^2}{2g} + h = \frac{v_0^2}{2g} + h_0 - \text{уравнение Бернулли;} \\ \frac{\partial(hu_x)}{\partial x} + \frac{\partial(hu_y)}{\partial y} = 0 - \text{уравнение} \\ \text{непрерывности потока;} \\ \frac{\partial u_y}{\partial x} - \frac{\partial u_x}{\partial y} = \Omega = 0 - \text{условие} \\ \text{потенциальности движения потока.} \end{array} \right. \quad (31)$$

Постоянная H_0 зависит от параметров потока на выходе из трубы [10], т.е. от величин v_0, h_0 – скорости и глубины потока на выходе из трубы.

Граничные условия:

– на выходе потока из трубы:

$$x = 0, \quad -\frac{b}{2} \leq y \leq \frac{b}{2}, \quad h = h_0, \quad v = v_0, \quad \theta = 0;$$

– вдоль оси симметрии потока: $\theta = 0$;

– на бесконечности:

$$x \rightarrow \infty, \quad h \rightarrow 0, \quad v \rightarrow v_{\max} = \sqrt{2gH_0};$$

– вдоль крайней верхней линии тока:

$$y = f(x), \quad y'_x = \text{tg } \theta;$$

– на бесконечности вдоль крайней линии тока:

$$\theta \rightarrow \theta_{\max}, \quad h \rightarrow 0, \quad v \rightarrow v_{\max}.$$

Верхняя крайняя линия тока отсекает от оси Ox

50 % расхода Q или удельного расхода $\frac{Q}{h_0} = \frac{v_0 b}{2}$.

В области течения потока G необходимо определить следующие параметры: проекции вектора скорости $u_x = u_x(x, y), u_y = u_y(x, y)$, местную глубину потока $h = h(x, y)$, а также неизвестную границу области растекания потока $y = f(x)$, учитывая, что поток имеет ось симметрии Ox .

При известных u_x, u_y модуль скорости опре-

деляется по формуле $v = \sqrt{u_x^2 + u_y^2}$; угол

$$\theta = \arctg \frac{u_x}{u_y}.$$

Для решения поставленной задачи приведённых граничных условий недостаточно. Заранее неизвестны крайняя линия тока и условия изменения параметров v, h вдоль неё. Известно лишь, что область потока является сплошной и крайняя линия тока отделяет его от сухого русла. Следовательно, в поставленной задаче имеется одна степень свободы.

Решить задачу аналитически непосредственно в физической плоскости течения потока не представляется возможным, так как система уравнений (31) является существенно нелинейной системой уравнений математической физики (присутствуют слагаемые типа $\frac{\partial}{\partial x}(hu_x)$ и т.д.). Её аналитические решения до настоящего времени не найдены. Поэтому можно поставить эту же задачу в плоскости годографа скорости, как это сделал С.А. Чаплыгин для идеального газа [14], а затем, используя формулу связи (14), перейти в физическую плоскость течения потока и интегрированием получить параметры потока непосредственно в физической плоскости течения жидкости.

Заметим, что естественное условие $h=0$ вдоль крайней линии тока приводит к грубому искажению адекватности модельного и реального потоков, так как из уравнения Бернулли следует, что $v \rightarrow v_{\max} = \sqrt{2gH_0}$ и крайняя линия тока представляет прямую линию. Это противоречит практике наблюдений за бурными потоками. И.А. Шеренков в своей работе [15] предлагает рассматривать глубину вдоль крайних линий тока монотонно убывающей от h_0 до нуля, а сами значения глубины определять в результате решения граничной задачи.

Граничная задача растекания потока в плоскости годографа скорости. Решить задачу в плоскости годографа скорости – это значит определить функцию $\psi = \psi(\tau, \theta)$, удовлетворяющую уравнению в частных производных (13), граничным и дополнительным условиям, вытекающим из свойств свободно растекающегося потенциально бурного потока. Решение уравнения (13) будем определять в виде

$$\psi(\tau, \theta) = C \frac{(1-\tau)^2}{\tau^{1/2}} \sin(\theta_{\max} - \theta) + \sum_{k=1}^N \psi_k(\tau) \sin k\theta.$$

Дифференциальное уравнение второго порядка в частных производных (14) имеет спектр аналитических решений, из которого необходимо выбрать решения, удовлетворяющие следующим условиям:

– вдоль крайней верхней линии тока в плоскости годографа скорости

$$\psi = \psi(\tau, \theta) = \frac{v_0 b}{2}; \quad (32)$$

– на выходе потока из трубы точка $\tau = \tau_0, \theta = 0$ должна принадлежать линии тока, т.е.

$$\psi(\tau_0, 0) = \frac{v_0 b}{2}; \quad (33)$$

– на бесконечности точка $\tau = 1, \theta = \theta_{\max}$ также должна принадлежать крайней линии тока, т.е.

$$\psi(1, \theta_{\max}) = \frac{v_0 b}{2}. \quad (34)$$

Угол

$$\theta = f^*(\tau) \quad (35)$$

должен быть монотонно возрастающей функцией при возрастании τ от τ_0 до 1. При этом θ должно возрастать от 0 до θ_{\max} .

Условиям (33)–(35) удовлетворяют только решения уравнений (21), (22) при $n = 1$, что было доказано компьютерным путём.

Следовательно, функцию $\psi = \psi(\tau, \theta)$ и уравнение крайней линии тока можно представить в виде

$$\psi(\tau, \theta) = C \frac{(1-\tau)^2}{\tau^{1/2}} \sin(\theta_{\max} - \theta) + A_1 \frac{\sin \theta}{\tau^{1/2}} + A_2 \tau^{1/2} \left(1 - \frac{\tau}{2}\right) \sin \theta, \quad (36)$$

где C, A_1, A_2 – постоянные, определяемые в результате решения граничной задачи.

Первое слагаемое в (36) должно присутствовать для сопряжения потока в трубе и на его выходе из трубы, т.е. удовлетворять условию (33).

Второе слагаемое может иметь место, так как $f(\theta) = \sin \theta$ – неотрицательная монотонно возрастающая функция при увеличении θ от нуля до θ_{\max} ; $f(\tau) = \tau^{1/2}$ – положительная монотонно возрастающая функция при возрастании τ от τ_0 до 1. Их отношение может быть постоянным в некотором интервале изменения угла θ и параметра кинетичности τ .

Третье слагаемое может иметь место на некотором интервале изменения параметров θ и τ , так как функция $f(\theta) = \sin \theta$ – монотонно возрастающая

функция; $f(\tau) = \tau^{1/2} \left(1 - \frac{\tau}{2}\right)$ – монотонно убывающая

функция в интервале $\tau \in \left[\frac{2}{3}, 1\right]$.

Очевидно, что функция вида $f(\theta) = \sin 2\theta$ не будет монотонной при увеличении θ от 0 до θ_{\max} ; θ_{\max} , согласно [1, 4], может достигать предельного значения 67° .

Определение коэффициентов в уравнении крайней линии тока. Определим коэффициенты в уравнении крайней линии тока:

$$\frac{\nu_0 b}{2} = C \frac{(1-\tau)^2}{\tau^{1/2}} \sin(\theta_{\max} - \theta) + A_1 \frac{\sin \theta}{\tau^{1/2}} + A_2 \tau^{1/2} \left(1 - \frac{\tau}{2}\right) \sin \theta. \quad (37)$$

Из условия (33) следует

$$\frac{\nu_0 b}{2} = C \frac{(1-\tau_0)^2}{\tau_0^{1/2}} \sin \theta_{\max};$$

$$C = \frac{\nu_0 b \tau_0^{1/2}}{2(1-\tau_0)^2 \sin \theta_{\max}}, \quad (38)$$

т.е. коэффициент C определяется однозначно.

Из условия (34)

$$\frac{\nu_0 b}{2} = A_1 \sin \theta_{\max} + \frac{A_2}{2} \sin \theta_{\max} \quad \text{или}$$

$$A_1 + \frac{A_2}{2} = \frac{\nu_0 b}{2 \sin \theta_{\max}}. \quad (39)$$

Из условия (39) $A_2 = \frac{\nu_0 b}{\sin \theta_{\max}} - 2A_1$. Перепишем

уравнение (37)

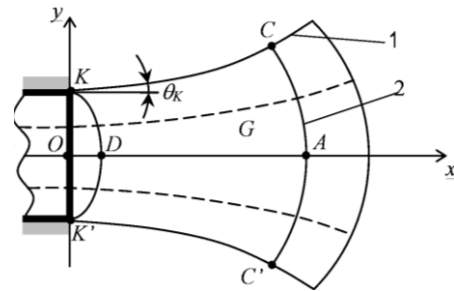
$$\frac{\nu_0 b}{2} = C \frac{(1-\tau)^2}{\tau^{1/2}} \sin(\theta_{\max} - \theta) + \frac{A \sin \theta}{\tau^{1/2}} + \left(\frac{\nu_0 b}{\sin \theta_{\max}} - 2A \right) \cdot \tau^{1/2} \left(1 - \frac{\tau}{2}\right) \sin \theta \quad (40)$$

или

$$\frac{\nu_0 b}{2} = C \frac{(1-\tau)^2}{\tau^{1/2}} \sin(\theta_{\max} - \theta) + A \sin \theta \left[\frac{1}{\tau^{1/2}} - 2\tau^{1/2} \left(1 - \frac{\tau}{2}\right) \right] + \frac{\nu_0 b}{\sin \theta_{\max}} \cdot \tau^{1/2} \left(1 - \frac{\tau}{2}\right) \sin \theta. \quad (41)$$

Анализируя уравнение крайней линии тока (41), можно убедиться, что с увеличением τ от τ_0 до τ_K и θ от нуля до θ_K (где τ_K, θ_K – параметры потока в точке K при $C=0$) [10, 11], роль первого слагаемого в правой части (41) уменьшается в разы по сравнению со вторым и третьим слагаемыми, и это уравнение практически будет совпадать с уравнением

$$\frac{\nu_0 b}{2} = A \sin \theta \left[\frac{1}{\tau^{1/2}} - 2\tau^{1/2} \left(1 - \frac{\tau}{2}\right) \right] + \frac{\nu_0 b}{\sin \theta_{\max}} \cdot \tau^{1/2} \cdot \left(1 - \frac{\tau}{2}\right) \sin \theta \quad (\text{рис. 3}).$$



1 – крайняя верхняя линия тока $y=f(x)$
 2 – произвольная эквипотенциаль

Рис. 3. План течения потока при $C=0, \theta_k \neq 0$
 / Fig. 3. The plan of flow at $C=0, \theta_k \neq 0$

Так как $A + \frac{A_2}{2} = \frac{\nu_0 b}{2 \sin \theta_{\max}}$ согласно (39), то

$$A \geq 0, A_2 \geq 0 \quad \text{и}$$

$$0 \leq A \leq \frac{\nu_0 b}{2 \sin \theta_{\max}}. \quad (42)$$

Так как C определяется однозначно из (38), то из уравнения (40) при $C=0$ определим угол θ :

$$\sin \theta = \frac{\nu_0 b}{2A \tau^{-1/2} + \left(\frac{\nu_0 b}{\sin \theta_{\max}} - 2A \right) \tau^{1/2} (2-\tau)}. \quad (43)$$

В уравнение (43) входит постоянная A , изменяющаяся в пределах (42) и определяющая свойства $\sin \theta$ и $\theta = f(A, \tau, \tau_0)$. Для её определения используем принцип оптимальности в природе [16], который сформулируем применительно к граничной задаче.

Если процесс растекания бурного потока имеет одну степень свободы (неизвестна одна постоянная – A), то процесс будет протекать так, что целевая функция $\theta = f(A, \tau, \tau_0)$ будет принимать максимальное возможное значение при любых τ_0 и τ .

Задача определения постоянной A – это задача динамического программирования.

Определим частную производную $\frac{\partial f(A, \tau, \tau_0)}{\partial A}$:

$$\frac{\partial f}{\partial A} = - \frac{\nu_0 b \cdot [2\tau^{-1/2} - 2\tau^{1/2}(2-\tau)]}{2A \tau^{-1/2} + \left(\frac{\nu_0 b}{\sin \theta_{\max}} - 2A \right) \cdot \tau^{1/2} \cdot (2-\tau)}. \quad (44)$$

Так как числитель в (44) не зависит от A , то максимум $\sin \theta$, а следовательно, и θ может достигаться только при $A=0$ либо $A = \frac{\nu_0 b}{2 \sin \theta_{\max}}$.

Уравнение крайней линии тока при этом с учётом ограничений на монотонность угла θ будет следующим:

$$\left\{ \begin{aligned} \psi(\tau, \tau_0, \theta) &= \frac{A^* \sin \theta}{\tau^{1/2}} + \frac{C(1-\tau)^2}{\tau^{1/2}} \sin(\theta_{\max} - \theta) = \frac{\nu_0 b}{2}, \\ \text{при } \frac{1}{3} < \tau_0 \leq \frac{2}{3}, \quad A^* &= \frac{\nu_0 b}{2 \sin \theta_{\max}} = A; \\ \psi(\tau, \tau_0, \theta) &= A^* \sin \theta \cdot \tau^{1/2} \left(1 - \frac{\tau}{2}\right) + \\ &+ \frac{C(1-\tau)^2}{\tau^{1/2}} \sin(\theta_{\max} - \theta) = \frac{\nu_0 b}{2}, \\ \text{при } \frac{2}{3} < \tau_0 < 1, \quad A^* &= \frac{\nu_0 b}{2 \sin \theta_{\max}}, \quad A = 0. \end{aligned} \right. \quad (45)$$

В работе [11] отмечено, что угол θ , определённый из уравнений (45), будет также монотонно возрастающей функцией от τ . Зная вид крайней линии тока, из системы (13) можно определить потенциальную функцию и вид эквипотенциалей.

Решив задачу свободного растекания бурного потенциального потока в плоскости годографа скорости, можно определить параметры потока τ, θ в любой точке области течения потока (рис. 4). Верхняя часть области течения потока G в плоскости τ, θ ограничена крайней линией тока AB , отрезком AC линии тока с нулевым расходом и дугой окружности BC при $\tau = 1$. Для этого необходимо решить систему

$$\begin{cases} \psi(\tau, \theta) = C_1; \\ \psi(\tau, \theta) = C_2, \end{cases} \quad (46)$$

где C_1 определяется долей расхода, отсекаемого данной линией тока и осью симметрии Ox ($O\tau_x$); C_2 определяется фиксацией конкретной эквипотенциали.

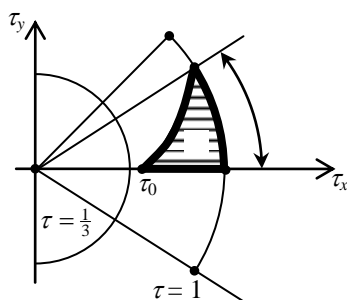


Рис. 4. К пояснению области течения потока в плоскости (τ, θ)
 / Fig. 4. The explanation of the flow stream in the plane (τ, θ)

Из системы (46) определяются параметры потока в точке пересечения произвольной фиксированной линии тока с произвольной эквипотенциалью. Переход в физическую плоскость осуществляется использованием связи (14), из которой интегрированием определяются координаты x, y , соответст-

вующие параметрам τ, θ , полученным из системы (46). Подробный алгоритм решения задачи можно посмотреть в литературе [10, 11]. Там же доказыва-ется, что сходимость по различным параметрам потока между моделью и реальным потоком в окрестности выхода потока из трубы до расширения потока $\beta = 7$ превышает сходимость по ранее известным методам.

Выводы

1. Метод Кирхгофа – Чаплыгина применим к потенциальным плавным течениям водных потоков. Он позволяет получить аналитические зависимости для определения глубин, скоростей в любой точке потока, а также для определения формы линий тока и эквипотенциалей (вообще для определения любых точечных или интегральных характеристик потока).

2. Доказано, что замыкание граничной задачи свободного растекания потенциального бурного потока в предположении оптимальности угла растекания потока вдоль крайних линий тока даёт высокую адекватность модели реальному потоку в окрестности выхода потока из трубы.

3. Модель потенциального двухмерного в плане водного потока имеет не только теоретический, но и практический интерес.

Литература

1. Емцев Б.Т. Двухмерные бурные потоки. М. : Энергия, 1967. 212 с.
2. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. М. : Дрофа, 2003. 840 с.
3. Справочник по математике для научных работников и инженеров / под общ. ред. Г. Корн, Т. Корн. М. : Наука, 1970. 720 с.
4. Высоцкий Л.И. Совершенствование методов гидравлических расчётов водопропускных и очистных сооружений : межвуз. науч. сб. / редкол. Л.И. Высоцкий и др.; Саратов. гос. техн. ун-т. Саратов, 1994. 94 с.
5. Сухомел Г.И. Вопросы гидравлики открытых русел и сооружений. Киев : Изд-во АН УССР, 1949. 314 с.
6. Гарзанов А.В. Применение метода Кирхгофа – Чаплыгина к расчёту сжатия открытых потоков // Сб. тр. каф. гидравлики Саратов. политехн. ун-та. Саратов, 1963. Вып. 19. С. 96–115.
7. Гиргидов А.Д. Механика жидкости и газа (гидравлика) : учеб. пособие. 2-е изд. СПб. : Изд-во СПбГТУ, 2003. 545 с.
8. Takeda R., Kawanawi M. The influence of turbulence on the characteristic of the propeller current meters // Trans. Soc. Mtch. Eng. 1978. № 383, vol. 44. P. 2389–2394.

9. Ippen A.T. Mechanics of Supercritical Flow // Proceedings American Society of Civill Engineers. 1949. № 9, vol. 75. 178 p.

10. Коханенко В.Н., Волосухин Я.В., Ширяев В.В., Коханенко Н.В. Моделирование одномерных и двухмерных открытых водных потоков / под общ. ред. В.Н. Коханенко. Ростов н/Д. : Изд-во ЮФУ, 2007. 168 с.

11. Коханенко В.Н., Волосухин Я.В., Лемешко М.А., Папченко Н.Г. Моделирование бурных двухмерных в плане водных потоков / под общ. ред. В.Н. Коханенко. Ростов н/Д. : Изд-во ЮФУ, 2013. 179 с.

12. Коханенко В.Н., Келехсаев Д.Б. Решение граничных задач по течению двухмерных в плане стационарных открытых потенциальных водных потоков // Сб. ст. по материалам III Междунар. конф. преподавателей, молодых учёных, аспирантов и студентов вузов. 26 апреля 2016 года. Новочеркасск : ЮРГПУ (НПИ), 2016. С. 69–72.

13. Коханенко В.Н., Косиченко Ю.М., Дуванская Е.В., Калмыков Б.Ю. Методы решения гидравлических задач по течению плановых стационарных потоков воды / под общ. ред. В.Н. Коханенко; Южн.-Рос. гос. ун-т экономики и сервиса. Шахты : Изд-во ЮРГУЭС, 2003. 68 с.

14. Чаплыгин С.А. Механика жидкости и газа. Математика. Общая механика: Избранные труды. М. : Наука, 1976. 496 с.

15. Шеренков И.А. О плановой задаче растекания струи бурного потока несжимаемой жидкости // Изв. АН СССР. ОТН. 1958. № 1. С. 72–78.

16. Реклейтис Г., Рейвиндран А., Регсдел К. Оптимизация в технике : в 2 кн. / пер. с англ. В.Я. Алтаева, В.И. Моторина. М. : Мир, 1986. 347 с.

References

1. Emtsev B.T. *Dvukhmernye burnye potoki* [Two-dimensional turbulent flows]. Moscow, Energiya, 1967, 212 p.

2. Loitsyanskii L.G. *Mekhanika zhidkosti i gaza* [Mechanics of fluid and gas]. Moscow, Drofa, 2003, 840 p.

3. *Spravochnik po matematike dlya nauchnykh rabotnikov i inzhenerov* [Handbook on mathematics for scientists and engineers]. Eds. G. Korn, T. Korn. Moscow, Nauka, 1970, 720 p.

4. Vysotskii L.I. *Sovershenstvovanie metodov gidravlicheskih raschetov vodopropusknykh i ochistnykh sooruzhenii* [Perfection of methods of hydraulic calculations of culverts and treatment facilities]. Interuniver. Sci. Col. L.I. Vysotskii et al.; Saratov State Tech. Un-t. Saratov, 1994, 94 p.

5. Sukhomel G.I. *Voprosy gidravliki otkrytykh rusel i sooruzhenii* [Hydraulics of open channels and structures]. Kiev, Izd-vo AN USSR, 1949, 314 p.

6. Garzanov A.V. [Application of the Kirchhoff-

Chaplygin method to the calculation of the compression of open flows]. *Sb. tr. kaf. gidravliki Saratov. politekhn. un-ta* [Collected works of the Department of Hydraulics of the Saratov Polytechnic University]. Saratov, 1963, issue 19, pp. 96-115.

7. Girgidov A.D. *Mekhanika zhidkosti i gaza (gidravlika)* [Mechanics of fluid and gas (hydraulics)]. Textbook. Saint Petersburg, Izd-vo SPbGTU, 2003, 545 p.

8. Takeda R., Kawanawi M. The influence of turbulence on the characteristic of the propeller current meters. *Trans. Soc. Mch. Eng.* 1978, No. 383, vol. 44, pp. 2389-2394.

9. Ippen A.T. Mechanics of Supercritical Flow. *Proceedings American Society of Civill Engineers.* 1949, No. 9, vol. 75, 178 p.

10. Kokhanenko V.N., Volosukhin Ya.V., Shiryayev V.V., Kokhanenko N.V. *Modelirovanie odnomernykh i dvukhmernykh otkrytykh vodnykh potokov* [Simulation of one-dimensional and two-dimensional open water streams]. Ed. V.N. Kokhanenko. Rostov-on-Don, Izd-vo YuFU, 2007, 168 p.

11. Kokhanenko V.N., Volosukhin Ya.V., Lemesheko M.A., Papchenko N.G. *Modelirovanie burnykh dvukhmernykh v plane vodnykh potokov* [Simulation of rough two-dimensional in terms of water flows]. Ed. V.N. Kokhanenko. Rostov-on-Don, Izd-vo YuFU, 2013, 179 p.

12. Kokhanenko V.N., Kelekhshayev D.B. [Solution of boundary value problems in the course of two-dimensional stationary open potential water flows]. *Sb. st. po materialam III Mezhdunar. konf. prepodavatelei, molodykh uchenykh, aspirantov i studentov vuzov* [Collected papers on the materials of the III International Conference of Teachers, Young Scientists, Post-Graduate Students and University Students]. April 26, 2016. Novocherkassk, YuRGPU (NPI), 2016, pp. 69-72.

13. Kokhanenko V.N., Kosichenko Yu.M., Duvanskaya E.V., Kalmykov B.Yu. *Metody resheniya gidravlicheskih zadach po techeniyu planovykh statsionarnykh potokov vody* [Methods for solving hydraulic tasks along the flow of planned stationary water flows]. Ed. V.N. Kokhanenko; South-Russian State University of Economics and Service. Shakhty, Izd-vo YuRGUES, 2003, 68 p.

14. Chaplygin S.A. *Mekhanika zhidkosti i gaza. Matematika. Obshchaya mekhanika: Izbrannye trudy* [Mechanics of fluid and gas. Mathematics. General Mechanics: Selected Works]. Moscow, Nauka, 1976, 496 p.

15. Sherenkov I.A. O planovoi zadache rastekaniya strui burnogo potoka neszhimaemoi zhidkosti [On the planned problem of the flow of a jet of a turbulent flow of an incompressible fluid]. *Izv. AN SSSR. OTN.* 1958, No. 1, pp. 72-78.

16. Rekleitis G., Reivindran A., Regsdel K. *Optimizatsiya v tekhnike* [Optimization in technology]. Trans. V.Ya. Altaev, V.I. Motorin. Moscow, Mir, 1986, 347 p.

УДК 517.392

DOI 10.23683/0321-3005-2017-2-26-31

ПРИБЛИЖЕННОЕ РЕШЕНИЕ СИНГУЛЯРНОГО ИНТЕГРАЛЬНОГО УРАВНЕНИЯ, НЕ ОГРАНИЧЕННОЕ НА КОНЦАХ ИНТЕГРИРОВАНИЯ, С ПРИМЕНЕНИЕМ РЯДОВ ЧЕБЫШЕВА

© 2017 г. Ш.С. Хубежты^{1,2}, З.В. Бесаева¹

¹Северо-Осетинский государственный университет им. К.Л. Хетагурова, Владикавказ, Россия,

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

APPROXIMATE SOLUTION OF SINGULAR INTEGRAL EQUATIONS ON THE END OF UNLIMITED INTEGRATION OF CHEBYSHEV SERIES

Sh.S. Khubezhty^{1,2}, Z.V. Besaeva¹

¹Khetagurov North Ossetian State University, Vladikavkaz, Russia,

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

Хубежты Шалва Соломонович – доктор физико-математических наук, профессор, кафедра математического анализа, Северо-Осетинский государственный университет им. К.Л. Хетагурова, ул. Ватутина, 46, г. Владикавказ, РСО-Алания, 362025, Россия; ведущий научный сотрудник, Южный математический институт – филиал Владикавказского научного центра РАН, ул. Маркуса, 22, г. Владикавказ, РСО-Алания, 362027, Россия, e-mail: shalva57@rambler.ru

Shalva S. Khubezhty – Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Department of Mathematical Analysis, Khetagurov North Ossetian State University, Vatutina St., 46, Vladikavkaz, Republic of North Ossetia-Alania, 362025, Russia; Leading Researcher, Southern Mathematical Institute - Branch of the Vladikavkaz Scientific Center, Russian Academy of Sciences, Marcusa St., 22, Vladikavkaz, Republic of North Ossetia-Alania, 362027, Russia, e-mail: shalva57@rambler.ru

Бесаева Зарина Вячеславовна – аспирант, кафедра математического анализа, Северо-Осетинский государственный университет им. К.Л. Хетагурова, ул. Ватутина, 46, г. Владикавказ, РСО-Алания, 362025, Россия, e-mail: besaeva.85@mail.ru

Zarina V. Besaeva – Postgraduate, Department of Mathematical Analysis, Khetagurov North Ossetian State University, Vatutina St., 46, Vladikavkaz, Republic of North Ossetia-Alania, 362025, Russia; e-mail: besaeva.85@mail.ru

Строится вычислительная схема для приближенного решения сингулярного интегрального уравнения первого рода, не ограниченного на концах отрезка интегрирования $[-1, 1]$. Решение уравнения ищется в виде ряда по многочленам Чебышева первого рода. Ядро и правая часть уравнения разлагаются в ряды с применением квадратурных формул Гаусса. Для коэффициентов разложения многочленов Чебышева второго рода в ряды по многочленам Чебышева первого рода найдены точные значения. Коэффициенты разложения искомой функции, т. е. решения, находятся из решения линейных алгебраических уравнений.

Для обоснования вычислительной схемы используются методы функционального анализа и теории ортогональных многочленов. Вводится пространство гёльдеровых функций с соответствующими нормами. В этом пространстве рассматриваются заданные сингулярные и соответствующие приближенные операторы. Приводятся условия существования обратного сингулярного оператора и доказывается существование обратного приближенного оператора. При выполнении условия существования у заданных функций, имеющих производные до некоторого порядка, принадлежащих классу Гёльдера, оценивается погрешность вычисления и дается порядок её стремления к нулю.

Ключевые слова: сингулярный интеграл, квадратурная формула, ряды Чебышева, коэффициенты разложения.

A computational scheme is constructed for the approximate solution of a singular integral equation of the first kind of an unbounded integration segment at the ends $[-1, 1]$. The solution of the equation is sought in the form of a series in Chebyshev polynomials of the first kind. The kernel and the right-hand side of the equation decompose into series using the Chebyshev polynomials of the first kind, whose coefficients are calculated approximately by Gaussian quadrature formulas. For the coefficients of the decomposition of Chebyshev polynomials of the second kind into series in Chebyshev polynomials of the first kind, exact values are found. The coefficients of the expansion of the unknown function, that is, the solution, are found from the solution of linear algebraic equations.

To justify the computational scheme, methods of functional analysis and the theory of orthogonal polynomials are used. We introduce the space of Holder functions with the corresponding norms. In this space, we consider the given singular and corresponding approximate operators. Conditions for the existence of an inverse singular operator are given and the existence of an inverse approximate operator is proved. When the existence condition for the given functions having derivatives up to some order belonging to the Holder class is satisfied, the error in the computation is evaluated and the order of its tendency to zero is given.

Keywords: singular integral, quadrature formula, Chebyshev series, expansion coefficients.

Введение

Теория сингулярных интегральных уравнений в течение последних 100 лет переживает бурное развитие. Это в первую очередь связано с многочисленными приложениями в физике, механике и технике сингулярных интегральных уравнений и краевой задачи Римана. Хорошо известен спектр применения теории сингулярных интегральных уравнений в теории упругости, термоупругости, аэродинамике. Последние годы эти уравнения являются одним из основных аппаратов математического моделирования задач электродинамики.

Однако решение сингулярных интегральных уравнений возможно лишь в исключительных случаях. Основным аппаратом в прикладных задачах являются численные методы, подробное изложение которых содержится в работах [1, 2], где также имеется обширная библиография.

Но надо отметить, что указанные методы в основном дают приближенные значения решения в конечном числе точек. Во многих случаях требуется получить аналитическое приближение решения, годное на всем отрезке. К этому типу методов принадлежат методы, связанные с многочленами Чебышева, разработанные для интегральных уравнений.

В настоящей работе предлагается метод с применением рядов Чебышева [3] для приближенного решения сингулярных интегральных уравнений на отрезке интегрирования. Суть метода заключается в том, что задача решения сингулярного интегрального уравнения после замены плотности рядом Чебышева сводится к решению системы линейных алгебраических уравнений относительно неизвестных коэффициентов данного решения. После нахождения коэффициентов разложения $a_0, a_1, a_2, \dots, a_n$ приближенное решение получается в аналитическом виде. Это позволяет найти значения неизвестной функции во всех точках отрезка $[-1, 1]$.

Приближенное решение сингулярного интегрального уравнения, не ограниченного на концах интегрирования, с применением рядов Чебышева имеется в работе [4], где только неизвестная функция разлагается в ряд Чебышева, а система линейных алгебраических уравнений получается методом коллокации.

В данной работе все функции, участвующие в уравнении, разлагаются в ряды Чебышева. Устанавливаются отношения между коэффициентами разложения.

Вычислительная схема

Рассмотрим сингулярные интегральные уравнения вида

$$\mathbf{K}\varphi_0 \equiv \frac{1}{\pi} \int_{-1}^1 \frac{\varphi_0(t)}{t-x} dt + \frac{1}{\pi} \int_{-1}^1 k(x,t)\varphi_0(t) dt = f(x), \quad (1)$$

где $k(x,t)$, $f(x)$ – непрерывно-дифференцируемые заданные функции на отрезке $[-1,1]$.

Доказано [1, с. 50; 5, с. 343], что если индекс $\kappa = 1$, уравнение (1) имеет неограниченное решение на концах отрезка $[-1,1]$ вида

$$\varphi_0(t) = \frac{1}{\sqrt{1-t^2}} \varphi(t), \quad (2)$$

где $\varphi(t)$ – непрерывно-дифференцируемая функция.

В этом случае уравнение (1) примет вид

$$\mathbf{K}_0\varphi \equiv \frac{1}{\pi} \int_{-1}^1 \frac{1}{\sqrt{1-t^2}} \cdot \frac{\varphi(t)}{t-x} dt + \frac{1}{\pi} \int_{-1}^1 \frac{1}{\sqrt{1-t^2}} k(x,t) \varphi(t) dt = f(x). \quad (3)$$

Оно имеет единственное решение [1, с. 341], если выполняется условие

$$\frac{1}{\pi} \int_{-1}^1 \frac{1}{\sqrt{1-t^2}} \varphi(t) dt = C^*, \quad (4)$$

где C^* – произвольная постоянная.

Разложим функции $\varphi(t)$, $k(x,t)$, $f(x)$ в ряды Чебышева [3, 6]. Имеем

$$\begin{aligned} \varphi(t) &= \sum_{k=0}^{\infty} a_k T_k(t), \\ k(x,t) &= \sum_{i=0}^{\infty} \sum_{l=0}^{\infty} c_{il} T_i(x) T_l(t), \\ f(x) &= \sum_{k=0}^{\infty} d_k T_k(x), \end{aligned} \quad (5)$$

где под \sum' подразумевается сумма вида

$$\sum_{k=0}^{\infty} \lambda_k = \frac{\lambda_0}{2} + \lambda_1 + \lambda_2 + \dots, \text{ а } T_k(t) = \cos k \arccos t -$$

ортогональные многочлены Чебышева I рода с весом $\frac{1}{\sqrt{1-t^2}}$ на отрезке $[-1,1]$. Коэффициенты a_k

($k = 0, 1, 2, \dots$) неизвестны, так как неизвестна функция $\varphi(t)$. Остальные коэффициенты вычисляются по формулам

$$c_{il} = \frac{2}{\pi} \int_{-1}^1 \frac{1}{\sqrt{1-t^2}} \left(\frac{2}{\pi} \int_{-1}^1 \frac{1}{\sqrt{1-x^2}} k(x,t) T_i(x) dx \right) T_l(t) dt, \quad (6)$$

$$d_k = \frac{2}{\pi} \int_{-1}^1 \frac{1}{\sqrt{1-t^2}} f(t) T_k(t) dt.$$

Подставляя разложения (5) в (3), получаем

$$\begin{aligned} & \frac{1}{\pi} \int_{-1}^1 \frac{1}{\sqrt{1-t^2}} \cdot \frac{1}{t-x} \left(\sum_{k=0}^{\infty} a_k T_k(t) \right) dt + \\ & + \frac{1}{\pi} \int_{-1}^1 \frac{1}{\sqrt{1-t^2}} \left(\sum_{i=0}^{\infty} \sum_{l=0}^{\infty} c_{il} T_i(x) T_l(t) \right) \sum_{k=0}^{\infty} a_k T_k(t) dt = \\ & = \sum_{k=0}^{\infty} d_k T_k(x). \end{aligned}$$

Используя формулу обращения [7, с. 85]

$$\frac{1}{\pi} \int_{-1}^1 \frac{1}{\sqrt{1-t^2}} \cdot \frac{T_k(t)}{t-x} dt = U_{k-1}(x) \text{ и свойства ортого-$$

нальных многочленов Чебышева I рода, получаем

$$\begin{aligned} & \sum_{k=0}^{\infty} a_k U_{k-1}(x) + \sum_{k=0}^{\infty} a_k \sum_{i=0}^{\infty} c_{ik} \cdot \frac{1}{2} T_i(x) = \\ & = \sum_{k=0}^{\infty} d_k T_k(x). \end{aligned} \quad (7)$$

Здесь $U_k(x) = \frac{\sin(k+1) \arccos x}{\sqrt{1-x^2}}$ – многочлен Че-

бышева II рода.

Дополнительное условие (4) дает

$$\sum_{k=0}^{\infty} a_k \cdot \frac{1}{\pi} \int_{-1}^1 \frac{1}{\sqrt{1-t^2}} T_k(t) dt = C^*.$$

В силу свойства ортогональности

$$\frac{1}{\pi} \int_{-1}^1 \frac{1}{\sqrt{1-t^2}} T_k(t) dt = \begin{cases} 0, & k = 1, 2, \dots, \\ 1, & k = 0, \end{cases}$$

имеем $a_0 = C^*$, т. е. первый коэффициент разложения заранее известен.

Чтобы найти соотношения между коэффициентами разложения, многочлен $U_{k-1}(x)$ также разложим в ряд Чебышева

$$U_{k-1}(x) = \sum_{i=0}^{\infty} b_{ik} T_i(x), \quad (8)$$

где $b_{ik} = \frac{2}{\pi} \int_{-1}^1 \frac{1}{\sqrt{1-t^2}} U_{k-1}(t) T_i(t) dt.$

Сделаем подстановку $t = \cos \vartheta$. Тогда

$$b_{ik} = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} \frac{1}{\sin \vartheta} \frac{\sin k \vartheta \cdot \cos i \vartheta}{\sin \vartheta} \sin \vartheta d\vartheta =$$

$$= \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} \frac{\sin(k+i)\vartheta + \sin(k-i)\vartheta}{\sin \vartheta} d\vartheta.$$

Известны формулы [8, с. 186]

$$\int \frac{\sin 2n\pi}{\sin x} dx = 2 \sum_{k=1}^n \frac{\sin(2k-1)x}{2k-1} + C,$$

$$\int \frac{\sin(2n+1)\pi}{\sin x} dx = 2 \sum_{k=1}^n \frac{\sin 2kx}{2k} + x + C.$$

С их учетом для b_{ik} получаем

$$b_{ik} = \begin{cases} 0, & \text{если } k+i, k-i \text{ – четные; или } k \leq i; \\ 2, & \text{если } k+i, k-i \text{ – нечетные.} \end{cases}$$

Подставляя (8) в (7), получаем

$$\begin{aligned} & \sum_{i=0}^{\infty} \left(\sum_{k=0}^{\infty} a_k b_{ik} \right) T_i(x) + \sum_{i=0}^{\infty} \sum_{k=0}^{\infty} a_k c_{ik} \frac{1}{2} T_i(x) = \\ & = \sum_{k=0}^{\infty} d_k T_k(x). \end{aligned}$$

Отсюда для коэффициентов a_1, a_2, a_3 получается бесконечная система линейных алгебраических уравнений

$$\sum_{k=0}^{\infty} a_k \left(b_{ik} + \frac{1}{2} c_{ik} \right) = d_i \quad (i = 0, 1, 2, \dots). \quad (9)$$

Коэффициенты c_{ik} и d_i не всегда вычисляются точно. Для их вычисления, используя квадратурные формулы Гаусса [9, с. 132], получаем

$$d_i \approx \frac{2}{n+1} \sum_{j=0}^n f(x_j) T_i(x_j),$$

$$c_{il} \approx \frac{4}{(n+1)^2} \sum_{j=0}^n \sum_{j_0=0}^n k(x_j, x_{j_0}) T_i(x_j) T_l(x_{j_0}), \quad (10)$$

где $x_j = \cos \frac{2j+1}{2(n+1)} \pi$ – корни многочлена $T_{n+1}(x)$.

Бесконечную систему (9) с бесконечным числом неизвестных можно решить приближенно, рассматривая конечную систему с n неизвестными

$$\sum_{k=0}^n a_k \left(b_{ik} + \frac{1}{2} c_{ik} \right) = d_i \quad (i = 0, 1, 2, \dots, n). \quad (11)$$

После решения системы (11) относительно неизвестных a_1, a_2, \dots, a_n приближенное решение будет выражаться функцией

$$\varphi_n(x) = \sum_{k=0}^n a_k T_k(x). \quad (12)$$

Обоснование вычислительной схемы

Рассмотрим приближенное решение сингулярного интегрального уравнения (1) в предположении, что ищется решение, обращающееся в бесконечность на концах интервала интегрирования, т.е. вида (2).

Обозначим через X пространство функций вида $x(t) = \frac{1}{\sqrt{1-t^2}} \varphi(t)$. Функция $\varphi(t)$ имеет непрерывные производные на $[-1,1]$, удовлетворяющие условию Гёльдера H_α с показателем α ($0 < \alpha \leq 1$) [10].

Норма в пространстве X определяется формулой

$$\|x(t)\| = \max_{-1 \leq t \leq 1} |\varphi(t)| + \sup_{t_1 \neq t_2} \frac{|\varphi(t_1) - \varphi(t_2)|}{|t_1 - t_2|^\beta}, \quad 0 < \beta < \alpha.$$

Введём обозначения: Y – пространство функций вида $y(t) = \psi(t)$ из класса H_α с нормой

$$\|y(t)\| = \max_{-1 \leq t \leq 1} |\psi(t)| + \sup_{t_1 \neq t_2} \frac{|\psi(t_1) - \psi(t_2)|}{|t_1 - t_2|^\beta}, \quad 0 < \beta < \alpha;$$

X_n – пространство функций вида $x_n(t) = \frac{1}{\sqrt{1-t^2}} \varphi_n(t)$,

$\varphi_n(t) = \sum_{k=0}^n \alpha_k T_k(t)$ с нормой

$$\|x_n(t)\| = \max_{-1 \leq t \leq 1} |\varphi_n(t)| + \sup_{t_1 \neq t_2} \frac{|\varphi_n(t_1) - \varphi_n(t_2)|}{|t_1 - t_2|^\beta}, \quad 0 < \beta < \alpha;$$

Y_n – пространство функций вида $y_n(t) = \psi_n(t)$,

$\psi_n(t) = \sum_{k=0}^n \alpha_k T_k(t)$ с нормой

$$\|y_n(t)\| = \max_{-1 \leq t \leq 1} |\psi_n(t)| + \sup_{t_1 \neq t_2} \frac{|\psi_n(t_1) - \psi_n(t_2)|}{|t_1 - t_2|^\beta}, \quad 0 < \beta < \alpha.$$

Известно [5], что оператор \mathbf{K} действует из пространства X в Y и имеет обратный оператор \mathbf{K}^{-1} , действующий из Y в X .

Обозначим через P_n оператор, проектирующий пространство Y на пространство Y_n по формуле $P_n[y(t)] = P_n[\psi(t)]$, где $\psi(t) \in C[-1,1]$; $P_n[\psi(t)]$ – оператор, проектирующий непрерывные функции на множество многочленов вида $\sum_{k=0}^n \alpha_k T_k(t)$. Известно, что $\|P_n\| \leq C \ln n$.

Приближенное решение (1) будем искать в виде функции $x_n(t) = \frac{1}{\sqrt{1-t^2}} \varphi_n(t) = \frac{1}{\sqrt{1-t^2}} \sum_{k=0}^n a_k T_k(t)$,

где $T_k(t)$ – ортогональные многочлены с весом $\frac{1}{\sqrt{1-t^2}}$ на отрезке $[-1,1]$, т. е. полиномы Чебышева I рода.

Коэффициенты a_k ($k=0,1, \dots, n$) определяются из системы линейных алгебраических уравнений (11), представленной в операторной форме уравнением

$$P_n \left\{ \frac{1}{\pi} \int_{-1}^1 \frac{x_n(\tau)}{\tau - t} d\tau + \frac{1}{\pi} \int_{-1}^1 \frac{1}{\sqrt{1-\tau^2}} P_n^\tau [k(t, \tau), \varphi_n(\tau)] d\tau \right\} = P_n[f(t)], \quad (13)$$

где $P_n[\psi(t)]$ – оператор проектирования на множестве полиномов степени вида $\sum_{k=0}^n \alpha_k T_k(t)$; $\psi(t) \in C[-1,1]$.

Воспользовавшись формулой обращения [1, с. 236] и квадратурными формулами Гаусса [9, с. 132], уравнение (13) представим в виде

$$\mathbf{K}_n x_n = \frac{1}{\pi} \int_{-1}^1 \frac{x_n(\tau)}{\tau - t} d\tau + P_n^\tau \left[\frac{1}{\pi} \int_{-1}^1 \frac{1}{\sqrt{1-\tau^2}} P_n^\tau [k(t, \tau)] \varphi_n(\tau) d\tau \right] = P_n[f(t)]. \quad (14)$$

Покажем [11], что при n таком, что

$$q = C \|\mathbf{K}^{-1}\| n^\beta \left(\overline{E}_n^t(k(t, \tau)) + \overline{E}_n^\tau(k(t, \tau)) \right) \ln n < 1,$$

система уравнения (14) имеет единственное решение x_n^* и справедлива оценка

$$\|x^*(t) - x_n^*(t)\| \leq C n^\beta \|\mathbf{K}^{-1}\| \left(\overline{E}_n^t(k(t, \tau)) + \overline{E}_n^\tau(k(t, \tau)) \right) \ln n,$$

где x^* – решение уравнения (1);

$\overline{E}_n^t(k(t, \tau)) = \max_{-1 \leq \tau \leq 1} |k(t, \tau) - k_n^t(t, \tau)|$; $k_n^t(t, \tau)$ – полином наилучшего равномерного приближения степени $n-1$ по переменной t к функции $k(t, \tau)$.

Вводим оператор

$$\overline{\mathbf{K}}_n x_n = \frac{1}{\pi} \int_{-1}^1 \frac{x_n(\tau)}{\tau - t} d\tau + P_n^\tau \left[\frac{1}{\pi} \int_{-1}^1 k(x, \tau) x_n(\tau) d\tau \right] = P_n[f(t)].$$

Оценим норму

$$\begin{aligned} \|\mathbf{K} x_n - \overline{\mathbf{K}}_n x_n\| &= \left\| \frac{1}{\pi} \int_{-1}^1 k(t, \tau) x_n(\tau) d\tau - P_n^t \left[\frac{1}{\pi} \int_{-1}^1 k(t, \tau) x_n(\tau) d\tau \right] \right\| \leq \\ &\leq \left\| \frac{1}{\pi} \int_{-1}^1 (k(t, \tau) - k_n^t(t, \tau)) x_n(\tau) d\tau \right\| + \\ &+ \left\| P_n^t \left[\frac{1}{\pi} \int_{-1}^1 (k(t, \tau) - k_n^t(t, \tau)) x_n(\tau) d\tau \right] \right\| = I_1 + I_2. \end{aligned}$$

Нетрудно видеть, что

$$I_1 \leq Cn^\beta \bar{E}_{n-1}^t(k(t, \tau)) \|x_n\|,$$

$$I_2 \leq Cn^\beta \|P_n\| \bar{E}_{n-1}(k(t, \tau)) \|x_n\|,$$

и, следовательно,

$$\|Kx_n - \bar{K}_n x_n\| = Cn^\beta \|P_n\| \bar{E}_{n-1}^t(k(t, \tau)) \|x_n\|,$$

где $\bar{E}_n^t(k(t, \tau)) = \max_{-1 \leq \tau \leq 1} E_n^t(k(t, \tau))$.

Из последнего неравенства и общей теории приближенных методов для обратных операторов [11, гл. V, с. 211; гл. XIV, с. 517] следует, что при n таких, что $q < 1$, существует обратный оператор

$$\bar{K}_n^{-1} \text{ с нормой } \|\bar{K}_n^{-1}\| \leq \frac{K^{-1}}{1-q}$$

$q = Cn^\beta \|K^{-1}\| \|P_n\| \bar{E}_n^t(k(t, \tau))$. Так как оператор \bar{K}_n конечномерный, то существует линейный оператор \bar{K}_n^{-1} с той же нормой. Оценим теперь норму $\|\bar{K}_n - K_n\|$. Очевидно

$$\begin{aligned} \|\bar{K}_n x_n - K_n x_n\| &= \\ &= \left\| P_n^t \left[\frac{1}{\pi} \int_{-1}^1 (k(t, \tau) - P_n^\tau[k(t, \tau)]) x_n(\tau) d\tau \right] \right\| \leq \\ &\leq Cn^\beta \|P_n\| \bar{E}_n^\tau(k(t, \tau)) \|x_n\|, \end{aligned}$$

где $\bar{E}_n^\tau = \max_{-1 \leq \tau \leq 1} E_n^\tau(k(t, \tau))$.

Пусть существует такое n^* , что при $n > n^*$ выполняется неравенство $Cn^\beta \|\bar{K}_n^{-1}\| \|P_n\| \bar{E}_n^\tau(k(t, \tau)) < 1$.

Тогда из теоремы Банаха [11, с. 211] следует, что

$$\|x^* - x_n^*\| \leq Cn^\beta \|P_n\| \left(\bar{E}_n^t(k(t, \tau)) + \bar{E}_n^\tau(k(t, \tau)) \right),$$

где x^* и x_n^* – решения уравнения (1) и (14).

Обобщая эти результаты, сформулируем заключение в виде теоремы.

Теорема. Если функции $k(x, t)$ и $f(x)$ принадлежат классу $H_r(\alpha)$ (т.е. имеют непрерывные производные до порядка $r-1$, а производная порядка r удовлетворяет условию Гёльдера с показателем α ($0 < \alpha \leq 1$)), при n таких, что

$$Cn^\beta \|K^{-1}\| \left(\bar{E}_n^x(k(x, t)) + \bar{E}_n^t(k(x, t)) \right) \ln n < 1,$$

система (11) имеет единственное решение и справедлива оценка

$$\|\varphi(t) - \varphi_n(t)\| = O\left(\frac{\ln n}{n^{r+\alpha-\beta}}\right),$$

где $\varphi(t)$ – решение уравнения (3); $\varphi_n(t)$ – её приближенное решение вида (12).

Литература

1. Лифанов И.К. Метод сингулярных интегральных уравнений и численный эксперимент. М. : Янус, 1995. 520 с.
2. Бойков И.В. Приближенные методы решения сингулярных интегральных уравнений. Пенза : Изд-во Пензен. гос. ун-та, 2004. 316 с.
3. Паиковский С. Вычислительные применения многочленов и рядов Чебышева. М. : Наука, 1983. 384 с.
4. Бесаева З.В., Хубежты Ш.С. Приближенное решение сингулярных интегральных уравнений с применением рядов Чебышева // Владикавк. мат. журн. 2016. Т. 18, вып. 4. С. 15–22.
5. Мухелишвили Н.И. Сингулярные интегральные уравнения. М. : Наука, 1966. 512 с.
6. Суетин П.К. Классические ортогональные многочлены. М. : Наука, 1979. 406 с.
7. Хубежты Ш.С. Квадратурные формулы для сингулярных интегралов и некоторые их применения. Владикавказ : ЮМИ ВНЦ РАН и РСО-А, 2011. 236 с.
8. Прудников А.П., Брычков Ю.А., Маричев О.И. Интегралы и ряды. М. : Наука, 1987. 798 с.
9. Крылов В.И. Приближенное вычисление интегралов. М. : Наука, 1967. 500 с.
10. Бойков И.В., Бойкова А.И., Сёмов М.А. Приближенное решение гиперсингулярных интегральных уравнений первого рода // Изв. вузов. Приволжский регион. Физико-математические науки. Математика. 2015. № 3 (35). С. 11–27.
11. Канторович Л.В., Акилов Г.П. Функциональный анализ. М. : Наука, 1977. 720 с.

References

1. Lifanov I.K. *Metod singulyarnykh integral'nykh uravnenii i chislennyi eksperiment* [The method of singular integral equations and numerical experiment]. Moscow, Yanus, 1995, 520 p.

2. Boikov I.V. *Priblizhennye metody resheniya singulyarnykh integral'nykh uravnenii* [Approximate methods for solving singular integral equations]. Penza, Izd-vo Penzen. gos. un-ta, 2004, 316 p.

3. Pashkovskii S. *Vychislitel'nye primeneniya mnogochlenov i ryadov Chebysheva* [Computational applications of polynomials and Chebyshev series]. Moscow, Nauka, 1983, 384 p.

4. Besaeva Z.V., Khubezhty Sh.S. *Priblizhennoe reshenie singulyarnykh integral'nykh uravnenii s primeneniem ryadov Chebysheva* [Approximate solution of singular integral equations using Chebyshev series]. *Vladikavk. mat. zhurn.* 2016, vol. 18, No. 4, pp. 15-22.

5. Muskhelishvili N.I. *Singulyarnye integral'nye uravneniya* [Singular integral equations]. Moscow, Nauka, 1966, 512 p.

6. Suetin P.K. *Klassicheskie ortogonal'nye mnogochleny* [Classical orthogonal polynomials]. Moscow, Nauka, 1979, 406 p.

7. Khubezhty Sh.S. *Kvadrurnye formuly dlya singulyarnykh integralov i nekotorye ikh primeneniya* [Quadrature formulas for singular integrals and some of their applications]. Vladikavkaz, YuMI VNTs RAN i RSO-A, 2011, 236 p.

8. Prudnikov A.P., Brychkov Yu.A., Marichev O.I. *Integraly i ryady* [Integrals and series]. Moscow, Nauka, 1987, 798 p.

9. Krylov V.I. *Priblizhennoe vychislenie integralov* [Approximate calculation of integrals]. Moscow, Nauka, 1967, 500 p.

10. Boikov I.V., Boikova A.I., Semov M.A. *Priblizhennoe reshenie gipersingulyarnykh integral'nykh uravnenii pervogo roda* [An approximate solution of hypersingular integral equations of the first kind]. *Izv. vuzov. Privolzhskii region. Fiziko-matematicheskie nauki. Matematika.* 2015, No. 3 (35), pp. 11-27.

11. Kantorovich L.V., Akilov G.P. *Funktsional'nyi analiz* [Functional analysis]. Moscow, Nauka, 1977, 720 p.

УДК 539.3

DOI 10.23683/0321-3005-2017-2-32-37

КОНТАКТНАЯ ЗАДАЧА ДЛЯ УПРУГОГО ПАРАЛЛЕЛЕПИПЕДА ПРИ НАЛИЧИИ ТРЕНИЯ И ИЗНОСА*

© 2017 г. М.И. Чебаков^{1,2}, С.А. Данильченко^{1,2}, А.А. Ляпин¹

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

²Ростовский государственный университет путей сообщения, Ростов-на-Дону, Россия

CONTACT PROBLEM FOR ELASTIC BLOCK TAKING INTO ACCOUNT FRICTION AND WEAR

M.I. Chebakov^{1,2}, S.A. Danilchenko^{1,2}, A.A. Lyapin¹

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

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

Чебаков Михаил Иванович – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий лабораторией механики деформируемых тел и конструкций, Институт математики, механики и компьютерных наук им. И.И. Воровича, Южный федеральный университет, пр. Стачки, 200/1, г. Ростов-на-Дону, 344090, Россия; Ростовский государственный университет путей сообщения, пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, 2, г. Ростов-на-Дону, 344038, Россия, e-mail: chebakov@math.sfedu.ru

Mikhail I. Chebakov – Doctor of Sciences in Physics and Mathematics, Professor, Head of Laboratory for Mechanics of Deformable Bodies and Constructions, Vorovich Institute for Mathematics, Mechanics and Computer Sciences, Southern Federal University, Stachki Ave., 200/1, Rostov-on-Don, 344090, Russia; Rostov State Transport University, Rostovskogo Strelkovogo Polka Narodnogo Opolcheniya Sq., 2, Rostov-on-Don, 344038, Russia, e-mail: chebakov@math.sfedu.ru

Данильченко Сергей Александрович – инженер-проектировщик, лаборатория механики деформируемых тел и конструкций, Институт математики, механики и компьютерных наук им. И.И. Воровича, Южный федеральный университет, пр. Стачки, 200/1, г. Ростов-на-Дону, 344090, Россия; Ростовский государственный университет путей сообщения, пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, 2, г. Ростов-на-Дону, 344038, Россия, e-mail: sergey.a.danilchenko@gmail.com

Sergey A. Danilchenko – Design Engineer, Laboratory for Mechanics of Deformable Bodies and Constructions, Vorovich Institute for Mathematics, Mechanics and Computer Sciences, Southern Federal University, Stachki Ave., 200/1, Rostov-on-Don, 344090, Russia; Rostov State Transport University, Rostovskogo Strelkovogo Polka Narodnogo Opolcheniya Sq., 2, Rostov-on-Don, 344038, Russia, e-mail: sergey.a.danilchenko@gmail.com

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

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

Одним из решающих факторов, влияющих на срок службы узлов трения, является износ их компонентов. Поэтому прогнозирование износа представляется важной задачей в машиностроении. В литературе описано достаточно много различных моделей износа. Их математические выражения варьируются от простых эмпирических соотношений до сложных уравнений, опирающихся на физические понятия и определения. Параметры и переменные, используемые в них, часто действительны только для конкретных случаев.

Рассмотрена нестационарная контактная задача об изнашивании упругого неоднородного основания конечных размеров в форме параллелепипеда под воздействием движущегося по поверхности жесткого штампа. Скорость износа рассчитывалась согласно модели Аркарда. Представлены результаты расчетов величины износа при различных параметрах изнашивания модели Аркарда и двух вариантов неоднородности основания.

* Постановка задачи, написание программы и макроса APDL ANSYS, моделирование и расчеты методом конечных элементов выполнены М.И. Чебаковым и С.А. Данильченко за счет гранта Российского научного фонда (проект № 16-19-10467) в Ростовском государственном университете путей сообщения. Расчеты выполнены А.А. Ляпиным при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований в рамках проекта № 16-08-00852 в Южном федеральном университете.

Рассмотрены случаи наличия тонкого приповерхностного слоя на однородном основании и случаи, когда модуль упругости основания изменяется по глубине согласно заданному линейному закону. Расчеты производились на основе метода конечных элементов и программного комплекса ANSYS. Проведено сравнение полученных результатов расчета в частном случае с известным аналитическим решением контактной задачи с учетом износа для относительно тонкого бесконечного слоя. При соответствующих параметрах задачи показано хорошее совпадение результатов.

Ключевые слова: износ, трение, контактное взаимодействие, математическое моделирование.

One of the most important factors varying exploitation time for friction units is wear. Thus, simulation for such process is vital problem of mechanical engineering. In literature one can find a lot of information on various wear models. Mathematical formulation of such models varies from simple empiric to complex equation, basing on physical definitions. Parameters and variables, used in such models, frequently are valid only for certain cases.

Presented article is devoted to non-stationary contact problem on wear of solid nonhomogeneous foundation of finite size in the shape of block under the action of moving rigid indenter. The wear speed was calculated on the basis of Archard model. There presented various results for wear amount for different Archard model parameters and two types of base non-homogeneity.

There studied special cases for thin layer based on homogeneous foundation and case for linear function of elasticity modulus. Simulation was performed using finite element method and ANSYS software. Results are compared for particle case and well known analytical solution for contact problem with wear for thin infinite layer. There demonstrated good satisfaction for both solutions.

Keywords: wear, friction, contact interaction, mathematical modelling.

Контактные задачи о движении штампа с учетом износа для полуограниченных тел аналитическими методами в различных постановках рассматривались в работах Л.А. Галина, И.Г. Горячевой, В.М. Александрова, Е.В. Коваленко, В.Ф. Комогорцева и других (см. работы [1–4] и др.). Обзор работ, посвященных контактными задачам с учетом износа, приведен в [5].

Частично работа была доложена на Международной конференции «Механика и трибология транспортных систем» [6].

Постановка задачи. Рассмотрим упругий неоднородный параллелепипед (блок) $(-b \leq x \leq b; 0 \leq y \leq h_1; -L_1 \leq z \leq L_1)$, закрепленный по основанию $y=0$. На границу $y=h_1$ действует жесткий штамп в форме параллелепипеда $(-a \leq x \leq a; h_1 \leq y \leq h_2; -L_2 \leq z \leq L_2)$, с нижним основанием, совпадающим с границей блока $y=h_1$, и нагруженный нормальным равномерно распределенным по линии в направлении оси z вдоль всего штампа усилием интенсивности P (рис. 1).

При этом общее усилие на штамп равно $2L_2P$. Боковые грани и поверхность блока $y=h_1$, не взаимодействующие со штампом, свободны от напряжений, поверхность блока $y=0$ закреплена. Штамп совершает возвратно-поступательные движения вдоль направляющей Oz с постоянным модулем скорости V , при этом между штампом и блоком задано кулоновское трение с коэффициентом

k и штамп не поворачивается относительно осей $x=0$ и $z=0$.

Будем считать, что на поверхности блока в области контакта со штампом возникает износ, при этом сам штамп не изнашивается.

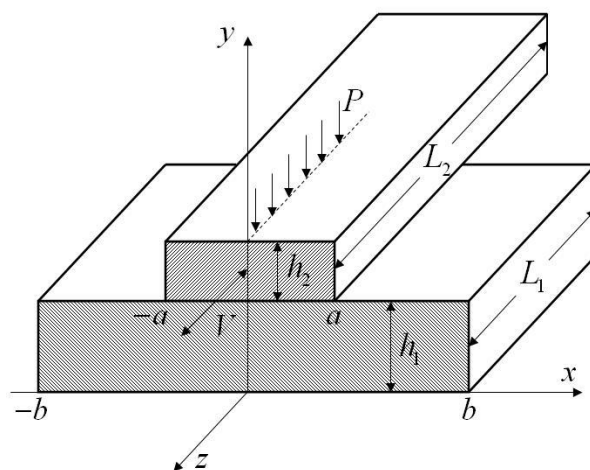


Рис. 1. К постановке задачи / Fig. 1. To the problem statement

Решение задачи. Для решения данной задачи были использованы метод конечных элементов и специальный программный комплекс ANSYS. Для улучшения сходимости алгоритма расчета задачи и сокращения времени вычислений решение осуществлялось в два этапа. На первом решалась статическая контактная задача теории упругости о вдавливании жесткого штампа в упругое основание. На втором – нестационарная задача скольжения штамп-

па по поверхности основания с учетом трения и износа. Скорость износа \bar{w} рассчитывалась согласно модели Аркарда (Archard) [7]:

$$\bar{w} = \frac{K}{H} V_{rel}^n P^m, \quad (1)$$

где K – коэффициент износа; H – твердость материала; V_{rel} – относительная скорость скольжения; P – контактное давление; m, n – положительные числа.

Конечно-элементная сетка строилась с использованием 20-узловых упругих элементов SOLID186. С помощью специальных макросов APDL ANSYS было обеспечено присвоение этим элементам различных постоянных значений модуля Юнга.

Для моделирования контактного взаимодействия между поверхностью основания и штампом создавалась контактная пара, определяемая элементами CONTA174 и TARGE170. Контактный элемент CONTA174 покрывал границу $y = h_1$, а ответные элементы TARGE170 задавались как недеформируемая поверхность плоской формы, соответствующая основанию штампа.

Для решения нестационарной задачи были установлены минимальное и максимальное количество подшагов, максимальное количество итераций для каждого подшага, а также параметры, позволяющие пакету определять оптимальный шаг по времени при расчетах.

Результаты расчетов. Численные расчеты производились для двух типов задач: 1 – блок состоял из двух слоев, обладающих различными физико-механическими характеристиками; 2 – блок выполнен из материала, обладающего градиентными свойствами. В обоих случаях использовались одинаковые геометрические параметры блока и штампа, а также скорость, время движения, нагрузка и коэффициент трения. Так, длина блока $L_1 = 0,3$ м; ширина $2b = 0,4$ м; толщина $h_1 = 0,05$ м; длина штампа $L_2 = 0,6$ м; ширина $2a = 0,2$ м. Скорость движения штампа $V = 0,15$ м/с; величина вдавливающей силы $P = 0,2$ МН; коэффициент трения $k = 0,05$. Время одного цикла движения штампа «туда-обратно» – 1 с; общее время движения $t = 10$ с (10 циклов). Соотношение K/H также считалось постоянным и равнялось $K/H = 0,5 \cdot 10^{-13}$.

В первом варианте задачи нижнему слою ($-b \leq x \leq b$; $0 \leq y \leq h_1 - h_{cl}$; $-L_1/2 \leq z \leq L_1/2$) присваивались постоянные значения модуля Юнга

и коэффициента Пуассона ($E_{очн} = 2 \cdot 10^5$ МПа, $\nu_{очн} = 0,3$). Для верхнего слоя $E_{сл} = 5 \cdot 10^5$ МПа и $\nu_{сл} = 0,33$. Был произведен расчет данной задачи при различных значениях толщины верхнего слоя $h_{сл}$. Показатели m и n в формуле (1) брались равными 1. Из полученных результатов следует, что при увеличении толщины приповерхностного слоя величина износа незначительно уменьшалась, а контактное давление увеличивалось.

Далее был произведен ряд расчетов при различных значениях показателей m и n . Полученные результаты свидетельствуют о том, что значение показателя степени при контактном давлении (m) оказывает большее влияние на величину износа, чем значение показателя степени при скорости скольжения (n). На рис. 2, 3 приведены графики результатов для слоя толщиной $h_{сл} = 0,1 \cdot 10^{-3}$ м.

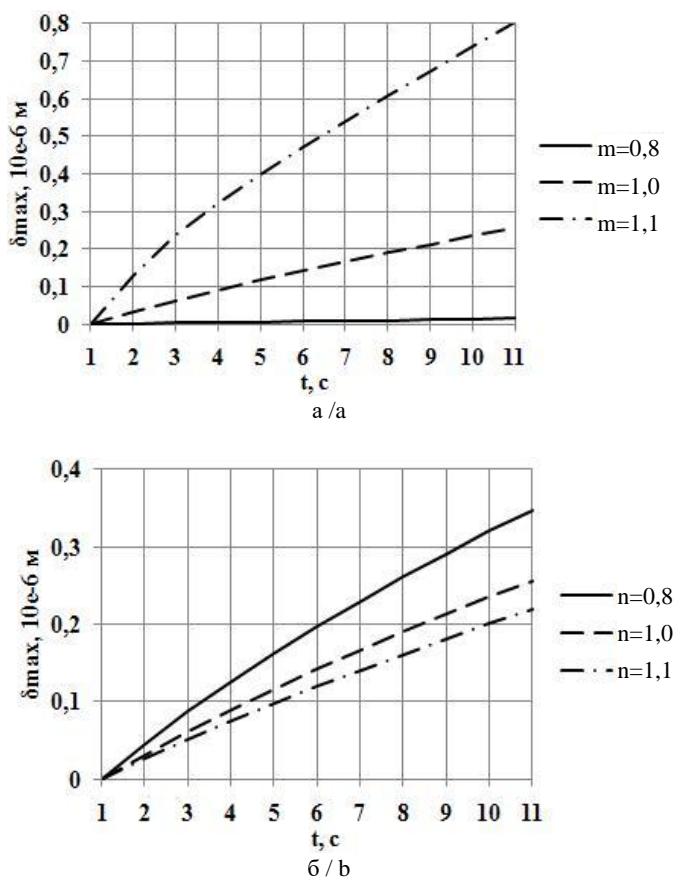


Рис. 2. Износ в точке $x = 0, y = h_1, z = 0$ в зависимости от времени при $n = 1$ и различных m (а); при $m = 1$ и различных n (б) / Fig. 2. Wear amount for point $x = 0, y = h_1, z = 0$ in time for $n = 1$ and various m (a); for $m = 1$ and various n (b)

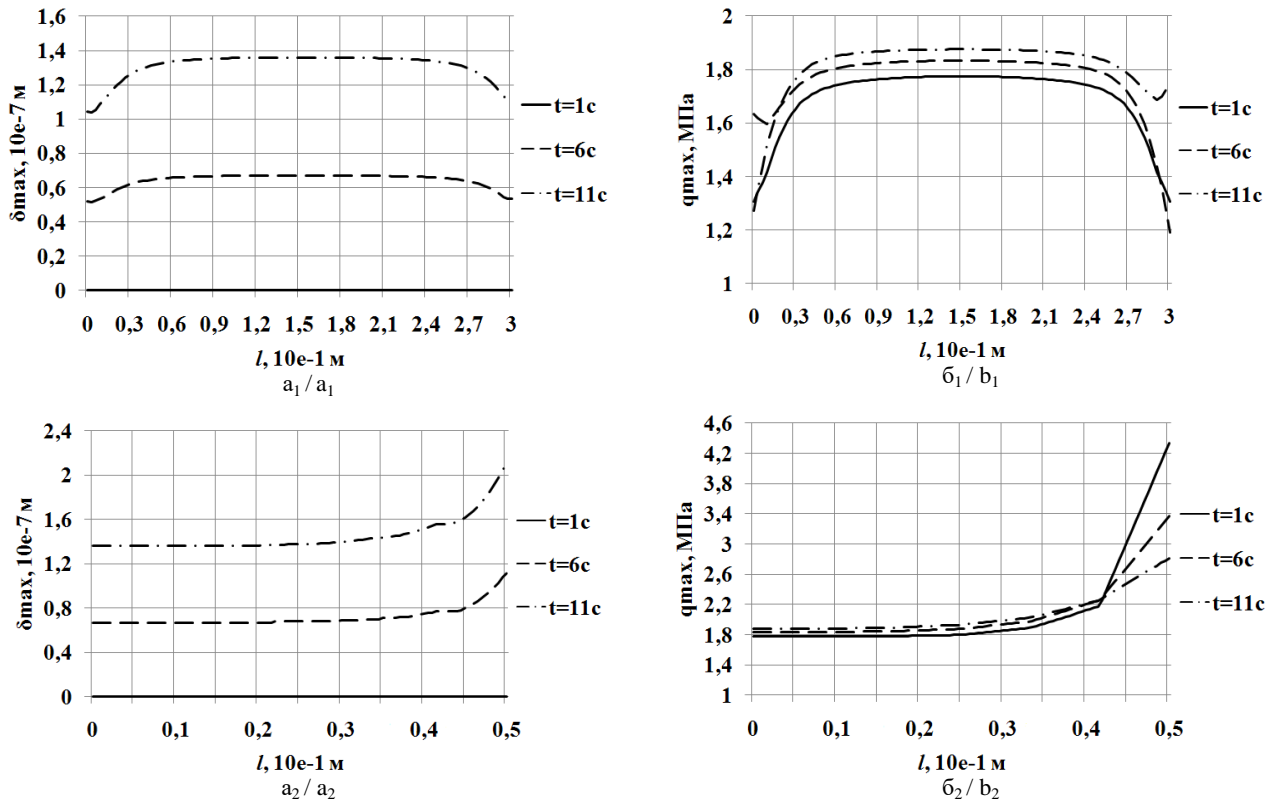


Рис. 3. Износ (a_i) и контактное давление (b_i), $i=1, 2$, вдоль линий $x=0, y=h_1, -L_1 \leq z \leq L_1$ ($i=1$); $0 \leq x \leq a, y=h_1, z=0$ ($i=2$) при $m=n=1$ и в различные моменты времени / Fig. 3. Wear amount (a_i) and contact pressure (b_i), $i=1, 2$, along the line $x=0, y=h_1, -L_1 \leq z \leq L_1$ ($i=1$); $0 \leq x \leq a, y=h_1, z=0$ ($i=2$) for various time moments, $m=n=1$

В задаче 2 моделировалось изменение модуля Юнга по глубине по зависимости $E_y/E_1 = f(y)$, где $f(y) = 2,5 + 1,5y/h_1$ – закон изменения модуля Юнга по толщине h_1 . Для этого был записан специальный макрос APDL ANSYS, который обеспечивал формирование конечных элементов с различными постоянными значениями модуля Юнга,

равными значениям функции $f(y)$ в центральных точках элементов. Коэффициент Пуассона всюду считался постоянным и равным $\nu_1 = 0,3$, $E_1 = 2 \cdot 10^5$ МПа, $m=1, n=1$. Результаты расчета величины износа и контактных давлений при различных значениях коэффициента трения представлены на рис. 4.

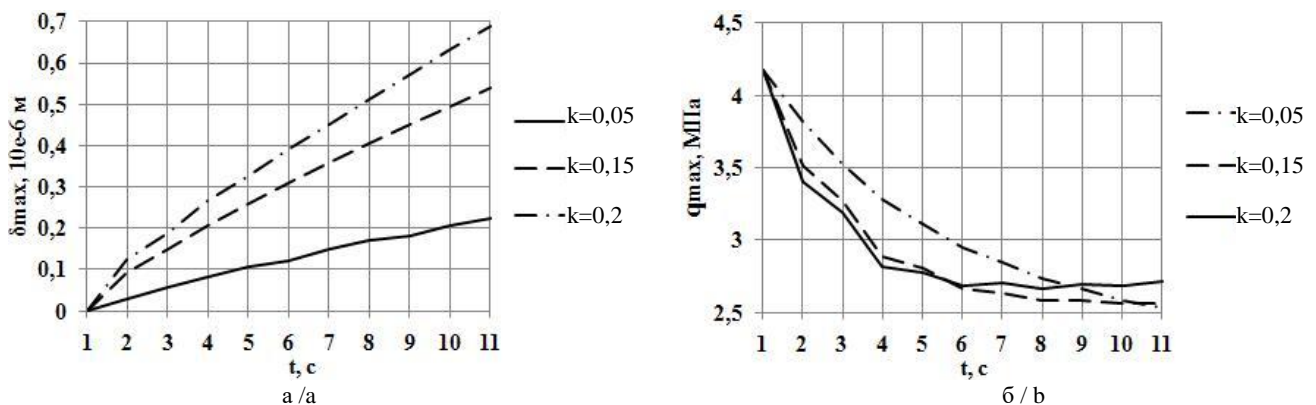


Рис. 4. Износ (а) и контактные напряжения (б) в зависимости от времени при различных значениях k / Fig. 4. Wear amount (a) and contact pressure (b) in time for various values of k

Для оценки точности конечно-элементных расчетов и выбора параметров проведено сравнение результатов для случая, когда блок состоит из однородного материала и $h_1/a \ll 1$. Аналитическое решение для бесконечного тонкого слоя относительно малой толщины описано в [8]. Согласно [8], для случая, когда штамп – плоский, величина износа δ и контактное давление q определяются из следующих соотношений:

$$\delta(t) = \frac{\alpha Pt}{2a}, \quad q(x,t) = \frac{P}{2a}, \quad \alpha = lkV. \quad (2)$$

Результаты расчетов при различных значениях параметров скорости, коэффициента трения и нагрузки приведены в таблице, где через $\varepsilon(\delta)$ и $\varepsilon(q)$ обозначена относительная погрешность в процентах для величин δ и q , при $h_1 = 0,005$ м, $t = 10$ с. Модуль Юнга и коэффициент Пуассона равны $E = 0,7 \cdot 10^5$ МПа и $\nu = 0,36$.

Как видно из таблицы, погрешность $\varepsilon(\xi) \leq 3\%$, что свидетельствует о достаточно высокой точности

результатов, полученных с помощью построенной модели. Необходимо отметить, что такое согласование достигается при $lk = K/H$.

Сравнение результатов расчетов с аналитическими / Comparison for numerical and analytical results

| $V, \text{ м/с}$ | k | $P, \text{ МН}$ | $\varepsilon(\delta)$ | $\varepsilon(q)$ |
|------------------|------|-----------------|-----------------------|------------------|
| 0,05 | 0,05 | 0,2 | 1,80 | 3,01 |
| 0,05 | 0,1 | 0,2 | 1,65 | 3,01 |
| 0,05 | 0,2 | 0,2 | 2,03 | 3,01 |
| 0,1 | 0,05 | 0,2 | 1,65 | 3,01 |
| 0,15 | 0,05 | 0,2 | 2 | 3,01 |
| 0,05 | 0,05 | 0,1 | 1,20 | 2,55 |
| 0,05 | 0,05 | 0,4 | 1,65 | 2,62 |

На рис. 5 представлены графики распределения износа и контактного давления вдоль линий $x = 0, y = h_1, -L_1 \leq z \leq L_1$ и $0 \leq x \leq a, y = h_1, z = 0$ в различные моменты времени для случая, когда блок состоит из однородного материала и $h_1/a \ll 1$.

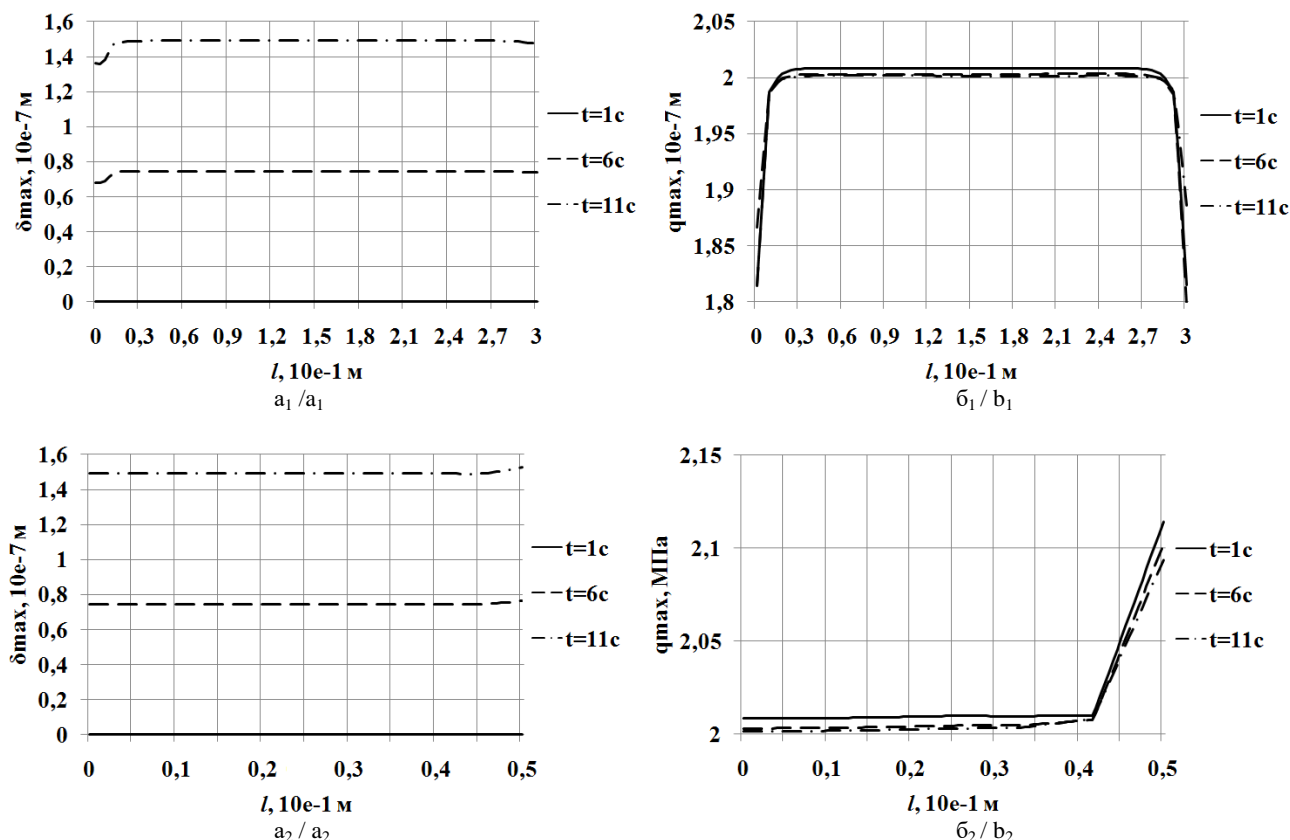


Рис. 5. Износ (a_i) и контактное давление (b_i), $i=1, 2$, вдоль линий $x = 0, y = h_1, -L_1 \leq z \leq L_1$ ($i=1$); $0 \leq x \leq a, y = h_1, z = 0$ ($i=2$) в различные моменты времени / Fig. 5. Wear amount (a_i) and contact pressure (b_i) along the line $x = 0, y = h_1, -L_1 \leq z \leq L_1$ ($i=1$); $0 \leq x \leq a, y = h_1, z = 0$ ($i=2$) for various time moments

Выводы. Результаты расчетов показали, что увеличение упругих характеристик материала вблизи области контакта приводит к снижению величины износа. При этом толщина такого слоя незначительно влияет на результат.

Варьирование различных входных параметров привело к вполне ожидаемым результатам. Увеличение параметров скорости, нагрузки, коэффициента трения приводило к увеличению износа.

Проведенное сравнение с аналитическим решением контактной задачи с учетом износа для относительно тонкого слоя позволяет сделать вывод о том, что метод конечных элементов с использованием пакета ANSYS для этой задачи оказался весьма эффективным и дает возможность проводить исследования для различных значений входных геометрических и физико-механических параметров.

Литература

1. Александров В.М., Галин Л.А., Пирьев Н.П. Плоская контактная задача при наличии износа для упругого слоя большой толщины // Изв. АН СССР. МТТ. 1978. № 4. С. 60–67.
2. Галин Л.А. Контактные задачи теории упругости при наличии износа // ПММ. 1976. Т. 40, вып. 6. С. 981–986.
3. Горячева И.Г., Добычин М.Н. Контактные задачи в трибологии. М. : Машиностроение, 1988. 254 с.
4. Комогорцев В.Ф. Контакт движущегося штампа с упругой полуплоскостью при наличии её износа // ПММ. 1985. Т. 49, вып. 2. С. 321–325.
5. Горячева И.Г., Солдатенков И.А. Контактные задачи с учетом износа // Механика контактных взаимодействий / под ред. И.И. Воровича, В.М. Александрова. М. : Физматлит, 2001. С. 438–458.
6. Чебаков М.И., Данильченко С.А., Ляпин А.А. Математическое моделирование износа неоднородных оснований // Механика и трибология транспортных систем : тр. Междунар. науч. конф. 8–10.11.2016. Ростов н/Д. : РГУПС, 2016. С. 64–67.

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

8. Александров В.М., Чебаков М.И. Введение в механику контактных взаимодействий. Ростов н/Д. : ЦВВР, 2007. 114 с.

References

1. Aleksandrov V.M., Galin L.A., Piriev N.P. Ploskaya kontaktnaya zadacha pri nalichii iznosa dlya uprugogo sloya bol'shoi tolshchiny [A plane contact problem in the presence of wear for an elastic layer of large thickness]. *Izv. AN SSSR. MTT*. 1978, No. 4, pp. 60-67.
2. Galin L.A. Kontaktnye zadachi teorii uprugosti pri nalichii iznosa [Contact problems of the theory of elasticity in the presence of wear]. *PMM*. 1976, vol. 40, No. 6, pp. 981-986.
3. Goryacheva I.G., Dobychin M.N. *Kontaktnye zadachi v tribologii* [Contact problems in tribology]. Moscow, Mashinostroenie, 1988, 254 p.
4. Komogortsev V.F. Kontakt dvizhushchegosya shtampa s uprugoi poluploskost'yu pri nalichii ee iznosa [Contact of a moving stamp with an elastic half-plane in the presence of its wear]. *PMM*. 1985, vol. 49, No. 2, pp. 321-325.
5. Goryacheva I.G., Soldatenkov I.A. [Contact problems with allowance for wear]. *Mekhanika kontaktnykh vzaimodeistvii* [Mechanics of contact interactions]. Eds. I.I. Vorovich, V.M. Aleksandrov. Moscow, Fizmatlit, 2001, pp. 438-458.
6. Chebakov M.I., Danil'chenko S.A., Lyapin A.A. [Mathematical modeling of the wear of inhomogeneous bases]. *Mekhanika i tribologiya transportnykh sistem* [Mechanics and tribology of transport systems]. Proceedings of the International Scientific Conference, 8-10.11.2016. Rostov-on-Don, RGUPS, 2016, pp. 64-67.
7. Archard J.F. Contact and rubbing of flat surfaces. *J. of Applied Physics*. 1953, vol. 24.1, pp. 18-28.
8. Aleksandrov V.M., Chebakov M.I. *Vvedenie v mekhaniku kontaktnykh vzaimodeistvii* [Introduction to the mechanics of contact interactions]. Rostov-on-Don, TsVVR, 2007, 114 p.

БИОЛОГИЧЕСКИЕ НАУКИ

BIOLOGICAL SCIENCES

УДК 581.9 (571.150)

DOI 10.23683/0321-3005-2017-2-38-49

ЗАКОНОМЕРНОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТРАВЯНОЙ РАСТИТЕЛЬНОСТИ СКАЛИСТОГО ХРЕБТА

© 2017 г. *О.Н. Демина*¹, *Ф.М. Борлакова*¹, *И.Р. Узденов*¹, *П.А. Дмитриев*², *Л.Л. Рогаль*²

¹Карачаево-Черкесский государственный университет им. У.Д. Алиева, Карачаевск, Россия,

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

REGULARITIES OF DISTRIBUTION OF ROCKY RIDGE GRASSLAND VEGETATION

*O.N. Demina*¹, *F.M. Borlakova*¹, *I.R. Uzdenov*¹, *P.A. Dmitriev*², *L.L. Rogal*²

¹Aliev Karachay-Cherkess State University, Karachaevsk, Russia

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

Демина Ольга Николаевна – доктор биологических наук, профессор, кафедра биологии и химии, кафедра естественных наук и методики его преподавания, Карачаево-Черкесский государственный университет им. У.Д. Алиева, ул. Ленина, 29, г. Карачаевск, КЧР, 359200, Россия, e-mail: ondemina@yandex.ru

Olga N. Demina – Doctor of Biology, Professor, Department of Biology and Chemistry, Department of Natural Science and Methods of Teaching It, Aliev Karachay-Cherkess State University, Lenina St., 29, Karachaevsk, Karachay-Cherkess Republic, 359200, Russia, e-mail: ondemina@yandex.ru

Борлакова Фатима Магомедовна – аспирант, кафедра естественных наук и методики его преподавания, Карачаево-Черкесский государственный университет им. У.Д. Алиева, ул. Ленина, 29, г. Карачаевск, КЧР, 359200, Россия, e-mail: rfatimad@mail.ru

Fatima M. Borlakova – Postgraduate, Department of Natural Science and Methods of Teaching It, Aliev Karachay-Cherkess State University, Lenina St., 29, Karachaevsk, Karachay-Cherkess Republic, 359200, Russia, e-mail: rfatimad@mail.ru

Узденов Исмаил Рамазанович – аспирант, кафедра естественных наук и методики его преподавания, Карачаево-Черкесский государственный университет им. У.Д. Алиева, ул. Ленина, 29, г. Карачаевск, КЧР, 359200, Россия, e-mail: uzdenov-ismail@mail.ru

Ismail R. Uzdenov – Postgraduate, Department of Natural Science and Methods of Teaching It, Aliev Karachay-Cherkess State University, Lenina St., 29, Karachaevsk, Karachay-Cherkess Republic, 359200, Russia, e-mail: uzdenov-ismail@mail.ru

Дмитриев Павел Александрович – кандидат биологических наук, Ботанический сад Академии биологии и биотехнологии Д.И. Ивановского, Южный федеральный университет, Ботанический спуск, 7, г. Ростов-на-Дону, 344006, Россия, e-mail: pdmitroff@gmail.com

Pavel A. Dmitriev – Candidate of Biology, Botanical Garden, Ivanovsky Academy of Biology and Biotechnology, Southern Federal University, Botanicheskii Spusk, 7, Rostov-on-Don, 344006, Russia, e-mail: pdmitroff@gmail.com

Рогаль Людмила Леонидовна – кандидат биологических наук, кафедра ботаники, Академия биологии и биотехнологии Д.И. Ивановского, Южный федеральный университет, Ботанический спуск, 7, г. Ростов-на-Дону, 344006, Россия, e-mail: llrogal@sfedu.ru

Lyudmila L. Rogal – Candidate of Biology, Department of Botany, Ivanovsky Academy of Biology and Biotechnology, Southern Federal University, Botanicheskii Spusk, 7, Rostov-on-Don, 344006, Russia, e-mail: llrogal@sfedu.ru

В результате предварительно выполненной синтаксономии травяной растительности Скалистого хребта в пределах Карачаево-Черкесской Республики выделено 6 сообществ, которые на данном уровне синтаксономического анализа отнесены к трем классам эколого-флористической классификации.

Сообщество *Anemonastrum narcissiflorum* – *Linum hypericifolium* представляет влажные среднегорные луга с субальпийскими элементами и отнесено к классу *Molinio-Arrhenatheretea*. Сообщество *Stachys macrantha* –

Pedicularis wilhelmsiana, представляющее остепненные среднегорные луга опушек, рассматривается в классе *Trifolio-Geranietea sanguinei*. Переходное сообщество *Erysimum cuspidatum* – *Pedicularis sibthorpii*, представляющее субсредиземноморские полуксерофитные петрофитные травяные сообщества, видится уже в составе класса *Festuco – Brometea*. Остальные три сообщества *Argyrolobium biebersteinii* – *Anthyllis vulneraria*, *Convolvulus arvensis* – *Daucus carota* и *Helianthemum nummularium* – *Scutellaria orientalis* рассматриваются как луговые степи и отнесены также к классу *Festuco-Brometea*, однако их синтаксономия требует дополнительных исследований.

Результаты непрямо́й ординации дополняют и подтверждают синтаксономические построения, раскрывают закономерности распределения сообществ травяной растительности Скалистого хребта в пространстве экологических факторов. Только первая ось вариации имеет экологически достоверную информацию, которую можно интерпретировать как ось увлажнения: наиболее влажные горные луговые сообщества с элементами субальпники, расположенные на одном конце оси, в конце представлены степями с участием нагорных ксерофитов. Все описания разделяются на две части, соответствующие различным типам растительности – лугам и степям.

Ключевые слова: Кавказ, Скалистый хребет, травяная растительность, синтаксономия, сообщества, экология, ординация.

As a result of the previously performed syntaxonomy of the grassy vegetation of the Rocky Range, within the Karachay-Cherkess Republic, 6 communities have been identified, which at this level of syntaxonomic analysis are classified into three classes of ecology-floristic classification.

The *Anemonastrum narcissiflorum* - *Linum hypericifolium* community represents moist mid - range meadows with subalpine elements is considered in the class of *Molinio - Arrhenatheretea*. The community of *Stachys macrantha* - *Pedicularis wilhelmsiana*, representing steppe mid-range meadows of fringes, is considered in the class of *Trifolio - Geranietea sanguinei*. The transitional community *Erysimum cuspidatum* - *Pedicularis sibthorpii*, which represents the sub - Mediterranean semi-oxyphytic petrophyte grass communities, is already seen in the *Festuco - Brometea* class. The remaining three communities of *Argyrolobium biebersteinii* - *Anthyllis vulneraria*, *Convolvulus arvensis* - *Daucus carota* and *Helianthemum nummularium* - *Scutellaria orientalis* are considered as meadow steppes and also classified as *Festuco - Brometea*, but their syntaxonomy requires additional studies.

The results of indirect ordination supplement and confirm syntaxonomic constructions, reveal patterns of distribution of communities of grassy vegetation of the Rocky Range in the space of environmental factors. Only the first axis of variation has ecologically reliable information that can be interpreted as the axis of moisture: the wetter meadow mountain communities with subalpine elements located at one end of the axis are represented in the end by steppes with the participation of upland xerophytes. All descriptions are divided into two parts, corresponding to different types of vegetation - meadows and steppes.

Keywords: Caucasus, Rocky Ridge, grassland vegetation, syntaxonomy, communities, ecology, ordination.

Скалистый хребет в пределах Карачаево-Черкесской Республики (КЧР), которая находится в центральной части альпийской складчатой системы Большого Кавказа, слагают верхнеюрские известняковые отложения [1]. Хребет имеет форму куэсты с крутыми южными и пологими северными склонами. Наиболее низкая часть горного сооружения на севере начинается с депрессии, расположенной у подножия южного склона Мелового хребта. Постепенно набирая высоту с запада на восток и с севера на юг, при этом имея неодинаковую ширину на территории КЧР, куэста Скалистого хребта к югу резко обрывается в Северо-Юрскую депрессию, где массивы его совершенно недоступны. Высоты почти вертикальных стен достигают 300 м и более [2]. Крупные левобережные притоки Кубани расчлняют хребет на несколько горных массивов, образуя скальные выступы – горы: Бол. Бермамыт (2592 м), Мал. Бермамыт (2644 м), Джангура (1560 м), Баширка (1751 м), Джиса (1610 м), Баранаха (1709 м), Громотуха (1352 м) [1].

Разнообразие климата и рельефа Скалистого хребта способствовало формированию богатой травяной растительности на открытых склонах и плато.

Закономерности дифференциации травяной растительности соответствуют сложившимся здесь природным условиям, связанным с высотой, широтой и долготой горной системы [3]. Главные климатические особенности на куэсте Скалистого хребта заключаются в абсолютной высоте местности и снижении количества осадков при движении с запада на восток, при удалении от Черного моря и возрастании континентальности климата [4]. В структуре высотной поясности Северного Кавказа все ландшафты Скалистого хребта КЧР отнесены к кубанскому варианту западно-северокавказского типа [5, 6].

Таким образом, распределение травяной растительности на Скалистом хребте связано в первую очередь с вертикальной зональностью или высотно-поясной приуроченностью экосистем по типу вертикальной поясности западной части Северного Кавказа [7], при которой большое значение имеет аридизация (континентализация) климата в направлении с запада на восток [2, 8]. Это биоклиматическое секторное [9, 10] (провинциальное) отражение природной обстановки в горах Кавказа [11], каждому из которых свойствен свой тип, или вариант поясности.

Луговые степи наиболее четко выражены в междуречье Урупа и Подкумка, доходя до 1300 м над уровнем моря [2] и располагаясь не только в лесостепном поясе, но и в следующем горном поясе широколиственных лесов на территории КЧР [12]. Луга, являющиеся одним из преобладающих типов растительности на куэсте Скалистого хребта, занимают более увлажненные участки. Расположенные западнее водораздела Лаба – Уруп, они представлены преимущественно вейниково-разнотравными лугами лесного пояса; восточнее луга менее мощные и пышные, хотя еще хранят много следов своего лесного прошлого. Среди них преобладают остепненные луга, образованные коротконожкой *Brachypodium pinnatum*. Колхидских элементов здесь значительно меньше, чем к западу от р. Уруп [8].

Выше, до 1400 м (иногда значительно ниже – 800 м над уровнем моря), в луговую степь и сообщества лугов проникают виды высокогорной субальпийской флоры, формируя здесь узкую полосу переходного типа к субальпам, и с высоты 1400÷1500 м коренная растительность становится субальпийской [2]. В других источниках мы находим противоречивые сведения о том, что субальпийский пояс на территории КЧР рассматривается в интервалах высот 1900÷2400 м [12].

Почти вертикальный южный склон Скалистого хребта вдоль депрессии покрыт более ксерофильной растительностью. Это обусловлено повышенной теплообеспеченностью, скелетностью субстрата, нередко почти полной обнаженностью материнских пород – глыбистых, желтовато-темных карбонатных песчаников; здесь встречаются нетипичные для нее группы (например, бородачевые степи в нижних частях сухих склонов речных долин) [2].

Судя по геоботанической карте, составленной под руководством О.М. Урбанского, наиболее распространенными типами естественных кормовых угодий на Скалистом хребте в пределах Карачаево-Черкесии являются горные луговые на горных дерново-подзолистых, серых и бурых лесных почвах и лугово-степные сообщества на выщелоченных и оподзоленных горных черноземах (класс Г-1, подклассы Г-1а – Г-1в, типы Г-1а-21 – Г-1в-29, реже Г-1в-30 – Г-1в-33); наименее представлены мелкосопочные и предгорные луговые на дерново-подзолистых серых и бурых лесных почвах и лугово-степные сообщества на выщелоченных черноземовидных горных почвах (класс М-1, подклассы М-1а, М-1б, типы М-1а-12 – М-1б-17, а также Г-1в-34 – Г-1в-42) [13].

Таким образом, в пределах Скалистого хребта отмечается широкое распространение луговых степей с элементами субальпийской и сниженных субальпийских лугов, предгорных или среднегорных, час-

то остепненных луговых сообществ, которые сменяются при повышении субальпийскими лугами, что особенно отчетливо заметно на плато Бермамыт – «...столкновение мезофитной лесной и лесолуговой растительности горных хребтов с пустошно-остепненно-луговой платообразных горных массивов – характерная черта растительного покрова Северного Кавказа» [8].

Изученные среднегорные сообщества отличаются по видовому составу и экологии от высокогорных западно-северокавказских [14, 15] и центральнокавказских [16–18], однако их эколого-флористическая классификация, а также оценка их современного состояния с применением современных методов до сих пор не выполнялись. Наряду с этим травяная растительность Скалистого хребта, равно как и природные экосистемы в целом, сильно пострадала в результате многовекового пастбищного использования и других форм антропогенной нагрузки. С глубокой древности на куэсте формировались атропогенно обусловленные фитоценозы, что привело к распространению залежных и послелесных лугов, вторичных сорно-кустарниковых и сорно-бурьянистых зарослей. История ресурсопользования уходит в глубь веков, однако наиболее отрицательно на природные экосистемы воздействовало многократное превышение норм пастбищной нагрузки. На куэсте имеет место нарушение растительного покрова в результате как увеличения поголовья скота, так и непланомерной деятельности горнодобывающей промышленности за последние 100 лет [2, 19].

Возрождение огромного пласта национальной культуры жителей Карачаево-Черкесии, в том числе традиционного основного занятия – отгонного скотоводства (овцы, козы, лошади, крупный рогатый скот), а также развитие рекреационного и познавательного туризма в регионе позволяют надеяться на научно обоснованное использование природных ресурсов, восстановление растительного покрова и оценку биоразнообразия травяной растительности Скалистого хребта, т.е. на научное обеспечение традиционной отрасли животноводства и туристической деятельности, что является не только чрезвычайно важным в природоохранном отношении, но и экономически выгодным. Однако до настоящего времени травяная растительность Скалистого хребта в синтаксономическом отношении остается слабоизученной; полностью отсутствуют ее эколого-флористическая классификация и оценка современного состояния.

Основной целью настоящей работы является анализ распределения сообществ травяной растительности Скалистого хребта в пространстве экологических факторов методами непрямой ординации.

Материалы и методы

Исследования проводились на Скалистом хребте, в пределах КЧР, на правом берегу горного течения р. Кубань (горы Аманка, Калагери, урочище Холодное, в окр. с. Важного) и в бассейне ее левобережного притока (р. М. Зеленчук, в окр. аула Али-Бердуковского). Всего в 2016 г. было сделано 15 геоботанических описаний травяной растительности.

Описания проводились на площадках 100 м² по общепринятым стандартным методикам [20]. Для каждой площадки указывались географические координаты (северной широты и восточной долготы) с использованием навигационной системы GPS. Для обработки валовой таблицы геоботанических описаний использовался IBIS [21]. Данные по проективному покрытию видов переводились в баллы и в описаниях представлены следующей шкалой: (+) – менее 1 %; 1 – 1–4 %; 2 – 5–9 %; 3 – 10–24 %; 4 – 25–49 %; 5 – 50–74 %; 6 – 75–100 %. В работе использовался метод классического синтаксономического анализа [22]. Номенклатура синтаксонов приведена в соответствии с Международным кодексом фитосоциологической номенклатуры [23].

Методы непрямой экологической ординации применялись для установления закономерностей отношения растений к условиям среды в пространстве. Анализ данных проведен с использованием методов DCA (Detrended Correspondence Analysis) – бестрендового анализа соответствия [24], или метода взаимного усреднения, и NMS, или NMDS (Nonmetrical Multidimensional Scaling) – неметрического многомерного шкалирования [25], в программе Juice 7.0.42, с предварительной обработкой в TWINSpan [26] и выделением фитоценонов. Учитывалось, что методы непрямой ординации особенно эффективны в том случае, когда удастся однозначно интерпретировать выделенные оси по составу конечных групп видов или сообществ [27].

Результаты и их обсуждение

Богатые луговые сообщества *Anemonastrum narcissiflorum* – *Linum hypericifolium* (фитоценон 1) представляют влажные среднегорные луга (1250 м над уровнем моря) с субальпийскими элементами и отнесены нами на данном уровне синтаксономического анализа к классу *Molinio* – *Arrhenatheretea* R. Tx. 1938 em R. Tx. 1970 (таблица). Диагностические виды (ДВ): *Anemonastrum narcissiflorum*, *Linum hypericifolium*, *Helictotrichon pubescens*, *Astrantia trifida*, *Phragmites australis*, *Calamagrostis arundinacea*, *Holcus lanatus*, *Veratrum lobelianum*, *Trifolium caucasicum*, *Dactylorhiza*

euxina, *D. urvilleana*, *Draba sibirica*, *Cephalaria gigantea*, *Centaurea abbreviate*, *Campanula glomerata*, *Asyneuma campanuloides*. Ценозы близки к высокогорным сообществам и, возможно, будут выделены в субассоциацию в предварительно выделенной Н.Л. Цепковой ассоциации *Cephalario giganteae* – *Calamagrostietum arundinaceae* для Центрального Кавказа, которая отнесена к классу *Mulgedio* – *Aconitetea* Hadac et Klika in Klika et Hadac 1944, объединяющему высокотравные мезофильные сообщества субальпийских лугов [16].

Несколько ниже (высота около 900 м над уровнем моря) выделено сообщество *Stachys macrantha* – *Pedicularis wilhelmsiana*, (фитоценон 2), представляющее остепненные среднегорные луга опушек. Сообщество рассматривается в классе *Trifolio* – *Geranietea sanguinei* T. Müller. ДВ: *Stachys macrantha*, *Pedicularis wilhelmsiana*, *Chaerophyllum aureum*, *Melampyrum arvense*. Они значительно беднее вейниковых лугов, часто остепнены и в составе травостоя уже отсутствует *Calamagrostis arundinacea*. Отметим, что эти среднегорные сообщества с участием эффективного *Stachys macrantha* не являются аналогами ассоциации *Betonici macranthae* – *Calamagrostietum arundinaceae* Onipchenko 2002, выделенной В.Г. Онипченко для высокогорий Тебердинского заповедника [14].

Третье, переходное сообщество *Erysimum cuspidatum* – *Pedicularis sibthorpii* (фитоценон 3), описанное не только в окр. с. Важного, как первые два, но и в окр. а. Али-Бердуковского (1250 м над уровнем моря), представляет субсредиземноморские полуксерофитные петрофитные травяные сообщества *Brometalia erecti* Koch 1926 из состава класса *Festuco* – *Brometea* Br.-Bl. et Tx. 1943. ДВ: *Bromopsis erectus*, *B. riparia*, *Erysimum cuspidatum*, *Pedicularis sibthorpii*, *Reseda lutea*, *Scorzonera hispanica*, *Poa compressa*, *Poterium polygamum*, *Jurinea arachnoidea*, *Linum austriacum*.

Остальные 3 фитоценона – сообщества *Argyrobolium biebersteinii* – *Anthyllis vulneraria* (фитоценон 4), *Convolvulus arvensis* – *Daucus carota* (фитоценон 5) и *Helianthemum nummularium* – *Scutellaria orientalis* (фитоценон 6), имеющие петрофитную природу своего формирования, рассматриваются нами как луговые степи и отнесены к классу *Festuco-Brometea*. Сообщество *Convolvulus arvensis* – *Daucus carota* представляет бородачевые степи с большой долей сорных видов, сильно пострадавшие от чрезмерного перевыпаса. ДВ: *Carex humilis*, *Bothriochloa ischaemum*, *Euphorbia stepposa*, *Cichorium intybus*, *Astragalus austriacus*, *Acinos arvensis*, *Melilotus officinalis*, *Achillea nobilis*, *Convolvulus arvensis*, *Daucus carota*.

Синтаксономия среднегорных сообществ *Argyrolobium biebersteinii* – *Anthyllis vulneraria* (ДВ: *Argyrolobium biebersteinii*, *Silene saxatilis*, *Anthyllis vulneraria*, *Teucrium chamaedrys*) и *Helianthemum nummularium* – *Scutellaria orientalis* (ДВ: *Helianthemum nummularium*, *Scutellaria orientalis*, *Cleistogenes bulgarica*, *Convolvulus lineatus*) требует дополнительных исследований.

Дифференциация сообществ травяной растительности Скалистого хребта
 / Differentiation of communities of grassland vegetation of the Rocky Range

| Фитоценоз | 1 | | 2 | | | 3 | | | 4 | | 5 | | | 6 | |
|--|----|----|---|---|----|---|---|----|----|----|----|----|----|----|----|
| № площадок (DRU) авторский | 13 | 14 | 6 | 7 | 15 | 5 | 9 | 10 | 11 | 12 | 8 | 1 | 2 | 3 | 4 |
| № п/п табличный | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 |
| ДВ класса <i>Molinio</i> – <i>Arrhenatheretea</i> R. Tx. 1938 em R. Tx. 1970 | | | | | | | | | | | | | | | |
| <i>Ranunculus polyanthemos</i> | + | + | + | + | . | + | + | + | + | . | . | . | . | . | . |
| <i>Plantago media</i> | + | + | 1 | + | + | . | 1 | + | + | . | . | + | 1 | + | + |
| <i>Achillea millefolium</i> | + | + | + | + | . | + | + | + | . | . | . | + | . | . | + |
| <i>Rhinanthus minor</i> | + | + | . | + | . | + | + | 1 | 1 | . | . | 1 | . | . | . |
| <i>Lotus corniculatus</i> | + | 1 | 1 | + | 1 | . | . | 1 | + | . | 1 | + | + | + | + |
| <i>Phleum pratense</i> | 1 | 1 | 1 | . | + | 1 | 1 | . | + | . | . | . | . | . | . |
| <i>Dactylis glomerata</i> | 1 | 1 | . | . | . | 1 | 1 | . | . | . | . | . | . | . | . |
| <i>Trifolium pratense</i> | + | 1 | 1 | . | + | . | . | + | . | . | + | . | 1 | 1 | + |
| <i>Festuca pratensis</i> | 1 | + | . | . | . | 1 | 1 | . | . | . | 1 | 2 | 2 | 1 | 1 |
| <i>Plantago lanceolata</i> | 1 | + | . | . | . | . | + | . | . | . | + | + | + | + | + |
| <i>Prunella vulgaris</i> | + | + | + | . | . | . | + | . | . | . | + | . | . | . | . |
| <i>Rumex acetosa</i> | + | 1 | 1 | . | . | . | . | . | . | . | . | . | . | . | . |
| <i>Vicia cracca</i> | + | + | . | . | . | . | . | . | . | . | . | . | . | . | . |
| <i>Amoria repens</i> | + | + | . | . | . | . | . | . | . | . | . | . | . | . | . |
| <i>Bromopsis inermis</i> | 1 | + | . | . | . | . | . | . | . | . | + | . | . | . | . |
| <i>Sanguisorba officinalis</i> | 1 | + | . | . | . | . | . | . | . | . | . | . | . | . | . |
| <i>Agrostis gigantea</i> | 2 | . | . | . | . | . | . | . | . | . | . | . | . | . | . |
| <i>Elytrigia repens</i> | . | . | . | . | 1 | + | 1 | . | . | . | 1 | . | . | . | . |
| <i>Leucanthemum vulgare</i> | . | . | . | . | . | + | + | + | . | . | 1 | . | . | . | . |
| ДВ класса <i>Trifolio-Geranietea sanguinei</i> T. Müller | | | | | | | | | | | | | | | |
| <i>Campanula bononiensis</i> | + | + | . | 1 | + | . | + | . | . | . | . | . | . | . | . |
| <i>Geranium sanguineum</i> | 1 | 1 | + | + | 1 | . | . | . | + | . | . | . | . | . | . |
| <i>Stachys officinalis</i> | 1 | + | 1 | + | 1 | . | . | . | . | . | . | . | . | . | . |
| <i>Origanum vulgare</i> | + | . | + | 1 | + | + | 1 | + | + | . | . | . | 1 | + | 1 |
| <i>Brachypodium pinnatum</i> | . | . | 3 | 4 | 4 | 3 | 4 | 3 | 1 | + | . | 1 | 1 | + | . |
| <i>Vicia tenuifolia</i> | . | . | 1 | . | + | + | + | . | . | . | . | . | . | . | . |
| <i>Inula aspera</i> | . | . | + | 1 | 1 | . | 1 | + | . | . | . | 1 | . | . | + |
| <i>Pyrethrum corymbosum</i> | . | . | 1 | + | 1 | . | . | + | . | . | . | . | . | . | 1 |
| <i>Clinopodium vulgare</i> | . | . | + | + | . | + | + | + | + | . | + | . | + | + | + |
| <i>Securigera varia</i> | . | . | . | + | + | + | + | 1 | 1 | . | 1 | + | 1 | + | + |
| <i>Vincetoxicum hirundinaria</i> | . | . | . | + | + | . | . | . | . | + | . | . | . | . | + |
| <i>Hypericum perforatum</i> | . | . | . | + | . | . | + | . | . | + | . | . | . | 1 | + |
| <i>Agrimonia eupatoria</i> | . | . | . | + | . | . | + | . | . | . | + | + | 1 | + | + |
| ДВ класса <i>Festuco-Brometea</i> Br.-Bl. et Tx. 1943 | | | | | | | | | | | | | | | |
| <i>Galium verum</i> | 1 | + | 1 | + | + | + | 1 | 1 | 1 | . | . | + | + | + | + |
| <i>Filipendula vulgaris</i> | 2 | 1 | 2 | + | 1 | 1 | 2 | 2 | + | . | . | + | . | . | + |
| <i>Amoria montana</i> | 1 | 1 | 1 | + | 1 | . | . | . | + | . | . | . | . | . | . |
| <i>Salvia verticillata</i> | . | . | 1 | 2 | 1 | + | 3 | 1 | 1 | . | 3 | + | 1 | + | . |
| <i>Koeleria cristata</i> | . | . | + | . | 1 | . | . | . | . | . | . | 1 | 1 | 1 | . |

Продолжение таблицы

| Фитоценоз | 1 | | 2 | | | 3 | | | 4 | | 5 | | | 6 | |
|---|--|----|---|---|----|---|---|----|----|----|----|----|----|----|----|
| | 13 | 14 | 6 | 7 | 15 | 5 | 9 | 10 | 11 | 12 | 8 | 1 | 2 | 3 | 4 |
| № п/п табличный | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 |
| <i>Scabiosa bipinnata</i> | . | . | + | . | . | . | + | + | + | + | + | + | + | + | + |
| <i>Seseli libanotis</i> | . | . | + | . | 1 | + | + | 1 | + | . | . | . | . | . | . |
| <i>Stachys recta</i> | . | . | . | + | + | + | + | 1 | + | + | + | 1 | 1 | + | + |
| <i>Stipa pulcherrima</i> | . | . | . | . | 1 | . | + | 1 | 4 | 3 | . | 2 | . | . | . |
| <i>Centaurea orientalis</i> | . | . | . | . | 1 | 1 | 1 | + | + | . | . | . | . | . | . |
| <i>Festuca rupicola</i> | . | . | . | . | . | + | 2 | 3 | 2 | . | + | . | . | . | . |
| <i>Eryngium campestre</i> | . | . | . | . | + | . | . | . | . | . | + | 2 | . | . | + |
| <i>Poa angustifolia</i> | . | . | . | . | . | 1 | + | . | . | . | 1 | 1 | . | + | + |
| <i>Stipa capillata</i> | . | . | . | . | . | . | . | . | 1 | . | . | 1 | 3 | 1 | 1 |
| <i>Fragaria viridis</i> | . | . | . | . | . | . | . | . | . | . | . | 1 | . | . | 1 |
| ДВ других синтаксонов | Луга (остепненные луга и степи) | | | | | | | | | | | | | | |
| <i>Euphrasia pectinata</i> | + | + | + | . | + | 1 | + | + | + | + | . | 1 | . | + | + |
| <i>Onobrychis vicifolia</i> | + | . | 3 | . | 1 | + | 1 | + | 1 | + | . | 1 | 1 | + | + |
| <i>Thymus marschallianus</i> | + | + | . | + | + | 2 | 3 | 1 | + | . | 2 | . | . | . | 1 |
| <i>Polygala major</i> | + | + | . | . | . | + | + | + | + | . | . | . | . | . | 1 |
| <i>Briza elatior</i> | 2 | 1 | 2 | + | + | 1 | 1 | 1 | . | . | . | . | 1 | . | . |
| <i>Pyrethrum coccineum</i> | + | + | 1 | + | . | + | + | . | . | . | . | . | . | . | . |
| <i>Cruciata pedemontana</i> | + | + | 1 | 2 | + | 1 | 1 | + | . | . | . | . | . | . | . |
| <i>Agrostis capillaris</i> | . | 1 | + | + | + | . | 1 | . | . | . | . | . | . | . | . |
| ДВ <i>Anemonastrum narcissiflorum</i> – <i>Linum hypericifolium</i> | | | | | | | | | | | | | | | |
| <i>Helictotrichon pubescens</i> | 1 | 2 | . | . | + | . | . | . | . | . | . | 1 | . | . | . |
| <i>Astrantia trifida</i> | + | 1 | 2 | + | + | . | . | . | . | . | . | . | . | . | . |
| <i>Anemonastrum narcissiflorum</i> | 1 | + | . | . | . | . | . | . | . | . | . | . | . | . | . |
| <i>Linum hypericifolium</i> | + | + | . | . | . | . | . | . | . | . | . | . | . | . | . |
| <i>Phragmites australis</i> | 1 | 1 | . | . | . | . | . | . | . | . | . | . | . | . | . |
| <i>Calamagrostis arundinacea</i> | 1 | + | . | . | . | . | . | . | . | . | . | . | . | . | . |
| <i>Holcus lanatus</i> | 1 | 1 | . | . | . | . | . | . | . | . | . | . | . | . | . |
| <i>Veratrum lobelianum</i> | + | 1 | . | . | . | . | . | . | . | . | . | . | . | . | . |
| <i>Trifolium caucasicum</i> | + | + | . | . | . | . | . | . | . | . | . | . | . | . | . |
| <i>Dactylorhiza euxina</i> | + | + | . | . | . | . | . | . | . | . | . | . | . | . | . |
| <i>Dactylorhiza urvilleana</i> | + | + | . | . | . | . | . | . | . | . | . | . | . | . | . |
| <i>Draba sibirica</i> | + | + | . | . | . | . | . | . | . | . | . | . | . | . | . |
| <i>Cephalaria gigantea</i> | 1 | 1 | 1 | . | . | . | . | . | . | . | . | . | . | . | . |
| <i>Centaurea abbreviata</i> | 1 | 1 | + | . | . | . | . | . | . | . | . | . | . | . | . |
| <i>Campanula glomerata</i> | + | + | 1 | . | . | . | . | . | . | . | . | . | . | . | . |
| <i>Asyneuma campanuloides</i> | + | . | + | . | . | . | . | . | . | . | . | . | . | . | . |
| ДВ <i>Stachys macrantha</i> – <i>Pedicularis wilhelmsiana</i> | | | | | | | | | | | | | | | |
| <i>Stachys macrantha</i> | . | . | 1 | 1 | . | . | . | . | . | . | . | . | . | . | . |
| <i>Chaerophyllum aureum</i> | . | . | + | 1 | . | . | . | . | . | . | . | . | . | . | . |
| <i>Melampyrum arvense</i> | . | . | + | . | 1 | . | . | . | . | . | . | . | . | . | . |
| <i>Pedicularis wilhelmsiana</i> | . | . | 1 | . | + | . | . | . | . | . | . | . | . | . | . |
| ДВ <i>Erysimum cuspidatum</i> – <i>Pedicularis sibthorpii</i> | | | | | | | | | | | | | | | |
| <i>Bromopsis riparia</i> | . | . | . | . | . | 1 | + | . | . | . | 1 | 1 | + | + | + |
| <i>Erysimum cuspidatum</i> | . | . | . | . | . | + | + | + | . | . | . | + | . | . | . |
| <i>Pedicularis sibthorpii</i> | + | . | . | . | . | + | + | + | + | . | . | . | . | . | . |

Продолжение таблицы

| Фитоценоз | 1 | | 2 | | | 3 | | | 4 | | 5 | | | 6 | |
|--|----|----|---|---|----|-------|---|----|----|----|----|----|----|----|----|
| | 13 | 14 | 6 | 7 | 15 | 5 | 9 | 10 | 11 | 12 | 8 | 1 | 2 | 3 | 4 |
| № п/п табличный | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 |
| <i>Reseda lutea</i> | . | . | . | . | . | + | + | + | . | . | . | . | . | . | . |
| <i>Bromopsis erectus</i> | . | . | . | . | . | + | + | + | . | . | . | . | . | . | . |
| <i>Scorzonera hispanica</i> | . | . | . | . | . | + | + | + | + | . | . | . | . | . | . |
| <i>Poa compressa</i> | . | . | . | . | . | + | + | + | + | . | + | + | + | + | . |
| <i>Poterium polygamum</i> | . | . | . | . | . | . | + | + | + | . | + | + | . | . | . |
| <i>Jurinea arachnoidea</i> | . | . | . | . | + | . | + | + | + | + | . | . | . | . | + |
| <i>Linum austriacum</i> | . | . | . | . | + | + | + | + | . | . | . | . | . | + | . |
| ДВ других синтаксонов (остепненные луга и степи) | | | | | | Степи | | | | | | | | | |
| <i>Euphorbia stepposa</i> | . | . | . | . | + | + | 1 | 1 | 1 | . | 1 | 1 | 1 | 1 | + |
| <i>Carex humilis</i> | 2 | 2 | . | . | 1 | + | + | . | . | 2 | 1 | 3 | 1 | 3 | 3 |
| <i>Bothriochloa ischaemum</i> | . | . | . | . | . | . | . | . | 1 | + | 2 | . | 2 | + | + |
| ДВ <i>Argyrobium biebersteinii</i> – <i>Anthyllis vulneraria</i> | | | | | | | | | | | | | | | |
| <i>Argyrobium biebersteinii</i> | 2 | + | . | . | . | . | . | 1 | 1 | + | . | . | . | . | . |
| <i>Silene saxatilis</i> | + | . | . | . | . | . | . | + | + | + | . | . | . | . | . |
| <i>Teucrium chamaedrys</i> | . | . | . | . | 1 | . | . | 1 | 1 | 1 | + | . | . | . | . |
| <i>Anthyllis vulneraria</i> | . | . | . | . | . | . | . | + | + | + | . | . | . | . | . |
| ДВ <i>Convolvulus arvensis</i> – <i>Daucus carota</i> | | | | | | | | | | | | | | | |
| <i>Cichorium intybus</i> | . | . | . | . | . | . | + | . | . | . | + | + | + | + | + |
| <i>Astragalus austriacus</i> | . | . | . | . | . | . | . | . | . | . | + | 1 | 1 | + | + |
| <i>Acinos arvensis</i> | . | . | . | . | . | . | . | . | . | . | + | + | . | + | + |
| <i>Melilotus officinalis</i> | . | . | . | . | . | . | . | . | . | . | + | + | + | + | . |
| <i>Achillea nobilis</i> | . | . | . | . | . | . | . | . | . | . | 1 | + | + | + | . |
| <i>Convolvulus arvensis</i> | . | . | . | . | . | . | . | . | . | . | + | 1 | + | . | . |
| <i>Daucus carota</i> | . | . | . | . | . | . | + | . | . | . | + | + | + | . | . |
| ДВ <i>Helianthemum nummularium</i> – <i>Scutellaria orientalis</i> | | | | | | | | | | | | | | | |
| <i>Helianthemum nummularium</i> | . | . | . | 1 | . | . | . | . | . | . | . | . | . | 2 | 1 |
| <i>Scutellaria orientalis</i> | . | . | . | . | . | . | . | + | . | . | . | . | . | + | + |
| <i>Senecio erucifolius</i> | . | . | . | . | . | . | . | . | . | . | + | . | . | + | + |
| <i>Cleistogenes bulgarica</i> | . | . | . | . | . | . | . | . | . | . | . | . | 1 | 1 | 1 |
| <i>Convolvulus lineatus</i> | . | . | . | . | . | . | . | . | . | . | . | . | . | + | + |
| <i>Linum sp.</i> | . | . | . | . | . | . | . | . | . | . | . | . | . | + | + |
| Другие виды | | | | | | | | | | | | | | | |
| <i>Arenaria serpyllifolia</i> | + | + | . | . | . | . | . | . | . | + | + | + | + | + | + |
| <i>Potentilla recta</i> | + | + | 2 | . | + | . | . | . | . | + | + | . | . | 1 | . |
| <i>Trifolium ambiguum</i> | + | 1 | + | . | . | + | + | + | . | . | + | + | . | . | . |
| <i>Tragopogon dasyrhynchus</i> | + | + | . | . | . | . | . | + | . | . | + | + | . | . | . |
| <i>Carex sp.</i> | + | + | . | 1 | . | . | . | . | . | 1 | . | . | . | . | . |
| <i>Bupleurum falcatum</i> | . | + | . | + | + | . | . | + | + | + | . | + | . | . | + |
| <i>Melampyrum argyrocomum</i> | . | . | + | . | + | + | 1 | 1 | + | . | . | . | . | . | . |
| <i>Inula ensifolia</i> | . | . | . | + | + | . | . | + | + | 1 | . | . | . | . | . |
| <i>Campanula elatior</i> | . | . | . | + | . | + | + | + | + | + | . | . | + | . | + |
| <i>Centaurea leucophylla</i> | . | . | . | + | 1 | . | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | . | . | . | 1 |
| <i>Teucrium nuchense</i> | . | . | . | + | . | + | + | . | . | . | . | 1 | 1 | 1 | 1 |
| <i>Salvia nemorosa</i> | . | . | . | 1 | 1 | . | . | . | . | . | 1 | + | . | . | + |
| <i>Cuscuta approximata</i> | . | . | . | . | + | . | . | . | + | + | . | . | . | + | + |

Окончание таблицы

| Фитоценоз | 1 | | 2 | | | 3 | | | 4 | | 5 | | | 6 | |
|--------------------------------|----|----|---|---|----|---|---|----|----|----|----|----|----|----|----|
| | 13 | 14 | 6 | 7 | 15 | 5 | 9 | 10 | 11 | 12 | 8 | 1 | 2 | 3 | 4 |
| № п/п табличный | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 |
| <i>Teucrium polium</i> | . | . | . | . | + | . | . | + | . | 1 | + | + | 1 | 1 | 1 |
| <i>Alyssum trichostachyum</i> | . | . | . | . | . | + | + | + | + | . | + | . | . | . | + |
| <i>Asperula kotovii</i> | . | . | . | . | . | . | . | + | . | 1 | + | + | . | 1 | + |
| <i>Cruciata laevipes</i> | . | . | . | . | . | . | . | . | . | + | 1 | . | + | + | + |
| <i>Thesium arvense</i> | . | . | . | . | . | . | . | . | . | + | . | + | + | + | + |
| <i>Carlina vulgaris</i> | . | . | . | . | + | . | . | + | . | . | . | . | . | + | + |
| <i>Elytrigia trichophora</i> | . | . | . | . | 2 | . | . | . | 1 | . | . | + | . | 1 | . |
| <i>Hieracium piloselloides</i> | + | + | . | . | . | + | + | . | . | . | . | . | . | . | . |

Приложение. Кроме того, с постоянством 20 % и менее встречены (номера площадок – авторские): *Ajuga reptans* (4+), *Allium albidum* (3+), *A. rotundum* (9+), *Alopecurus pratensis* (6 1), *A. vaginatus* (7 3), *Alyssum alyssoides* (1+, 5+, 8+, 9+), *A. turkestanicum/desertorum* (12+), *Anacamptis pyramidalis* (15+), *Anthemis macroglossa* (6+), *Anthoxanthum odoratum* (7 1), *Arabis auriculata* (12+), *Artemisia campestris* (1 1, 2+), *Astragalus demetrii* (4 1, 8+, 12+), *A. onobrychis* (8+, 2+), *Betula pendula* (7 1), *Bromus japonicus* (2+), *Bupleurum rotundifolium* (8+), *Campanula sarmatica* (7+, 12+, 15+), *Carduus hamulosus* (9+), *C. nutans* (8+), *Carduus* sp. (8+, 2+), *Caucalis platycarpus* (2+), *Centaurea jacea* (6+), *C. scabiosa* (9+), *Centaurea* sp. (6+), *Cephalaria coriacea* (12 1), *Cleistogenes serotina* (1+), *Convolvulus cantabrica* (12 1), *Crepis* sp. (8 1), *Dianthus* sp. (4+, 12+, 15+), *Draba nemorosa* (1+), *Echium russicum* (1+), *E. vulgare* (3+, 8+1), *Elytrigia caespitosa* (4+, 7 1), *Epipactis helleborine* (4+), *Erigeron acris* (8+), *Euphorbia petrophila* (12 1), *E. seguieriana* (15+), *Euphorbia* sp. (2+, 3 1, 7+), *Falcaria vulgaris* (1+, 15+), *Fallopia dumetorum* (10+), *Festuca valesiaca* (12+), *Galium humifusum* (2 1, 3+, 8 1), *G. mollugo* (7+, 12+), *G. octonarium* (1+, 4+), *G. odoratum* (4+), *G. rubioides* (7 3), *Genista patula* (9+), *Gentiana cruciata* (10+), *Gladiolus tenuis* (6+, 9+, 10+), *Gymnadenia conopsea* (7+), *Gypsophila meyeri* (3+), *Helianthemum canum* (3 1), *Hieracium echinoides* (4+), *Hypericum hirsutum* (6+), *Iberis taurica* (12+), *Inula britannica* (4 1), *Iris* sp. (12+), *Lappula squarrosa* (2+, 8+, 11+), *Lepidium campestre* (5+, 8+, 9+), *Linaria vulgaris* (11+, 15+), *Linum nervosum* (10+), *L. tenuifolium* (3+, 4+, 12+), *Lolium perenne* (8+, 2+), *Lotus caucasicus* (9 1), *Medicago lupulina* (8+, 1+), *Melandrium album* (9+), *Melica transsilvanica* (8+, 11+), *Microthlaspi perfoliatum* (2+), *Muscari armeniacum* (8+, 1+), *Onobrychis petraea* (1 1), *O. tournefortii* (4 3, 11 2), *Ononis pusilla* (4+, 12+), *Orchis tridentata* (4+), *Ostrya carpinifolia* (7+), *Pedicularis atropurpurea* (14+), *Peucedanum ruthenicum* (11+, 15+), *Phleum phleoides* (1+), *Phlomis pungens* (4+, 9+), *Phlomis tuberosa* (15+), *Pimpinella saxifraga* (4+), *Plantago maxima* (9+), *Polygala caucasica* (1 1, 3+), *Potentilla arenaria* (4+), *P. humifusa* (8+), *P. reptans* (8+), *Prunella grandiflora* (6+), *Pyrus communis* (2+), *Ranunculus repens* (7+), *Rhododendron luteum* (13+), *Rhynchospora orientalis* (9+), *Rosa* sp. (1+, 2+), *Salvia canescens* (3+, 12 1), *Scabiosa caucasica* (6+, 14+), *Sedum hispanicum* (12+), *Seseli petraeum* (12+), *S. varium* (1+), *Sideritis montana* (2+, 3+, 8+), *Silene densiflora* (10+, 11+), *Stachys germanica* (5+, 7+, 9+), *Taraxacum officinale* (3+, 4+), *Thalictrum foetidum* (9+), *Thalictrum minus* (1+, 8+, 10+), *Tilia begonifolia* (7+), *Trifolium alpestre* (6 1, 9 1, 11 1), *Turritis glabra* (1+, 4+), *Valeriana officinalis* (13+), *Verbascum thapsus* (8+), *Veronica jacquinii* (8+), *V. spicata* (3+), *Vicia angustifolia* (1+), *Vincetoxicum juzepeczukii* (1+, 3+, 4+), *Viola odorata* (4+).

После проведения непрямой ординации была определена нагрузка на ординационные оси (axis eigenvalue), которые в математике именуются собственными векторами (eigenvectors). Это – последовательность величин, определяющих точку в многомерном пространстве. Каждый из векторов имеет соответствующую собственную величину. В свою очередь, эта величина равна рассеиванию за-сечек объектов (в данном случае описаний) на оси ординации, и, таким образом, она и служит мерой значимости оси ординации. Было установлено, что все собственные величины осей ординации лежат в интервале между 0 и 1, при этом значения, приближенные к 0,5 и выше, обычно означают хорошее рассеяние вдоль оси и имеют экологически достоверную информацию [28].

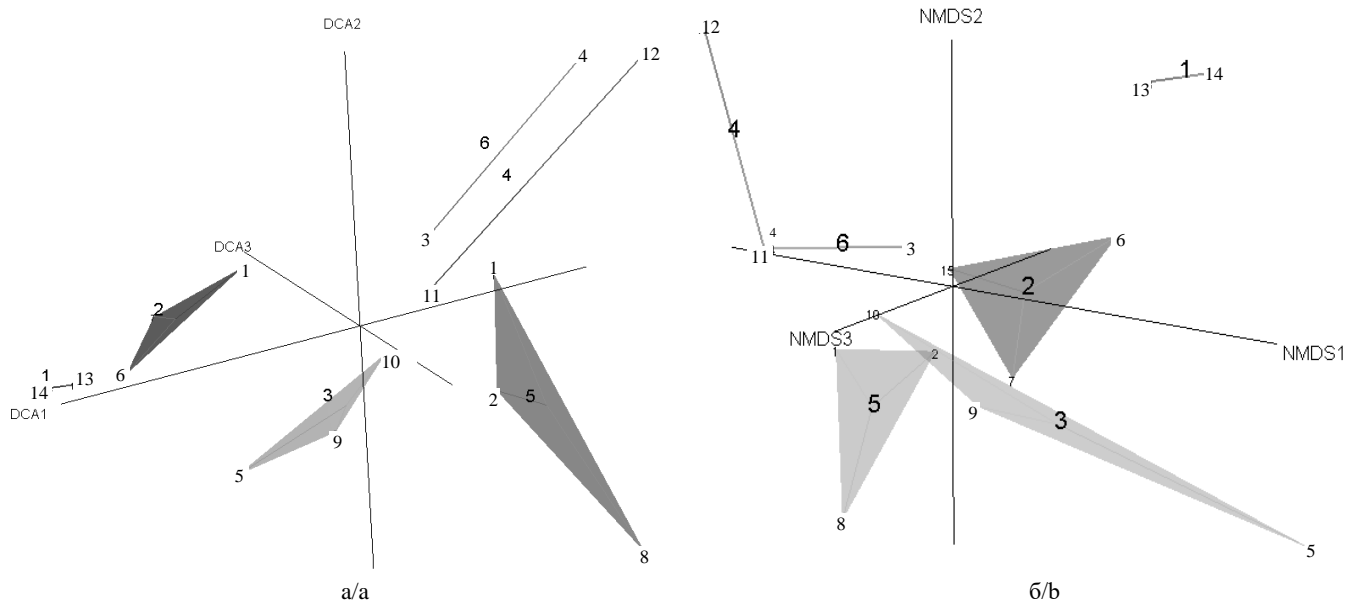
По результатам ординации 15 геоботанических описаний травяной растительности куэсты Скалистого хребта по методу DCA (бестрендовый анализ

соответствия), выполненной в пакете Juice 7.0.42 (рисунок), мера значимости (eigenvalue) 1-й оси ординации (DCA 1) оказалась превышающей значение 0,5 и равняется 0,56; значимость 2-й оси ординации и последующих оказалась ниже порогового значения (DCA 2 – 0,35; DCA 3 – 0,26; DCA 4 – 0,10). Таким образом, в соответствии с данными, полученными в [28], значимой является только первая ось ординации (DCA 1), отражающая экологически верную информацию, которую можно интерпретировать как ось увлажнения. Однако меры значимости 2-й (DCA 2) и 3-й (DCA 3) осей имеют значения выше 0,25, хотя и ниже 0,5. Игнорируя последующие оси ординации, мы ожидаем, что первые 3 оси ординации все же будут иметь экологически верную информацию, и наряду с выявлением главных факторов вариации, влияющих на распределение сообществ травяной растительности, можно будет определить координату предва-

рительно выделенных фитоценонов в пространстве экологических факторов.

Соответственно полученным результатам ординации (рисунок) и ранее проведенным ботаническим исследованиям на Скалистом хребте [2, 8, 13] можно предположить, что описания первых 3 фитоценонов, расположенных вдоль 1-й оси (DCA 1),

с одной стороны осей 2 (DCA 2) и 3 (DCA 3), представляют луговые сообщества (геоботанические описания 5–7, 9, 10, 13–15). Наиболее влажные условия просматриваются для первого фитоценона, описания которого можно принимать как крайнюю, т.е. конечную, группу сообществ на оси увлажнения [27].



Положение 15 описаний в 6 фитоценонах и в трех осях ординации: а – по методу DCA, Juice 7.0.42; б – по методу NMDS, Juice 7.0.42 / Position of the 15 descriptions in 6 phytocoenons and in three ordinate axes a – to the method DCA, Juice 7.0.42; b – to the method NMDS, Juice 7.0.42

Остальные геоботанические описания 3-го, 4-го и 5-го фитоценонов (1–4, 8, 11–12), которые расположились по другую сторону 2-й (DCA 2) и 3-й (DCA 3) осей, по всей видимости, развиваются в более сухих условиях относительно первых и могут интерпретироваться как другие типы растительности – луговые степи и группировки нагорных ксерофитов, т.е. наиболее сухие условия отмечены для последнего, шестого фитоценона; здесь должна располагаться другая противоположная концевая группа сообществ (таблица, рисунок). Второй и третий фитоценоны представляют настоящие и остепненные среднегорные луга соответственно; 4-й, 5-й и 6-й – луговые степи.

Эти данные также хорошо отражены в таблице, с помощью которой интерпретируются оси нагрузок по составу концевых групп видов. В 1-м фитоценоне отмечаются виды наиболее влажных горных луговых сообществ с элементами субальпикки: *Phragmites australis*, *Calamagrostis arundinacea*, *Holcus lanatus*, *Bromopsis erecta*, *Amoria repens*, *Anemonastrum narcissiflorum*, *Veratrum lobelianum*, *Linum hypericifolium*, *Trifolium caucasicum*, *Sanguisorba officinalis*, *Dactylorhiza euxina*, *D.*

urvilleana. В последнем, 6-м фитоценоне имеются виды так называемых нагорных ксерофитов в сообществах луговых степей, где формируются бородачевые степи: *Stipa capillata*, *Bothriochloa ischaemum*, *Carex humilis*, *Scabiosa bipinnata*, *Teucrium polium*, *Asperula kotovii*, *Helianthemum nummularium*, *Scutellaria orientalis*, *Cleistogenes bulgarica*, *Convolvulus lineatus*.

В экологическом пространстве геоботанические описания 2-го, 3-го и 5-го фитоценонов оказались расположенными ниже первой (DCA 1) и третьей (DCA 3) осей, т.е. фитоценон 2 (описания 6, 7, 15), фитоценон 3 (описания 5, 9, 10) и фитоценон 5 (описания 1, 2, 8) распределились ниже относительно 1-й и 3-й осей и оказались в сходных условиях низко- и среднегорных разнотравных и остепненных лугов и луговых степей на световых склонах, образованных коротконожкой *Brachypodium pinnatum* со значительным участием *Salvia verticillata*.

Остальные геоботанические описания (3, 4, 11–14), которые расположились выше 1-й и 3-й осей, т.е. с нагрузкой на 2-ю ось, и при этом по обе стороны от нее (DCA 2), ниже и выше третьей (DCA 3)

подтверждают мысль о том, что 2-я ось может рассматриваться как фактор вариации петрофитности сообществ: от среднегорных лугов с *Argyrobium biebersteinii*, *Silene saxatilis*, с элементами субальпики (описания 13, 14) к луговым степям (описания 11, 12); и затем до крайнего их варианта, с *Helianthemum nummularium*, *Scutellaria orientalis*, *Cleistogenes bulgarica* и *Convolvulus lineatus* (описания 3, 4).

Интерпретировать 2-ю и 3-ю оси ординации полученные данные позволяют приблизительно, для чего необходимо проведение дальнейших исследований.

Аналогичные результаты были получены на основе выполненной ординации 15 геоботанических описаний травяной растительности куэсты Скалистого хребта по методу NMDS.

Таким образом, по результатам ординации 15 геоботанических описаний травяной растительности куэсты Скалистого хребта можно судить о наличии 6 фитоценонов, которые четко разделяются на 6 части, соответствующие различным типам растительности – лугам и степям. Первые 3 фитоценона с нагрузкой на 1-ю ось вариации в ординационном пространстве представляют луга, в том числе остепненные и переходные; 3 последующие, расположившиеся по другую сторону 2-й и 3-й осей ординации, – степи.

Заключение

Проведенные исследования позволили предварительно выполнить синтаксономию травяной растительности Скалистого хребта в пределах КЧР и наметить дальнейшее изучение закономерностей ее распределения. Было выделено 6 сообществ, которые на данном уровне синтаксономического анализа отнесены к 3 классам эколого-флористической классификации.

Сообщество *Anemonastrum narcissiflorum* – *Linum hypericifolium* представляет влажные среднегорные луга с субальпийскими элементами и отнесено к классу *Molinio-Arrhenatheretea*. Сообщество *Stachys macrantha* – *Pedicularis wilhelmsiana*, представляющее остепненные среднегорные луга опушек, рассматривается в классе *Trifolio-Geranietea sanguinei*. Переходное сообщество *Erysimum cuspidatum* – *Pedicularis sibthorpii*, представляющее субсредиземноморские полуксерофитные петрофитные травяные сообщества, видится уже в составе класса *Festuco-Brometea*. Остальные 3 сообщества: *Argyrobium biebersteinii* – *Anthyllis vulneraria*, *Convolvulus arvensis* – *Daucus carota* и *Helianthemum nummularium* – *Scutellaria orientalis*, рассматриваются как луговые степи и отнесены

также к классу *Festuco-Brometea*, однако их синтаксономия требует дополнительных исследований.

Результаты непрямої ординации дополняют и подтверждают наши синтаксономические построения, раскрывая закономерности распределения сообществ травяной растительности Скалистого хребта в пространстве экологических факторов. Только 1-я ось вариации имеет экологически достоверную информацию, которую можно интерпретировать как ось увлажнения: наиболее влажные горные луговые сообщества с элементами субальпики на одном конце оси в конце ряда сменяются степями с участием нагорных ксерофитов. Все описания разделяются на 2 части, соответствующие различным типам растительности – лугам и степям.

Литература

1. *Потапенко Ю.Я.* Геология Карачаево-Черкесии: учеб. пособие. Карачаевск: Изд-во КЧГУ, 2004. 154 с.
2. *Дзыбов Д.С.* Флора и растительность Карачаево-Черкесии. Ставрополь: Астра-М, 2013. 424 с.
3. *Станюкович К.В.* Растительность гор СССР. Душанбе: Дониш, 1973. 416 с.
4. *Лурье П.М., Панов В.Д., Ильичев Ю.Г., Салтагаров А.Д.* Снежный покров и ледники бассейна реки Кубань // Тр. Тебердинского гос. биосферного заповедника. Вып. 41. Кисловодск: МИЛ, 2006. С. 1–244.
5. *Темботов А.К.* География млекопитающих Северного Кавказа. Нальчик: Эльбрус, 1972. 242 с.
6. *Соколов В.Е., Темботов А.К.* Млекопитающие Кавказа. Насекомоядные. М.: Наука, 1989. 548 с.
7. *Гулисаивили В.З., Махатадзе Л.Б., Прилипко Л.И.* Растительность Кавказа. М.: Наука, 1975. 233 с.
8. *Шифферс Е.В.* Растительность Северного Кавказа и его природные кормовые угодья. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1953. 399 с.
9. Зоны и типы поясности растительности России и сопредельных территорий / отв. ред. Г.Н. Огурева. М. 1:8 000 000. М.: Экор, 1999. 64 с.
10. *Макунина Н.И.* Растительность лесостепи Западно-Сибирской равнины и Алтае-Саянской горной области. Новосибирск: ГЕО, 2016. 183 с.
11. *Батхиев А.М.* Закономерности дифференциации природных условий Кавказа как основа для биоэкологического анализа // Юг России: экология, развитие. 2008. № 4. С. 76–87.
12. *Зернов А.С., Алексеев Ю.Е., Онинченко В.Г.* Определитель сосудистых растений Карачаево-Черкесской Республики. М.: Товарищество научных изданий КМК, 2015. 459 с.
13. *Урбанский О.М., Туркевич В.Н., Караев А.Н., Науменко Н.А., Ерижнев К.А.* Естественные кормовые угодья Карачаево-Черкесской Республики. Черкесск, 1995. 114 с.

14. Onipchenko V.G. Alpine Vegetation of the Teberda Reserve, the Northwestern Caucasus. Veröffentlichungendes Geobotanischen Institutes der ETH, Stiftung Rubel, Zürich, Heft 130, 2002. 168 p.

15. Ямалов С.М., Суворов А.В., Лебедева М.В., Ескина Т.Г., Хасанова Г.Р., Тания И.В. Разнообразие травяных сообществ южного передового и северо-западной части Главного Кавказского хребта // Научные ведомости. Естеств. науки. 2016. № 18 (239), вып. 36. С. 15–25.

16. Цепкова Н.Л. К синтаксономии высокогорных луговых степей Центрального Кавказа // Растительность России. 2005. № 7. С. 93–96.

17. Цепкова Н.Л. К синтаксономии мезофильных лугов Центрального Кавказа (Кабардино-Балкария) // Изв. Самарского науч. центра РАН. 2016. № 4. С. 62–68.

18. Цепкова Н.Л., Пшегусов Р.Х., Ханов З.М., Жашуев А.Ж. Оценка распространения травяных сообществ на основе данных дистанционного зондирования в мониторинге состояния горных лугов Центрального Кавказа (Кабардино-Балкария) // Изв. Самарского науч. центра РАН. 2015. Т. 17, № 4 (2). С. 428–432.

19. Танфильев В.Г. Растительность Скалистого хребта между р. Б. Лаба и М. Зеленчук // Материалы по изучению Ставропольского края. Ставропольский краевой музей. Вып. 10. Ставрополь : Ставроп. книжное изд-во, 1960. С. 203–221.

20. Полевая геоботаника / под ред. Е.М. Лавренко, А.А. Корчагина. М.; Л. : Изд-во АН СССР, 1964. Т. III. 530 с.

21. Зверев А.А. Информационные технологии в исследованиях растительного покрова : учеб. пособие. Томск : ТМЛ-Пресс, 2007. 304 с.

22. Миркин Б.М., Наумова Л.Г. Современное состояние основных концепций науки о растительности. Уфа : АНРБ, Гилем, 2012. 488 с.

23. Weber H.E., Moravec J. & Theurillat J.-P. International Code of Phytosociological Nomenclature 3rd edition // J. Veget. Sci. 2000. Vol. 11, № 5. P. 739–768.

24. Hill M.O., Gauch H.G. Detrended correspondence analysis: an improved ordination technique // Vegetatio, 1980. Vol. 42. P. 47–58.

25. Clarke K.R. Non-parametric multivariate analyses of changes in community structure // Australian J. of Ecology. 1993. Vol. 18. P. 117.

26. Hill M.O. TWINSpan--A FORTRAN program for arranging multivariate data in an ordered two-way table by classification of the individuals and attributes. Ithaca, NY : Ecology and Systematics, Cornell University, 1979.

27. Баянов А.Б., Ямалов С.М., Миркин Б.М. Опыт анализа факторов, определяющих состав луговых сообществ с использованием ординационных подходов (на примере северо-востока Республики Башкортостан) // Изв. Самарского науч. центра РАН. 2009. Т. 11, № 1. С. 31–33.

28. Джонгман Р.Г., Тер Брак С.Дж.Ф., Ван Тонгелен О.Ф.Р. Анализ данных в экологии сообществ и ландшафтов. М. : РАСХН, 1999. 306 с.

References

1. Potapenko Yu.Ya. *Geologiya Karachaevo-Cherkessii* [Geology of Karachay-Cherkessia]. Textbook. Karachaevsk, Izd-vo KChGU, 2004, 154 p.

2. Dzybov D.S. *Flora i rastitel'nost' Karachaevo-Cherkessii* [Flora and vegetation of Karachay-Cherkessia]. Stavropol, Astra-M, 2013, 424 p.

3. Stanyukovich K.V. *Rastitel'nost' gor SSSR* [Vegetation of the USSR mountains]. Dushanbe, Donish, 1973, 416 p.

4. Lur'e P.M., Panov V.D., Il'ichev Yu.G., Salpagarov A.D. *Snezhnyi pokrov i ledniki basseina reki Kuban'* [Snow cover and glaciers of the Kuban river basin]. *Tr. Teberdinskogo gos. biosfernogo zapovednika*. No. 41. Kislovodsk, MIL, 2006, pp. 1-244.

5. Tembotov A.K. *Geografiya mlekopitayushchikh Severnogo Kavkaza* [Geography of mammals of the North Caucasus]. Nalchik, El'brus, 1972, 242 p.

6. Sokolov V.E., Tembotov A.K. *Mlekopitayushchie Kavkaza. Nasekomoyadnye* [Mammals of the Caucasus. Insectivores]. Moscow, Nauka, 1989, 548 p.

7. Gulisashvili V.Z., Makhatadze L.B., Prilipko L.I. *Rastitel'nost' Kavkaza* [Vegetation of the Caucasus]. Moscow, Nauka, 1975, 233 p.

8. Shiffers E.V. *Rastitel'nost' Severnogo Kavkaza i ego prirodnye kormovye ugod'ya* [Vegetation of the North Caucasus and its natural feeding grounds]. Moscow, Leningrad, Izd-vo AN SSSR, 1953, 399 p.

9. *Zony i tipy poyasnosti rastitel'nosti Rossii i sopredel'nykh territorii* [Zones and types of zones of vegetation in Russia and adjacent territories]. Ed. G.N. Ogureeva. M. 1:8 000 000. Moscow, Ekor, 1999, 64 p.

10. Makunina N.I. *Rastitel'nost' lesostepi Zapadno-Sibirskoi ravniny i Altae-Sayanskoi gornoj oblasti* [Vegetation of the forest-steppe of the West Siberian Plain and the Altai-Sayan mountain region]. Novosibirsk, GEO, 2016, 183 p.

11. Batkhiev A.M. *Zakonomernosti differentsiatsii prirodnikh uslovii Kavkaza kak osnova dlya bioekologicheskogo analiza* [Regularities of differentiation of Caucasus natural conditions as a basis for bioecological analysis]. *Yug Rossii: ekologiya, razvitie*. 2008, No. 4, pp. 76-87.

12. Zernov A.S., Alekseev Yu.E., Onipchenko V.G. *Opredelitel' sosudistyykh rastenii Karachaevo-Cherkesskoi Respubliki* [The determinant of vascular plants of the Karachay-Cherkess Republic]. Moscow, Tovarishestvo nauchnykh izdaniy KMK, 2015, 459 p.

13. Urbanskii O.M., Turkevich V.N., Karaev A.N., Naumenko N.A., Erizhev K.A. *Estestvennye kormovye*

ugod'ya Karachaev-Cherkesskoi Respubliki [Natural feeding grounds of Karachay-Cherkess Republic]. Cherkessk, 1995, 114 p.

14. Onipchenko V.G. *Alpine Vegetation of the Teberda Reserve, the Northwestern Caucasus*. Veröffentlichungendes Geobotanischen Institutes der ETH, Stiftung Rubel, Zürich, Heft 130, 2002, 168 p.

15. Yamalov S.M., Suvorov A.V., Lebedeva M.V., Eskina T.G., Khasanova G.R., Taniya I.V. Raznoobrazie travyanykh soobshchestv yuzhnogo przedovogo i severo-zapadnoi chasti Glavnogo Kavkazskogo khrebtta [Variety of grass communities in the southern and northwestern parts of the Main Caucasian Range]. *Nauchnye vedomosti. Estestv. nauki*. 2016, No. 18 (239), iss. 36, pp. 15-25.

16. Tsepikova N.L. K sintaksonomii vysokogorynykh lugovykh stepei Tsentral'nogo Kavkaza [To the syntaxonomy of high mountain meadow steppes of the Central Caucasus]. *Rastitel'nost' Rossii*. 2005, No. 7, pp. 93-96.

17. Tsepikova N.L. K sintaksonomii mezofil'nykh lugov Tsentral'nogo Kavkaza (Kabardino-Balkariya) [To the syntaxonomy of mesophilic meadows of the Central Caucasus (Kabardino-Balkaria)]. *Izv. Samarskogo nauch. tsentra RAN*. 2016, No. 4, pp. 62-68.

18. Tsepikova N.L., Pshegusov R.Kh., Khanov Z.M., Zhashuev A.Zh. Otsenka rasprostraneniya travyanykh soobshchestv na osnove dannykh distantsionnogo zondirovaniya v monitoringe sostoyaniya gornykh lugov Tsentral'nogo Kavkaza (Kabardino-Balkariya) [Estimation of the distribution of herbal communities based on remote sensing data in monitoring the state of mountain meadows in the Central Caucasus (Kabardino-Balkaria)]. *Izv. Samarskogo nauch. tsentra RAN*. 2015, vol. 17, No. 4 (2), pp. 428-432.

19. Tanfil'ev V.G. Rastitel'nost' Skalistogo khrebtta mezhdru r. B. Laba i M. Zelenchuk [Vegetation of the Rocky ridge between the river B. Laba and M. Zelenchuk]. *Materialy po izucheniyu Stavropol'skogo kraya* [Materials on the study of the Stavropol Territory]. Stavropol Region

al Museum. Iss. 10. Stavropol, Stavrop. knizhnoe izd-vo, 1960, pp. 203-221.

20. *Polevaya geobotanika* [Field geobotany]. Eds. E.M. Lavrenko, A.A. Korchagina. Moscow, Leningrad, Izd-vo AN SSSR, 1964, vol. III, 530 p.

21. Zverev A.A. *Informatsionnye tekhnologii v issledovaniyakh rastitel'nogo pokrova* [Information technology in the study of vegetation cover]. Textbook. Tomsk, TML-Press, 2007, 304 p.

22. Mirkin B.M., Naumova L.G. *Sovremennoe sostoyanie osnovnykh kontseptsii nauki o rastitel'nosti* [The current state of the basic concepts of the science of vegetation]. Ufa, ANRB, Gilem, 2012, 488 p.

23. Weber H.E., Moravec J. & Theurillat J.-P. International Code of Phytosociological Nomenclature 3rd edition // *J. Veget. Sci.* 2000. Vol. 11, № 5. P. 739-768.

24. Hill M.O., Gauch H.G. Detrended correspondence analysis: an improved ordination technique. *Vegetatio*. 1980, vol. 42, pp. 47-58.

25. Clarke K.R. Non-parametric multivariate analyses of changes in community structure. *Australian J. of Ecology*. 1993, vol. 18, p. 117.

26. Hill M.O. *TWINSPAN--A FORTRAN program for arranging multivariate data in an ordered two-way table by classification of the individuals and attributes*. Ithaca, NY, Ecology and Systematics, Cornell University, 1979.

27. Bayanov A.B., Yamalov S.M., Mirkin B.M. Opyt analiza faktorov, opredelyayushchikh sostav lugovykh soobshchestv s ispol'zovaniem ordinatsionnykh podkhodov (na primere severo-vostoka Respubliki Bashkortostan) [Experience in analyzing the factors determining the composition of meadow communities using ordination approaches (on the example of the north-east of the Republic of Bashkortostan)]. *Izv. Samarskogo nauch. tsentra RAN*. 2009, vol. 11, No. 1, pp. 31-33.

28. Dzhongman R.G., Ter Brak S.Dzh.F., Van Tongeren O.F.R. *Analiz dannykh v ekologii soobshchestv i landshaftov* [Analysis of data in the ecology of communities and landscapes]. Moscow, RASKhN, 1999, 306 p.

ТИПЫ ОПУСТЫНИВАНИЯ ПОЧВ И КРИТЕРИИ ОЦЕНКИ ДЕГРАДАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ

© 2017 г. З.Г. Залибеков^{1,2}, Х.М. Гамзатова²

¹Дагестанский научный центр РАН, Махачкала, Россия,

²Дагестанский государственный университет, Махачкала, Россия

THE TYPES OF DESERTIFICATION OF SOILS AND CRITERIA FOR THE EVALUATION OF DEGRADATION PROCESSES

Z.G. Zalibekov^{1,2}, H.M. Gamzatova²

¹Dagestan Scientific Center, Russian Academy of Sciences, Makhachkala, Russia,

²Dagestan State University, Makhachkala, Russia

Залибеков Залибек Гаджиевич – доктор биологических наук, главный научный сотрудник, Институт геологии, Дагестанский научный центр РАН, ул. Ярагского, 75, г. Махачкала, 367014, Россия; профессор, кафедра почвоведения, Дагестанский государственный университет, ул. Дзержинского, 12, г. Махачкала, 367000, Россия, e-mail: dageo@.ru

Zalibek G. Zalibekov – Doctor of Biology, Main Researcher, Institute of Geology, Dagestan Scientific Center, Russian Academy of Sciences, Yaragskogo St., 75, Makhachkala, 367014, Russia; Professor, Department of Soil Science, Dagestan State University, Dzerzhinskogo St., 12, Makhachkala, 367000, Russia, e-mail: dageo@.ru

Гамзатова Халисат Магомедовна – соискатель, кафедра почвоведения, Дагестанский государственный университет, ул. Дзержинского, 12, г. Махачкала, 367000, Россия, e-mail: xalim.1980@mail.ru

Halisat M. Gamzatova – Competitor, Department of Soil Science, Dagestan State University, Dzerzhinskogo St., 12, Makhachkala, 367000, Russia, e-mail: xalim.1980@mail.ru

Выявленные формы опустынивания почв по природным зонам объединены в классы, представляющие крупные таксономические единицы литогенного и галогенного происхождения. Критерии оценки аридной деградации почв определяются антропогенным воздействием и процессами накопления легкорастворимых солей, содержание которых зависит от гранулометрического состава почв. Дифференцированы антропогенные изменения, способствующие ускоренной деградации при отсутствии заметных изменений в компонентах природной среды. Деграционные процессы с относительно высокой контрастностью переходных стадий ксерофитизации широко распространены в приморских и дельтово-аллювиальных равнинах. Переход наземных экосистем лугового, лугово-степного, степного типов (включая лесных и кустарниковых представителей) к стадии аридизации под влиянием хозяйственной деятельности человека совершается за отрезок времени, когда климатические условия остаются практически без изменений. Ведущая роль антропогенного фактора в иссушении почв и их реакция обуславливают появление новых признаков оценки деграционных процессов. Выделены классы литогенного, галогенного (соляноквого) опустынивания, объединяющие соответствующие типы почв. Для сравнительной оценки введен класс фоновый уровень, где отсутствуют признаки природной деградации. В выделенных классах дифференцированы стадии опустынивания по гранулометрическому составу, температурному режиму корнеобитаемого слоя и степени засоления.

Ключевые слова: опустынивание почв, антропогенные воздействия, оценка, классы, гранулометрический состав, фоновый уровень, процессы, соленакопление.

Identify forms of soil desertification in natural areas combined into classes that represent the major taxonomic units lithogenic and halogen origin. Criteria for assessing land degradation in arid determined by anthropogenic impact and process of accumulation of soluble salts performance, which depends on the particle size distribution of soil. Differentiation of human-induced changes, contributing to accelerated degradation in the absence of significant changes in the natural environment components. Degradation processes with relatively high contrast transition stages xerophytization widespread in coastal and delta-alluvial plains. Go terrestrial ecosystems meadow, meadow-steppe, steppe types, including representatives of forest and bush to the stage arid under the influence of human activities makes for a length of time, when the climatic conditions remain virtually unchanged. The leading role of the human factor in the draining soils and their reactions cause the appearance of new symptoms evaluation of degradation processes. Obtained lithogenic classes, halogen (thistle) desertification, combining appropriate soil types. For comparative evaluation introduced the background level of the class, where there are no signs of natural degradation. In the selected classes the desertification stages are differentiated by particle size distribution, temperature regime and root zone salinity.

Keywords: *desertification of soils, anthropogenic impacts, evaluation, classes, particle size distribution, the level of background, processes, salt accumulation.*

Процессы опустынивания и аридной деградации, обусловленные антропогенным фактором, приводят к радикальным изменениям в состоянии природной среды, прежде всего почвенного покрова. Общеизвестно, что антропогенным опустыниванием охвачены регионы с сухим, полупустынным климатическим режимом. В результате интенсификации антропогенного фактора опустынивание распространяется и в условиях формирования степных, лугово-степных и лесных экосистем сопровождается увеличением дефицита влаги и сухости почвенного профиля.

Цель работы – выявление типов опустынивания почв, связанных с антропогенным воздействием, и оценка деградационных процессов, происходящих в почвах одного из типичных регионов Западного Прикаспия – Терско-Кумской низменности.

Объекты и методы исследования

Исследования проведены в центральной части Терско-Кумской низменности с охватом ареалов проявления аридной деградации, в диапазоне различий формирующихся процессов по типам почв. Полигон расположен в пределах высотных отметок от –20 до +50 м между 44 и 39° северной широты и 45° 11' – 45° 17' восточной долготы. Северная граница простирается до реки Кумы и переходной полосы нижних предгорий Восточного Предкавказья. На западе граничит с Чеченской Республикой, простираясь к востоку до береговой линии Каспийского моря. Систематизация и обработка первичного материала по полевым лабораторным исследованиям осуществлены с применением общепринятых методов исследования почв. Космические снимки использованы с дешифровкой типов почв и оконтуриванием границ ареалов. Применен метод оптико-цифрового укрупнения масштабов космических снимков для их обобщения и улучшения по содержанию крупномасштабных съемок. К методической части работы относится выделение установленных типов опустынивания в рамках более крупной систематической единицы классов. Для условий, где развиваются автоморфные почвы (легкого гранулометрического состава), введены градации оценки по гумификации и ветровой эрозии. Градация стадий опустынивания дана по общепринятой классификации, включая и фоновый уровень в состоянии почвенного покрова [1, 2]. Влияние грунтового увлажнения учтено при дифференциации типов почв по классам опустынивания, включая и глубину залегания грунтовых вод.

Результаты исследований и их обсуждение

При обобщении данных и составлении карты опустынивания использованы классы как картографическая основа. Пространственные показатели (контуры), выведенные на карте опустынивания, показывают преобладающую роль класса «галогенное опустынивание» средней и сильной степени (рис. 1). Из общей площади региона (1,2 млн га) галогенное опустынивание занимает 33 % (0,4 млн га). Ареалы распространены в центральной и восточной частях региона в пределах аккумулятивной зоны. На накопление солей в условиях грунтового увлажнения оказывает существенное влияние дифференциация по гранулометрическому составу отдельных горизонтов. Формирование класса литогенного опустынивания связано с легким гранулометрическим составом. С уменьшением физического песка увеличивается относительное содержание физической глины, создавая условия для накопления солей в прогрессирующем направлении, и формирования обратимой динамики литогенного класса к галогенному. При этом образуются солончаки типичные, корковые, пухлые, относящиеся к классу галогенного опустынивания, высшая стадия которого наступает при более чем 70%-м содержании физической глины. Чем меньше физического песка в условиях безоточного грунтового увлажнения, тем сильнее развиваются процессы галогенного опустынивания (табл. 1). Роль песчаных фракций сводится к усилению дренажной роли опесчаненных слоев, поглощению солнечной энергии и увеличению температуры поверхностных горизонтов [1, 3, 4]. Создаются условия, способствующие прогреванию, быстрому оттаиванию снега на поверхности и аккумуляции тепловой энергии. Одностороннее увеличение физического песка на отдельных участках происходит преимущественно эоловым путем, способствуя иссушению почв и формированию локальных песчаных образований. При высоких пастбищных нагрузках локальные песчаные образования превращаются в очаги опустынивания. С увеличением физического песка связано формирование бугров, барханов, подверженных литогенному опустыниванию (рис. 1, контур 5). Почвы, содержащие более 90 % физического песка, переходят в стадию очень сильного опустынивания, образуя массивы движущихся песков [5, 6]. На представленной карте движущиеся пески (сыпучие) образуют 6 контуров площадью 62,8 тыс. га (7,7 % общей территории региона). Отличительным признаком является тенденция расширения площадей, охваченных сферой влияния антропогенных воздействий (пастбищ, дорог, животноводческих объектов и др.). В стадии сильного

опустынивания содержание физического песка уменьшается до 70 %, в результате чего отмечаются признаки гумусообразования и сохранившиеся растительные группировки в виде островков с низким потенциалом. Они занимают 6,1 % территории (51,6 тыс. га), представлены 6 контурами с округлопятнистой формой.

Средняя и слабая степень опустынивания имеет значительное распространение (площадь 162,8 тыс. га, 21,1 %). Здесь распространены светло-каштановые, лугово-каштановые почвы с признаками слабой и средней степени развития процессов засоления и эрозии. Литогенное опустынивание почв слабой и средней степени проявляется в комплексе с начальной стадией галогенного опустынивания. Физическая глина придает почве пластичность, способность к структурообразованию, уменьшению водопроницаемости. Почвы, содержащие физическую глину в пределах 40÷70 %, активно подтягивают влагу по капиллярам из нижних горизонтов в верхние, способствуя формированию водоносного горизонта на глубине 4÷6 м. При залегании минерализованных грунтовых вод капиллярный подъем способствует подтяжке солей в верхнюю метровую толщу с последующим их накоплением.

Параллельно с процессами засоления почв наблюдается иссушение профиля с формированием различных стадий опустынивания. Графики гидротермического режима (рис. 2) показывают максимальную величину температуры на глубине 5 см для всех вариантов: при литогенном опустынивании в летний период она достигает 45÷48 °С, в галогенном – 35÷40 °С. Это связано с высокой гигроскопичностью хлористого кальция легкорастворимых солей, пропитавших всю почвенную массу. Увеличение глубины профиля не меняет общую тенденцию в температурном режиме. Максимальная температура по исследуемым вариантам (включая и фоновый уровень) в слое 0÷20 см составляет 20÷25 °С, причем в весенний и осенний периоды термический показатель выравнивается. Высокая температура характерна для горизонтов со значительным содержанием физического песка (литогенное опустынивание), незначительным количеством засоленных почв (галогенное опустынивание). Установлено, что изменение суммы токсичных солей (табл. 2) происходит в определен-

ной зависимости от содержания физической глины. В лугово-каштановой солончаковой почве (разрез 107) на глубине 0÷10 см сумма токсичных солей – 13,91 мг-экв, содержание физической глины – 50,2 %; на глубине 60÷70 см содержание токсичных солей увеличивается до 17,8 мг-экв, физической глины – до 59,0 %.

Солевой состав почв и соотношение гранулометрических фракций рассматриваются как показатели почвообразования, интерпретация которых дает возможность раскрыть закономерные изменения в физических и химических свойствах почв [7, 8].

Таблица 1

Почвенные факторы, определяющие стадии опустынивания / Soil factors that determine the stage of desertification

| Опустынивание | | Площадь | | Определяющие факторы, % | |
|---------------|-----------------|---------|------|-------------------------|---------------|
| Класс | Стадия | Тыс. га | % | Физический песок | Сухой остаток |
| Литогенный | Фоновый уровень | 510,5 | 45,5 | <50,0 | <0,5 |
| | Слабая | 56,4 | 13,0 | 20–30 | 0,5–0,3 |
| | Средняя | 52,0 | 8,1 | 40–60 | 0,3–0,1 |
| | Сильная | 51,0 | 6,1 | 60–90 | <0,1 |
| | Очень сильная | 62,8 | 7,7 | >90 | Тоже |
| | Всего | 174,1 | 34,1 | – | – |
| Галогенный | Фоновый уровень | – | – | – | – |
| | Слабая | 41,3 | 8,1 | <50,0 | <0,3 |
| | Средняя | 28,1 | 5,5 | 20,0–40,0 | 0,3–0,6 |
| | Сильная | 22,4 | 4,4 | 10,0–20,0 | 0,6–1,0 |
| | Очень сильная | 17,3 | 3,4 | <10,0 | <1,0 |
| | Всего | 131,3 | 21,4 | – | – |

Таблица 2

Содержание солей в гранулометрических фракциях в лугово-каштановой солонцеватой почве / The salt content in different particle-size fractions in a meadow-chestnut alkaline soil

| Разрез | Сухой остаток, % | мг-экв/100 г почвы | | | | Частицы, % | |
|--------|------------------|------------------------------|------|-----------------|-----------------------|----------------------|----------------------|
| | | HCO ₃ | Cl | SO ₄ | Сумма токсичных полей | Физ. глина, <0,01 мм | Физ. песок, >0,01 мм |
| Р.107 | | Эфемерно-попынная | | | | | |
| 0–10 | 0,24 | 0,54 | 1,70 | 2,70 | 13,91 | 50,2 | 49,8 |
| 20–30 | 0,60 | 0,22 | 1,40 | 4,16 | 14,40 | 50,5 | 49,5 |
| 40–60 | 0,39 | 0,10 | 1,85 | 2,54 | 10,94 | 47,1 | 52,9 |
| 60–70 | 0,85 | 0,38 | 2,70 | 9,20 | 17,80 | 59,0 | 41,0 |
| Р.118 | | Попынно-злаковая | | | | | |
| 0–10 | 0,35 | 0,36 | 0,79 | 14,68 | 21,41 | 64,1 | 35,9 |
| 20–30 | 0,41 | 0,74 | 4,20 | 2,37 | 25,57 | 70,5 | 29,5 |
| 40–50 | 0,25 | 0,14 | 2,74 | 1,42 | 13,8 | 44,4 | 45,6 |
| 60–70 | 0,89 | 0,44 | 2,49 | 6,50 | 22,86 | 65,3 | 34,7 |
| | | Попынно-многолетнесолянковая | | | | | |
| 0–10 | 0,15 | 0,68 | 0,60 | 0,02 | 9,3 | 37,5 | 62,5 |
| 20–30 | 0,49 | 0,88 | 2,20 | 0,40 | 18,0 | 68,1 | 31,9 |
| 40–50 | 0,92 | 0,58 | 0,42 | 6,49 | 29,09 | 77,5 | 22,5 |
| 60–70 | 0,98 | 0,73 | 6,33 | 1,69 | 34,31 | 85,3 | 14,7 |

Дополнительные условные обозначения
к легенде почвенной карты РД

Механический состав:

Г - глинистые
Т - тяжелосуглинистые
С - среднесуглинистые

Л - легкосуглинистые
Ч - супесчаные
П - песчаные

Степень засоления

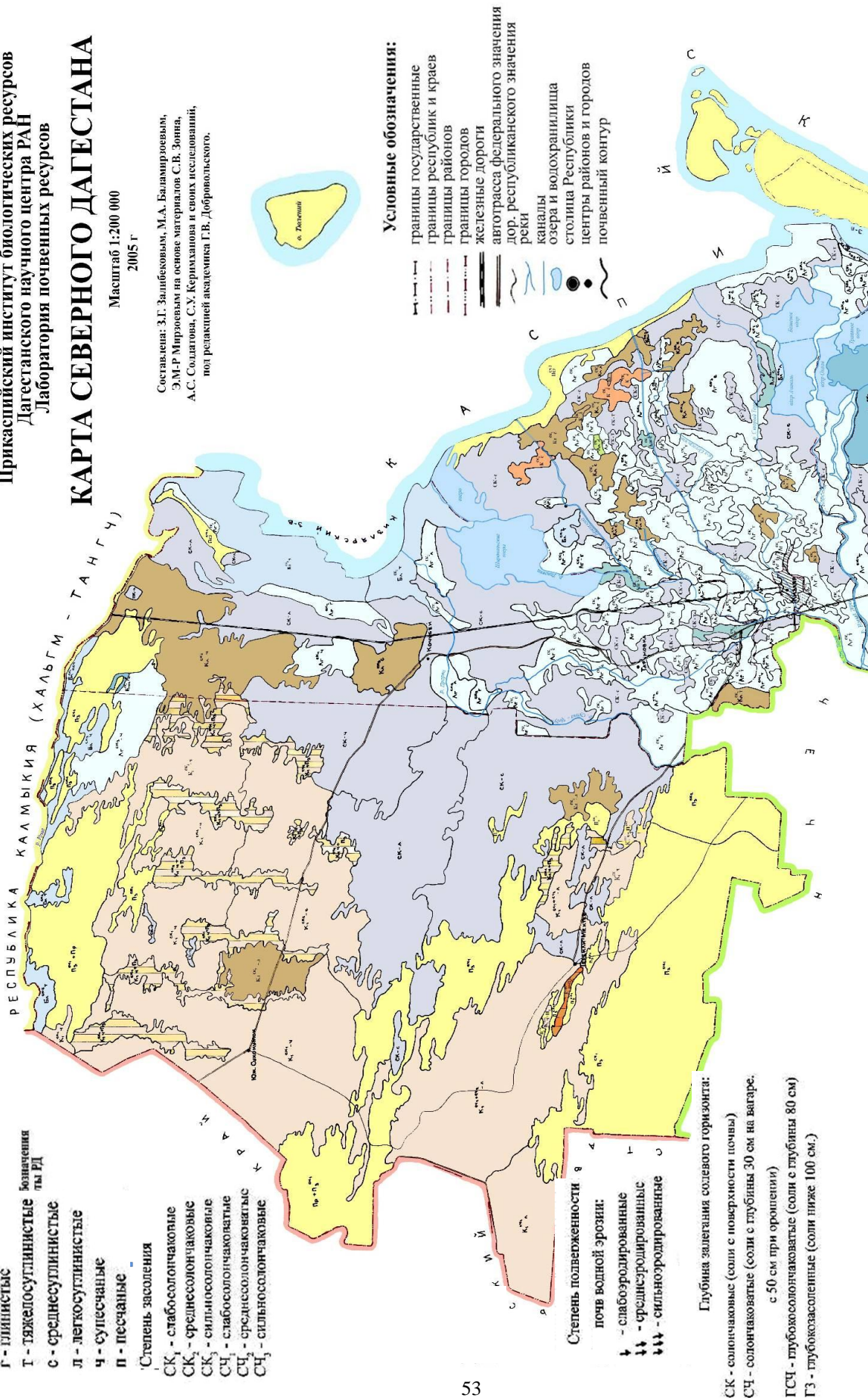
СК₁ - слабосолончаковые
СК₂ - среднесолончаковые
СК₃ - сильносолончаковые
СЧ₁ - слабосолончачковые
СЧ₂ - среднесолончачковые
СЧ₃ - сильносолончачковые

Прикаспийский институт биологических ресурсов
Дагестанского научного центра РАН
Лаборатория почвенных ресурсов

КАРТА СЕВЕРНОГО ДАГЕСТАНА

Масштаб 1:200 000
2005 г

Составлена: З.Г. Залибековым, М.А. Баламировым,
Э.М.Р. Мирзоевым на основе материалов С.В. Зонна,
А.С. Солдагова, С.У. Керимханова и своих исследований,
под редакцией академика Г.В. Дюрова.



Условные обозначения:

- границы государственные
- границы республик и краев
- границы районов
- границы городов
- железные дороги
- автотрасса федерального значения
- дор. республиканского значения
- реки
- каналы
- озера и водохранилища
- столицы Республики
- центры районов и городов
- почвенный контур

Степень подверженности
почв водной эрозии:






























- ↓ - слабоэродированные
- ↓↓ - среднеэродированные
- ↓↓↓ - сильноэродированные

Глубина залегания солевого горизонта:

- СК - солончаквые (соли с поверхности почвы)
- СЧ - солончакватые (соли с глубины 30 см на вагаре, с 50 см при орошении)
- ГСЧ - глибосолончакватые (соли с глубины 80 см)
- ГЗ - глибокзасоленные (соли ниже 100 см.)

Рис. 1. Почвенная карта Терско-Кумской низменности
/ Fig. 1. Soil map of Terek-Kuma lowland

Легенда к почвенной карте

| Окраска и индексы почв | Наименование почв | Механический состав почв | Почвообразующие породы | Площадь тыс. га | Баллы бонитета почв | |
|---|---|---|---|---|---------------------|-----|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | |
|  | <u>Почвы низменности:</u> Темно-каштановые | тяжело - и среднесуглинистые | делювиальные суглинки | 6,68 | 100 | |
|  | Каштановые | глинистые, тяжело- и среднесуглинистые | | 37,95 | 73 | |
|  | Светло-каштановые | глинистые, тяжело-, средне-легко суглинистые и супесчаные | делювиальные, аллювиально-делювиальные суглинки и морские отложения | 108,2 | 61 | |
|  | Светло-каштановые солонцевато-солончаковые | | | 386,8 | 35 | |
|  | Лугово-каштановые | тяжело - среднесуглинистые | аллювиальные и морские отложения | 186,1 | 78 | |
|  | Лугово-каштановые солонцевато-солончаковые | глинистые, тяжело - и среднесуглинистые | | 215,5 | 30 | |
|  | Лугово-каштановые солончаковые в комплексе с солончаками | тяжело - и среднесуглинистые | аллювиальные суглинки подстилаемые супесями и галечником | 80,1 | 25 | |
|  | Лугово-лесные | | | 36,3 | 85 | |
|  | Аллювиально-луговые | среднесуглинистые и тяжело-суглинистые | аллювиальные суглинки, глины и супески | 160,6 | 78 | |
|  | Луговые | глинистые и тяжелосуглинистые | | 73,2 | 68 | |
|  | Луговые солончаковые в комплексе с солончаками | песчаный | пески эоловые и морские | 244,67 | 23 | |
|  | Лугово-болотные солончаковые | | | 56,2 | 23 | |
|  | Лугово-болотные осушенные | песчаный | пески эоловые и морские | 20,0 | 46 | |
|  | Солончаки | | | 482,1 | 20 | |
|  | Пески развеваемые | песчаный | пески эоловые и морские | 126,9 | 10 | |
|  | Пески развеваемые в сочетании с песками закрепленными | | | 227,7 | 15 | |
|  | <u>Почвы гор и высокогорий:</u> Горно -каштановые | тяжело - и среднесуглинистые | эллювиально-делювиальные отложения | 36,5 | 61 | |
|  | Горные бурые лесные | | | делювиальные отложения | 252,6 | 79 |
|  | Горно-луговые черноземовидные | | | эллювиально-делювиальные отложения на извест. | 158,7 | 100 |
|  | Горные лугово-степные | | | делювиальные отложения | 125,2 | 70 |
|  | Горные лугово-лесные скрытоподзоленные | | | эллювиально-делювиальные отложения | 17,8 | 81 |
|  | Горно-луговые | тяжело - и среднесуглинистые | делювиальные отложения | 871,16 | 75 | |
|  | Горно-луговые дерновые | среднесуглинистые | эллювиально-делювиальные отложения | 311,70 | 76 | |
|  | Горно-луговые примитивные (слабо-развитые) | | | делювиальные отложения | 145,46 | 15 |
|  | Горно-долинные: лугово-каштановые и луговые речных террас | тяжело - и среднесуглинистые | аллювиально-делювиальные отложения | 69,24 | 68 | |
|  | Не почвенные образования: | | | 13,84 | | |
|  | Обнажение коренных пород | | | 20,9 | | |
|  | Каменистые русла рек | | | 7,8 | | |
|  | Ледники | | | | | |

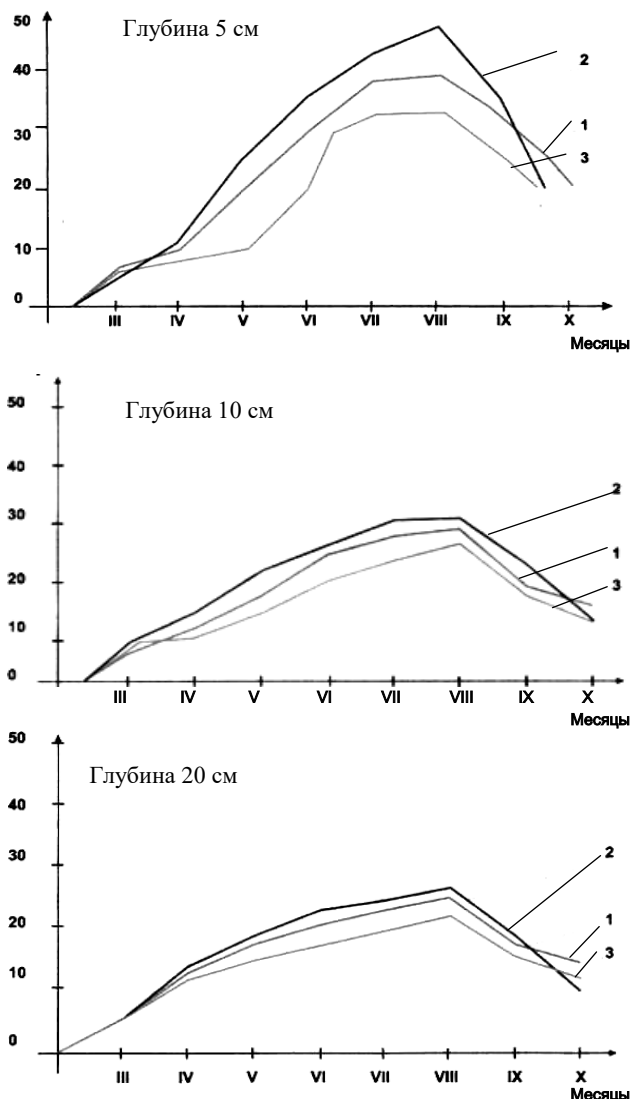


Рис. 2. Температурный режим почв на разных глубинах при стадии сильного опустынивания, 2010 г. 1 – фоновый уровень; 2 – литогенный; 3 – галогенный / Fig. 2. Soil temperature at different depths in a phase of strong desertification, 2010. 1 - the background level; 2 - lithogenic; 3 - halogen

Небольшие отклонения в отдельных горизонтах от выявленной закономерности связаны с различиями в соотношении гранулометрических фракций, входящих в группы пылеватых и песчаных частиц [9].

Установлено, что в лугово-каштановых почвах слабоминерализованные и пресные грунтовые воды (глубина > 1,5 м) увеличивают запасы продуктивной влаги. Оценка условий формирования ресурсов кормовых растений рассматриваемых почв позволяет отметить увеличение надземной массы растений с формированием сообществ, отличающихся высокой биологической продуктивностью [10]. Сравнительная оценка типов опустынивания и рядов почвообразования дает возможность выделить приморский ряд в качестве стадии, тяготеющей к засолению и галогенному опустыниванию. При сильной степени

засоления на луговых среднесуглинистых почвах поселяется в основном лугово-солянковая растительность, где устанавливается стабильный уровень грунтовых вод (0,5÷1,5) с высокой минерализацией хлоридно-сульфатного типа засоления (18,0–22,5 ц/га). Накопление фитомассы за счет увеличения роли галофитов с высоким разнообразием растений иллюстрирует адаптивную их способность к условиям галогенного опустынивания.

Выводы

1. Многообразие форм изменений, происходящих под влиянием деградационных процессов и различий, обуславливающих таксономическую последовательность, объединено в рамках высшей классификационной единицы – класса опустынивания. Выделены классы литогенного, галогенного и фонового уровня, характеризующие современное состояние аридных экосистем.

2. Основными критериями литогенного опустынивания являются различия в содержании фракций физического песка в поверхностных горизонтах почвы (> 70 %). Дальнейшее увеличение песчаных фракций приводит к развитию ветровой эрозии и появлению ареалов движущихся песков. Одностороннее увеличение физического песка усиливает деградационные процессы с формированием локальных очагов деградации (опустынивания).

3. Установлена временная устойчивость климатического фактора в проявлении ускоренной деградации под влиянием антропогенного фактора. При переходе наземных экосистем от фонового состояния к стадиям аридной деградации в качестве определяющих критериев выступают увеличение нагрузок на единицу площади и разрыв естественной биологической цепи круговорота веществ в системе почва – живые организмы.

4. Галогенное опустынивание распространено на значительных площадях и формируется в условиях близкого залегания минерализованных грунтовых вод. Важным фактором, способствующим накоплению солей, является также высокое содержание физической глины и однородный по гранулометрическому составу почвенный профиль. Почвы, содержащие физическую глину менее 50 %, активно подтягивает влагу по капиллярам с последующей подтяжкой и накоплением солей. В содержании физической глины и легкорастворимых солей существует прямая зависимость, отражающая параллельное их увеличение в диапазоне абсолютных величин 50÷80 %.

5. Оценка деградационных процессов по классам опустынивания дает возможность определить по стадиям температурный режим корнеобитаемого слоя почв, сумму токсичных солей и количественное содержание фракций по горизонтам почвенного профиля.

Литература

1. Бабаев А.Г., Байрамов С.Б. Актуальные проблемы сохранения и рационального использования экосистем средней зоны // Проблемы освоения пустынь. 1985. № 4. С. 14–20.

2. Бананова В.А. Карта антропогенного опустынивания Калмыцкой АССР и ее природоохранное значение // Комплексный мониторинг и прогнозы состояния природной среды : сб. Всерос. симп. М. : АН СССР, 1991. С. 187–190.

3. Залибеков З.Г., Гамзатова Х.М. Основные направления исследований по проблеме формирования разнообразия почв в условиях аридного климатического режима // Тр. Ин-та геологии ДНЦ РАН. 2014. № 63. С. 80–85.

4. Залибеков З.Г., Гаджиева А.М. Вопросы классификации и картографии процессов опустынивания земель Терско-Кумской низменности // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2010. № 5. С. 98–102.

5. Гунин П.Д., Панкова Е.И. История формирования и основные понятия концепции опустынивания в отечественной науке // Природные и антропогенные изменения аридных экосистем и борьба с опустыниванием. Махачкала; Волгоград, 2016. С. 15–20.

6. Кулик К.Н., Петров В.И. История и современность «Генеральной схемы по борьбе с опустыниванием Черных земель и Кизлярских пастбищ» // Тр. Ин-та геологии ДНЦ РАН. 2016. № 67. С. 94–97.

7. Ковда В.А. Проблемы борьбы с опустыниванием и засолением орошаемых земель. М. : Колос, 1984. 384 с.

8. Глянц М.Х., Кац Р.У. Африканская засуха и ее последствия: возродившийся интерес к повторяющемуся явлению // Проблемы опустынивания. М. : ЦМП Госкомприроды СССР, 1989. Вып. 7. С. 48–72.

9. Паизулаева Р.М., Залибекова М.З., Асгерова Д.Б. О функциональной структуре электронной базы данных по почвенным ресурсам аридных территорий // Почвенные и растительные ресурсы в южных регионах России, их оценка и управление с применением информационных технологий : материалы Всерос. науч. конф. Махачкала, 2007. С. 27–32.

10. Петров В.И. Процессы опустынивания и концепция борьбы с ними на сельскохозяйственных землях аридной зоны России // Антропогенная деградация ландшафтов и экологическая безопасность. Волгоград, 2005. С. 115–134.

References

1. Babaev A.G., Bairamov S.B. Aktual'nye problemy sokhraneniya i ratsional'nogo ispol'zovaniya ekosistem srednei zony [Actual problems of conservation and rational use of medium-zone ecosystems]. *Problemy osvoeniya pustyn'*. 1985, No. 4, pp. 14-20.

2. Bananova V.A. [Map of anthropogenic desertification of the Kalmyk ASSR and its conservation value]. *Kompleksnyi monitoring i prognozy sostoyaniya prirodnoi sredy* [Complex monitoring and forecasts of the state of the natural environment]. Collection of the All-Russian Symposium. Moscow, AN SSSR, 1991, pp. 187-190.

3. Zalibekov Z.G., Gamzatova Kh.M. Osnovnye napravleniya issledovaniya po probleme formirovaniya raznoobraziya pochv v usloviyakh aridnogo klimaticheskogo rezhima [The main directions of research on the problem of formation of soil diversity in arid climatic conditions]. *Tr. In-ta geologii DNTs RAN*. 2014, No. 63, pp. 80-85.

4. Zalibekov Z.G., Gadzhieva A.M. Voprosy klassifikatsii i kartografii protsessov opustynivaniya zemel' Tersko-Kumskoi nizmennosti [Issues of Classification and Mapping of the Desertification Processes of the Terek-Kuma Lowlands]. *Izv. vuzov. Sev.-Kavk. region. Estestv. nauki*. 2010, No. 5, pp. 98-102.

5. Gunin P.D., Pankova E.I. [History of formation and basic concepts of the concept of desertification in the domestic science]. *Prirodnye i antropogennye izmeneniya aridnykh ekosistem i bor'ba s opustynivaniem* [Natural and anthropogenic changes in arid ecosystems and struggle against desertification]. Makhachkala, Volgograd, 2016, pp. 15-20.

6. Kulik K.N., Petrov V.I. Istoriya i sovremennost' «General'noi skhemy po bor'be s opustynivaniem Chernykh zemel' i Kizlyarskikh pastbishch» [The history and the present of the “General Scheme to Combat Desertification of the Black Lands and Kizlyar Pastures”]. *Tr. In-ta geologii DNTs RAN*. 2016, No. 67, pp. 94-97.

7. Kovda V.A. *Problemy bor'by s opustynivaniem i zasoleniem oroshaemykh zemel'* [Problems of combating desertification and salinization of irrigated lands]. Moscow, Kolos, 1984, 384 p.

8. Glyants M.Kh., Kats R.U. [African drought and its consequences: renewed interest in a recurring phenomenon]. *Problemy opustynivaniya* [Problems of desertification]. Moscow, TsMP Goskomprirody SSSR, 1989, iss. 7, pp. 48-72.

9. Paizulaeva R.M., Zalibekova M.Z., Asgerova D.B. [On the functional structure of the electronic database on soil resources of arid territories]. *Pochvennye i rastitel'nye resursy v yuzhnykh regionakh Rossii, ikh otsenka i upravlenie s primeneniem informatsionnykh tekhnologii* [Soil and plant resources in the southern regions of Russia, their assessment and management using information technology]. Materials of the All-Russian Scientific Conference. Makhachkala, 2007, pp. 27-32.

10. Petrov V.I. [Desertification processes and the concept of their control on agricultural lands of the arid zone of Russia]. *Antropogennaya degradatsiya landshaftov i ekologicheskaya bezopasnost'* [Anthropogenic degradation of landscapes and ecological safety]. Volgograd, 2005, pp. 115-134.

БИОДИАГНОСТИКА УСТОЙЧИВОСТИ РИСОВЫХ ПОЧВ КУБАНИ К ХИМИЧЕСКОМУ ЗАГРЯЗНЕНИЮ*

© 2017 г. С.И. Колесников¹, А.Н. Дульцев¹, Н.А. Вернигорова¹,
К.Ш. Казеев¹, Ю.В. Акименко¹, Т.А. Тер-Мисакянц¹
¹Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, Россия

BIODIAGNOSTICS OF STABILITY OF KUBAN'S RICE SOILS TO CHEMICAL POLLUTION

S.I. Kolesnikov¹, A.N. Dultsev¹, N.A. Vernigorova¹,
K.Sh. Kazeev¹, Yu.V. Akimenko¹, T.A. Ter-Misakyants¹
¹Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia

Колесников Сергей Ильич – доктор сельскохозяйственных наук, профессор, заведующий кафедрой экологии и природопользования, Академия биологии и биотехнологии им. Д.И. Ивановского, Южный федеральный университет, пр. Стачки, 194/1, г. Ростов-на-Дону, 344090, Россия, e-mail: kolesnikov@sfedu.ru

Sergei I. Kolesnikov – Doctor of Agricultural Sciences, Professor, Head of Ecology and Natural Management Department, Ivanovsky Academy of Biology and Biotechnology, Southern Federal University, Stachki Ave., 194/1, Rostov-on-Don, 344090, Russia, e-mail: kolesnikov@sfedu.ru

Дульцев Алексей Николаевич – магистр, кафедра экологии и природопользования, Академия биологии и биотехнологии им. Д.И. Ивановского, Южный федеральный университет, пр. Стачки, 194/1, г. Ростов-на-Дону, 344090, Россия

Alexey N. Dultsev – Master, Department of Ecology and Natural Management, Ivanovsky Academy of Biology and Biotechnology, Southern Federal University, Stachki Ave., 194/1, Rostov-on-Don, 344090, Russia

Вернигорова Наталья Александровна – магистр, кафедра экологии и природопользования, Академия биологии и биотехнологии им. Д.И. Ивановского, Южный федеральный университет, пр. Стачки, 194/1, г. Ростов-на-Дону, 344090, Россия

Natalya A. Vernigorova – Master, Department of Ecology and Natural Management, Ivanovsky Academy of Biology and Biotechnology, Southern Federal University, Stachki Ave., 194/1, Rostov-on-Don, 344090, Russia

Казеев Камил Шагидуллоевич – доктор географических наук, профессор, кафедра экологии и природопользования, Академия биологии и биотехнологии им. Д.И. Ивановского, Южный федеральный университет, пр. Стачки, 194/1, г. Ростов-на-Дону, 344090, Россия, e-mail: Kamil_kazeev@mail.ru

Kamil Sh. Kazeev – Doctor of Geography, Professor, Department of Ecology and Natural Management, Ivanovsky Academy of Biology and Biotechnology, Southern Federal University, Stachki Ave., 194/1, Rostov-on-Don, 344090, Russia, e-mail: Kamil_kazeev@mail.ru

Акименко Юлия Викторовна – кандидат биологических наук, ассистент, кафедра экологии и природопользования, Академия биологии и биотехнологии им. Д.И. Ивановского, Южный федеральный университет, пр. Стачки, 194/1, г. Ростов-на-Дону, 344090, Россия, e-mail: akimenkojuliya@mail.ru

Yuliya V. Akimenko – Candidate of Biology, Assistant, Department of Ecology and Natural Management, Ivanovsky Academy of Biology and Biotechnology, Southern Federal University, Stachki Ave., 194/1, Rostov-on-Don, 344090, Russia, e-mail: akimenkojuliya@mail.ru

Тер-Мисакянц Тигран Александрович – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, кафедра экологии и природопользования, Академия биологии и биотехнологии им. Д.И. Ивановского, Южный федеральный университет, пр. Стачки, 194/1, г. Ростов-на-Дону, 344090, Россия

Tigran A. Ter-Misakyants – Candidate of Biology, Senior Researcher, Department of Ecology and Natural Management, Ivanovsky Academy of Biology and Biotechnology, Southern Federal University, Stachki Ave., 194/1, Rostov-on-Don, 344090, Russia

* Исследование выполнено при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (5.5735.2017/8.9) и Президента Российской Федерации (НШ-9072.2016.1, МК-326.2017.11).9).

В результате проведенных модельных исследований установлено, что рисовые почвы Кубани, сформированные на чернозёмах обыкновенных, менее устойчивы к загрязнению тяжелыми металлами (хромом, никелем, медью, свинцом) и нефтью, чем аналогичные чернозёмы, не используемые для рисоводства, а также дерново-карбонатные и коричневые почвы, но более устойчивы, чем бурые лесные и солончаки Юга России. Загрязнение рисовых почв Кубани нефтью и тяжелыми металлами приводит к снижению биологических показателей: общей численности бактерий, активности каталазы и дегидрогеназы, целлюлозолитической активности, обилия бактерий рода *Azotobacter*, длины корней редиса, интегрального показателя биологического состояния (ИПБС). По степени экотоксичности для рисовых почв Кубани тяжелые металлы образуют следующий ряд: $Cr > Cu > Pb \geq Ni$. Предложены региональные нормативы предельно допустимого содержания хрома, меди, свинца, никеля и нефти в рисовых почвах Кубани, сформированных на чернозёмах обыкновенных, определенные по нарушению экологических функций почв.

Ключевые слова: рисовые почвы, устойчивость, загрязнение, тяжелые металлы, нефть, биодиагностика, региональные нормативы.

As a result of the conducted model researches it has been established that the rice soils of Kuban created on chernozems ordinary are less steady against pollution by heavy metals (chrome, nickel, copper, lead) and oil, than the similar chernozems which aren't used for rice growing and also calcareous soil and brown soils, but are steadier, than brown forest soils and saline soils of the South of Russia. Pollution of rice soils of Kuban oil and heavy metals leads to decrease in biological indicators: total number of bacteria, activity of a catalase and degidrogenase, cellulolytic activity, abundance of *Azotobacter*, length of roots of a garden radish, IPBS. On ecotoxicity degree for rice soils of Kuban heavy metals form the following row: $Cr > Cu > Pb \geq Ni$. The regional standards of maximum permissible content of chrome, copper, lead, nickel and oil in the rice soils of Kuban created on chernozems ordinary determined by violation of ecological functions of soils are offered.

Keywords: rice soils, stability, pollution, heavy metals, oil, biodiagnosics, regional standards.

Введение

Почвы, используемые для возделывания риса, подвержены значительной антропогенной трансформации. В результате они теряют многие генетические свойства исходных почв и приобретают новые, свойственные только этим почвам. Такие почвы называют рисовыми [1]. Рисовые почвы широко распространены на Юге России и имеют огромное хозяйственное значение для всей страны. При этом их устойчивость к химическому загрязнению не была изучена.

Цель исследования – оценить по биологическим показателям устойчивость рисовых почв Кубани к загрязнению нефтью и тяжелыми металлами (хромом, никелем, медью, свинцом).

Объекты и методы исследования

Было проведено лабораторное моделирование химического загрязнения почвы, которая была отобрана на рисовых чеках в дельте реки Кубань (Россия, Краснодарский край, Славянский район, ст. Анастасиевская).

Для почвы характерны среднее содержание гумуса в верхнем горизонте – 2,5 %; нейтральная реакция среды – $pH = 7,5$; тяжелосуглинистый гранулометрический состав, плохая оструктуренность; средний уровень биологической активности: общая численность бактерий – 2,7 млрд/г почвы, активность каталазы – 8,7 мл O_2 /г почвы за 1 мин; активность дегидрогеназы – 12,1 мг ТФФ/10 г почвы за

24 ч; обилие бактерий рода *Azotobacter* – 43 % комочков обрастания.

Для модельных исследований использовали верхний слой почвы 0–10 см, так как в нем задерживается большая часть загрязняющих почву веществ [2].

Исследовали устойчивость почвы к хрому, свинцу, меди и никелю, поскольку именно этими тяжелыми металлами (ТМ) в значительной степени загрязнены почвы на Юге России [3]. Кроме того, эти ТМ интересны для сравнения – их предельно допустимые концентрации (ПДК) составляют 100 мг/кг почвы. Использовали значения ПДК, разработанные в Германии [4], потому что значения ПДК в почве общего (валового) содержания меди и никеля в России отсутствуют, кроме того, российская ПДК свинца зачастую не может быть использована, так как она меньше содержания этого элемента во многих почвах.

Поскольку ПДК нефти в почве также не разработана, её содержание в почве выражали в процентах.

ТМ вносили в почву в количестве 1, 10, 100 ПДК (100, 1000 и 10000 мг/кг соответственно); нефть – 1, 5, 10 % от массы почвы.

Источниками поступления ТМ в рисовые почвы являются пестициды, минеральные удобрения, протравители семян, продукты сгорания топлива, источниками нефти – аварии на нефтепроводах [2].

Исследовали оксиды ТМ: CrO_3 , CuO , NiO , PbO . Во-первых, значительная доля ТМ поступает в

почву именно в форме оксидов [2]. Во-вторых, использование оксидов ТМ позволяет исключить воздействие на свойства почвы сопутствующих анионов, как это происходит при внесении солей металлов [5].

Почву инкубировали в вегетационных сосудах при комнатной температуре (20±22 °С) и оптимальном увлажнении (60 % от полевой влагоемкости) в трехкратной повторности.

Биологические свойства почвы определяли через 30 сут после загрязнения. При оценке химического воздействия на биологическое состояние почвы этот срок является наиболее информативным [6]. Использовали общепринятые в биологии почв методы [7]. Определяли общую численность бактерий, обилие бактерий рода *Azotobacter*, активность каталазы и дегидрогеназы, целлюлозолитическую активность, фитотоксические свойства почв, интегральный показатель биологического состояния (ИПБС) почвы.

Результаты исследования

Результаты исследований представлены на рисунке.

В ходе проведенного исследования было установлено, что загрязнение рисовых почв Кубани нефтью и ТМ (хромом, никелем, медью, свинцом) приводит к снижению значений всех исследованных биологических показателей: общей численности бактерий, активности каталазы и дегидрогеназы, целлюлозолитической активности, обилия бактерий рода *Azotobacter*, длины корней редиса, ИПБС.

Поскольку ТМ вносили в почву в одинаковом количестве (100 мг/кг), возможно корректное сравнение их токсического действия. Ряд экотоксично-

сти ТМ для рисовых почв Кубани выглядит следующим образом: Cr > Cu > Pb ≥ Ni. Хром проявляет наибольшую токсичность, а медь, свинец и никель оказывают менее сильное, схожее по силе воздействие. Аналогичная закономерность была получена ранее для зональных аналогов рисовых почв Кубани – чернозёмов обыкновенных [8, 9].

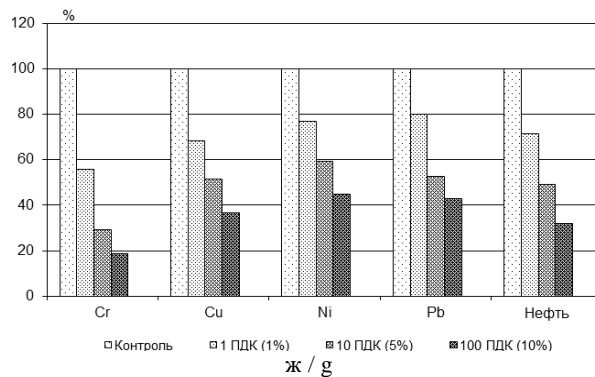
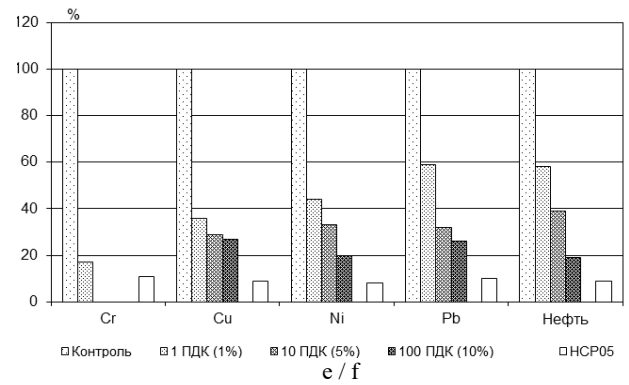
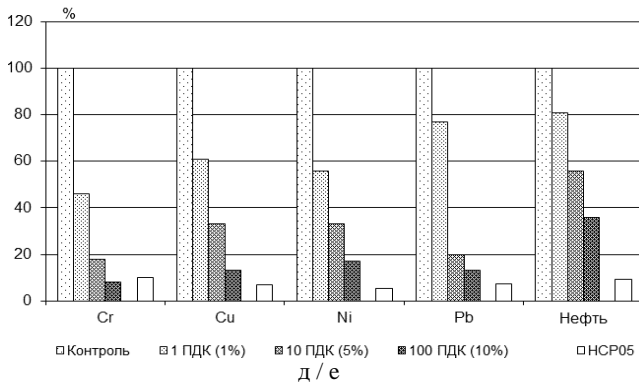
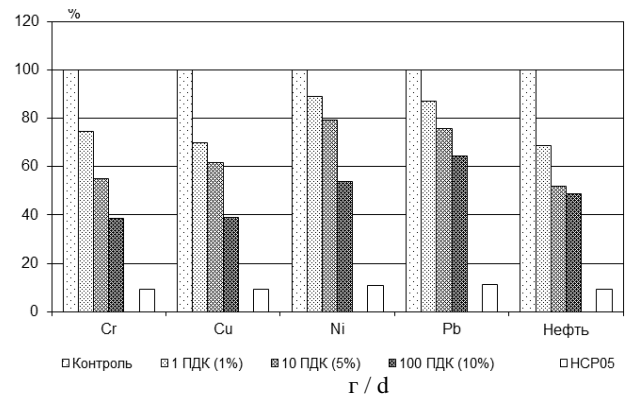
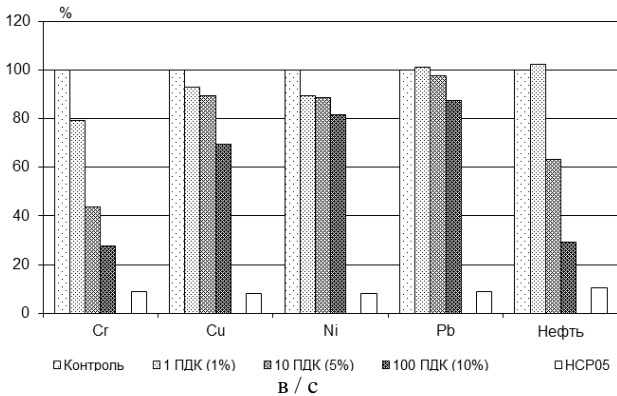
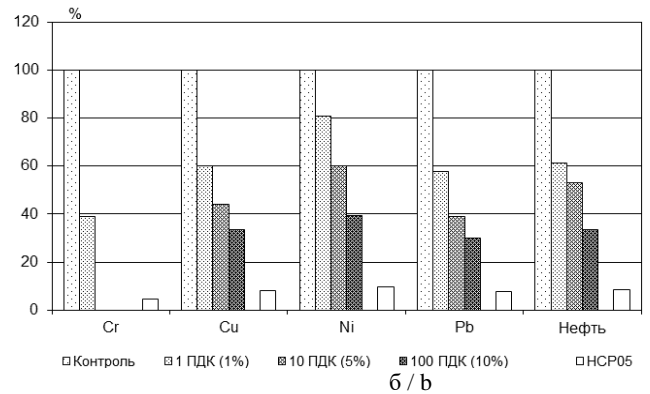
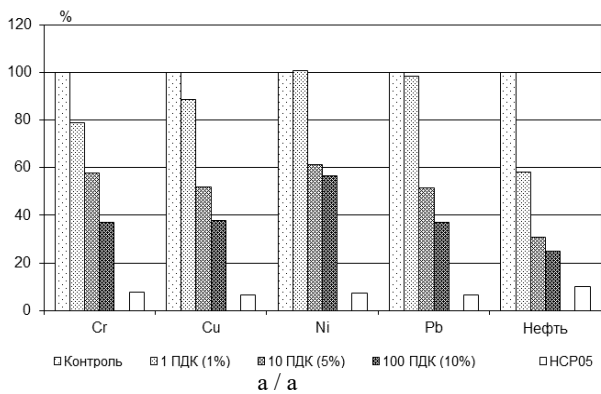
Ранее была исследована устойчивость к загрязнению других почв Азово-Черноморского бассейна. Сравнительная оценка показала, что в результате химического загрязнения биологические показатели почв рисовых чеков снижаются сильнее, чем в чернозёмах [8, 9], дерново-карбонатных [10, 11] и коричневых [12] почвах, но в меньшей степени, чем в бурых лесных почвах [13, 14] и солончаках [15].

Это связано с тем, что исследованные рисовые почвы сформированы на чернозёмах обыкновенных и наследуют от них тяжелый гранулометрический состав, нейтральную реакцию среды, высокое содержание органического вещества. Все эти свойства определяют высокую поглотительную способность рисовых почв, закрепляющую ТМ в почве и препятствующую проявлению их токсичности для живых организмов. Низкая устойчивость к нефтяному загрязнению определяется слабой оструктуренностью рисовых почв и, соответственно, существенным нарушением водно-воздушного и окислительно-восстановительного режимов почвы при загрязнении.

Ранее С.И. Колесниковым с соавт. [16] была предложена методика определения региональных нормативов содержания загрязняющих веществ в почвах. По результатам проведенных исследований предложена региональная схема экологического нормирования загрязнения рисовых почв Кубани (таблица).

Схема экологического нормирования загрязнения ТМ и нефтью рисовых почв Кубани, сформированных на чернозёмах обыкновенных, по степени нарушения экофункций / The scheme of environmental regulation of pollution with heavy metals and oil rice soils of the Kuban, formed on the ordinary black earth, formed according to the degree of violation of the ecological functions

| Почва | Степень снижения ИПБС, % [16] | Нарушаемые экологические функции [17] | Содержание ТМ в почве, мг/кг | | | | Содержание нефти в почве, % |
|--------------------|-------------------------------|---|------------------------------|--------|---------|---------|-----------------------------|
| | | | Cr | Cu | Ni | Pb | |
| Незагрязненная | < 5 | – | < 110 | < 45 | < 50 | < 50 | < 0,20 |
| Слабозагрязненная | 5 ÷ 10 | Информационные | 110÷130 | 45÷70 | 50÷100 | 50÷100 | 0,20–0,50 |
| Среднезагрязненная | 10 ÷ 25 | Химические, физико-химические, биохимические; целостные | 130÷145 | 70÷200 | 100÷220 | 100÷220 | 0,50–1,5 |
| Сильнозагрязненная | > 25 | Физические | > 145 | > 200 | > 220 | > 220 | > 1,50 |



Влияние химического загрязнения рисовой почвы (чернозёма обыкновенного) на биологические показатели: а – численность бактерий; б – обилие бактерий рода *Azotobacter*; в – активность каталазы; г – активность дегидрогеназы; д – целлюлозолитическую активность; е – длину корней редиса; ж – ИПБС, % от контроля (ПДК – для ТМ, % – для нефти) / Influence of chemical contamination of paddy soil (ordinary chernozem) on biological indicators: а – number of bacteria; б – the abundance of bacteria of the genus *Azotobacter*; в – activity of catalase; г – activity of dehydrogenase; д – cellulolytic activity; е – length of roots of radish; ж – integrated indicator of the biological status, % of control (maximum permissible concentration for heavy metals, % in oil)

Выводы

1. Загрязнение рисовых почв Кубани нефтью и ТМ (хромом, никелем, медью, свинцом) приводит к снижению биологических показателей: общей численности бактерий, активности каталазы и дегидрогеназы, целлюлозолитической активности, обилия бактерий рода *Azotobacter*, длины корней редиеса, ИПБС.

2. По степени экотоксичности для рисовых почв Кубани ТМ образуют следующий ряд: $Cr > Cu > Pb \geq Ni$.

3. Рисовые почвы Кубани, сформированные на чернозёмах обыкновенных, менее устойчивы к загрязнению ТМ и нефтью, чем аналогичные чернозёмы, не используемые для рисоводства, а также дерново-карбонатные и коричневые почвы, но более устойчивы, чем бурые лесные почвы и солончаки.

4. Предложены региональные нормативы предельно допустимого содержания хрома, меди, свинца, никеля и нефти в рисовых почвах Кубани, сформированных на чернозёмах обыкновенных, определенные по нарушению экологических функций почв.

Литература

1. Вальков В.Ф., Колесников С.И., Казеев К.Ш. Почвы юга России: классификация и диагностика. Ростов н/Д. : Изд-во СКНЦ ВШ, 2002. 168 с.

2. Kabata-Pendias A. Trace Elements in Soils and Plants. 4th Edition. Boca Raton, FL: Crc Press, 2010. 548 p.

3. Шеуджен А.Х. Биогеохимия. Майкоп : Адыгея, 2003. 1028 с.

4. Орлов Д.С., Малинина М.С., Мотузова Г.В., Садовникова Л.К., Соколова Т.А. Химическое загрязнение почв и их охрана. М. : Агропромиздат, 1991. 303 с.

5. Вальков В.Ф., Колесников С.И., Казеев К.Ш., Тащев С.С. Влияние загрязнения тяжелыми металлами на микроскопические грибы и *Azotobacter* чернозёма обыкновенного // Экология. 1997. № 5. С. 388–390.

6. Колесников С.И., Евреинова А.В., Казеев К.Ш., Вальков В.Ф. Изменение эколого-биологических свойств чернозёма при загрязнении тяжелыми металлами второго класса опасности (Mo, Co, Cr, Ni) // Почвоведение. 2009. № 8. С. 1007–1013.

7. Казеев К.Ш., Колесников С.И., Акименко Ю.В., Даденко Е.В. Методы биодиагностики наземных экосистем. Ростов н/Д. : Изд-во ЮФУ, 2016. 356 с.

8. Колесников С.И., Ярославцев М.В., Спивакова Н.А., Казеев К.Ш. Сравнительная оценка устойчивости биологических свойств разных подтипов черно-

зёмов Юга России к загрязнению Cr, Cu, Ni, Pb (в модельном эксперименте) // Почвоведение. 2013. № 2. С. 195–200.

9. Ярославцев М.В., Колесников С.И. Оценка устойчивости чернозёмов Юга России к загрязнению тяжелыми металлами по биологическим показателям // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2011. № 4. С. 83–86.

10. Кузина А.А., Колесников С.И., Казеев К.Ш. Биодиагностика устойчивости почв Черноморского побережья Краснодарского края к загрязнению нефтью и тяжелыми металлами. Ростов н/Д. : Изд-во ЮФУ, 2015. 125 с.

11. Колесников С.И., Кузина А.А., Казеев К.Ш., Акименко Ю.В., Козунь Ю.С., Мясникова М.А., Лубенцова Д.В. Оценка устойчивости дерново-карбонатных типичных почв Черноморского побережья Кавказа к химическому загрязнению // Рос. сельскохоз. наука (Докл. Рос. академии сельскохоз. наук). 2016. № 5. С. 37–40.

12. Моспаненко А.Ф., Колесников С.И., Казеев К.Ш., Вернигорова Н.А., Акименко Ю.В., Козунь Ю.С., Мясникова М.А., Налета Е.В., Янкина К.О. Оценка устойчивости к химическому загрязнению коричневой типичной почвы заповедника «Утриш» // Политематический сетевой электр. науч. журн. Кубан. гос. аграр. ун-та (Научный журн. КубГАУ). 2014. № 10 (104).

13. Колесников С.И., Кузина А.А., Евстегнеева Н.А., Казеев К.Ш. Оценка устойчивости бурых лесных оподзоленных почв Черноморского побережья Кавказа к химическому загрязнению // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2016. № 1 (189). С. 66–70.

14. Kolesnikov S.I., Kuzina A.A., Kazeev K.Sh., Evstegneeva N.A., Akimenko Yu.V. Assessment of resistance of brown forest sour soils of the Black Sea Coast of the Caucasus to the chemical pollution // Ecology, Environment and Conservation. 2016. Vol. 22 (3). P. 519–523.

15. Kolesnikov S.I., Vernigorova N.A., Kazeev K.Sh., Tishchenko S.A., Dadenko E.V., Akimenko Yu.V. Biodiagnostics of the Azov Sea Solonchaks Condition at Chemical Contamination // Oriental J. of Chemistry. 2016. Vol. 32, № (6). P. 3015–3019.

16. Колесников С.И., Казеев К.Ш., Денисова Т.В., Даденко Е.В., Тищенко С.А. Способ комплексной оценки экологического состояния почв / Патент № 2501009 от 10.12.2013.

17. Добровольский Г.В., Никитин Е.Д. Функции почв в биосфере и экосистемах (экологическое значение почв). М. : Наука, 1990. 261 с.

References

1. Val'kov V.F., Kolesnikov S.I., Kazeev K.Sh. *Pochvy yuga Rossii: klassifikatsiya i diagnostika* [Soils of

the south of Russia: classification and diagnostics]. Rostov-on-Don, Izd-vo SKNTs VSh, 2002, 168 p.

2. Kabata-Pendias A. *Trace Elements in Soils and Plants*. 4th Edition. Boca Raton, FL, Crc Press, 2010, 548 p.

3. Sheudzhen A.Kh. *Biogeokhimiya* [Biogeochemistry]. Maykop, Adygeya, 2003, 1028 p.

4. Orlov D.S., Malinina M.S., Motuzova G.V., Sadovnikova L.K., Sokolova T.A. *Khimicheskoe zagryaznenie pochv i ikh okhrana* [Chemical contamination of soils and their protection]. Moscow, Agropromizdat, 1991, 303 p.

5. Val'kov V.F., Kolesnikov S.I., Kazeev K.Sh., Tashchiev S.S. Vliyaniye zagryazneniya tyazhelymi metallami na mikroskopicheskie griby i Azotobacter chernozema obyknovennogo [Influence of contamination by heavy metals on microscopic fungi and Azotobacter of chernozem of the common]. *Ekologiya*. 1997, No. 5, pp. 388-390.

6. Kolesnikov S.I., Evreinova A.V., Kazeev K.Sh., Val'kov V.F. Izmeneniye ekologo-biologicheskikh svoystv chernozema pri zagryaznenii tyazhelymi metallami drugogo klassa opasnosti (Mo, Co, Cr, Ni) [Changes in the ecological and biological properties of chernozem when contaminated with heavy metals of the second hazard class (Mo, Co, Cr, Ni)]. *Pochvovedenie*. 2009, No. 8, pp. 1007-1013.

7. Kazeev K.Sh., Kolesnikov S.I., Akimenko Yu.V., Dadenko E.V. *Metody biodiagnostiki nazemnykh ekosistem* [Methods of bio-diagnostics of terrestrial ecosystems]. Rostov-on-Don, Izd-vo YuFU, 2016, 356 p.

8. Kolesnikov S.I., Yaroslavtsev M.V., Spivakova N.A., Kazeev K.Sh. Sravnitel'naya otsenka ustoichivosti biologicheskikh svoystv raznykh podtipov chernozemov Yuga Rossii k zagryazneniyu Cr, Cu, Ni, Pb (v model'nom eksperimente) [Comparative assessment of the stability of biological properties of different subtypes of chernozems in the South of Russia to contamination of Cr, Cu, Ni, Pb (in a model experiment)]. *Pochvovedenie*. 2013, No. 2, pp. 195-200.

9. Yaroslavtsev M.V., Kolesnikov S.I. Otsenka ustoichivosti chernozemov Yuga Rossii k zagryazneniyu tyazhelymi metallami po biologicheskim pokazatelyam [Estimation of the stability of chernozems in the South of Russia for contamination by heavy metals by biological indexes]. *Izv. vuzov. Sev.-Kavk. region. Estestv. nauki*. 2011, No. 4, pp. 83-86.

10. Kuzina A.A., Kolesnikov S.I., Kazeev K.Sh. *Biodiagnostika ustoichivosti pochv Chernomorskogo poberezh'ya Krasnodarskogo kraya k zagryazneniyu neft'yu i tyazhelymi metallami* [Biodiagnostics of soil sta-

bility of the Black Sea coast of the Krasnodar Territory to pollution with oil and heavy metals]. Rostov-on-Don, Izd-vo YuFU, 2015, 125 p.

11. Kolesnikov S.I., Kuzina A.A., Kazeev K.Sh., Akimenko Yu.V., Kozun' Yu.S., Myasnikova M.A., Lubentsova D.V. Otsenka ustoichivosti dervno-karbonatnykh tipichnykh pochv Chernomorskogo poberezh'ya Kavkaza k khimicheskomu zagryazneniyu [Estimation of the stability of soddy-carbonate typical soils of the Black Sea coast of the Caucasus to chemical pollution]. *Ros. sel'skokhoz. nauka (Dokl. Ros. akademii sel'skokhoz. nauk)*. 2016, No. 5, pp. 37-40.

12. Mospanenko A.F., Kolesnikov S.I., Kazeev K.Sh., Vernigorova N.A., Akimenko Yu.V., Kozun' Yu.S., Myasnikova M.A., Naleta E.V., Yankina K.O. Otsenka ustoichivosti k khimicheskomu zagryazneniyu korichnevoi tipichnoi pochvy zapovednika «Utrish» [Evaluation of the resistance to chemical contamination of the brown typical soil of the Utrish Nature Reserve]. *Politematicheskii setevoi elektr. nauch. zhurn. Kuban. gos. agrar. un-ta (Nauchnyi zhurn. KubGAU)*. 2014, No. 10 (104).

13. Kolesnikov S.I., Kuzina A.A., Evstegneeva N.A., Kazeev K.Sh. Otsenka ustoichivosti burykh lesnykh opodzolennykh pochv Chernomorskogo poberezh'ya Kavkaza k khimicheskomu zagryazneniyu [Evaluation of the stability of brown forest podzolized soils of the Black Sea coast of the Caucasus to chemical pollution]. *Izv. vuzov. Sev.-Kavk. region. Estestv. nauki*. 2016, No. 1 (189), pp. 66-70.

14. Kolesnikov S.I., Kuzina A.A., Kazeev K.Sh., Evstegneeva N.A., Akimenko Yu.V. Assessment of resistance of brown forest sour soils of the Black Sea Coast of the Caucasus to the chemical pollution. *Ecology, Environment and Conservation*. 2016, vol. 22 (3), pp. 519-523.

15. Kolesnikov S.I., Vernigorova N.A., Kazeev K.Sh., Tishchenko S.A., Dadenko E.V., Akimenko Yu.V. Biodiagnostics of the Azov Sea Solonchaks Condition at Chemical Contamination. *Oriental J. of Chemistry*. 2016, vol. 32, No. (6), pp. 3015-3019.

16. *Sposob kompleksnoi otsenki ekologicheskogo sostoyaniya pochv* [A method for a comprehensive assessment of the ecological state of soils] / Kolesnikov S.I., Kazeev K.Sh., Denisova T.V., Dadenko E.V., Tishchenko S.A. No. 2501009. 10.12.2013.

17. Dobrovol'skii G.V., Nikitin E.D. *Funktsii pochv v biosfere i ekosistemakh (ekologicheskoe znachenie pochv)* [Soil functions in the biosphere and ecosystems (ecological significance of soils)]. Moscow, Nauka, 1990, 261 p.

УДК 633.511:581.5:547.963.3

DOI 10.23683/0321-3005-2017-2-63-67

ИЗМЕНЕНИЕ СОДЕРЖАНИЯ РНК И СТРУКТУРНОГО СОСТОЯНИЯ ДНК ПРИ ЗАСОЛЕНИИ У СОРТООБРАЗЦОВ ХЛОПЧАТНИКА ВИДА *G. BARBADENSE* L., ОТЛИЧАЮЩИХСЯ РАЗЛИЧНОЙ СТЕПЕНЬЮ УСТОЙЧИВОСТИ К СТРЕССУ

© 2017 г. А.Д. Мамедова¹, Р.Т. Алиев¹

¹Институт генетических ресурсов, Национальная академия наук Азербайджана, Баку, Азербайджан

CHANGES IN THE CONTENT OF RNA AND STRUCTURAL STATE OF THE DNA UNDER SALINITY IN VARIETY ACCESSIONS OF *G. BARBADENSE* L., WITH THE DIFFERENT LEVEL OF RESISTANCE TO STRESS

A.D. Mamedova¹, R.T. Aliyev¹

¹Genetic Resources Institute, Azerbaijan National Academy of Sciences, Baku, Azerbaijan

Мамедова Афет Дадаш – кандидат биологических наук, доцент, ведущий научный сотрудник, Институт генетических ресурсов, Национальная академия наук Азербайджана, пр. Азадлыг, 155, г. Баку, AZ 1106, Азербайджан, e-mail: afet.m@mail.ru

Afet D. Mamedova – Candidate of Biology, Associate Professor, Leading Researcher, Genetic Resources Institute, Azerbaijan National Academy of Sciences, Azadlyg Ave., 155, Baku, AZ 1106, Azerbaijan, e-mail: afet.m@mail.ru

Алиев Рамиз Таги – доктор биологических наук, профессор, заведующий отделом физиологии, Институт генетических ресурсов, Национальная академия наук Азербайджана, пр. Азадлыг, 155, г. Баку, AZ 1106, Азербайджан, e-mail: aramiz@box.az

Ramiz T. Aliyev – Doctor of Biology, Professor, Head of the Physiology Division, Genetic Resources Institute, Azerbaijan National Academy of Sciences, Azadlyg Ave., 155, Baku, AZ 1106, Azerbaijan, e-mail: aramiz@box.az

В первой серии исследований было проведено изучение всхожести семян различных сортообразцов хлопчатника в условиях засоления. Способность различных сортов адаптироваться к вредным условиям среды определяется ее генотипом. В зависимости от генотипа реакция растений на отрицательное действие стресса засоления различна: более толерантные характеризуются низким уровнем чувствительности к стрессу. Реакция различных образцов на стресс позволила ориентировочно разделить сортообразцы хлопчатника на группы с различной степенью устойчивости. Выбранные устойчивые сорта хлопка имеют перспективу для использования в селекционной практике для получения новых хозяйственно ценных форм. Эти сорта характеризуются отсутствием стресс-депрессии физиологических показателей.

В результате проведенных исследований установлено, что при действии засоления у устойчивых сортообразцов наблюдаются активация синтеза РНК, тотальной ДНК, а также увеличение лабильной и остаточной, уменьшение количества стабильной ДНК. Наоборот, у чувствительных к стрессу генотипов отмечалось снижение синтеза РНК, тотальной ДНК, лабильной и остаточной фракций ДНК, в то время как количество стабильной ДНК увеличилось.

Ключевые слова: стресс, засоление, РНК, фракции ДНК, *G. barbadense* L.

In the first series of investigations germination of seeds of different cotton variety accessions in salinization conditions was studied. Ability of different varieties to adapt to the harmful environment conditions is determined by its genotype. Depending on genotype, negative impacts of salinity stress on plant are different: more tolerant are characterized by low level of sensitivity to stress. The reaction of various accessions to stress enabled us to divide roughly the cotton accessions into groups with different degrees of resistance. Selected resistant cotton varieties have a perspective for being used in a breeding practice for obtaining new economically valuable forms. These varieties are characterized by lack of stress depression of physiological indicators.

Activation of the synthesis of RNA, total DNA, as well as labile and residual fraction of DNA, while reducing of the stable DNA fraction synthesis in resistant cotton genotypes were observed under abiotic stress factors of environment. Contrary, there was not any changes on the synthesis of the RNA, total DNA, labile and residual fractions of DNA in susceptible genotypes, whereas increasing of the stable fraction of DNA was observed.

Keywords: stress, salinity, RNA, DNA fractions, *G. barbadense* L.

Возделываемые виды и сорта растений различаются по чувствительности к засолению [1]. Солевой стресс сопровождается как осмотическим, так и токсическим эффектом избыточного содержания ионов (прежде всего, ионов натрия) [2].

Основное внимание исследователей привлекает изучение механизмов, обеспечивающих ионный гомеостаз при засолении [3].

Накоплено немало сведений об изменении физиологических параметров у растений в условиях стресса [4, 5]. При солевом стрессе подавляется синтез белка и усиливается распад уже сформированных белковых комплексов [6]. Засоление вызывает повышение активности пероксидазы, полифенолоксидазы, увеличение набора изоферментов у более устойчивых сортов [7].

Действие стрессовых факторов среды является причиной многочисленных структурных и функциональных изменений, которые направлены на выживание организма. Среди этих изменений существенную роль играет реакция генетического аппарата, от которого во многом зависит, какие в конечном итоге белки, с какой интенсивностью и последовательностью будут синтезированы клеткой в создавшейся ситуации.

В литературе немало данных, указывающих на существенные изменения показателей функционирования генов растений, подвергнутых воздействию абиотических стрессовых факторов [8, 9].

В морфологическом отношении хромосома динамична, быстро претерпевает структурные изменения в зависимости от функционального состояния клетки, что наглядно отмечается в фазе её развития. Функциональная активность хроматина сопряжена с его структурным состоянием. В лабильном хроматине локализована генетически активная ДНК, которая не насыщена гистонами, имеет много свободных фосфатных групп и метастабильных легкоденатурируемых участков, благодаря чему чувствительна к кислотному гидролизу. ДНК стабильного хроматина насыщена гистонами и сравнительно бедна свободными фосфатными группами [10].

Настоящая работа посвящена изучению изменений содержания нуклеиновых кислот и соотношения фракций ДНК при действии стресса засоления на растения хлопчатника с целью выяснения их возможной роли в формировании механизма устойчивости у растений.

Материалы и методы

Исследования проводились на коллекционных сортах хлопчатника вида *G. barbadense* L.

В качестве показателей устойчивости растений к засолению использовался способ прорастания семян хлопчатника в растворе 0,2 М NaCl [11].

Для изучения содержания нуклеиновых кислот растения, выращенные в полевых условиях в фазе 3–4 листьев, подвергались в лабораторных условиях солевому стрессу, после чего в опытных и контрольных растениях изучалось изменение синтеза нуклеиновых кислот. Определение фракционного состава ДНК осуществляли методом ступенчатого воздействия на хроматин растворами разной ионной силы и факторами депротенизации [12]. Данные анализа обрабатывались статистически [13].

Результаты исследований

Как показали результаты исследования, в зависимости от генотипа сортообразцы отличались амплитудой физиологических показателей при адаптивных процессах. Реакция сортообразцов на действие солевого стресса позволила в пределах вида ориентировочно разделить сортообразцы на группы, определив различную степень сравнительной устойчивости (табл. 1).

Сортообразцы AP-154, 5010-V, Senare, S-6022 высокоустойчивы к засолению. Стресс-депрессия всхожести семян в солевом растворе у этих образцов полностью отсутствовала.

У солеустойчивых сортообразцов наблюдалось увеличение тотальной, лабильной и остаточной ДНК. Так, например, у контрольных растений сортообразца Senare содержание тотальной ДНК составило 16,102 мг %, лабильной – 5,107, у опытных растений этого сортообразца активация синтеза указанных показателей составила соответственно 6,611 и 6,215 %. При этом отмечается уменьшение количества стабильной ДНК. Так, например, при стрессе у сортообразца Senare процент стабильной ДНК уменьшается на 7,1 % (рис. 1).

Наряду с этим в условиях стресса солеустойчивые сортообразцы характеризовались различной активацией синтеза РНК. Так, у сортообразца Senare увеличение синтеза РНК при засолении составило 20,9 %.

Позитивное изменение в синтезе лабильной, остаточной ДНК и РНК свидетельствует о повышении функциональной активности генома, что, в свою очередь, обеспечивает ускорение синтетических процессов, в особенности синтеза белков, и тем самым способствует повышению устойчивости организма к стрессовому фактору.

Таблица 1

Изменение всхожести семян, содержания нуклеиновых кислот и фракций ДНК у стрессоустойчивых сортов хлопчатника в условиях засоления (X±x) / Change of seed germination, nucleic acids content and DNA fractions among stress-resistant cotton cultivars in conditions of salinity (X±x)

| Сорт | Всхожесть семян при засухе, % | | | | ДНК, на 100 г сырой массы, мг % | | | РНК, на 100 г сырой массы, мг % | |
|--------|-------------------------------|------|---------------|---------------------|---------------------------------|------------|------------|---------------------------------|--------------|
| | Контроль | Опыт | % от контроля | Стресс-депрессия, % | Фракции ДНК | Контроль | Опыт | Контроль | Опыт |
| AP-154 | 76,0 | 76,0 | 100 | 0 | Лабильная | 4,274±0,11 | 5,657±0,04 | 105,0±4,35 | 137,63±1,29 |
| | | | | | Стабильная | 7,209±0,04 | 6,310±0,09 | | |
| | | | | | Остаточная | 1,224±0,06 | 1,472±0,06 | | |
| | | | | | Сумма | 12,707 | 13,439 | | |
| 5010-V | 100 | 100 | 100 | 0 | Лабильная | 5,595±0,07 | 6,207±0,09 | 107,64±5,18 | 113,71±2,72 |
| | | | | | Стабильная | 7,661±0,22 | 7,067±0,08 | | |
| | | | | | Остаточная | 2,299±0,07 | 2,509±0,06 | | |
| | | | | | Сумма | 15,555 | 15,783 | | |
| Senare | 94,8 | 94,8 | 100 | 0 | Лабильная | 5,107±0,08 | 6,215±0,15 | 122,36±2,434 | 147,93±1,35 |
| | | | | | Стабильная | 8,494±0,10 | 7,891±0,10 | | |
| | | | | | Остаточная | 2,501±0,03 | 2,505± | | |
| | | | | | Сумма | 16,102 | 16,611 | | |
| S-6022 | 95,0 | 95,0 | 100 | 0 | Лабильная | 5,187±0,08 | 6,242±0,05 | 123,832±1,50 | 147,016±2,48 |
| | | | | | Стабильная | 9,283±0,11 | 8,503±0,08 | | |
| | | | | | Остаточная | 2,021±0,04 | 2,385±0,05 | | |
| | | | | | Сумма | 16,491 | 17,130 | | |



Рис. 1. Изменение синтеза нуклеиновых кислот при засолении у стрессоустойчивых сортообразцов: 1 – AP-154; 2 – 5010-V; 3 – Senare; 4 – S-6022 / Fig. 1. Change of nucleic acid synthesis among stress-resistant varieties in conditions of salinity: 1 - AP-154; 2 - 5010-V; 3 - Senare; 4 - S-6022

У генотипов хлопчатника, отличающихся стресс-депрессией физиологических показателей в растворе засоления, наблюдается снижение синтеза РНК, тотальной и лабильной ДНК в сравнении с контрольными растениями (табл. 2). При этом чем большей чувствительностью к засолению отличалось растение, тем больше отмечалось снижение синтеза тотальной и лабильной ДНК, а также РНК. Так, например, стресс-депрессия всхожести семян при засолении у сортообразца 741 составила 15 %, депрессия синтеза лабильной ДНК у опытных растений в сравнении с контрольными составила 9,5 %. У сортообразца С-6040-1 депрессия всхожести семян при стрессе составила 49,2 %, депрессия

синтеза лабильной ДНК – 18,6 %. Одновременно этот процесс сопровождался увеличением количества стабильной ДНК (рис. 2).



Рис. 2. Изменение синтеза нуклеиновых кислот при засолении у сортообразцов хлопчатника, характеризующихся различной чувствительностью к стрессу: 1 – С-6002; 2 – 741; 3 – 5904-1; 4 – С-6040-1 / Fig. 2. Change of nucleic acid synthesis among cotton varieties characterized by different sensitivity to stress in conditions of salinity: 1 - C-6002; 2 - 741; 3 - 5904-1; 4 - C-6040-1

Таким образом, при действии стресса засоления у устойчивых сортообразцов наблюдаются активация синтеза РНК, увеличение лабильной и уменьшение количества стабильной ДНК. Эти данные согласуются с результатами исследований по изучению действия стресса засухи на фракционный состав ДНК [14]. Холодовой стресс также приводит к увеличению доли гетерохроматина и уменьшению доли эухроматина [15].

Таблица 2

Изменение всхожести семян, содержания нуклеиновых кислот и фракций ДНК у стрессочувствительных сортов хлопчатника в условиях засоления (X±x) / Change of seed germination, nucleic acids content and DNA fractions among stress-sensitive cotton cultivars in conditions of salinity (X±x)

| Сорт | Всхожесть семян при засухе, % | | | | ДНК, на 100 г сырой массы, мг % | | | РНК, на 100 г сырой массы, мг % | |
|----------|-------------------------------|------|---------------|---------------------|---------------------------------|------------|------------|---------------------------------|--------------|
| | Контроль | Опыт | % от контроля | Стресс-депрессия, % | Фракции ДНК | Контроль | Опыт | Контроль | Опыт |
| S-6002 | 92,0 | 86,8 | 94,3 | 5,7 | Лабильная | 4,699±0,02 | 4,501±0,11 | 109,48±2,55 | 102,304±1,75 |
| | | | | | Стабильная | 7,253±0,07 | 7,341±0,08 | | |
| | | | | | Остаточная | 1,489±0,05 | 1,472±0,06 | | |
| | | | | | Сумма | 13,417 | 13,314 | | |
| 741 | 80,0 | 68,0 | 85,0 | 15,0 | Лабильная | 4,859±0,08 | 4,398±0,11 | 112,056±1,59 | 102,672±1,69 |
| | | | | | Стабильная | 7,093±0,09 | 7,404±0,09 | | |
| | | | | | Остаточная | 2,101±0,04 | 2,004±0,05 | | |
| | | | | | Сумма | 14,053 | 13,806 | | |
| 5904-1 | 78,5 | 58,5 | 74,5 | 25,5 | Лабильная | 5,533±0,03 | 4,833±0,08 | 120,152±1,44 | 104,328±2,40 |
| | | | | | Стабильная | 7,652±0,08 | 8,007±0,06 | | |
| | | | | | Остаточная | 2,341±0,03 | 1,986±0,02 | | |
| | | | | | Сумма | 15,526 | 14,826 | | |
| C-6040-1 | 73,2 | 37,2 | 50,8 | 49,2 | Лабильная | 5,905±0,11 | 4,806±0,05 | 125,304±2,60 | 101,752±1,22 |
| | | | | | Стабильная | 8,406±0,08 | 7,767±0,06 | | |
| | | | | | Остаточная | 2,500±0,05 | 2,013±0,07 | | |
| | | | | | Сумма | 16,811 | 14,586 | | |

Полученные данные свидетельствуют о том, что стрессовые факторы воздействуют на структуру и функциональную активность генома растений, что сопровождается смещением соотношения ДНК в сторону лабильной и стабильной. Если воздействие стрессового фактора среды не оказывает отрицательного влияния на устойчивые к стрессу сортообразцы, то на чувствительные генотипы они оказывают негативное влияние.

Литература

1. *Flowers T.J.* Improving crop salt tolerance // J. of Experimental Botany. 2004. Vol. 55, № 396. P. 307–319.
2. *Sairam R.K., Tyagi A.* Physiology and molecular biology of salinity stress tolerance in plants // Curr. Sci. 2004. Vol. 86, № 3. P. 407–421.
3. *Deinlein U., Stephan A.B., Horie T., Luo W., Xu G., Schroeder J.I.* Plant salt-tolerance mechanisms // Trends in Plant Science. 2014. Vol. 19, № 6. P. 371–379.
4. *Ashagre H., Hamza I. A., Fasika E., Temesgen F.* Effect of salinity stress on germination and seedling vigour of chickpea (*Cicer arietinum* L.) cultivars // Academia J. of Agricultural Research. 2013. Vol. 9, № 1. P. 161–166.
5. *Кузнецова С.А., Климачев Д.А., Карташов С.Н., Старикова В.Т.* Влияние засоления на показатели фотосинтетической активности растений // Вестн. МГОУ. Естеств. науки. 2014. № 1. С. 63–68.

6. *Abbas M.A., Goinis M.E., Snurky W.M.* Plant growth, metabolism and adaptation in relation to stress condition. Effect of salinity on the internal solute concentration in *Phaseolus vulgaris* // J. Plant Physiol. 1991. Vol. 138, № 6. P. 722–727.
7. *Аббасова З.И., Аллахвердиев С.Р., Зейналова Э.М.* Реакция ферментов дыхания в проростках пшеницы (*Triticum aestivum*) на биогурус и засоление субстрата // Теоретические и практические проблемы агропромышленного комплекса. 2010. № 2. С. 19–21.
8. *Choi C.S., Sano H.* Abiotic-stress induces demethylation and transcriptional activation of a gene encoding a glycerophosphodiesterase-like protein in tobacco plants // Mol. Genet. Genomics. 2007. Vol. 277, № 5. P. 589–600.
9. *Madlung A., Comai L.* The effect of stress on genome regulation and structure // Ann. Bot. 2004. Vol. 94, № 4. P. 481–495.
10. *Конярев В.Г.* Белки, нуклеиновые кислоты и проблемы прикладной ботаники и селекции // Тр. по прикладной ботанике, генетике и селекции. 1973. Т. 52, № 1. С. 5–28.
11. Диагностика устойчивости растений к стрессовым воздействиям : метод. руководство / под ред. Г.В. Удовенко. Л. : ВИР, 1988. 227 с.
12. *Алексеев В.Г.* Гетерогенность ДНК проростков пшеницы и активность генома // Тр. по прикладной ботанике, генетике и селекции. 1973. Т. 52, № 1. С. 46–56.

13. Доспехов Б.А. Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследований). М. : Агропромиздат, 1985. 351 с.

14. Mammadova A.D., Aliyev R.T., Babayeva S.M., Abbasov M.A. Adaptive reaction of cotton accessions of *G. hirsutum* L. and *G. barbadense* L. species to a drought stress // *Genetika. Serbia*. 2015. Vol. 47, № 2. P. 617–626.

15. Stepinski D. Levels of DNA methylation and histone methylation and acetylation change in root tip cells of soybean seedlings grown at different temperatures // *Plant Physiol. Biochem*. 2012. Vol. 61. P. 9–17.

References

1. Flowers T.J. Improving crop salt tolerance. *J. of Experimental Botany*. 2004, vol. 55, No. 396, pp. 307–319.

2. Sairam R.K., Tyagi A. Physiology and molecular biology of salinity stress tolerance in plants. *Curr. Sci*. 2004, vol. 86, No. 3, pp. 407–421.

3. Deinlein U., Stephan A.B., Horie T., Luo W., Xu G., Schroeder J.I. Plant salt-tolerance mechanisms. *Trends in Plant Science*. 2014, vol. 19, No. 6, pp. 371–379.

4. Ashagre H., Hamza I. A., Fasika E., Temesgen F. Effect of salinity stress on germination and seedling vigour of chickpea (*Cicer arietinum* L.) cultivars. *Academia J. of Agricultural Research*. 2013, vol. 9, No. 1, pp. 161–166.

5. Kuznetsova S.A., Klimachev D.A., Kartashov S.N., Starikova V.T. Vliyanie zasoleniya na pokazateli fotosinteticheskoi aktivnosti rastenii [Influence of salinity on the photosynthetic activity of plants]. *Vestn. MGOU. Estestv. nauki*. 2014, No. 1, pp. 63–68.

6. Abbas M.A., Goinis M.E., Snurky W.M. Plant growth, metabolism and adaptation in relation to stress condition. Effect of salinity on the internal solute concentration in *Phaseolus vulgaris*. *J. Plant Physiol*. 1991, vol. 138, No. 6, pp. 722–727.

7. Abbasova Z.I., Allakhverdiev S.R., Zeinalova E.M. Reaktsiya fermentov dykhaniya v prorstkakh

pshenitsy (*Triticum aestivum*) na biogumus i zasolenie substrata [Respiration of respiratory enzymes in sprouts of wheat (*Triticum aestivum*) on biohumus and salinization of substrate]. *Teoreticheskie i prakticheskie problemy agropromyshlennogo kompleksa*. 2010, No. 2, pp. 19–21.

8. Choi C.S., Sano H. Abiotic-stress induces demethylation and transcriptional activation of a gene encoding a glycerophosphodiesterase-like protein in tobacco plants. *Mol. Genet. Genomics*. 2007, vol. 277, No. 5, pp. 589–600.

9. Madlung A., Comai L. The effect of stress on genome regulation and structure. *Ann. Bot*. 2004, vol. 94, No. 4, pp. 481–495.

10. Konarev V.G. Belki, nukleinovye kisloty i problemy prikladnoi botaniki i seleksii [Proteins, nucleic acids and problems of applied botany and breeding]. *Tr. po prikladnoi botanike, genetike i seleksii*. 1973, vol. 52, No. 1, pp. 5–28.

11. Diagnostika ustoichivosti rastenii k stressovym vozdeistviyam [Diagnosis of plant resistance to stress]. Methodical guidance. Ed. G.V. Udovenko. Leningrad, VIR, 1988, 227 p.

12. Alekseev V.G. Geterogenost' DNK prorstkov pshenitsy i aktivnost' genoma [Heterogeneity of wheat germ DNA and genome activity]. *Tr. po prikladnoi botanike, genetike i seleksii*. 1973, vol. 52, No. 1, pp. 46–56.

13. Dospekhov B.A. *Metodika polevogo opyta (s osnovami statisticheskoi obrabotki rezul'tatov issledovaniy)* [Methodology of field experience (with the basics of statistical processing of research results)]. Moscow, Agropromizdat, 1985, 351 p.

14. Mammadova A.D., Aliyev R.T., Babayeva S.M., Abbasov M.A. Adaptive reaction of cotton accessions of *G. hirsutum* L. and *G. barbadense* L. species to a drought stress. *Genetika. Serbia*. 2015, vol. 47, No. 2, pp. 617–626.

15. Stepinski D. Levels of DNA methylation and histone methylation and acetylation change in root tip cells of soybean seedlings grown at different temperatures. *Plant Physiol. Biochem*. 2012, vol. 61, pp. 9–17.

УДК 574.4; 631.4; 504.05

DOI 10.23683/0321-3005-2017-2-68-74

ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРЯМОГО ПОСЕВА НА ЭКОЛОГО-БИОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЧЕРНОЗЕМОВ*

© 2017 г. Г.В. Мокриков¹, К.Ш. Казеев¹, Ю.В. Акименко¹, С.И. Колесников¹

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

INFLUENCE OF NO-TILL ON ECOLOGICAL AND BIOLOGICAL PROPERTIES OF CHERNOZEMS

G.V. Mokrikov¹, K.Sh. Kazeev¹, Yu.V. Akimenko¹, S.I. Kolesnikov¹

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

Мокриков Григорий Васильевич – кандидат сельскохозяйственных наук, научный сотрудник, кафедра экологии и природопользования, Академия биологии и биотехнологии им. Д.И. Иванковского, Южный федеральный университет, пр. Стачки, 194/1, г. Ростов-на-Дону, 344090, Россия

Grigory V. Mokrikov – Candidate of Agricultural Sciences, Researcher, Department of Ecology and Natural Management, Ivanovsky Academy of Biology and Biotechnology, Southern Federal University, Stachki Ave., 194/1, Rostov-on-Don, 344090, Russia

Казеев Камиль Шагидуллоевич – доктор географических наук, профессор, кафедра экологии и природопользования, Академия биологии и биотехнологии им. Д.И. Иванковского, Южный федеральный университет, пр. Стачки, 194/1, г. Ростов-на-Дону, 344090, Россия, e-mail: Kamil_kazeev@mail.ru

Kamil Sh. Kazeev – Doctor of Geography, Professor, Department of Ecology and Natural Management, Ivanovsky Academy of Biology and Biotechnology, Southern Federal University, Stachki Ave., 194/1, Rostov-on-Don, 344090, Russia, e-mail: Kamil_kazeev@mail.ru

Акименко Юлия Викторовна – кандидат биологических наук, ассистент, кафедра экологии и природопользования, Академия биологии и биотехнологии им. Д.И. Иванковского, Южный федеральный университет, пр. Стачки, 194/1, г. Ростов-на-Дону, 344090, Россия, e-mail: akimenkojuliya@mail.ru

Yuliya V. Akimenko – Candidate of Biology, Assistant, Department of Ecology and Natural Management, Ivanovsky Academy of Biology and Biotechnology, Southern Federal University, Stachki Ave., 194/1, Rostov-on-Don, 344090, Russia, e-mail: akimenkojuliya@mail.ru

Колесников Сергей Ильич – доктор сельскохозяйственных наук, профессор, заведующий кафедрой экологии и природопользования, Академия биологии и биотехнологии им. Д.И. Иванковского, Южный федеральный университет, пр. Стачки, 194/1, г. Ростов-на-Дону, 344090, Россия, e-mail: kolesnikov@sfedu.ru

Sergei I. Kolesnikov – Doctor of Agricultural Sciences, Professor, Head of Ecology and Natural Management Department, Ivanovsky Academy of Biology and Biotechnology, Southern Federal University, Stachki Ave., 194/1, Rostov-on-Don, 344090, Russia, e-mail: kolesnikov@sfedu.ru

Проведено сравнительное исследование влияния 7-летнего использования технологии прямого посева на эколого-биологические свойства черноземов Ростовской области. Объектами исследования были 28 полей, занятых различными сельскохозяйственными культурами: озимая пшеница, ячмень, подсолнечник, нут, масличный лен, кориандр и др. Исследования проводили трижды за вегетационный период на полях с разной системой обработки. В сравнении с традиционными способами обработки почв, которые предусматривают вспашку, технология прямого посева приводит к изменению физических и биологических свойств черноземов. В поверхностном слое почвы повышается влажность, увеличиваются плотность и твердость (сопротивление пенетрации). Основные изменения физических свойств касаются поверхностных слоев почвы и особенно существенны в сухой сезон. Значения сопротивления пенетрации значительно повышаются при высыхании почвы независимо от способа обработки почвы. На полях с прямым посевом повышаются численность микроорганизмов и биологическая активность почв. Исследуемые показатели показали разную информативность при сравнении традиционных и альтернативных технологий обработки почвы. Интенсивность выделения почвой углекислого газа и целлюлолитическая активность почв слабо различались на полях с разной обработкой. Однако в целом можно сделать заключение о том, что почвосберегающие технологии прямого посева могут служить одним из радикальных средств сохранения и повышения потенциального плодородия почв.

Ключевые слова: биодиагностика, прямой посев, No-Till, антропогенное воздействие.

* Исследование выполнено при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (5.5735.2017/8.9) и Президента Российской Федерации (НШ-9072.2016.1, МК-326.2017.11).

A comparative study of the effect of the 7-year use of No-Till technology on the ecological and biological properties of the chernozems in the Rostov Region has been carried out. The objects of the study were 28 fields occupied by various crops: winter wheat, barley, sunflower, chickpeas, oil flax, coriander and others. Studies were carried out three times during the growing season in fields with different treatment systems. In comparison with traditional methods of soil treatment, which provide for plowing, No-Till leads to a change in the physical and biological properties of chernozems. In the surface layer of the soil moisture rises, density and hardness (penetration resistance) increase. The main changes in physical properties concern the surface layers of the soil and are especially significant in the dry season. The penetration resistance values are significantly increased when the soil dries out, regardless of the way the soil is treated. In fields with No-Till, the number of microorganisms and the biological activity of soils are increasing. The investigated indicators showed different informative value when comparing traditional and alternative technologies of soil cultivation. The intensity of soil carbon dioxide and the cellulolytic activity of soils differed slightly in fields with different treatments. However, in general, it can be concluded that the soil-saving technologies of No-Till can serve as one of the radical means of preserving and enhancing the potential fertility of soils.

Keywords: *biodiagnostics, direct seeding, No-Till, anthropogenic impact.*

Введение

Одной из глобальных проблем современного мира является продовольственная проблема. Она состоит в дефиците продуктов питания, необходимых для нормального развития человечества. Их получение непосредственно связано с плодородием почв. Обработка почвы – это один из основных показателей, влияющих на плодородие. Традиционная вспашка почвы приводит к снижению плодородия, что доказано многочисленными исследованиями почв [1–4]. Наряду с этим в последние годы опыт обработки почвы без вспашки (No-Till), называемый прямым посевом, набирает все большие обороты. При правильной обработке этим методом почва освобождается от урожая и покрывается слоем мульчи, состоящим из остатков жнивья. Это помогает надолго сохранить влагу и тем самым возобновить или улучшить микробиологические процессы в почве, нормализует химические, физические и биологические свойства почвы, её восстановление после эрозии; обеспечивает устойчивость почвенной структуры. Применение технологий с минимальной обработкой почвы и без её обработки способствует, наряду с экономией ресурсов, повышению плодородия и снижению негативного воздействия на агроландшафты. Технология прямого посева распространена в США, Аргентине, Бразилии и ряде других стран мира [5]. В России она ограниченно применяется в Ставропольском крае, Новосибирской, Ростовской, Самарской и Белгородской областях, республиках Крым и Татарстан и других регионах.

Цель работы – исследование воздействия технологий прямого посева на показатели эколого-биологического состояния черноземов.

Объекты исследований

Опытные поля ООО «Донская Нива», возделываемые в течение 7 лет по технологии прямого посева, находятся в центральной части Ростовской области, в Октябрьском районе, на площади более 5 тыс. га. В 2016 г. поля были заняты различными сельскохозяйственными культурами: озимой пшеницей, подсолнечником, льном, кориандром и др. Традиционная технология обработки земель применялась на контрольных полях, расположенных в непосредственной близости от опытных полей, – на расстоянии от 50 до 200 м. Это облегчает сравнение применяемых агротехнологий. Почвы исследуемой территории диагностированы как черноземы обыкновенные разной степени выщелоченности от карбонатов и гумусированности. Эти почвы подробно описаны в научной литературе [6, 7].

Методика исследований

Полевые исследования выполнены в сезонной динамике: первый срок – 3÷5 июня, второй – 25÷26 июля, третий – 17÷18 сентября. Почву описывали и определяли ее таксономическую принадлежность согласно рекомендациям описания по морфологическим признакам [8]. Плотность почвы определяли объёмно-весовым методом в 3-кратной повторности; температуру – послойно электронным термометром HANNA СНЕСТЕМР; влажность – в полевых условиях влагомером с датчиков Dataprobe в 10-кратной повторности. Твердость почв (сопротивление пенетрации) исследовали в полевых условиях с помощью пенетromетра EJKELKAMP на глубине 45 см с интервалом 5 см в 10-кратной повторности.

Лабораторно-аналитические исследования выполнены в лабораториях кафедры экологии и природопользования [8, 9]. Численность микрофлоры в почве также учитывали методами посева на плотные питательные среды и прямого микроскопирования на люминесцентном микроскопе «Микмед-2» [9] в 3÷6-кратной повторности. Дыхание почв определяли в полевых условиях по предложенной [10] и адаптированной [8] методикам с помощью портативного газоанализатора ПГА-7 в 3÷8-кратной повторности. Содержание общего гумуса определяли методом И.В. Тюрина в модификации Никитина по окисляемости хромовой смесью в 3-кратной повторности.

Результаты исследований

Биота и биологическая активность почв в значительной степени зависят от экологических факторов среды. Исследование температурного режима показало достаточно равномерное распределение данных на всех исследуемых участках. Была выявлена сезонная динамика хода температуры, достаточно типичная для данной территории. В целом можно сказать, что первый срок был тёплым, второй – жарким, третий – прохладным. Это относится как к дневным, так и к ночным температурам. В первые два срока температура почвы благоприятствовала высокой скорости протекания биологических процессов. В сентябре вследствие её снижения биологические процессы были менее интенсивными.

В течение сезона влажность исследуемых почв существенно изменялась в зависимости от количества выпадающих атмосферных осадков непосредственно перед измерениями или во время исследований. Влажная весна и начало лета привели к высоким зарегистрированным значениям влажности на всех без исключения ключевых участках, независимо от способа их обработки. Однако большие значения по сравнению с контрольными были отмечены на опытных полях. Это свидетельствует о большей способности почвы на опытных полях к накоплению и удерживанию влаги. То же самое относится и к сухому периоду наблюдения в сентябре. В целом значительно более низкие значения влажности на опытных полях были выше, чем на контрольных участках. Исключение во второй и третий сроки составило поле № 3Д, засеянное кориандром прямым посевом. Второй срок наблюдения в целом был более сухим, хоть и относительно влажным для данного сезона. В сентябре влажность почвы была минимальна след-

ствии недостаточного выпадения атмосферных осадков. Иссущение почвы значительно повлияло на её физические и биологические свойства. Среди исследуемых вариантов минимальные значения отмечены на полях с кориандром (участки № 3, 4). Однако самые низкие средние значения за вегетацию были на контрольном поле кукурузы (вариант № 10К).

Известным фактом является повышение плотности почв при использовании технологии прямого посева (по сравнению с традиционными технологиями обработки). Это связано с прекращением механического воздействия на поверхностный слой почвы. Вспашка, боронование и культивации разрушают пахотный горизонт при традиционной технологии обработки почвы. В результате его плотность колеблется в небольших пределах (1,0–1,3 г/см³), что оптимально для сельскохозяйственных растений. Существенное влияние на значения плотности оказывают возделываемые культуры и влажность почвы [11]. Почвы ООО «Донская Нива» в значительном большинстве обладают оптимальными для растений параметрами плотности. Сравнение почв, обрабатываемых по технологии прямого посева, с расположенными рядом опытными участками с традиционной технологией обработки показывает разные тенденции. Чаще всего на опытных полях отмечена такая же плотность, как на контрольных участках (или незначительно повышенная). Однако отмечены и обратные тенденции понижения плотности. Выявлена существенная динамика плотности почв. Особенно это характерно для контрольных почв, где проводится их рыхление в результате механических обработок (вспашка, боронование, культивации). Максимальные значения плотности установлены в третий срок наблюдения. По сравнению с первым сроком (июнь), когда был самый влажный период, третий срок (сентябрь) был самым сухим, что привело к возрастанию плотности в среднем на 20 % (при учете всех площадок). При этом плотность возросла на всех участках опытных и контрольных полей. Самыми плотными в сентябре были почвы на опытных участках под подсолнечником, нутом и кориандром. В этот период плотность была неблагоприятно высокой (1,40÷1,53 г/см³). Высокая плотность также была отмечена в сентябре для полей с посевами зерновых на участках 5Д и 8Д (1,42÷1,51 г/см³). Следует отметить, что повышение плотности относится только к поверхностным горизонтам почвы. Ниже по профилю плотность почвы была на уровне стандартных для черноземов значений.

Сопротивление пенетрации почвы – это сопротивление почвы внедрению в нее зонда цилиндрической или конусообразной формы небольшого диаметра. Традиционно до сих пор в почвоведении в отношении сопротивления пенетрации используют и термин «твердость почвы». Сопротивление пенетрации характеризует способность почвы противодействовать проникновению в нее не только агротехнических орудий, но и корней растений. Начало сокращения роста корней наблюдается при сопротивлении пенетрации 0,5 МПа; значительное замедление роста корней происходит при 1,5 МПа. При значении 2,0 МПа сокращение роста корней происходит на 55÷70 % от оптимальных значений. Сокращение роста корней на 90 % или его полное прекращение наблюдается при значениях сопротивления пенетрации почвы (3,0÷3,5 МПа) [12]. В этом случае распространение корней возможно только по трещинам или по корневинам (ходам сгнивших корней).

Следствием зависимости значений твердости почв от многих почвенных и экологических факторов является высокая вариабельность этого показателя [13]. В особенности это касается поверхностных горизонтов, где на твердость почвы влияет активное антропогенное воздействие (помимо естественных факторов).

Определение сопротивления пенетрации показало сравнительно небольшие отличия исследуемых участков между собой. Анализом значений сопротивления на разных глубинах установлено, что наибольшим варьированием значений твердости характеризуются поверхностные горизонты. Сопротивление пенетрации нарастает от поверхности вниз по профилю. Существенные различия в значениях этого показателя установлены для почвы с различными выращиваемыми сельскохозяйственными культурами. Наиболее высоким показателем сопротивления пенетрации обладает почва, засеянная кориандром (№ 3, 4). Причина этого явления – поздний посев. Низкое значение показателя пенетрации, только в одном из 50 случаев превышающее критическую отметку (5 МПа), обусловлено высокой влажностью почвы в первый срок наблюдения. Влажная почва обладает высокой пластичностью и низкой твердостью, хорошо проницаема сельскохозяйственными орудиями. Однако во втором сроке наблюдений установлено значительное повышение твердости почвы практически на всех исследуемых полях. Сопротивление пенетрации увеличилось в несколько раз, особенно на участке 3Д с кориандром, где оно достигает 9,9 МПа уже на глубине 15 см. Критическая твердость почвы, превышаю-

щая 5 МПа, установлена в 27 из 50 определяемых значений. Летом значения сопротивления пенетрации в опытных полях значительно отличаются от таковых на контрольных почвах. Например, в участке 1Д сопротивление пенетрации более чем в 2 раза выше, чем на участке 1К, а между участками 3Д и 3К разница увеличивается в 3 раза. Таким образом, можно сделать вывод, что технология прямого посева способствует переуплотнению почвы на исследуемых участках в сухой период. Дальнейшее её высыхание привело к ещё большему повышению значений сопротивления пенетрации в сентябре (10–12 МПа). Твердость увеличилась как на контрольных участках, так и на опытных. Максимальная плотность отмечена на глубинах более 10 см на полях с пропашными культурами, независимо от обработки почвы. Верхние слои почв участков с традиционной обработкой на большинстве полей были разрыхлены в результате обработки (вспашки, боронования).

Полевые исследования показали достаточно хорошую оструктуренность почв исследуемой территории в первые месяцы лета 2016 г. В июле и сентябре почва сильно уплотнилась, и структура значительно ухудшилась. На посевах пропашных культур (подсолнечник, кориандр, нут) стали преобладать глыбистые структурные отдельности; водопрочность агрегатов значительно снизилась. Если в первый срок наблюдения большая часть вариантов обладала хорошей и отличной водопрочностью агрегатов, то во второй и третий сроки она была на удовлетворительном и даже неудовлетворительном уровнях. Однозначного влияния прямого посева на водопрочность агрегатов не выявлено.

Для установления общих закономерностей изменения микробоценоза черноземов при разных технологиях возделывания сельскохозяйственных культур рассчитан интегральный показатель биологического состояния (ИПБС) почвы [14, 15]; интегральный показатель биологической активности (ИПБА), который характеризует интенсивность и направленность микробиологических процессов почвы в целом. ИПБА рассчитывали по следующим показателям: численность аммонификаторов, микроскопических грибов, актиномицетов, бактерий *p. Azotobacter*; общая численность бактерий, микробная биомасса. Для расчета ИПБА черноземов значение каждого из выбранных показателей принимали за 100 % (в контроле) и по отношению к контролю выражали в процентах от значения других показателей. Затем определяли среднее значение выбранных показателей для каждого варианта. Данная методика

расчета позволяет объединять относительные значения различных показателей, абсолютные значения которых нельзя суммировать, так как они имеют разные единицы измерений.

Анализ данных ИПБА по срокам исследований свидетельствует, что наименьшая микробиологическая активность наблюдается в первый влажный период исследований как на опытных полях, так и на контрольных. Однако при сравнении опытных и контрольных полей первого срока исследований показатель ИПБА на 20÷30 % выше на полях с технологией No-Till, чем на полях с традиционной технологией, причем наибольшая микробиологическая активность отмечена на полях с бинарными посевами (№ 9, 10), нежели одновидовыми (за исключение поля № 5, ячмень), где показатель ИПБА варьировал в диапазоне 93÷100 %. На этих же контрольных полях с применением традиционной технологии ИПБА варьировал в диапазоне 72÷76 %.

Что касается второго срока исследований, то для большинства опытных полей наблюдается тенденция увеличения ИПБА, особенно на полях с озимой пшеницей (№ 6÷8) и бинарных посевах подсолнечника.

В послеуборочный период (3-й срок исследований) ИПБА снижается незначительно, однако остается на высоком уровне на полях бинарных посевов подсолнечника.

В вариантах с прямым посевом колебания уровня биологической активности на протяжении всего срока исследований не являются существенными, и можно говорить о более стабильном функционировании микробоценоза черноземов при использовании данного способа возделывания культур. Аналогичные результаты исследований были получены в работе Р.П. Вильного [16], в которой было установлено, что под влиянием разных способов механической обработки чернозема типичного происходят перестройки в структуре и функционировании почвенного микробного комплекса. Так, при уменьшении механической нагрузки на почву наблюдалось возрастание ИПБС чернозема типичного. В среднем за годы исследований в варианте с применением нулевой обработки почвы ИПБС возрастает, что свидетельствует о формировании лучших условий для развития и функционирования микробоценоза чернозема типичного и интенсификации обмена веществ и энергии в агроэкосистеме [17].

Рассматривая непосредственно взаимосвязь микробного сообщества и урожайности, следует отметить, что последняя теснее связана не с чис-

ленностью микроорганизмов, а с интенсивностью и направленностью круговорота питательных элементов, осуществляемого микробным сообществом. В большой мере, за вычетом разнообразия, это касается структуры микробного сообщества. Численность микроорганизмов может снижаться и увеличиваться за короткий промежуток времени в ответ на изменение условий среды. Тогда как структура отражает состояние сообщества, близкое к равновесию [18]. Трудноразлагающиеся растительные остатки, прижизненные метаболиты и корневые экссудаты растений, наоборот, активно минерализуются микробоценозом, поддерживая функционирование как самих микроорганизмов, так и растений агроэкосистемы.

В результате исследований микробоценоза черноземов Ростовской области при использовании разных систем возделывания сельскохозяйственных культур установлено, что использование технологии No-Till не приводит к ухудшению микробиологической активности почв.

Дыхание почв является одним из показателей их биологической активности [15, 19]. Общая интенсивность дыхания почвы обусловлена всей ее биологической активностью и определяется количеством потребленного кислорода и продуцированного диоксида углерода. В первый срок наблюдения значения дыхания почв были достаточно высокими для определения исследуемых почв как почв с высокой биологической активностью. На опытных полях разложение органических остатков в почве и мульчирующем слое приводит к активизации микрофлоры и повышению интенсивности дыхания почв. Однако в некоторых случаях интенсивность дыхания почв опытных полей была ниже контрольных значений на полях с традиционной обработкой. В последующие сроки наблюдения при высыхании почвы дыхание почв было подавлено на всей исследуемой территории. Биологические процессы в сухой почве практически останавливаются, смещаясь в более глубокие и влажные горизонты почвы.

Таким образом, технология прямого посева вследствие отсутствия пахотной обработки и наличия растительных остатков на поверхности почв приводит к изменению физических свойств почв, увеличению биогенности и биологической активности, способствуя увеличению плодородия и повышению урожайности сельскохозяйственных культур. Следовательно, энергосберегающие технологии прямого посева в сочетании со средствами комплексной химизации могут служить одним из радикальных средств сохранения и повышения потенциального плодородия почв.

Литература

1. Вальков В.Ф., Казадаев А.А., Гайдамакина Л.Ф., Перемужева Л.А., Пелипенко О.Ф., Стаев А.А., Нечепуренко В.Э. Биологическая характеристика чернозема обыкновенного // Почвоведение. 1989. № 7. С. 67–74.
2. Казеев К.Ш., Колесников С.И., Вальков В.Ф. Биология почв Юга России. Ростов н/Д. : ЦВВР, 2004. 350 с.
3. Даденко Е.В., Мясникова М.А., Казеев К.Ш., Колесников С.И., Вальков В.Ф. Биологическая активность чернозема обыкновенного при длительном использовании под пашню // Почвоведение. 2014. № 6. С. 724–733.
4. Мясникова М.А., Казеев К.Ш., Колесников С.И. Влияние возраста залежей на биологические свойства постагрогенных почв Ростовской области. Ростов н/Д. : Изд-во ЮФУ, 2015. 130 с.
5. Дридригер В.К., Дрепа Е.Б., Матвеев А.Г. Влияние технологии No-Till на содержание продуктивной влаги и плотность чернозема выщелоченного центрального Предкавказья // Современные проблемы науки и образования. 2015. № 1–2. С. 283.
6. Вальков В.Ф., Казеев К.Ш., Колесников С.И. Почвы Юга России. Ростов н/Д. : Эверест, 2008. 276 с.
7. Вальков В.Ф., Казеев К.Ш., Колесников С.И. Почвы Ростовской области. Ростов н/Д. : Изд-во ЮФУ, 2012. 492 с.
8. Казеев К.Ш., Колесников С.И., Акименко Ю.В., Даденко Е.В. Методы биодиагностики наземных экосистем. Ростов н/Д. : Изд-во ЮФУ, 2016. 356 с.
9. Методы почвенной микробиологии и биохимии / под ред. Д.Г. Звягинцева. М. : Изд-во МГУ, 1991. 304 с.
10. Смагин А.В. Газовая фаза почв. М. : Изд-во МГУ, 2005. 300 с.
11. Вальков В.Ф., Елисеева Н.В., Имгрунт И.И., Казеев К.Ш., Колесников С.И. Справочник по оценке почв. Майкоп : Адыгея, 2004. 236 с.
12. Шейн Е.В. Курс физики почв. М. : Изд-во МГУ, 2005. 432 с.
13. Мазиров М.А., Шейн Е.В., Корчагин А.А., Шушкевич Н.И., Дембовецкий А.В. Полевые исследования свойств почв : учеб. пособие. Владимир : Изд-во ВлГУ, 2012. 72 с.
14. Казеев К.Ш. Изменение биологической активности почв предгорий Северо-Западного Кавказа при антропогенном воздействии : автореф. дис. ... канд. биол. наук. Краснодар, 1996. 17 с.
15. Казеев К.Ш., Колесников С.И., Вальков В.Ф. Биологическая диагностика и индикация почв: методология и методы исследований. Ростов н/Д. : Изд-во РГУ, 2003. 204 с.

16. Вильный Р.П. Влияние минимизации обработки чернозема типичного на его биологическое состояние // Почвоведение и агрохимия. 2015. № 1(54). С. 104–114.
17. Акименко Ю.В., Мокриков Г.В., Казеев К.Ш., Колесников С.И. Влияние технологии прямого посева на микробиологические свойства черноземов. Ростов н/Д. : Изд-во ЮФУ, 2016. 110 с.
18. Селиверстова О.М., Верховцева Н.В., Степанов А.Л., Корчагин А.А. Изменение микробного сообщества серой лесной почвы под посевом злаковых культур при применении органических и минеральных удобрений // Агрохимия. 2008. № 8. С. 1–9.
19. Звягинцев Д.Г. Биологическая активность почв и шкалы для оценки некоторых ее показателей // Почвоведение. 1978. № 6. С. 48–54.

References

1. Val'kov V.F., Kazadaev A.A., Gaidamakina L.F., Peremuzova L.A., Pelipenko O.F., Staev A.A., Nechepurenko V.E. Biologicheskaya kharakteristika chernozema obyknovennogo [Biological characteristics of ordinary chernozem]. *Pochvovedenie*. 1989, No. 7, pp. 67-74.
2. Kazeev K.Sh., Kolesnikov S.I., Val'kov V.F. *Biologiya pochv Yuga Rossii* [Soil biology of the South of Russia]. Rostov-on-Don, TsVVR, 2004, 350 p.
3. Dadenko E.V., Myasnikova M.A., Kazeev K.Sh., Kolesnikov S.I., Val'kov V.F. Biologicheskaya aktivnost' chernozema obyknovennogo pri dlitel'nom ispol'zovanii pod pashnyu [Biological activity of ordinary chernozem under long-term use for arable land]. *Pochvovedenie*. 2014, No. 6, pp. 724-733.
4. Myasnikova M.A., Kazeev K.Sh., Kolesnikov S.I. *Vliyanie vozrasta zalezhei na biologicheskie svoystva postagrogennykh pochv Rostovskoi oblasti* [Influence of the age of deposits on the biological properties of postagenogenic soils in the Rostov Region]. Rostov-on-Don, Izd-vo YuFU, 2015, 130 p.
5. Dridiger V.K., Drepa E.B., Matveev A.G. Vliyanie tekhnologii No-Till na sodержanie produktivnoi vlagi i plotnost' chernozema vyshchelochennogo tsentral'nogo Predkavkaz'ya [The influence of No-Till technology on the content of productive moisture and the density of the chernozem of the leached central Ciscaucasia]. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya*. 2015, No. 1-2, p. 283.
6. Val'kov V.F., Kazeev K.Sh., Kolesnikov S.I. *Pochvy Yuga Rossii* [Soil of the South of Russia]. Rostov-on-Don, Everest, 2008, 276 p.
7. Val'kov V.F., Kazeev K.Sh., Kolesnikov S.I. *Pochvy Rostovskoi oblasti* [Soil of the Rostov Region]. Rostov-on-Don, Izd-vo YuFU, 2012, 492 p.
8. Kazeev K.Sh., Kolesnikov S.I., Akimenko Yu.V., Dadenko E.V. *Metody biodiagnostiki nazemnykh*

ekosistem [Methods of bio-diagnostics of terrestrial ecosystems]. Rostov-on-Don, Izd-vo YuFU, 2016, 356 p.

9. *Metody pochvennoi mikrobiologii i biokhimii* [Methods of soil microbiology and biochemistry]. Ed. D.G. Zvyagintsev. Moscow, Izd-vo MGU, 1991, 304 p.

10. Smagin A.V. *Gazovaya faza pochv* [Gas phase of soils]. Moscow, Izd-vo MGU, 2005, 300 p.

11. Val'kov V.F., Eliseeva N.V., Imgrunt I.I., Kazeev K.Sh., Kolesnikov S.I. *Spravochnik po otsenke pochv* [Handbook on the assessment of soils]. Maykop, Adygeya, 2004, 236 p.

12. Shein E.V. *Kurs fiziki pochv* [Course of soil physics]. Moscow, Izd-vo MGU, 2005, 432 p.

13. Mazirov M.A., Shein E.V., Korchagin A.A., Shushkevich N.I., Dembovetskii A.V. *Polevye issledovaniya svoistv pochv* [Field study of soil properties]. Textbook. Vladimir, Izd-vo VIGU, 2012, 72 p.

14. Kazeev K.Sh. *Izmenenie biologicheskoi aktivnosti pochv predgorii Severo-Zapadnogo Kavkaza pri antropogennom vozdeistvii*: avtoref. dis. ... kand. biol. nauk [Changes in the biological activity of soils in the foothills of the North-West Caucasus under anthropogenic influence]. Krasnodar, 1996, 17 p.

15. Kazeev K.Sh., Kolesnikov S.I., Val'kov V.F. *Biologicheskaya diagnostika i indikatsiya pochv: metodologiya i metody issledovaniia* [Biological diagnos-

tics and soil indication: methodology and methods of research]. Rostov-on-Don, Izd-vo RGU, 2003, 204 p.

16. Vil'nyi R.P. Vliyanie minimizatsii obrabotki chernozema tipichnogo na ego biologicheskoe sostoyanie [Influence of minimization of treatment of chernozem typical for its biological state]. *Pochvovedenie i agrokhimiya*. 2015, No. 1 (54), pp. 104-114.

17. Akimenko Yu.V., Mokrikov G.V., Kazeev K.Sh., Kolesnikov S.I. *Vliyanie tekhnologii pryamogo poseva na mikrobiologicheskie svoistva chernozemov* [The influence of direct seeding technology on the microbiological properties of chernozems]. Rostov-on-Don, Izd-vo YuFU, 2016, 110 p.

18. Seliverstova O.M., Verkhovtseva N.V., Stepanov A.L., Korchagin A.A. *Izmenenie mikrobnogo soobshchestva seroi lesnoi pochvy pod posevom zlakovykh kul'tur pri primeneniia organicheskikh i mineral'nykh udobrenii* [Changes in the microbial community of gray forest soil under sowing of cereal crops using organic and mineral fertilizers]. *Agrokhimiya*. 2008, No. 8, pp. 1-9.

19. Zvyagintsev D.G. *Biologicheskaya aktivnost' pochv i shkaly dlya otsenki nekotorykh ee pokazatelei* [Biological activity of soils and scales for the evaluation of some of its indicators]. *Pochvovedenie*. 1978, No. 6, pp. 48-54.

НАУКИ О ЗЕМЛЕ
SCIENCE OF EARTH

УДК 504.06

DOI 10.23683/0321-3005-2017-2-75-83

ГИДРОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ РЕК АРМЕНИИ В ЗАВИСИМОСТИ
ОТ ВЫСОТНОЙ ЗОНАЛЬНОСТИ ЛАНДШАФТОВ И ТИПОВ
ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЯ В ИХ БАССЕЙНАХ

© 2017 г. Г.Г. Бабаян¹, В.Е. Закруткин², О.С. Решетняк², Г.А. Саакян¹

¹Центр эколого-ноосферных исследований НАН Республики Армения, Ереван, Армения,

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

HYDROCHEMICAL FEATURES OF THE RIVERS OF ARMENIA
DEPENDING ON THE ALTITUDINAL ZONALITY OF LANDSCAPES AND TYPES
OF NATURE USE IN THEIR BASINS

G.G. Babayan¹, V.E. Zakrutkin², O.S. Reshetnyak², G.A. Sahakyan¹

¹Center for Ecological and Noospheric Studies, National Academy of Sciences of Armenia, Yerevan, Armenia,

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

Бабаян Гаяне Грантовна – доктор технических наук, старший научный сотрудник, отдел геохимии окружающей среды, Центр эколого-ноосферных исследований НАН Республики Армения, ул. Абовяна, 68, г. Ереван, 0025, Армения, e-mail: gayane.babayan@cens.am

Gayane G. Babayan – Doctor of Technical Sciences, Senior Researcher, Department of Environmental Geochemistry, Center for Ecological and Noospheric Studies, National Academy of Sciences of Armenia, Abovyana St., 68, Yerevan, 0025, Armenia, e-mail: gayane.babayan@cens.am

Закруткин Владимир Евгеньевич – доктор геолого-минералогических наук, профессор, заведующий кафедрой геоэкологии и прикладной геохимии, Институт наук о Земле, Южный федеральный университет, ул. Зорге, 40, г. Ростов-на-Дону, 344090, Россия, e-mail: vezak@list.ru

Vladimir E. Zakrutkin – Doctor of Geology and Mineralogy, Professor, Head of the Department of Geoecology and Applied Geochemistry, Institute of Earth Sciences, Southern Federal University, Zorge St., 40, Rostov-on-Don, 344090, Russia, e-mail: vezak@list.ru

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, e-mail: olgare1@rambler.ru

Olga S. Reshetnyak – Candidate of Geography, Associate Professor, Department of Geoecology and Applied Geochemistry, Institute of Earth Sciences, Southern Federal University, Zorge St., 40, Rostov-on-Don, 344090, Russia, e-mail: olgare1@rambler.ru

Саакян Геворг Ашотович – лаборант-исследователь, отдел геохимии окружающей среды, Центр эколого-ноосферных исследований, НАН Республики Армения, ул. Абовяна, 68, г. Ереван, 0025, Армения, e-mail: gevorg.sahakyan@cens.am

Gevorg A. Sahakyan – Laboratory Assistant-Researcher, Department of Environmental Geochemistry, Center for Ecological and Noospheric Studies, National Academy of Sciences of Armenia, Abovyana St., 68, Yerevan, 0025, Armenia, e-mail: gevorg.sahakyan@cens.am

Обобщены результаты гидрохимических исследований наиболее крупных рек Армении (по 13 стационарным постам) по 29 показателям за период 2004–2008 гг. Прослеживается выраженная тенденция изменения концентраций химических веществ в зависимости от высотной зональности ландшафтов и типов природопользования в бассейнах рек. Показано, что изменение качества воды обусловлено техногенными потоками загрязняющих веществ, поступающих с селитебных городских, селитебных сельских, горнопромышленных и агроландшафтов.

Выявлено, что для характеристики качества воды рек индикаторными являются 7 показателей: электропроводимость (минерализация), содержание ионов натрия, хлоридов, сульфатов, меди, цинка и молибдена. По степени экологической напряженности выделены р. Памбак, Агстев, Дебед, Раздан и Севджур, в бассейнах которых преобладают селитебные городские и селитебные сельские ландшафты, а также р. Вохчи (Капан), которую можно отнести к горнопромышленной ландшафтной системе.

Ключевые слова: реки Армении, химический состав, качество воды, высотная зональность ландшафтов, тип природопользования.

The results of hydrochemical studies of the largest rivers of Armenia (13 stationary posts) on 29 indicators for 2004-2008 are summarized. There is a pronounced tendency to change the concentration of hydrochemical indicators depending on the zonality of landscapes and the types of nature use in river basins. It is shown that the change in water quality is caused by technogenic pollutant flows from residential urban, residential rural, mining and agro landscapes.

It is shown that 7 indicators are indicative for characterizing the water quality of rivers: electrical conductivity (mineralization), sodium, chlorides, sulfates, copper, zinc and molybdenum content. According to the degree of environmental tension, the Pambak, Agstev, Debed, Razdan and Sevzhur rivers are distinguished, in the basins of which predominantly residential urban and residential rural landscapes prevail, as well as the Vokhchi (Kapán), which can be attributed to the mining landscape system.

Keywords: rivers of Armenia, chemical composition, water quality, altitudinal zonality of landscapes, nature use type.

Введение

Речные бассейны представляют собой целостные ландшафтные системы, которые находятся в тесной зависимости от абсолютной и относительной высот местности, характера и степени расчленённости рельефа, климатических условий и др. Отличительной чертой всех рек Армении (трансграничный бассейн Кура – Аракс) является их формирование на абсолютной отметке в среднем 2000 м. В высокогорных областях влияние вертикальной (высотной) зональности на формирование качества воды рек имеет определяющее значение. В местах истоков распространены горно-луговые и нивальные природные ландшафты, а также техногенные – системы неорошаемого и орошаемого земледелия и гидротехнических сооружений, пастбищные, лесохозяйственные, горнопромышленные, сельские селитебные. Вниз по течению их сменяют горно-лесные, горно-степные, полупустынные и пустынные ландшафты. В среднегорной части средних течений бассейнов рек на высоте ниже 1500 м с изменением морфологии русла, увеличением водности и антропогенных нагрузок возрастает влияние урбанизированных и рекреационных ландшафтов. В нижних течениях большинства рек техногенные ландшафты полностью или явно преобладают над природными [1, 2].

В условиях разнообразных природно-антропогенных ландшафтов в бассейнах рек реализуются различные типы природопользования – землепользование, пользование недрами, лесопользование, водопользование и др. При этом, несмотря на то что практически все природные комплексы в той или иной степени испытывают техногенное воздействие,

бассейн каждой реки и участки его верхнего, среднего и нижнего течения отличаются преобладанием одного из типов природопользования. Развитие всех видов хозяйственной деятельности сопровождается поступлением специфичных загрязняющих веществ в поверхностные водотоки. При этом средние и малые реки, в отличие от больших, наиболее динамично реагируют на изменение потоков вещества и энергии при трансформации природных систем в антропогенные. Все это накладывает свой отпечаток и на гидрохимический режим рек – динамику сезонных и многолетних изменений показателей, соотношение ионов в солевом составе воды, величину общей минерализации, концентрацию макро- и микрокомпонентов [3, 4].

Гидрохимические исследования наиболее крупных рек Армении и выявление их пространственных различий в зависимости от природно-антропогенных ландшафтов, в условиях которых реализуются различные системы природопользования, являются целью настоящей работы. Результаты исследований позволят выделить речные бассейны с измененными ландшафтами и обосновать необходимость природоохранных мероприятий.

Материал и методы

В качестве объектов исследований выбраны следующие наиболее крупные реки трансграничного бассейна Кура – Аракс (Армения, Грузия, Азербайджан, Иран, Турция): Дебед с притоком Памбак, Агстев, Севджур, Раздан с притоком Мармарик, Арпа, Воротан с притоком Горис, Вохчи и Мегри [1].

Армения занимает северо-восточную часть Армянского нагорья с территорией 29,8 тыс. км², про-

тяженностью с северо-запада на юго-восток – 360 км, с запада на восток – 200 км. Почти 90 % территории республики находится на высоте более 1000 м над уровнем моря и представляет собой сложное сочетание складчатых, складчато-глыбовых и вулканических гор, лавовых плато, межгорных аллювиальных и озерных котловин, узких и глубоких речных долин с различными ландшафтами. В геологическом отношении имеется почти полный стратиграфический разрез отложений геологических эпох. Среди металлических полезных ископаемых наиболее распространены месторождения золота, меди и молибдена. Характерными для территории Армении естественными природно-ландшафтными поясами являются пустынный, полупустынный, сухой горно-степной, горно-лесной, альпийский и нивальный. Из них преобладают горно-степной ландшафт, находящийся на высоте 1300–2400 м над уровнем моря, а также альпийские и субальпийские луга – на высоте 2100 м. Вертикальная поясность рельефа и различие в геологическом строении обусловили наличие сложной и разнообразной по своим типам речной сети. На участках своего верхнего и среднего течения реки имеют V-образные долины в виде глубоких ущелий (до 300–500 м), прорезанных в толще вулканогенных или осадочных пород. В нижнем течении русла рек большей частью проходят в предгорных и равнинных областях, сложенных аллювиальными и озерными отложениями. Для всех изученных рек характерны [1, 5]:

1) значительные колебания в величине уклонов водной поверхности и скоростей течения на отдельных участках;

2) большая извилистость, малая глубина и радиусы закруглений;

3) усиленное развитие перекатов, расстояние между которыми весьма незначительно.

Пункты отбора проб, некоторые морфологические и гидрологические характеристики рек и природно-антропогенные ландшафты их бассейнов приведены в табл. 1 [1, 5–7]. Пробы воды отбирались ежемесячно в течение 2004–2008 гг. на 13 стационарных пунктах наблюдений. Пробоотбор и пробообработка проводились по авторской стандартной операционной процедуре (SOP), разработанной в соответствии с требованиями международных стандартов. Контроль качества полевых работ осуществлялся анализом повторных и нулевых проб (Transport Blank, Equipment Blank и Transfer Blank). Пробы отбирались с середины реки в 0,5–1,5-литровые новые полиэтиленовые бутылки ПВХ. В качестве консерванта для тяжелых метал-

лов использовалась концентрированная азотная, а для фосфатов – серная кислота (до $\text{pH} \leq 2$) [8–10].

Определение физико-химических показателей проводилось в местах отбора проб с использованием анализаторов Horiba и HACH sensION. Остальные показатели определялись в лаборатории Центра эколого-ноосферных исследований НАН РА (сертификат 027/Т-029 ИСО/IEC17025-2005). Для анализа использовались следующие методы: pH – ISO-10523; электропроводность – ISO-7888; мутность – ISO-7027; $\text{O}_{2\text{раст}}$ – ISO-5813; HCO_3^- и CO_3^{2-} – ISO-9963-1; Cl – ISO-9297; SO_4^{2-} – ISO-9280; Ca^{2+} и Mg^{2+} – ISO-6059; Na^+ и K^+ – ISO-9964-3; $\text{N}_{\text{об}}$ – ISO 29441:2010; $\text{P}_{\text{об}}$ – ISO-6878; Hg – ISO-5666; Cd – ISO 5961; Co, Ni, Cu, Zn, Pb, Fe – ISO 8288:1986; As – ISO 17378-2:2014; Ag – EN 15586:2008. Точность аналитических измерений проверена анализом стандартных растворов и повторным анализом пробы воды ($n=3$).

Первичная обработка результатов анализов включала определение солевого состава воды и расчет статистических параметров [11, 12]. При подготовке массива данных для статистической обработки очень высокие и очень низкие значения не были удалены.

Для оценки особенностей химического состава использованы методы многомерной статистики – анализ главных компонент (PCA) и кластерный анализ. В основе первого лежит сокращение числа переменных путем выделения главных компонент, их классификация и определение структуры взаимосвязей между ними. Для вращения использован метод варимакс со стандартизацией Кайзера. Метод главных компонент полезен для ранжирования гидрохимических показателей по их дисперсии в соответствии с их вкладом (значимостью) в общую характеристику качества воды рек. Кластерный анализ дает возможность производить разбиение объектов не по одному, а по ряду признаков. Предварительно все гидрохимические данные нормированы (отношение отклонений от среднего значения к стандартному отклонению), а применение метода Уорда позволило «расширить» признаковое пространство и более четко выделить кластеры. Кластерный анализ использован для изучения пространственных изменений качества воды по пунктам наблюдений. В целом методы статистики – это инструмент, позволяющий выделить факторы, ответственные за изменение гидрохимических показателей, и изучить их пространственное распределение [13–15]. Статистическая обработка массива гидрохимических данных проведена с помощью программы STATISTICA 12.0.

Таблица 1

Пункты отбора проб воды, некоторые морфологические и гидрологические характеристики рек и природно-антропогенные ландшафты их бассейнов / Points of water sampling, some morphological and hydrological characteristics of rivers and natural-anthropogenic landscapes of their basins

| Река – пункт отбора проб | Длина, км Площадь водосбора, км ² [5] | Средне-годовой сток, м ³ /с [5] | Питание рек (% от годового стока) [5] | Природные ландшафты [1] | Антропогенные ландшафты [6, 7] |
|--------------------------|---|--|---------------------------------------|-------------------------|--|
| Дебед – Айрум | 152 4050 | 35,8 | Подземное (56) | Горно-лесной | Селитебный городской, селитебный сельский, горнопромышленный, агроландшафт |
| Памбак – Ширакамут | 86 1380 | 11,7 | Тало-снеговое (63) | Горно-степной | Селитебный городской, селитебный сельский, агроландшафт |
| Памбак – Ванадзор | | | | Горно-лесной | Селитебный городской, агроландшафт |
| Агстев – Фиолетово | 99 1610 | 8,22 | Тало-снеговое (45) | Горно-лесной | Селитебный сельский, агроландшафт |
| Агстев – Иджеван | | | | Сухой горно-степной | Селитебный городской, селитебный сельский, агроландшафт |
| Севджур – Ранчпар | 40 3540 | 33,2 | Подземное (78) | Полу- и пустынный | Селитебный городской, селитебный сельский, агроландшафт |
| Раздан – Масис | 141 2310 | 22,4 | – | Пустынный | Селитебный городской, селитебный сельский, агроландшафт |
| Мармарик – Агванадзор | 37 418 | 65,2 | Поверхностное (75) | Горно-степной | Селитебный сельский, горнопромышленный, агроландшафт |
| Арпа – Арени | 126 2175 | 21,9 | Поверхностное (58) | Полупустынный | Селитебный городской, селитебный сельский, агроландшафт |
| Воротан – Воротан | 119 2180 | 21,5 | Тало-снеговое (35) | Горно-степной | Селитебный городской, селитебный сельский, агроландшафт |
| Горис – Горис | 29 146 | 0,4 | Подземное (80) | Горно-степной | Селитебный городской, селитебный сельский, агроландшафт |
| Вохчи – Капан | 88 933 | 10,4 | Дождевое (34) | Горно-лесной | Селитебный городской, селитебный сельский, горнопромышленный, агроландшафт |
| Мегри – Мегри | 32 336 | 2,88 | Дождевое (70,5) | Горно-степной | Селитебный городской, селитебный сельский, горнопромышленные, агроландшафт |

Результаты и обсуждение

Результаты гидрохимических исследований рек Армении бассейна Кура – Аракс приведены в табл. 2. Температура воды колеблется в пределах 0,40–27,40 °С; величина водородного показателя – 6,38–8,82; окислительно-восстановительного потенциала – 20–370 мВ; электропроводности – 55 – 1570 мкСм/см; содержания взвешенных веществ – 1,10–495,50 мг/дм³; мутности – 1,0–460 NTU; содержание растворенного кислорода – 6,71–15,65 мг/дм³.

Пределы изменений величины общей минерализации составляют 99,1–1105,2; концентрации гидрокарбонатов – 26,9–390,6; хлоридов – 1,9–170,0; сульфатов – 6,6–284,3; кальция – 12,0–317,3; магния – 0,6–74,2; натрия – 3,1–148,0; калия – 0,9–17,1; общего фосфора – 0,01–4,89; общего азота – 0,53–61,21 мг/дм³, мышьяка – 0,70–9,57 мкг/дм³. Колебание концентраций тяжелых металлов составляет: серебро – 0,01–1,96; кадмий – 0,02–5,02; кобальт – 0,50–4,74; хром – 0,01–10,92; медь – 0,23–113,70;

ртуть – 0,07–25,54; марганец – 5,77–282,0; молибден – 0,30–89,50; никель – 0,24–44,58; свинец – 0,03–7,66; цинк – 4,88–283,0 мкг/дм³.

Химический состав речных вод относится к гидрокарбонатному классу, кальциевой группе малой и средней минерализации. Наблюдается общая тенденция генетической близости солевого состава воды всех изученных рек. Исключение составляют реки Раздан и Севджур. Химический состав воды первой из них в истоке формирует более минерализованная (700–750 мг/дм³) вода оз. Севан, имеющая гидрокарбонатно-магниевый состав, второй – поступление глубинных подземных вод.

Для представленных выше показателей характерны большой разброс значений вокруг среднего, меньшая выравненность значений и превышающая 33 % величина коэффициента вариации. Наличие экстремально высоких и экстремально низких концентраций (выбросов) вносит серьезное отклонение от нормального распределения, что отмечено по хлоридам, общему фосфору, азоту, практически всем тяжелым металлам.

Таблица 2

Статистические характеристики гидрохимических показателей рек Армении за 2004–2008 гг.
/ Statistical characteristics of hydrochemical indicators of the rivers of Armenia for 2004-2008

| Показатель | N | Min | Max | Mean | STD | CV |
|--|-----|------|--------|-------|-------|--------|
| Расход, м ³ /с | 780 | 0,05 | 107,0 | 11,4 | 13,8 | 121,0 |
| Температура, °С | 780 | 0,4 | 27,4 | 12,4 | 6,2 | 50,5 |
| pH | 780 | 6,38 | 8,82 | 7,59 | 0,46 | 6,08 |
| Электропроводность (Бс), мСм/см | 780 | 55,0 | 1570 | 463 | 327 | 71 |
| Содержание взвешенных веществ, мг/дм ³ | 780 | 1,1 | 495,5 | 45,8 | 50,5 | 110,2 |
| Eh, mV | 780 | 20 | 370 | 224,6 | 44,2 | 19,7 |
| Мутность, NTU | 780 | 1,0 | 460,0 | 42,2 | 62,7 | 148,6 |
| Раств. О ₂ , мг/дм ³ | 780 | 6,71 | 15,65 | 10,53 | 1,75 | 16,63 |
| TDS, мг/дм ³ | 780 | 99 | 1105 | 398 | 220 | 55 |
| HCO ₃ ⁻ , мг/дм ³ | 260 | 27 | 391 | 197 | 81 | 41 |
| SO ₄ ²⁻ , мг/дм ³ | 260 | 6,6 | 284,3 | 65,3 | 63,2 | 96,8 |
| Cl ⁻ , мг/дм ³ | 260 | 1,9 | 170,0 | 34,4 | 35,8 | 104,0 |
| Ca ²⁺ , мг/дм ³ | 260 | 12,0 | 317,3 | 49,0 | 25,8 | 52,7 |
| Mg ²⁺ , мг/дм ³ | 260 | 0,6 | 74,2 | 17,1 | 15,4 | 89,7 |
| Na ⁺ , мг/дм ³ | 260 | 3,1 | 148,0 | 31,9 | 31,5 | 98,8 |
| K ⁺ , мг/дм ³ | 260 | 0,01 | 4,89 | 0,16 | 0,33 | 203,8 |
| N _{total} , мг/дм ³ | 260 | 0,5 | 61,2 | 12,6 | 9,5 | 75,2 |
| P _{total} , мг/дм ³ | 260 | 0,01 | 4,89 | 0,16 | 0,33 | 203,8 |
| As, мкг/дм ³ | 312 | 0,70 | 9,57 | 2,15 | 1,68 | 78,11 |
| Ag, мкг/дм ³ | 780 | 0,10 | 1,96 | 0,19 | 0,22 | 112,08 |
| Cd, мкг/дм ³ | 780 | 0,02 | 5,02 | 0,09 | 0,26 | 287,23 |
| Co, мкг/дм ³ | 780 | 0,50 | 4,74 | 0,71 | 0,29 | 40,90 |
| Cr, мкг/дм ³ | 780 | 0,01 | 10,92 | 0,81 | 1,15 | 143,00 |
| Cu, мкг/дм ³ | 780 | 0,23 | 113,70 | 5,87 | 9,18 | 156,47 |
| Hg, мкг/дм ³ | 752 | 0,07 | 25,54 | 0,86 | 1,41 | 164,09 |
| Mn, мкг/дм ³ | 780 | 2,50 | 282,00 | 36,94 | 25,45 | 68,88 |
| Mo, мкг/дм ³ | 780 | 0,30 | 89,50 | 1,52 | 4,68 | 307,83 |
| Ni, мкг/дм ³ | 780 | 0,24 | 44,58 | 1,68 | 3,82 | 226,8 |
| Pb, мкг/дм ³ | 780 | 0,30 | 7,66 | 0,35 | 0,34 | 96,45 |
| Zn, мкг/дм ³ | 780 | 4,58 | 283,00 | 32,88 | 30,46 | 72,66 |

Матрица факторов гидрохимических показателей, приведенная в табл. 3, содержит два главных фактора, на долю которых приходится 65,7 % дисперсии выборки. Первый фактор содержит 47,9 %, а второй – 17,8 % дисперсии. Именно эти факторы в большей степени ответственны за изменение химического состава речных вод. Переменные, определяющие первый фактор, – это смешанные показатели, такие как расход и температура воды, физико-химические показатели, показатели солевого состава воды, общий азот, мышьяк, а также некоторые тяжелые металлы (ртуть, марганец и никель). В первом факторе сильно коррелируемыми между собой показателями являются Es, TDS, SO₄²⁻, Mg²⁺, Cl⁻, Na⁺; умеренно коррелируют температура воды, HCO₃⁻, Ca²⁺, K⁺, As; слабо коррелируют – расход воды, N_{total}, Mn, Pb. Выявлена обратная зависи-

мость между растворенным кислородом и температурой воды, а также всеми остальными показателями. Во втором факторе максимальные нагрузки имеют однородные показатели – только тяжелые металлы. Из них сильно коррелируемыми являются Cu, Mo, Zn и Cd, а умеренно – Ag, Co и Mn.

Определяющие минерализацию и солевой состав воды анионы и катионы первого фактора образуются в результате диссоциации хорошо растворимых солей NaCl, MgSO₄, Ca(HCO₃)₂, KHCO₃. Они могут быть отнесены к главным литогенным ионам, поступающим в воду в процессе химического выветривания и растворения горных пород, а также выщелачивания почв. Однако присутствие наравне с главными ионами азотсодержащих веществ и некоторых тяжелых металлов, несмотря на более слабую корреляцию, не исключает их антро-

погенное происхождение. Загрязняющие вещества поступают в реки из техногенных ландшафтов – селитебных городских, селитебных сельских, горнопромышленных, агроландшафтов.

Второй по силе воздействия фактор образует однородная группа показателей и поэтому в большей степени отражает естественные процессы формирования компонентного состава воды – хи-

мического выветривания пород и рудных минералов. Однако нельзя исключить также возможности техногенных потоков тяжелых металлов в некоторые реки из горнопромышленных ландшафтов, поскольку сильно коррелируемые показатели, такие как медь, молибден, цинк и кадмий, являются также типоморфными элементами руд и первичных ореолов месторождений Армении.

Таблица 3

Матрица главных факторов гидрохимических показателей / Matrix of main factors of hydrochemical indicators

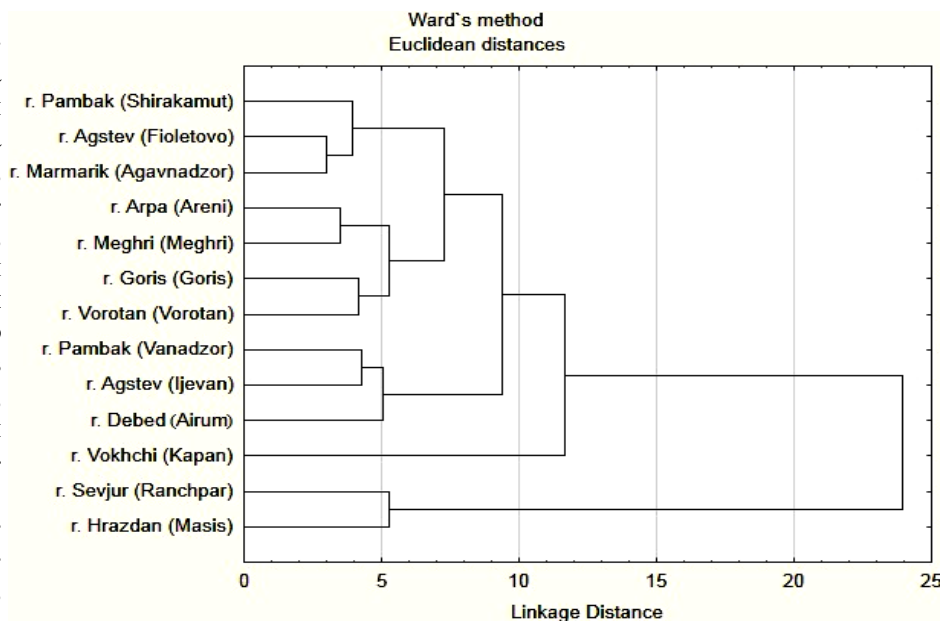
| Variable* | Factor 1 | Factor 2 | Variable* | Factor 1 | Factor 2 |
|-------------------------------|------------------|-----------|---------------------|----------------|-----------------|
| Расход | 0,66492** | 0,125411 | N _{total} | 0,75061 | -0,227141 |
| Temp | 0,86776 | 0,131654 | As | 0,89236 | 0,029974 |
| pH | -0,59792 | 0,194951 | Ag | -0,54173 | 0,699478 |
| Eh | -0,15675 | -0,283128 | Cd | -0,10677 | 0,929998 |
| Ec | 0,97072 | -0,058225 | Co | -0,08141 | 0,769230 |
| TSS | 0,14929 | 0,130182 | Cr | 0,51930 | 0,056687 |
| Turb | -0,23924 | 0,188808 | Cu | 0,01679 | 0,973977 |
| Растворенный кислород | -0,72576 | -0,151193 | Hg | 0,95497 | 0,086370 |
| TDS | 0,98189 | -0,019069 | Mn | 0,70427 | 0,628358 |
| HCO ₃ ⁻ | 0,90714 | -0,074972 | Mo | 0,00376 | 0,867532 |
| Cl ⁻ | 0,98583 | -0,028684 | Ni | 0,67350 | -0,088053 |
| SO ₄ ²⁻ | 0,98580 | 0,088284 | Pb | -0,29255 | 0,144274 |
| Ca ²⁺ | 0,90618 | 0,053540 | Zn | 0,21195 | 0,959042 |
| Mg ²⁺ | 0,96828 | -0,018524 | Expl, Var | 14,37136 | 5,326995 |
| Na ⁺ | 0,98903 | -0,047943 | % of total variance | 47,9 | 17,8 |
| K ⁺ | 0,81312 | -0,150829 | Cumulative % | 47,9 | 65,7 |
| P _{total} | 0,42847 | 0,024740 | | | |

* – метод анализа главных компонент, метод вращения: варимакс (Varimax raw), нормализация Кайзера;

** – выделены значения с нагрузками более 0,6 (Marked loadings are >,600000).

Результаты факторного анализа подтверждает и оценка качества воды рек, которая показала пятый класс качества [16] по электропроводности, содержанию сульфатов, натрия, общего азота, кадмия, кобальта, меди, марганца и молибдена. При этом каждая изученная река имеет свою матрицу главных факторов гидрохимических показателей, которые в виду ограничения объема не могут быть приведены в настоящей статье.

По результатам кластерного анализа выделены каскадные системы участков рек, которые отнесены к различным ландшафтным системам (рисунок).



Дендрограмма кластерного анализа массива гидрохимических данных, по пунктам отбора проб воды / Dendrogram of cluster analysis of the hydrochemical data grouped by water sampling points

На дендограмме массива гидрохимических данных выделены 4 кластерные единицы. В первый кластер вошли участки р. Памбак (Ширакамут), Агстев (Фиолетово), Мармарик (Агавнадзор) – это верхние и средние участки рек, в которых преобладают агро- и селитебные сельские ландшафты. Второй кластер образуют р. Арпа (Арени), Мегри (Мегри), Горис (Горис) и Воротан (Воротан), в бассейнах которых преобладают селитебные сельские и селитебные городские ландшафты. Трудно объяснить причину нахождения в этом кластере р. Мегри, которая находится в зоне влияния горно-промышленного ландшафта, где разрабатываются медно-молибденовые и золоторудные месторождения. Третий кластер включает участки нижних течений рек Памбак (Ванадзор), Агстев (Иджеван) и Дебед (Айрум), где преобладают селитебные городские и селитебные сельские ландшафты. В четвертый кластер входят р. Раздан (Масис) и Севджур (Ранчпар), которые, как уже отмечалось, по условиям формирования качества воды и уровням загрязненности в корне отличаются от остальных рек. Отдельно находится р. Вохчи (Капан), которую можно отнести к горнопромышленной ландшафтной системе. В отличие от остальных рек, Вохчи является наиболее загрязненной по тяжелым металлам и в большей степени испытывает влияние со стороны эксплуатируемых месторождений, горно-обрабатывающих предприятий, действующих и рекультивированных хвостохранилищ, производственных сточных вод.

В пределах бассейна Кура – Аракс находятся значительные запасы подземных вод, которые в основном сосредоточены в областях развития плиоценово-четвертичных лав и в межгорных впадинах. Подземные воды, формирующиеся в пределах межгорных впадин, практически не принимают участия в питании рек, в то время как роль родникового стока областей развития плиоценово-четвертичных лав имеет определяющее значение. Питание большинства горных рек Армении осуществляется преимущественно нисходящим подземным стоком, или подпорно-нисходящими водами. Характер подземного питания рек отражает ход поступления атмосферных осадков и талых вод в русла рек. С началом половодья в горных реках происходит увеличение подземного питания и максимум его практически совпадает с гребнем основной волны половодья. В результате для большинства рек (Армянское вулканическое нагорье и южная часть Джавахетского нагорья) доля подземного стока в общем речном стоке составляет до 70–75 %, величина среднего многолетнего модуля подземного стока – 6–8 л/с·км². При этом основные подластовые потоки разгружаются на отметках до 2000 м,

выше которых доля подземного питания рек уменьшается [6, 7]. В целом высокогорные районы менее подвержены антропогенному воздействию. Здесь речные воды находятся под влиянием только селитебных сельских и агроландшафтов.

В нижнем и среднем течении рек роль ландшафтов в формировании качества воды выражается в участии водовмещающих пород и почв, морфологических и гидродинамических факторов, процессов углекислого выщелачивания, внутригодовой смены фаз водного режима и др. Здесь же в реки поступают техногенные потоки с селитебных городских, селитебных сельских, горнопромышленных и агроландшафтов, что приводит к изменению ряда гидрохимических показателей. Так, если в верховьях рек и их притоков средние значения электропроводности воды в р. Памбак (Ширакамут) составляют 380; р. Агстев (Фиолетово) – 250; р. Мармарик (Агавнадзор) – 260 мкСм/см, то вниз по течению электропроводность рек увеличивается и составляет 420 (Памбак – Ванадзор), 380 (Агстев – Иджеван), 1270 (Раздан – Масис) мкСм/см соответственно. Та же картина характерна для мутности воды: в тех же пунктах в верхнем течении рек она составляет 29,0; 43,4; 30,0, а в нижнем – 65,8; 75,8; 32,0 NTU соответственно. Заметно увеличиваются также и концентрации практически всех тяжелых металлов.

Выявленные закономерности изменчивости химического состава малых рек Армении характерны и для горных районов России. Так, в частности, в реках Центрального Кавказа (Баксан, Черек, Терек и др.) мобилизация и транспорт тяжелых металлов усиливаются в нижнем течении рек, где отмечается повышение содержания молибдена, свинца, хрома и др. [17]. Однако известны и исключения, когда концентрации металлов и уровень загрязнения в целом выше в верховьях рек, что обусловлено наличием здесь рудных месторождений (р. Малка, Баксан и Чегем) [18] либо интенсивным хозяйственным освоением данной территории (р. Теберда) [19].

Основные выводы

Для всех изученных рек Армении прослеживается выраженная тенденция изменения концентраций химических веществ в зависимости от высотной зональности ландшафтов и типов природопользования в бассейнах рек. В верхних течениях рек влияние ландшафтов на качество воды наименьшее. Здесь малую минерализацию и выраженный гидрокарбонатно-кальциевый состав воды формируют атмосферные осадки, климатические и гидроморфологические факторы, процессы гидролитического углекислого выщелачивания, а также

селитебные сельские и агроландшафты. В нижних течениях рек роль ландшафтов повышается, а в некоторых реках имеет определяющее значение. Изменение качества воды обусловлено техногенными потоками загрязняющих веществ, поступающих из селитебных городских, селитебных сельских, горнопромышленных и агроландшафтов.

Результаты гидрохимических исследований за 5-летний период показали, что из 29 изученных гидрохимических показателей для характеристики качества воды рек индикаторными являются 7 из них: электропроводимость (минерализация), натрий, хлориды, сульфаты, медь, цинк и молибден. По степени экологической напряженности можно выделить р. Памбак (Ванадзор), Агстев (Иджеван), Дебед (Айрум), Раздан (Масис) и Севджур (Ранчпар), где преобладают селитебные городские и селитебные сельские ландшафты, а также р. Вохчи (Капан), которую можно отнести к горнопромышленной ландшафтной системе.

Результаты гидрохимических исследований, характеризующие состояние основных рек Армении за 2004–2008 гг., могут быть распространены и на современный период ввиду отсутствия новых крупных источников загрязнения.

Литература

1. Атлас Армянской ССР. Ереван : Изд-во АН Арм. ССР и Гл. упр. геодезии СССР, 1961. 103 с.
2. Перельман А.И., Касимов Н.С. Геохимия ландшафта. М. : Астрель-2000, 1999. 610 с.
3. Отчет национального статистического управления за 2008–2014 гг. Окружающая среда и природные ресурсы (на арм. яз.) URL: <http://www.armstat.am> (дата обращения: 12.02.2017).
4. Никаноров А.М. Гидрохимия. СПб. : Гидрометеоиздат, 2001. 444 с.
5. О создании бассейнов территориального управления Республики Армения и утверждении их планов : Решение Правительства РА № 1749 от 09.12.2004 г. (на арм. яз.).
6. Ресурсы поверхностных вод СССР. Бассейн реки Аракс. Т. 9, вып. 2. М., 1973. 471 с.
7. Ресурсы поверхностных вод СССР. Западное Закавказье. Т. 9, вып. 1. Л., 1969. 310 с.
8. ГОСТ 31861-2012. Вода. Общие требования к отбору проб. URL: <http://www.docipedia.ru/document/5153316> (дата обращения: 12.02.2017).
9. ISO 5667:2006 (E). Sampling. Part 1–14. Geneva, 2006.
10. Standard Operating Procedures for Surface Water Quality Sampling, Prepared by the Surface Water Section / ed. J.D. Jones. Phoenix, 2012.
11. Lambarkis N., Antonakos A., Panagopoulos G. The use of multicomponent statistical analysis in hydro-

geological environmental research // Water Res. 2004. № 38 (7). P. 1862–1872.

12. Лагутин М.Б. Наглядная математическая статистика. М. : БИНОМ, 2007. 471 с.

13. Олдендерфер М.С., Блэшфилд Р.К. Факторный, дискриминантный и кластерный анализ. М., 1989. 215 с.

14. Айвазян С.А., Мхитарян В.С. Прикладная статистика. Т. 1 : Основы эконометрики. М. : ЮНИТИ-ДАНА, 2001. 656 с.

15. Kaiser H.F. The application of electronic computers to factor analysis // Educ. Psychol. Meas. 1960. № 20. P. 141–151.

16. Об определении норм обеспечения качества воды отдельных водных бассейнов Республики Армения в зависимости от особенностей местности: Решение Правительства РА № 75 от 27.01.2011 г. (на арм. яз.).

17. Воробьева Т.И., Гуцина Л.П., Жинжакова Л.З., Реутова Т.В., Чередник Е.А., Машуков Х.Х. Формирование микроэлементного состава в речных водах Центрального Кавказа // Современные фундаментальные проблемы гидрохимии и мониторинга качества поверхностных вод России : материалы науч.-практ. конф. с междунар. участием. Азов, 8–10 июня 2009 г. Ростов н/Д., 2009. Ч. 1. С. 39–42.

18. Реутова Т.В., Дреева Ф.Р., Реутова Н.В. Пространственное распределение концентраций токсичных тяжелых металлов в речных водах горной зоны Кабардино-Балкарской Республики // Изв. Кабардино-Балкарского науч. центра РАН. 2014. Т. 62, № 6. С. 99–105.

19. Онищенко В.В., Дега Н.С., Мамчурев И.М. Эколого-географический анализ бассейна реки Теберды в условиях хозяйственно-рекреационного функционирования // Арктика. Естеств. и техн. науки. 2016. № 6.

References

1. Atlas Armyanskoi SSR [Atlas of the Armenian SSR]. Erevan, Izd-vo AN Arm. SSR i Gl. upr. geodezii SSSR, 1961, 103 p.
2. Perel'man A.I., Kasimov N.S. *Geokhimiya landshafta* [Geochemistry of the landscape]. Moscow, Astreya-2000, 1999, 610 p.
3. *Otchet natsional'nogo statisticheskogo upravleniya za 2008–2014 gg. Okruzhayushchaya sreda i prirodnye resursy* [Report of the National Statistical Office for 2008–2014. Environment and natural resources] (in Armenian). Available at: <http://www.armstat.am> (accessed 12.02.2017).
4. Nikanorov A.M. *Gidrokimiya* [Hydrochemistry]. Saint Petersburg, Gidrometeoizdat, 2001, 444 p.
5. *O sozdanii basseinov territorial'nogo upravleniya Respubliki Armeniya i utverzhenii ikh planov* [On the establishment of basins of territorial administration of the Republic of Armenia and approval of their plans]:

Reshenie Pravitel'stva RA No. 1749 ot 09.12.2004 g. (in Armenian).

6. *Resursy poverkhnostnykh vod SSSR. Bassein reki Araks* [Resources of surface waters of the USSR. The basin of the Araks River]. Vol. 9, iss. 2. Moscow, 1973, 471 p.

7. *Resursy poverkhnostnykh vod SSSR. Zapadnoe Zakavkaz'e* [Resources of surface waters of the USSR. Western Transcaucasia]. Vol. 9, iss. 1. Leningrad, 1969, 310 p.

8. *GOST 31861-2012. Voda. Obshchie trebovaniya k otboru prob* [OST 31861-2012. Water. General requirements for sampling]. Available at: <http://www.docipedia.ru/document/5153316> (accessed 12.02.2017).

9. *ISO 5667:2006 (E). Sampling*. Part 1–14. Geneva, 2006.

10. *Standard Operating Procedures for Surface Water Quality Sampling, Prepared by the Surface Water Section*. Ed. J.D. Jones. Phoenix, 2012.

11. Lambarkis N., Antonakos A., Panagopoulos G. The use of multicomponent statistical analysis in hydrogeological environmental research. *Water Res.* 2004, No. 38 (7), pp. 1862-1872.

12. Lagutin M.B. *Naglyadnaya matematicheskaya statistika* [Visual mathematical statistics]. Moscow, BINOM, 2007, 471 p.

13. Oldenderfer M.S., Bleshfild R.K. *Faktornyi, diskriminantnyi i klasternyi analiz* [Factorial, discriminant and cluster analysis]. Moscow, 1989, 215 p.

14. Aivazyan S.A., Mkhitaryan V.S. *Prikladnaya statistika. T. 1 : Osnovy ekonometriki* [Applied statistics. Vol. 1. Fundamentals of Econometrics]. Moscow, YuNITI- DANA, 2001, 656 p.

15. Kaiser H.F. The application of electronic computers to factor analysis. *Educ. Psychol. Meas.* 1960, No. 20, pp. 141-151.

16. *Ob opredelenii norm obespecheniya kachestva vody ot del'nykh vodnykh basseinov Respubliki Armeniya v zavisimosti ot osobennostei mestnosti* [On the definition of water quality standards for individual water basins of the Republic of Armenia, depending on the characteristics of the terrain]: Reshenie Pravitel'stva RA No. 75 ot 27.01.2011 g. (in Armenian).

17. Vorob'eva T.I., Gushchina L.P., Zhinzhakova L.Z., Reutova T.V., Cherednik E.A., Mashukov Kh.Kh. [Formation of trace element composition in the river waters of the Central Caucasus]. *Sovremennye fundamental'nye problemy gidrokhimii i monitoringa kachestva poverkhnostnykh vod Rossii* [Modern fundamental problems of hydrochemistry and surface water quality monitoring in Russia]. Materials of the scientific and practical conference with international participation. Azov, July 8-10, 2009. Rostov-on-Don, 2009, ch. 1, pp. 39-42.

18. Reutova T.V., Dreeva F.R., Reutova N.V. Prostranstvennoe raspredelenie kontsentratsii toksichnykh tyazhelykh metallov v rechnykh vodakh gornoi zony Kabardino-Balkarskoi Respubliki [Spatial distribution of concentrations of toxic heavy metals in river waters of the mountainous zone of the Kabardino-Balkarian Republic]. *Izv. Kabardino-Balkarskogo nauch. tsentra RAN.* 2014, vol. 62, No. 6, pp. 99-105.

19. Onishchenko V.V., Dega N.S., Mamchuev I.M. Ekologo-geograficheskii analiz basseina reki Teberdy v usloviyakh khozyaistvenno-rekreatsionnogo funktsionirovaniya [Ecological and geographical analysis of the Teberda river basin in conditions of economic and recreational functioning]. *Apriori. Estestv. i tekhn. nauki.* 2016, No. 6.

УДК 911.53 (282.2)

DOI 10.23683/0321-3005-2017-2-84-91

МЕТОДИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ К ЛАНДШАФТНОМУ ПЛАНИРОВАНИЮ БАССЕЙНА Р. САЛГИР

© 2017 г. А.Н. Власова¹

¹Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского, Симферополь, Россия

METHODOLOGICAL APPROACHES TO LANDSCAPE PLANNING OF SALGIR RIVER BASIN

A.N. Vlasova¹

¹Vernadsky Crimean Federal University, Simferopol, Russia

Власова Анна Николаевна – магистр, преподаватель, Та-
врический колледж, Крымский федеральный университет
им. В.И. Вернадского, ул. Киевская, 116 б, г. Симферополь,
295034, Россия, e-mail: avlas05@mail.ru

Anna N. Vlasova – Master, Lecturer, Taurida College,
Vernadsky Crimean Federal University, Kievskaya St., 116 b,
Simferopol, 295034, Russia, e-mail: avlas05@mail.ru

Рассмотрена методика ландшафтного планирования, выделены особенности ландшафтного планирования для бассейновых территорий, интегрированных постоянным однонаправленным потоком вещества и энергии. Процедуру ландшафтного планирования речных бассейнов предлагается дополнить изучением позиционно-динамической структуры территории, что дает возможность уточнить границы водоохраных зон с учетом ландшафтных границ. На основе анализа природной подсистемы современного ландшафта, разных пространственных моделей ландшафтной структуры, изучения существующего землепользования, оценок значимости и чувствительности ландшафтов, определения антропогенной преобразованности и экологического состояния рек системы Салгира и их бассейнов выделены зоны ландшафтно-экологических ограничений. Составлена схема ландшафтного планирования бассейна р. Салгир (ландшафтная программа), предложены рекомендации по целевому использованию и улучшению водно-экологической ситуации изучаемой территории.

Ключевые слова: ландшафтное планирование, речной бассейн, бассейновый подход, позиционно-динамическая структура ландшафта, оценка значимости и чувствительности ландшафта.

The article describes the landscape planning procedure, the features of landscape planning of basin areas as systems integrated by unidirectional flow are considered. It is proposed to supplement the procedure of landscape planning of river basins by researching of position-dynamic structure of the territory; it allows to specify the boundaries of water protection zones taking into account the landscape features. On the basis of analysis of modern landscapes' natural subsystem, landscape structure (different spatial models), researching existing land-use, estimation the significance and sensitivity of landscapes, determining the anthropogenic transformation and ecological condition of Salgir river and its basin, zones of landscape-ecological limitations are allocated. The scheme of landscape planning of Salgir river basin is made (the landscape program), recommendations for improvement of water and ecological situation in the basin territory are offered.

Keywords: landscape planning, river basin, basin approach, position-dynamic structure of the landscape, estimation of significance and sensitivity of landscape.

Республика Крым относится к регионам с недостаточной водообеспеченностью, поэтому поиск сбалансированных способов защиты и восстановления водных ресурсов полуострова является актуальным. Для регламентирования природопользования на территориях, которые окружают водные объекты, эффективным является ландшафтное планирование.

Современная теория ландшафтного планирования разрабатывается в России А.Н. Антиповым, А.В. Дроздовым, Е.Ю. Колбовским, В.А. Николаевым, Л.К. Казаковым, К.Н. Дьяконовым, А.В. Хорошевым, Е.А. Позаченюк. Ландшафтное планирование представляет собой совокупность методических инструментов, используемых для построения такой пространственной организации деятельности

общества в конкретных ландшафтах, которая обеспечивала бы устойчивое природопользование и сохранение основных функций этих ландшафтов [1, 2]. Российскими учеными был адаптирован немецкий опыт ландшафтного планирования [1], основой которого является концепция зонирования территории для приспособления различных типов природопользования к естественной ландшафтной структуре, которая основывается на представлениях об устойчивости, значимости и емкости природного ландшафта.

Объектами ландшафтного планирования выступают различные территории. Бассейны рек выделяются в качестве оптимальной территориальной единицы для изучения ландшафтов и природопользова-

ния, так как они имеют природную обусловленность и четко выделяются на местности и на карте. Постоянный односторонний поток вещества и энергии служит интегрирующим фактором всего бассейна реки, изменения на водосборе отражаются на качестве и количестве речных вод. С точки зрения бассейнового подхода, применяемого в разных странах мира, управление водохозяйственным комплексом переносится с водных объектов на весь водосбор [3], такой подход позволит обеспечить максимальный экономический и природоохранный эффекты. Целью ландшафтного планирования бассейновых территорий является поддержание стокотрансформирующего, стокорегулирующего и водоохранного потенциалов природных комплексов.

Цель работы – провести ландшафтное планирование бассейна р. Салгир для уточнения мероприятий по природопользованию. В ходе выполнения работы были решены следующие задачи:

- адаптированы методические подходы к ландшафтному планированию бассейновых территорий с использованием ГИС-технологий;
- составлена схема ландшафтного планирования (ландшафтная программа) бассейна р. Салгир.

Материалы и методы

Исходными материалами для составления схемы ландшафтного планирования (ландшафтной программы) служат топографические карты разных масштабов, геологические карты, карты почв и растительности, доступные в сети Интернет материалы дистанционного зондирования. Использовался большой объем фоновых и статистических данных. Полевой этап исследований включал маршрутные наблюдения, отбор проб воды для химического анализа, комплексное изучение природной и хозяйственной подсистем ландшафта в пределах ключевых участков с занесением данных в соответствующие бланки описания. Обработка картографического материала и других данных производилась с помощью программного комплекса ArcGIS 9.3, что позволило выполнить ряд аналитических процедур. В работе применялись традиционные и новые методы исследований: литературно-аналитический, сравнительно-географический, математический, метод ландшафтного картографирования и геоинформационного моделирования.

Включение в методику ландшафтного планирования анализа различных пространственных моделей ландшафта связано с особенностью бассейновых территорий. Позиционно-динамическая структура показывает зависимость природных условий и процессов от высоты местности, положения ландшафтных контуров относительно ландшафтно значимых рубежей, вдоль которых происходит изменение интенсивности и направления горизонталь-

ных потоков вещества и энергии [4]. В пределах позиционно-динамических единиц интенсивность современных природных процессов в целом одинакова. Для обоснования ландшафтно-экологических мероприятий в пределах речного бассейна эффективно сочетание бассейнового и позиционно-динамического подходов, которые наиболее полно отражают тесноту связей экологического состояния водных ресурсов и свойств окружающих ландшафтов [5]. В ходе работы автором была разработана методика выделения позиционно-динамической структуры бассейна реки [5].

Результаты и обсуждение

Методические подходы к ландшафтному планированию применялись при составлении схемы ландшафтного планирования крупнейшего на полуострове бассейна реки Салгир (длина реки – 204 км, площадь водосбора – 3750 км²). Салгир берет начало на северном макросклоне Главной гряды Крымских гор, пересекает Внутреннюю и Внешнюю предгорные гряды, Центральную-Крымскую равнину и Присивашскую низменность, впадает в залив Сиваш Азовского моря, проходя через зоны горных лесов, лесостепи и степи. Самый крупный приток Салгира – Бюк-Карасу длиной 86 км, площадь его бассейна 1160 км²; река впадает в Салгир в нижнем течении. Другие крупные притоки – р. Зуя с Бештереком, Бурлуца, в верховьях – р. Ангара, Малый Салгир и др. Природные ландшафты сильно преобразованы, что связано с существованием сети сельских населенных пунктов, 7 поселков городского типа и двух городов (Симферополь – 360 тыс. чел., Белогорск – 25 тыс. чел.). Некоторые методические подходы апробировались при изучении ключевого участка – бассейна р. Малый Салгир (длина – 22 км, площадь бассейна – 96,1 км²).

Ландшафтное планирование бассейна р. Салгир проходило в несколько этапов:

1. Обоснование масштаба проработки, который определяется детальностью изучаемого вопроса и размером территории. При анализе различной картографической информации использовались карты масштаба 1:50 000 и мельче. Итоговая схема ландшафтного планирования создавалась на базовой карте 1:500 000, в соответствующей терминологии это ландшафтная программа развития территории. Объектом исследования в работе является речной бассейн р. Салгир как современный ландшафт, состоящий из природной и хозяйственной подсистем.

2. Изучение природных ландшафтообразующих компонентов и ландшафтной структуры речного бассейна. В ходе работы была собрана пространственная информация о рельефе, литологии, поверхностных водах, почвенном покрове, растительных сообществах бассейна р. Салгир. Разнообразный

картографический материал, статистические и литературные данные загружаются в геоинформационную систему, где проводится дальнейший анализ. Исходя из свойства полиструктурности ландшафта, выделено несколько ландшафтных территориальных структур, которые проанализированы с помощью ГИС-технологий:

2.1. Морфологическая структура бассейна р. Салгир была проанализирована на основе ландшафтно-типологической карты Крыма (1:200 000), составленной Г.Е. Гришанковым [6]. Бассейн р. Салгир пересекает все ландшафтные уровни Крыма: гидроморфный, плакорный, низкогорный, среднегорный. Низко- и среднегорные лесные, лесостепные и горно-луговые ландшафты занимают 18 % площади бассейна, 49 % – предгорные (степные и куэстовые лесостепные) ландшафты, 20 % – типичные бедноразнотравные степи на плакорных равнинах, 11 % – низменные слабодренированные равнины с галофитными лугами, степями.

2.2. При изучении бассейновой структуры с помощью ArcGIS и приложения ArcHydro уточнены элементы эрозионной сети, выделены границы микроводосборов, определены порядки бассейнов рек (по Р. Хортону). Бассейн р. Салгир имеет 6-й порядок, основные притоки – 2–3-й порядок.

2.3. Позиционно-динамическая ландшафтная структура изучена на примере бассейнов р. Малый Салгир, Ангара, а также участка в равнинной части бассейна р. Салгир. В результате анализа уклонов поверхности, экспозиции склонов, проведения каркасных линий рельефа (водоразделов и тальвегов), изучения почвенно-растительного покрова выделены позиционно-динамические ландшафтные контуры (полосы). Бассейны р. Малый Салгир и Ангара характеризуются разнообразием склоновых ландшафтных полос, в формировании которых главную роль играет рельеф. Ландшафтные полосы, имеющие общую позицию по отношению к гипсометрическим рубежам и схожие характеристики, были объединены в 3 группы ярусов [5]. В каждом из вышеназванных участков группы ярусов были объединены в 5, 4 и 3 позиционно-динамических района по однонаправленности горизонтальных потоков. Составлены схемы позиционно-динамической структуры, показывающие зависимость природных условий от рубежей, вдоль которых происходит изменение вещественно-энергетических потоков. Корректировка границ выделенных ландшафтных единиц в пределах бассейнов проводилась во время маршрутных наблюдений.

2.4. Экоцентрически-сетевая структура, состоящая из экоцентров, выполняющих средообразующие функции, и вытянутых экологических коридоров, обеспечивающих сохранение ландшафтного разнообразия на основе массо- и энергопереноса,

была выделена для всего бассейна. Природные территории бассейна р. Салгир являются элементами экосети национального и регионального уровней, на локальном уровне экологическая сеть ранее не составлялась. Природными ядрами региональных экоцентров являются особо охраняемые природные территории (заповедник, заказники, памятники природы – 2,8 % площади бассейна); территории, приоритетные для сохранения биоразнообразия разных категорий. Локальные экоцентры – разреженные лесные массивы, площадные водные объекты, участки степной растительности, солончаки, останцы. В качестве региональных гидрологических экокоридоров выступают долины р. Салгир и Бююк-Карасу, локальные – долины малых рек и днища балок. Естественная экоцентрически-сетевая структура дополняется природно-антропогенными элементами: искусственно созданными зелеными зонами населенных пунктов (ботанический сад, парки), лесополосами, буферными и охранными зонами.

2.5. Определены значимость и чувствительность ландшафтов относительно состояния водных ресурсов. С позиций ландшафтно-гидрологического подхода значимость – это реализованный в конкретных процессах водно-ресурсный потенциал ландшафтов, мерой значимости территории принимается модуль стока с ландшафта в межень [7]. Чувствительность территории рассматривается как возможность реализации процессов восполнения динамических запасов влаги и бассейнового регулирования водоотдачи, что обеспечивает сток рек в меженные периоды, что зависит от влагоемкости и инфильтрационных способностей почвогрунтов [1]. В работе [8] автором были оценены значимость и чувствительность ландшафтов бассейна р. Малый Салгир. Для этого были определены критерии оценки значимости и чувствительности с учетом природных и хозяйственных особенностей конкретного бассейна, по совокупности признаков и выбранных критериев выделены участки, отличающиеся по гидрологической значимости и чувствительности. Составлена соответствующая карта, используемая для уточнения процедуры ландшафтного планирования на локальном уровне.

3. Изучение хозяйственной подсистемы бассейна р. Салгир.

3.1. Анализ современного землепользования был проведен на основе карты современных ландшафтов, включающей характеристики природных компонентов и сведения о реальном использовании земель. Такая карта была составлена для бассейна р. Салгир на основе топографических карт различных масштабов, космических снимков Landsat и данных маршрутных наблюдений. Большую площадь бассейна занимают сельскохозяйственные угодья (64 %, пашни, многолетние насаждения,

сенокосы), расположенные преимущественно в равнинной части. Больше всего площадь сельхозугодий в бассейнах р. Зуя (76,7 %) и Бештерек (75,6 %), меньше всего – в бассейне р. Ангара (11,6 %). Селитебные территории занимают 5 % площади всего бассейна р. Салгир, наибольшая площадь земель – под застройкой в бассейне р. Малый Салгир (29,9 %). В пределах бассейна Салгира лесистость составляет 13,8 %, что превышает среднюю для Крыма, но меньше рекомендуемых (исключением является бассейн р. Ангара).

3.2. Оценка антропогенной преобразованности по П.Г. Шищенко [9, 10] проводилась на основе полевых исследований и картографических материалов, составленных автором. В целом бассейн р. Салгир средне преобразован, наименее преобразованные ландшафты находятся в горной части, в месте формирования стока рек системы Салгира. Равнинная часть бассейна очень сильно преобразована, что совпадает с районами потребления водных ресурсов. Наименее преобразованы ландшафты бассейна р. Ангара, самые преобразованные – в бассейне р. Малый Салгир. На естественные ландшафты повлияли стихийные процессы урбанизации в конце XX в. и большая доля сельскохозяйственных угодий (пашни). К конфликтам природопользования в пределах бассейна относятся нарушения режима водоохранной зоны промышленными и сельскохозяйственными предприятиями, сброс неочищенных сточных вод в реки, загрязнение от транспорта, свалки твердых бытовых отходов.

3.3. Экологическое состояние бассейна р. Салгир оценивалось по методикам З.В. Тимченко [11] и А.В. Яцыка [12]. Пробы воды для проведения анализов были взяты автором в 5 реках системы Салгира. В соответствии с методикой З.В. Тимченко сначала по результатам химических анализов оценивалось гидроэкологическое состояние водных ресурсов рек, далее оценка распространялась на весь бассейн с учетом его ландшафтных особенностей. На региональном уровне были отмечены участки бассейна с устойчивым (Ангара, Бурульча, Танасу), среднеустойчивым с очагами неустойчивости состоянием (Зуя). Остальные реки, их бассейны и бассейн реки Салгир в целом считаются неустойчивыми (особенно в нижнем течении). На локальном уровне по методике А.В. Яцыка была уточнена оценка экологического состояния бассейнов с учетом использования земельных ресурсов (сельхозосвоенность, урбанизация, эродированность) и качества воды. Рассчитан индекс загрязненности воды (ИЗВ), по результатам химического анализа вод по нескольким показателям вода р. Малый Салгир – чистая (II класс качества), по нитритам – загрязненная. Общее состояние бассейна р. Малый Салгир удовлетворительное, на состояние ландшафтов влияют современная структу-

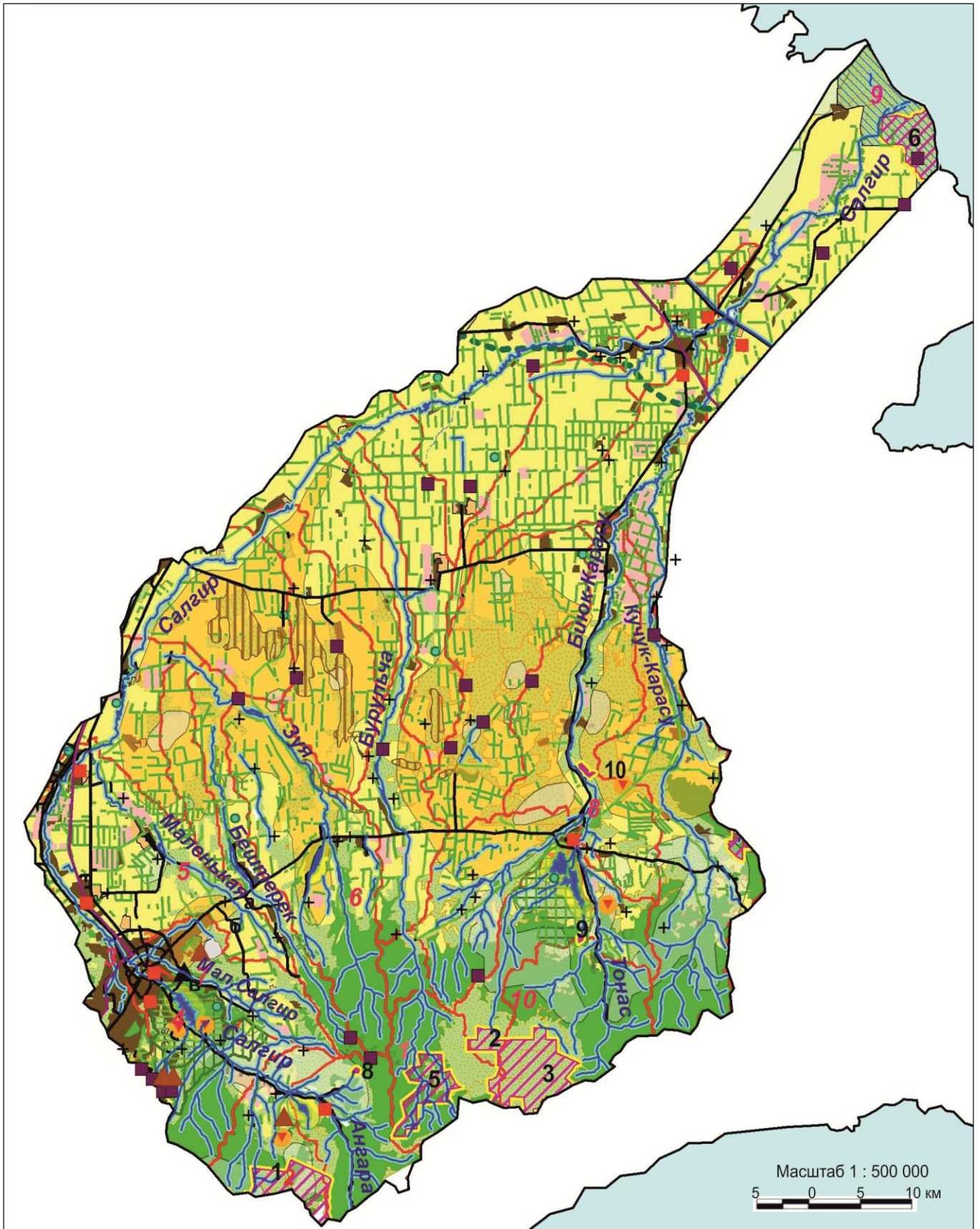
ра землепользования и низкая лесистость.

3.4. Дополнена схема экологической сети бассейна р. Салгир, к единицам естественной экоцентрически-сетевой структуры были добавлены зоны ландшафтно-экологических ограничений – водоохранные зоны рек и буферные зоны ООПТ. Нормативные границы водоохранных зон уточнены с учетом ландшафтно-экологических условий. Ширина водоохранных зон рек, согласно Водному кодексу РФ [13], зависит от их длины, например, для рек длиной до 50 км она составляет 100 м, при длине 50–100 км ширина водоохранной зоны 200 м и т.д. Согласно ландшафтному подходу в качестве внешних границ водоохранных зон использовались границы пойменно-террасового ландшафтного яруса, например, ширина водоохранной зоны может быть увеличена для р. Малый Салгир от 100 до 250 м, для р. Бююк-Карасу – от 200 до 350 м.

4. Зонирование бассейна р. Салгир проведено по приоритетным направлениям экологически обоснованного природопользования. С учетом наложения полученных ранее карт и результатов маршрутных наблюдений составляется итоговая схема ландшафтного планирования. Для бассейна р. Малый Салгир автором был предложен ландшафтный план (рабочий масштаб 1:50 000) [14], для всего бассейна р. Салгир составлена ландшафтная программа (рабочий масштаб 1:200 000), указаны направления развития территории, позволяющие улучшить качество и увеличить количество вод. На схемах ландшафтного планирования выделены следующие зоны (рисунок):

А. Зона сохранения особо нуждающихся в охране ареалов – территории, являющиеся средоформирующим каркасом, которые рекомендуется вывести из использования (особо охраняемые природные территории, участки наибольшего видового и ландшафтного разнообразия, экоридоры).

Это участки бассейна, приоритетные для сохранения ландшафтного разнообразия, где рекомендуется отказ от использования территорий с установлением режима, близкого к заповедному. В пределах бассейна р. Салгир находятся 5 региональных экологических центров (природные ядра – 1 природный заповедник, 5 заказников, 1 заповедное урочище, 3 памятника природы). К участкам, особо нуждающимся в охране, относятся яйлинские горно-луговые, горно-степные сообщества, сосновые, буковые, дубовые леса, где формируется сток основных рек системы Салгира. Эти территории выполняют водоохранную и почвозащитную функции, обладают высоким средообразующим потенциалом и биоразнообразием, стабильным подземным притоком в реки в меженные периоды. Также приоритетными для охраны являются дельта р. Салгир и участки естественной растительности в равнинной части.













УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

Зона сохранения особо нуждающихся в охране ареалов

| | |
|---|--|
| <p>особо охраняемые природные территории:</p> <p>1 - Крымский природный заповедник 2 - геологический заказник «Горный карст Крыма» 3 - ботанический заказник Караби-Яйла 4 - ботанический заказник Кубалач 5 - ботанический заказник Тырке 6 - ботанический заказник Присивашский 7 - заповедное урочище «Яйла Чатырдага» 8 - геологический памятник природы Кизил-Коба 9 - гидрологический памятник природы урочище Карасу-Баши 10 - комплексный памятник природы Ак-Кая</p> | <p>территории, приоритетные для сохранения биоразнообразия</p> <p>категория наивысшей приоритетности 1 - Долгоруковская Яйла 2 - Чатырдаг-Яйла</p> <p>очень высокой приоритетности 3 - Дубки 6 - Зуйские дубки 4 - дубки у с. Залесье 7 - Битак 5 - Беки-Элинские дубки 8 - Белогорский сосняк</p> <p>высокой приоритетности 9 - дельта Салгира</p> <p> горнокрымский лес</p> |
|---|--|

Зона сохранения экстенсивно используемых ареалов

| | |
|--|---|
| <p> площадные водные объекты (озера, пруды, водохранилища)</p> <p> реки</p> <p> лесостепные сообщества</p> <p> разреженные лесные массивы</p> <p> водоохранные зоны рек, озер, водохранилищ, водозаборов</p> <p> водоохранная зона моря</p> <p> буферные зоны особо охраняемых природных территорий</p> | <p>зоны санитарной охраны водохранилищ:</p> <p> I пояс ЗСО</p> <p> II пояс ЗСО</p> <p> III пояс ЗСО</p> |
|--|---|

Зона улучшения с последующим переводом в категорию «сохранение»

ареалы наибольшего проявления негативных процессов природного и антропогенного характера












| | |
|--|---|
| <p> линейная эрозия</p> <p> плоскостной смыл</p> | <p> подтопление</p> <p> деструктивные процессы в местах открытой добычи полезных ископаемых</p> |
| <p>проявления конфликтов природопользования</p> <p> свалки ТБО</p> <p> автозаправочная станция в водоохранной зоне</p> | <p> точечные источники загрязнений</p> <p> кладбища</p> |

Зона сохранения природных компонентов

в населенных пунктах и ареалах, используемых в сельском хозяйстве

| | |
|---|--|
| <p> зеленые зоны населенных пунктов</p> <p> лесополосы существующие</p> <p> лесополосы проектируемые</p> | <p> лесополосы вдоль дорог</p> <p> лесонасаждения в пределах прибрежных защитных зон</p> |
|---|--|

Зона существующего и планируемого использования

| | |
|--|--|
| <p>регламентированное экстенсивное развитие</p> <p> сады</p> <p> пашни</p> <p> пастбища</p> <p> территории восстановления ландшафтов</p> | <p>регламентированное интенсивное развитие</p> <p> застроенные территории</p> <p> дачные участки</p> <p> производственные строения</p> <p> элементы транспортной сети</p> <p> животноводческие комплексы (фермы)</p> <p> карьеры</p> |
| <p> границы микроводосборов</p> | |

Ландшафтное планирование бассейна р. Салгир / Landscape planning of the Salgir river basin

В бассейне р. Малый Салгир особо нуждаются в охране покрытые дубовыми лесами и кустарниками склоны в верховьях и среднем течении реки. Развитие новых видов деятельности исключается, запрещаются распашка земель, садоводство и устройство пастбищ, строительство любых сооружений [13] (кроме гидротехнических и гидрометрических).

Б. Зона сохранения экстенсивно используемых ареалов: водных экосистем, участков с природной растительностью, которые характеризуются высокой долей природно-антропогенных ландшафтов. В пределах аквальных систем и чувствительных пойменных территорий, участков лесостепной растительности важно сохранить способность экосистемы к восстановлению. В категорию сохранения также включаются водоохранные и санитарно-защитные зоны, буферные зоны ООПТ, охранные зоны водозаборов, прибрежная зона моря. Учитывая средообразующие факторы и высокую приоритетность сохранения биоразнообразия дельты Салгира, ширину водоохранной зоны залива Сиваш Азовского моря рекомендуется увеличить с указанных в Водном кодексе РФ 500 м до 2–3 км от уреза воды. В пределах зоны сохранения экстенсивно используемых ареалов рекомендуется отказаться от развития новых видов деятельности, запрещены строительство и устройство свалок.

В. Зона улучшения с последующим переводом в категорию «сохранение» – для особо уязвимых ареалов, где проявляется развитие негативных процессов (плоскостной смыв и эрозия почв, карст, подтопление, деструктивные процессы в местах открытой добычи полезных ископаемых), деградированные ландшафты. Также сюда относятся водоохранные зоны рек системы Салгира в пределах городов Симферополь и Белогорск. Рекомендуется устранить проявления конфликтов природопользования, снизить интенсивность хозяйственной деятельности, провести санацию нарушенных участков.

Г. Зона сохранения природных компонентов в населенных пунктах и ареалах, используемых в сельском хозяйстве, среднечувствительных к антропогенной нагрузке. Сюда включаются близкие к природным комплексы в пределах городских территорий (парки, скверы), а также лесополосы. В пределах бассейна р. Салгир необходима рекультивация полосных лесонасаждений. С учетом ландшафтной структуры эффективными будут рекультивация и создание водорегулирующих лесополос на склоновых землях из дуба обыкновенного (*Quercus robur* L.), клена татарского (*Acer tataricum* L.), сосны крымской (*Pinus nigra* subsp. *pallasiana* Lamb.); противоэрозионных лесонасаждений из дуба обыкновенного (*Quercus robur* L.), липы сердцелистной (*Tilia cordata* Mill.), клена полевого (*Acer campestre* L.), орешника (*Corylus avellana* L.), боярышника (*Crataegus* L.). В пойменных комплексах в

пределах прибрежных защитных зон в среднем и нижнем течении реки возможны посадки из тополя пирамидального (*Populus pyramidalis* Salisb.), платана восточного (*Platanus orientalis* L.), кизила (*Cornus mas* L.)

Д. Зона развития существующего и планируемого использования:

– регламентированное экстенсивное развитие – сады, пашни на месте разнотравных степей, сенокосы, пастбища на крутых склонах;

– регламентированное интенсивное развитие – участки, где все компоненты ландшафта сильно изменены антропогенной деятельностью. Это застроенные территории (селитебные и промышленные комплексы), элементы транспортной сети, карьеры, фермы и т.д. Поверхностные воды в таких ландшафтах загрязнены. Для улучшения ситуации нужно основываться на устранении существующих конфликтов природопользования. Также рекомендуется использовать технологии, способствующие сохранению стабильности экосистем и их способности к самовосстановлению (увеличение доли древесно-кустарниковых насаждений, внедрение контурно-мелиоративной организации земледелия). После улучшения территория может быть переведена в категорию сохранения [1] и регламентированного использования.

Ландшафтное планирование территории бассейна р. Салгир, основанное на учете ландшафтной структуры и современной структуры землепользования, дает возможность выделить зоны регламентированного природопользования, обеспечить комплексную систему водоохраных мероприятий по восстановлению водных и средообразующих ресурсов бассейна.

Литература

1. Ландшафтное планирование: принципы, методы, европейский и российский опыт / ред.-сост. А.Н. Антипов, А.В. Дроздов. Иркутск : Изд-во Ин-та географии СО РАН, 2002. 141 с.
2. Позаченюк Е.А. Теоретические подходы к ландшафтному планированию // Уч. записки Тавр. нац. ун-та. География. 2011. Т. 24 (63), № 2, ч. 1. С. 237–243.
3. Корытный Л.Н. Бассейновая концепция природопользования. Иркутск : Изд-во Ин-та географии СО РАН, 2001. 163 с.
4. Методические указания по ландшафтным исследованиям для сельскохозяйственных целей / ред. Г.И. Швебс, П.Г. Шищенко. М. : Изд-во ВАСХНИЛ, 1990. 58 с.
5. Pozachenyuk E.A., Lisetskii F.N., Vlasova A.N., Buryak Zh.A., Marinina O.A., Kalinchuk I.V. Model of position-dynamic structure of river basins // Research J. of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences. 2015. Vol. 6, № 6. P. 1776–1780.

6. Ландшафтно-типологическая карта Крыма / сост. Г.Е. Гришанков. М : 1:200000. Симферополь, 1997.

7. Гагарина О.В., Саядян О.Я. Гидрологические основы ландшафтного планирования бассейна озера Севан // География и природные ресурсы. 2009. № 3. С. 143–150.

8. Власова А.Н. Оценка значимости и чувствительности бассейна малой реки Крыма // Экосистемы малых рек: биоразнообразие, экология, охрана : материалы II Всерос. школы-конф. Ярославль : Филигрань, 2014. Т. II. С. 67–70.

9. Шищенко П.Г. Принципы и методы ландшафтного анализа в региональном проектировании. Киев : Фитосоцицентр, 1999. 284 с.

10. Власова А.Н. Структура землепользования и антропогенная преобразованность ландшафтов бассейнов малых рек системы Салгира // Географические и геоэкологические исследования в Украине и сопредельных территориях : материалы II Междунар. науч. конф. студентов, аспирантов и молодых учёных. Симферополь : ДИАИПИ, 2013. Т. 1. С. 23–27.

11. Тимченко З.В. Водные ресурсы и экологическое состояние малых рек Крыма. Симферополь : ДОЛЯ, 2002. 152 с.

12. Яцук А.В., Шевчук В.Я. Энциклопедия водного хозяйства, природоохраны, природообновления, стабильного развития. Киев : Генеа, 2006. 1000 с.

13. Водный кодекс Российской Федерации. М. : Проспект, КноРус, 2014. 48 с.

14. Власова А.Н. Ландшафтное планирование бассейна р. Малый Салгир // Географические исследования Евразии: история и современность : материалы Междунар. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, посвященной 160-летию экспедиции П.П. Семенова на Тянь-Шань в рамках XII Большого географического фестиваля. М. : Перо, 2016. С. 95–100.

References

1. *Landshaftnoe planirovanie: printsipy, metody, evropeiskii i rossiiskii opyt* [Landscape planning: principles, methods, European and Russian experience]. Eds. A.N. Antipov, A.V. Drozdov. Irkutsk, Izd-vo In-ta geografii SO RAN, 2002, 141 p.

2. Pozachenyuk E.A. Teoreticheskie podkhody k landshaftnomu planirovaniyu [Theoretical approaches to landscape planning]. *Uch. zapiski Tavriy. nats. un-ta. Geografiya*. 2011, vol. 24 (63), No. 2, ch. 1, pp. 237-243.

3. Korytnyi L.N. *Basseinovaya kontseptsiya prirodopol'zovaniya* [Basin concept of nature management]. Irkutsk, Izd-vo In-ta geografii SO RAN, 2001, 163 p.

4. *Metodicheskie ukazaniya po landshaftnym issledovaniyam dlya sel'skokhozyaistvennykh tselei* [Methodological guidelines for landscape research for

agricultural purposes]. Eds. G.I. Shvebs, P.G. Shishchenko. Moscow, Izd-vo VASKhNIL, 1990, 58 p.

5. Pozachenyuk E.A., Lisetskii F.N., Vlasova A.N., Buryak Zh.A., Marinina O.A., Kalinchuk I.V. Model of position-dynamic structure of river basins. *Research J. of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences*. 2015, vol. 6, No. 6, pp. 1776-1780.

6. *Landshaftno-tipologicheskaya karta Kryma* [Landscape and typological map of the Crimea]. Comp. G.E. Grishankov. M : 1:200000. Simferopol, 1997.

7. Gagarina O.V., Sayadyan O.Ya. Gidrologicheskie osnovy landshaftnogo planirovaniya basseina ozera Sevan [Hydrological bases of landscape planning of Lake Sevan basin]. *Geografiya i prirodnye resursy*. 2009, No. 3, pp. 143-150.

8. Vlasova A.N. [Evaluation of the significance and sensitivity of the Crimean small river basin]. *Ekosistemy malykh rek: bioraznoobrazie, ekologiya, okhrana* [Ecosystems of small rivers: biodiversity, ecology, protection]. Materials of the II All-Russian School-Conference. Yaroslavl, Filigran', 2014, vol. II, pp. 67-70.

9. Shishchenko P.G. *Printsipy i metody landshaftnogo analiza v regional'nom proektirovanii* [Principles and methods of landscape analysis in regional design]. Kiev, Fitosotsiotsentr, 1999, 284 p.

10. Vlasova A.N. [Land use structure and anthropogenic transformation of landscapes of the basins of small rivers of the Salgir system]. *Geograficheskie i geoekologicheskie issledovaniya v Ukraine i sopredel'nykh territoriyakh* [Geographical and geoecological studies in Ukraine and adjacent territories]. Materials of the II International Scientific Conference of Students, Postgraduates and Young Scientists. Simferopol, DIAIPI, 2013, vol. 1, pp. 23-27.

11. Timchenko Z.V. *Vodnye resursy i ekologicheskoe sostoyanie malykh rek Kryma* [Water resources and ecological condition of small rivers of Crimea]. Simferopol, DOLYA, 2002, 152 p.

12. Yatsik A.V., Shevchuk V.Ya. *Entsiklopediya vodnogo gospodarstva, prirodokoristuvannya, prirodovidvorennya, stalogo rozviku* [Encyclopedia of water management, nature management, natural reproduction, sustainable development]. Kiev, Geneza, 2006, 1000 p.

13. *Vodnyi kodeks Rossiiskoi Federatsii* [Water Code of the Russian Federation]. Moscow, Prospekt, KnoRus, 2014, 48 p.

14. Vlasova A.N. [Landscape planning of the Maly Salgir river basin]. *Geograficheskie issledovaniya Evrazii: istoriya i sovremennost'* [Geographical investigations of Eurasia: history and modernity]. Proceedings of the International Scientific and Practical Conference of students, postgraduates and young scientists, dedicated to the 160th anniversary of the Semenov expedition in Tien Shan within the framework of the 12th Great Geographical Festival. Moscow, Pero, 2016, pp. 95-100.

УДК 553.12+622.822.2

DOI 10.23683/0321-3005-2017-2-92-100

ОСНОВНЫЕ ФАКТОРЫ И ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПОСЛЕДСТВИЯ САМОВОЗГОРАНИЯ ОТВАЛОВ УГОЛЬНЫХ ШАХТ ВОСТОЧНОГО ДОНБАССА

© 2017 г. М.И. Гамов¹, И.В. Гордеев²

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

²Всероссийский научно-исследовательский геологоразведочный институт угольных месторождений, Ростов-на-Дону, Россия

THE MAIN FACTORS AND ECOLOGICAL EFFECTS OF SPONTANEOUS COMBUSTION OF COAL MINE WASTE DUMPS OF THE EASTERN DONBASS

M.I. Gamow¹, I.V. Gordeev²

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

²All-Russian Scientific Research Geological Prospecting Institute of Coal Deposits, Rostov-on-Don, Russia

Гамов Михаил Иванович – доктор геолого-минералогических наук, заведующий кафедрой месторождений полезных ископаемых, Институт наук о Земле, Южный федеральный университет, ул. Зорге, 40, г. Ростов-на-Дону, 344090, Россия, e-mail: gamov@sfedu.ru

Mikhail I. Gamow – Doctor of Geology and Mineralogy, Head of Department of Mineral Deposits, Institute of Earth Sciences, Southern Federal University, Zorge St., 40, Rostov-on-Don, 344090, Russia, e-mail: gamov@sfedu.ru

Гордеев Иван Владимирович – заместитель директора, Всероссийский научно-исследовательский геологоразведочный институт угольных месторождений, пр. Стачки, 200/1, г. Ростов-на-Дону, 344090, Россия

Ivan V. Gordeev – Deputy Director, All-Russian Scientific Research Geological Prospecting Institute of Coal Deposits, Stachki Ave., 200/1, Rostov-on-Don, 344090, Russia

На примере породных отвалов угольных шахт Восточного Донбасса показана вещественно-геохимическая модель преобразования отвалов угольных шахт – террикоников, сложенных породами, претерпевшими разные стадии термального преобразования, на основе использования представлений об углеводородной флюидизации ископаемых углей и вмещающих пород. Выделены основные причины самовозгорания углей и углистых пород отвала, которыми являются ряд горнотехнических и горно-геологических условий, среди которых наибольшее значение, помимо петрологического состава и метаморфизма углей, имеют такие факторы, как влажность и сернистость исходного материала, температура окружающей среды, условия образования углей и углистых пород, способ добычи угля, структура разрабатываемых пластов, размер и форма отвалов, газовая среда и парциальное давление кислорода в отвале. Большое значение имеют также механо-химические факторы и механизм развития химических процессов в смесях твердых веществ, которыми фактически являются углеотходы добычи, переработки и обогащения углей. Выявлены минералого-петрографические и термобарогеохимические факторы и критерии, обуславливающие разную предрасположенность породных отвалов угольных шахт к процессам автотермодеструкции и самовозгорания, что имеет важное прогностическое и практическое значение при освоении техногенных месторождений угольного ряда. Представлена вещественно-геохимическая структура горящего и перегоревшего терриконика, в котором выделены следующие объемные пакеты: очаг самонагрева, горения; зона окислительного обжига; зона восстановительного обжига; зона техногенной флюидизации; зона относительно неизменных пород. Предложенная модель позволяет эффективнее проводить мероприятия по рекультивации и тушению горящих отвалов, а также обоснованно определять направления рационального использования техногенного сырья.

Ключевые слова: терриконики, техногенные месторождения, уголь, углеотходы, картирование отвалов угольных шахт, вещественная модель шахтных отвалов, самовозгорание отвалов, термально измененные породы.

On the example of waste dumps of East Donbass coal mines implemented physical and geochemical model of the transformations of coal mine waste dumps - territorial stacked rocks by the different stages of thermal conversion, on the basis of the perceptions of hydrocarbon fluidization of fossil coals and host rocks. The main reasons of spontaneous combustion of coals and coaly rocks of the blade, which are a number of mining and geological conditions, among which the most important, in addition to the petrologic structure and metamorphism of the coals, are such factors as moisture and sulfur content of the source material, ambient temperature, conditions of formation of coal and carbonaceous rocks, coal mining, the structure of the developed reservoirs, the size and shape of the dumps, gas environment and the partial pressure of oxygen within the pile. Also important are the mechanical and chemical factors and mechanism of development of chemical processes in the mixtures of solid substances, which are actually plowhole of mining, processing and enrichment of coal. The identified mineralogical and petrographic and thermobarogeochemical factors and criteria that lead to different disposition of waste dumps

of coal mines to the processes of auto thermal destruction and spontaneous combustion, which has important prognostic and practical value in the development of technogenic deposits of coal-series. The article presents material geochemical structure of burning and burned dumps, in which there are following bulk packages: the source of self-heating, burning; zone of oxidizing roasting; roasting recovery area; area of the industrial fluidization; zone of relatively unaltered rocks. The proposed model allows effectively drive remediation and extinguishing of a burning dump, and reasonably determine the direction of the rational use of technogenic raw materials.

Keywords: dumps, anthropogenic deposits, coal, coal mining waste, mapping of coal mine waste dumps, the physical model of the mine dumps, spontaneous combustion of waste dumps, thermal modified species.

Относительно природы самовозгорания углей и углистых пород в отвалах нет единого мнения. Многочисленные теории и гипотезы, пытающиеся вскрыть или объяснить сущность явления самовозгорания, трактуют его как с химической, так и с физической стороны. Не существует единого взгляда и на первоначальный источник накопления тепловой энергии. Одни считают, что им является химическое взаимодействие кислорода с органической частью материала, другие приоритет процесса возгорания приписывают явлениям первичной сорбции кислорода и процессам окисления сульфидов в угольном веществе [1–5].

В результате этих исследований установлено, что развитие процесса самоокисления, определяющего самовозгорание углей и углистых пород отвала, зависит от ряда горнотехнических и горно-геологических условий, среди которых наибольшее значение, помимо петрологического состава и метаморфизма углей, имеют такие факторы, как влажность и сернистость исходного материала, температура окружающей среды, условия их образования, способ добычи, структура разрабатываемых пластов, размер и форма отвалов, газовая среда и парциальное давление кислорода в отвале. Большое значение имеют также механо-химические факторы и механизм развития химических процессов в смесях твердых веществ, которыми фактически являются углеотходы добычи, переработки и обогащения углей.

Влажность исходного материала. Вопрос о влиянии влаги на процесс окисления и саморазогревания углей не решён однозначно. Некоторые авторы считают влагу фактором, тормозящим процесс окисления, другие же, наоборот, полагают, что она ему способствует и в некоторых случаях является даже причиной самовозгорания углей.

Второй точки зрения придерживается большинство исследователей [2, 6]. Изучая сорбцию кислорода углем или процессы его горения, нашли, что уголь, обработанный водой, окисляется лучше вследствие смыва с него окисной пленки, препятствующей доступу кислорода, или вследствие образования дополнительных трещин, образующихся за счет набухания угля и облегчающих доступ кислорода к внутренним поверхностям.

Вместе с тем исследованиями [7] и других установлена устойчивость угля к окислению при избытке влаги. Из этого можно сделать вывод, что влажность может оказывать двоякое влияние, и, в частности, в условиях породных отвалов она может замедлять процесс самовозгорания за счет значительного притока воды, выносящего тепло из очага саморазогрева. В случае же снижения притока воды вынос тепла ею будет снижен и воздействие ее на отвал может стать активизирующим процессы самовозгорания.

Температура окружающей среды. Работой [8] установлено, что повышение температуры способствует увеличению скорости окисления углей. Это объясняется усилением распада уголь-кислородных комплексов в окисленном слое.

При нагревании угля и углистых пород форма связи кислорода изменяется, на поверхности угля появляются кислые поверхностные окислы, которые ускоряют процесс окисления. Опытным путем было установлено, что нагревание антрацитов до 50 °С при свободном доступе воздуха в течение 2–3 ч резко повышает их активность к окислителям, что способствует развитию процессов, приводящих к самовозгоранию.

Присутствие минеральных примесей. Касаясь роли минеральных примесей в процессе окисления угольного вещества, нельзя не упомянуть пиритную теорию. Согласно её первоначальной трактовке, окисление углей в естественных условиях, приводящее к самовозгоранию, обусловлено и инициируется теплотой реакции окисления содержащегося в угле пирита и марказита, т.е. низкотемпературное окисление заключается в окислении минеральных сернистых соединений, а окисление собственно угольного вещества наступает лишь при достижении какой-то достаточно высокой температуры.

Особенности окисления сульфидов связаны с тем, что его скорость сильно возрастает в присутствии воды. Сульфиды в сухом состоянии, по видимому, практически не сорбируют кислород из сухого воздуха. Отмечается, что наличие пирита в контакте с другими сульфидными минералами приводит к возникновению локальных электрических полей и окислению сульфидов с образовани-

ем свободных кислот. В результате этого происходит локальная активация угольного вещества, что может приводить к интенсификации окислительных процессов. Катионы Fe^{2+} и FeS_2 оказывают каталитическое действие на процесс окисления, который протекает более интенсивно при повышенной влажности воздуха. При этом влага конденсируется в порах, кислород воздуха растворяется в ней и диффундирует к активной поверхности угля. В присутствии воды и кислорода FeS_2 образует $FeSO_4$: $2FeS_2 + 7O_2 + 2H_2O \rightarrow 2FeSO_4 + 2H_2SO_4 + O$.

Эта реакция протекает со значительным выделением тепла. Образовавшийся закисный сульфат оказывается неустойчивым и переходит в оксидный сульфат, который, в свою очередь, очень активен по отношению к пириту.

Следующим фактором, определяющим реакционную способность складываемой массы по отношению к кислороду при низких температурах, следует считать присутствие в окисляющихся материалах веществ, тормозящих процессы окисления, – галогенов. На шахтах с негорящими породными отвалами разрабатываемые угли содержат значительное количество галогенов – до 0,25 % (в пересчете на горючую массу), на шахтах же с горящими отвалами – не более 0,05–0,06 % [2].

Условия образования углей и углистых пород. Известно, что все естественные минеральные образования в геологической истории претерпевают значительные изменения, в том числе и физико-химические. Последние непостоянны: они меняются во времени. Сам процесс самовозгорания и затем активного горения породного отвала, образованного на земной поверхности, также выражает стремление минеральных образований найти новую форму локализации в новых условиях земной поверхности.

Самовозгорание углей и углистых пород зависит не столько от геологической истории, предшествовавшей накоплению данного пласта, сколько от последующих эпигенетических преобразований.

Условия образования являются основной причиной повышенной или пониженной активности углистых пород по отношению к кислороду как на каменноугольной, так и на антрацитовый стадии метаморфизма. В этой связи принципиально новым подходом к объяснению природы и механизма самовозгорания углей и углевлещающих пород является концепция углеводородной флюидизации угленосных отложений, которая разрабатывается сотрудниками Южного федерального университета. Согласно этой концепции, в участках тектониче-

ской нарушенности угольных пластов в результате проникновения глубинных гидротермальных растворов развиваются процессы флюидогенной трансформации угольного вещества и вмещающих пород, приводящие к образованию флюидоактивных зон с углями, обладающими аномальными структурно-энергетическими и технологическими свойствами, в таких зонах отчетливо наблюдаются признаки метасоматоза рассеянного органического и базисного силикатного материала, с одновременным окварцеванием и карбонатизацией вмещающих терригенно-осадочных пород, существенно изменяются структура и свойства угля, состав, объем и формы локализации газов, микроминералов и элементов-примесей [5, 9]. По данным электронно-микроскопических исследований в углях устанавливается широкий спектр новообразованных минералов: глобулярный пирит в ассоциации с гидротроилитом, сера самородная, микрокристаллиты мелантерита и гипса в виде параллельно-шестоватых, спутанно-волоконистых и радиально-лучистых агрегатов (рис. 1).

Наиболее существенными факторами, влияющими на потенциальную склонность таких флюидизированных углей и вмещающих пород к самовозгоранию, являются:

1. Метастабильное состояние системы уголь – порода – флюид с аномально высокой энергоемкостью.
2. Высокая структурная нарушенность органического вещества и сопутствующих минеральных компонентов.
3. Природный синтез новых органических веществ с высокими окислительно-восстановительными свойствами.
4. Появление в составе флюидных компонентов легковоспламеняющихся газов (водород, ацетилен, этилен и др.).
5. Присутствие повышенных содержаний природных катализаторов – редкометалльных и редкоземельных элементов-примесей (молибден, вольфрам, скандий, германий и др.).

Эти факторы являются определяющими при развитии процессов самовозгорания и трансформации угленосных отвалов в случаях локализации флюидогенно-измененных углей и пород в террикониках.

Способ переработки угля. При формировании отвалов только из пород, получаемых при проходке подготовительных выработок, и отсутствии на шахте какого бы то ни было способа обогащения углей породные отвалы не самовозгораются независимо от генетической характеристики углей и пород.

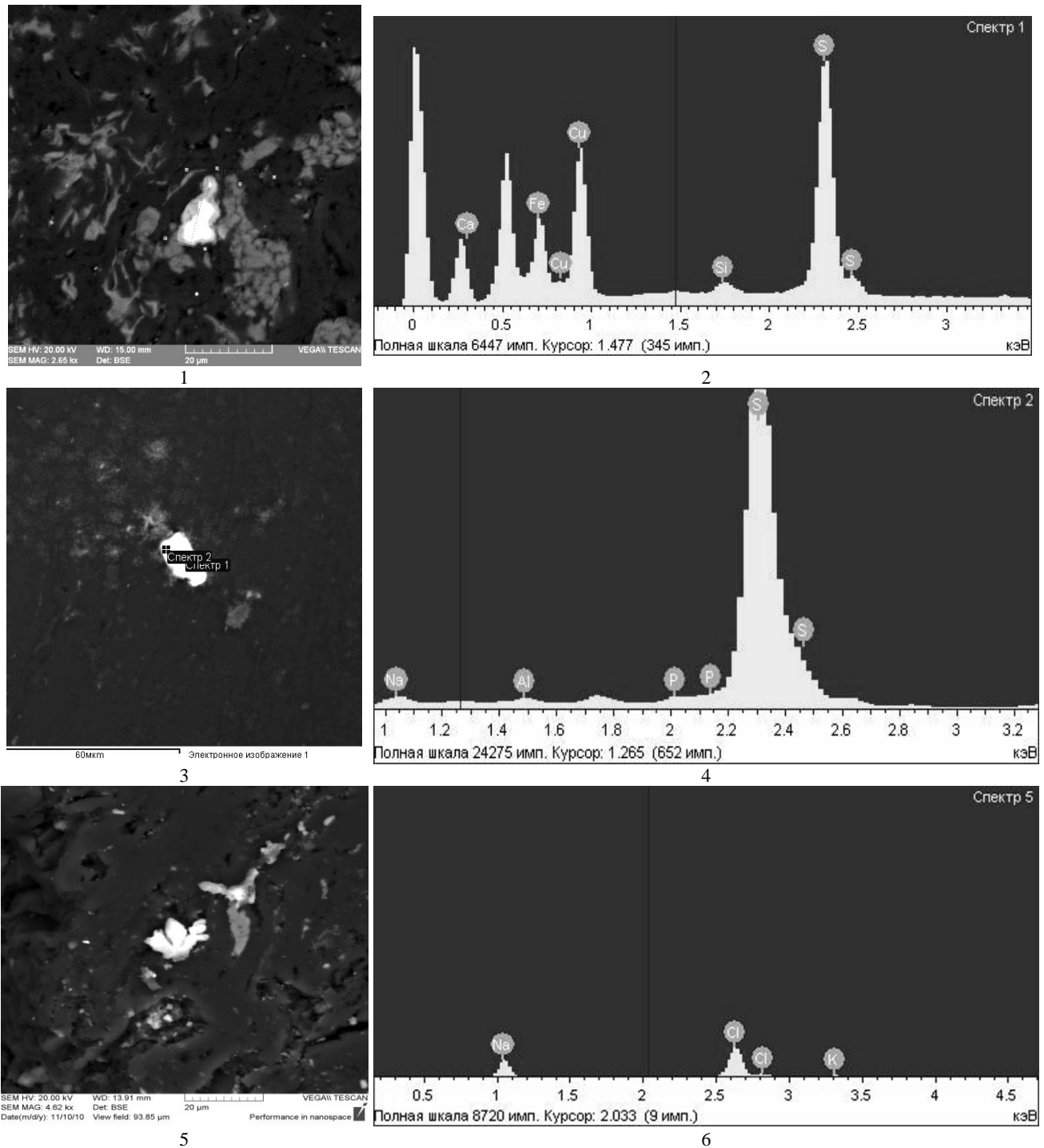


Рис. 1. Минеральные включения: 1 – халькопирит (светлое) и каолинит (серое) в инертините (черное); 2 – энергетический спектр халькопирита; 3 – самородная сера в угле; 4 – один из энергетических спектров самородной серы; 5 – кристаллы галита (светлое) заполняют клеточные полости в инертините; 6 – энергетический спектр галита / Fig. 1. Mineral inclusions: 1 – chalcopyrite (light) and kaolinite (gray) in inertinite (black); 2 – energy spectrum of chalcopyrite; 3 – native sulfur in coal; 4 – one of the energy spectra of native sulfur; 5 – crystals of halite (light) fills the cell cavity in inertinite; 6 – energy spectrum of halite

Структура разрабатываемых пластов. При обследовании породных отвалов шахт Ростовской области и сопоставлении их состояния со структурой разрабатываемых пластов установлено, что при наличии более 70 % углистых пород отвалы

подвержены самовозгоранию, и наоборот, при разработке пластов простого строения и отсутствии углистого материала в породах кровли и почвы самовозгорание породных отвалов весьма редко. Вероятность самовозгорания и интенсивность горения

всегда выше, если безуглистые породы крупнокусковаты и медленно выветриваются, в результате чего создаются условия для доступа кислорода в глубинные зоны отвалов. При легко разрушающихся и выветривающихся породах отвалы имеют повышенную плотность и не горят или горят весьма слабо, даже если в их составе имеется значительное количество высокозернистых углистых пород, сростков и колчедана.

Размер и форма отвалов влияют прежде всего на интенсивность тепло- и массообмена в их глубинных зонах. Наряду с гранулометрическим составом отвальной массы эти факторы определяют фильтрующие свойства и тем самым способствуют или препятствуют генерации и аккумуляции тепла, т.е. оказывают действие на протекание тех процессов, оптимальное соотношение которых во времени приводит к самовозгоранию.

Газовая среда, несомненно, влияет на протекание процесса окисления. Наличие в газовой среде химически инертных по отношению к углю и углистым породам газов должно замедлять сорбцию кислорода. Так, образующаяся при окислении углекислота как бы предохраняет уголь от дальнейшей окисления.

Таким образом, несмотря на значительное число предполагаемых факторов и причин, определяющих склонность отходов угледобычи к самовозгоранию, их роль и значение трактуются неоднозначно, что обусловлено, по нашему мнению, отсутствием адекватных моделей термодеструкции отвалобразующих пород. Отсюда возникает и неопределенность прогнозов использования образующихся в конечном итоге техногенных месторождений угольного ряда.

В результате исследования термоизмененных пород терриконов (у г. Белая Калитва, г. Новошахтинск, пос. Углекаменный, пос. Синегорский) авторами предлагаются аспекты вещественно-геохимической модели преобразования отвалов угольных шахт.

Негорелые части исследуемых отвалов сложены различными литологическими разностями пород, которые типичны для угленосных толщ Донбасса. Это преимущественно аргиллиты, алевролиты, песчаники, как неизменные, так и затронутые процессами выветривания. В горелых частях отвала наблюдается породная масса с различной степенью термической деструкции и дезинтеграции. В очагах пожаров и на их обрамлении образовались горелые и переплавленные породы, новообразования «черных блоков», в которых локализируются газообразные продукты горения. Так, для неизменных и слабообожженных пород в составе локализованных газов характерным является наличие паров воды,

СО₂ и азота. В то время как в переплавленных породах вода практически полностью отсутствует либо находится в весьма подчиненном количестве. Для «черных блоков» характерным является появление H₂S и непредельных углеводородов (C_mH_n) (рис. 2, 3). Еще большая разница отмечается в изменении коэффициента окисленности (K_o), рассчитанного как отношение суммы окисленных газов к сумме восстановленных. При нанесении K_o на разрез отвала отчетливо выделяется зона бескислородного пропаривания.

Пелитовые и алевропелитовые разности пород с углистым веществом, непосредственно вмещающие угольные пласты, претерпевают наибольшие пирометаморфические изменения, являясь очагами пожаров. Серые первичные глинистые породы в горелых отвалах приобретают черты обожженных, оплавленных, фарфоровидных, стекловатых образований различных окрасок. Слабообожженные породы обычно имеют более светлые тона – желтовато-белый, розовый, серый. Интенсивно обожженные породы характеризуются более темной окраской (коричневой, красной). На участках, наиболее приближенных к очагам пожаров, образуются техногенные брекчии (термобрекчии), породы расстрескиваются, в них образуется большое количество каверн, глинистые минералы теряют воду, первичные осадочные породы перекристаллизуются в роговики, образуются новые минералы. Непосредственно в очагах пожаров формируются клинкеры, бухиты, могут также присутствовать пористые продукты – шлаки, образующиеся при термообжиге силикатных минералов.

В горящих отвалах и недавно перегоревших терриконах породы менее затронуты гипергенными изменениями, чем в отвалах, перегоревших 30 и более лет назад. Разрушение давно горелых продуктов связано с образованием щебнисто-дресвяных масс выветрелых термоизмененных образований, часто полностью дезинтегрированных с потерей их первичного облика.

Исследования показали, что обжиг песчаников, алевролитов и аргиллитов в горельниках при умеренных температурах (до 500–800 °С) приводит к осветлению этих пород, прежде всего за счет разложения и выгорания углистого вещества, но в породах сохраняются реликты их первичной слоистости. В начальной стадии обжига глинистых пород формируются метапелиты, в которых еще нет остекления. Они располагаются в сводовых или подстилающих частях горевших отвалов, обладают низкой прочностью, часто обрушаются, что приводит к образованию обломочной массы, при низкотемпературном воздействии на породные отвалы происходят в основном разложение кристаллогидратов, ис-

парение физической и кристаллизационной воды, дегидратация, декарбонатизация, десульфурация и другие процессы, связанные с термической диссоциацией. Горение углистого вещества и сульфидов в отвалах приводит к загрязнению воздуха газами (CO, CO₂, NO₂, SO₂, CH₄, H₂S и др.). С поверхности перегоревших отвалов атмосферными осадками сносятся легкоподвижные продукты разрушения новообразованных минералов.

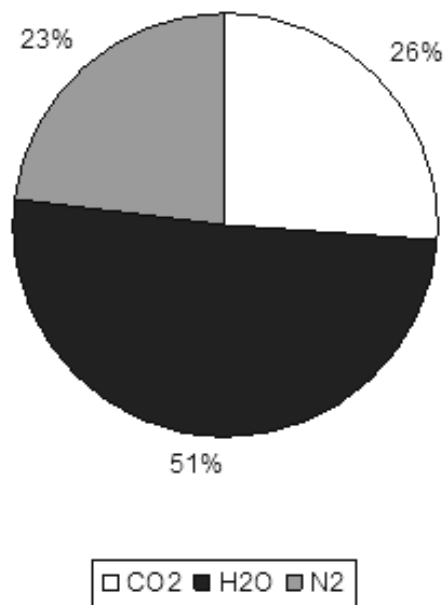


Рис. 2. Состав газов в неизмененных отвальных породах (интервал 20–120 °С) / Fig. 2. Composition of gases in an unaltered dump rocks (interval 20 - 120 °С)

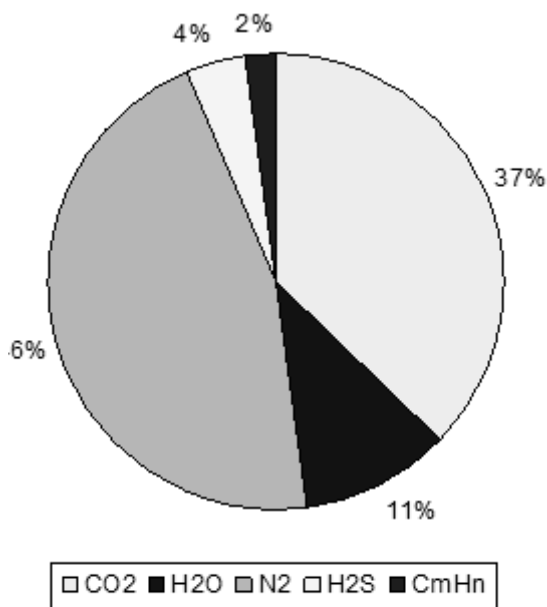


Рис. 3. Состав газов в «черных блоках» (интервал 20–120 °С) / Fig. 3. Composition of the gases in the "black blocks" (interval 20 - 120 °С)

Так, на горящих терриконах образуются легко-растворимые азотсодержащие минералы (нашатырь и другие), сульфаты, самородная сера. Все это приводит к загрязнению поверхностных и подземных вод, почв различными токсичными элементами и их соединениями. Вследствие неравномерного нагрева образуются пустоты, трещины, осыпи, термические оползни на склонах терриконов, происходят выбросы пород, пыли и другие опасные явления.

По данным приближенно-количественного спектрального анализа установлено, что при увеличении термического воздействия на терригенные породы в горящих отвалах и их деструкции происходит закономерное возрастание в пробах большинства металлов (таблица).

Так, в красных обожженных породах, термобрекчиях и шлаках по сравнению со слабоизмененными разностями (серых, бледных розовато-желтых тонов) почти в два раза увеличиваются содержания Mg, Sr, Ti, V, Cr, Ni, Zn, Cu, Sn, Sc, Be, Li, Ga, Ge, В.

Сравнение термоизмененных пород по степени их деструкции при выветривании показало, что в более выветрелых термоизмененных породах старых перегоревших отвалов закономерно уменьшается количество многих металлических примесей – Sr, Ti, V, Cr, Co, Ni, Zr, Nb, Bi, а также некоторых породообразующих компонентов – глинозема, натрия.

Однако ряд элементов не удаляется из пород при выветривании, а наоборот – накапливается. К таким компонентам относятся Sn, Ga (которых на порядок больше в выветрелых разностях), Pb (в 20 раз больше), As, Sb (в два раза больше в выветрелых разностях). Близкие по качественному и количественному составу геохимические спектры пород, слагающих отвалы, приводятся в работе [10].

Многие металлические примеси, содержащиеся в термоизмененных и выветрелых породах исследуемых терриконов, относятся к токсичным и экологически опасным компонентам, причем их содержания часто превышают предельно допустимые концентрации (ПДК), согласно действующим инструкциям [11]. К таким элементам относятся Ti, Ni, V, As, Cr, Co.

По результатам корреляционного анализа компонентов термоизмененных пород горевших терриконов было установлено, что основная масса экологически опасных примесей положительно коррелирует друг с другом и с глиноземной составляющей пород. Исключения составляют взаимосвязанные As и Sb, отрицательно коррелирующие с кремнеземом, а также Ge, который не связан ни с одним из компонентов. Последнее еще раз подтверждает факт, что для Донбасса наиболее типична связь германия непосредственно с углистым веществом.

Породообразующие элементы и примеси в термоизмененных породах свежих и горевших отвалов у г. Белая Калитва
/ Rock-forming elements and impurities in thermal altered rocks of fresh and burning dumps of Belaya Kalitva

| Термоизмененные породы | Породообразующие элементы и примеси, % | | | | | | | |
|-----------------------------|--|--------------------------------|------|-------|--------------------------------|------------------|-------------------|-------------------------------|
| | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | MgO | CaO | Fe ₂ O ₃ | K ₂ O | Na ₂ O | P ₂ O ₅ |
| 1005/4 серый алевропесчаник | 50 | 14 | 0,64 | 1,2 | 3,7 | 3,3 | 2,1 | 0,18 |
| 1005/2 желтый аргиллит | 50 | 24 | 0,54 | 0,089 | 3,8 | 6,1 | 1,4 | 0,08 |
| 1005/1 розовый алевролит | 50 | 16 | 0,79 | 0,41 | 6 | 4,2 | 1,8 | 0,089 |
| 1005/3 красный алевролит | 49 | 25 | 1,7 | 0,24 | 5 | 5 | 1,7 | 0,081 |
| 1005/5 красный алевролит | 50 | 25 | 0,99 | 0,081 | 4,2 | 5,3 | 2 | 0,08 |
| 1005/6 термобрекчия | 50 | 23 | 1,7 | 1,6 | 16 | 5,4 | 1,2 | 0,17 |
| 1005/7 шлак | 41 | 25 | 3,8 | 1,9 | 9,5 | 3,6 | 1 | 0,31 |

| Термоизмененные породы | Породообразующие элементы и примеси | | | | | | | |
|-----------------------------|-------------------------------------|-------|------------------|-------|-----|-----|----|-----|
| | Sr | Ba | TiO ₂ | MnO | V | Cr | Co | Ni |
| | % | | | | г/т | | | |
| 1005/4 серый алевропесчаник | 0,021 | 0,024 | 0,85 | 0,042 | 47 | 140 | 22 | 27 |
| 1005/2 желтый аргиллит | 0,012 | 0,045 | 1,4 | 0,012 | 110 | 140 | 16 | 68 |
| 1005/1 розовый алевролит | 0,012 | 0,028 | 0,48 | 0,08 | 56 | 59 | 20 | 46 |
| 1005/3 красный алевролит | 0,019 | 0,036 | 0,81 | 0,034 | 86 | 130 | 18 | 61 |
| 1005/5 красный алевролит | 0,015 | 0,038 | 1,5 | 0,013 | 120 | 180 | 23 | 68 |
| 1005/6 термобрекчия | 0,062 | 0,04 | 0,98 | 0,079 | 130 | 130 | 40 | 100 |
| 1005/7 шлак | 0,043 | 0,11 | 1,2 | 0,15 | 160 | 170 | 25 | 89 |

| Термоизмененные породы | Элементы примеси, г/т | | | | | | | |
|-----------------------------|-----------------------|-----|-----|-----|----|----|-----|-----|
| | Zr | Nb | Sc | Ce | La | Y | Yb | Be |
| 1005/4 серый алевропесчаник | 600 | 13 | 8,3 | 150 | 83 | 43 | 3,3 | 2,6 |
| 1005/2 желтый аргиллит | 260 | 23 | 16 | 120 | 63 | 29 | 2,6 | 5,5 |
| 1005/1 розовый алевролит | 180 | 12 | 6 | 100 | 60 | 25 | 2,1 | 3,8 |
| 1005/3 красный алевролит | 140 | 8,3 | 19 | 96 | 52 | 32 | 3,5 | 4,1 |
| 1005/5 красный алевролит | 360 | 14 | 18 | 110 | 46 | 25 | 2,7 | 4 |
| 1005/6 термобрекчия | 320 | 14 | 17 | 720 | 34 | 37 | 5,2 | 4,2 |
| 1005/7 шлак | 210 | 8,1 | 14 | 100 | 60 | 28 | 3,3 | 5,4 |

| Термоизмененные породы | Элементы примеси, г/т | | | | | | | |
|-----------------------------|-----------------------|------|-----|----|-----|-----|----|-------|
| | Li | Mo | Sn | Cu | Pb | Zn | Bi | Ag |
| 1005/4 серый алевропесчаник | 41 | 0,5 | 11 | 31 | 21 | 60 | 2 | 0,22 |
| 1005/2 желтый аргиллит | 55 | 0,62 | 41 | 57 | 66 | 170 | 2 | 0,15 |
| 1005/1 розовый алевролит | 35 | 0,53 | 23 | 27 | 110 | 89 | 2 | 0,078 |
| 1005/3 красный алевролит | 45 | 0,67 | 27 | 71 | 82 | 380 | 2 | 0,26 |
| 1005/5 красный алевролит | 65 | 0,86 | 24 | 54 | 62 | 220 | 2 | 0,2 |
| 1005/6 термобрекчия | 76 | 2,4 | 3,9 | 24 | 50 | 160 | 2 | 0,16 |
| 1005/7 шлак | 70 | 4,4 | 9,9 | 37 | 70 | 81 | 2 | 0,22 |

| Термоизмененные породы | Элементы примеси, г/т | | | | |
|-----------------------------|-----------------------|-----|----|-----|----|
| | Ga | As | Sb | Ge | B |
| 1005/4 серый алевропесчаник | 21 | 290 | 20 | 2 | 35 |
| 1005/2 желтый аргиллит | 35 | 160 | 20 | 2 | 78 |
| 1005/1 розовый алевролит | 18 | 120 | 20 | 4,4 | 42 |
| 1005/3 красный алевролит | 44 | 100 | 20 | 2,9 | 67 |
| 1005/5 красный алевролит | 41 | 100 | 20 | 2,9 | 69 |
| 1005/6 термобрекчия | 52 | 100 | 20 | 2 | 41 |
| 1005/7 шлак | 26 | 100 | 20 | 2 | 40 |

Заключение

В процессе пирометаморфизма при горении породных отвалов происходит зональное изменение исходных терригенных пород. По мере приближения к очагу горения в алевропесчаниках и алевролитах уменьшается количество глинистого цемента с образованием пор при выделении воды из глин, происходит уничтожение углистого вещества с выделением углерода и его соединений. При более сильных температурных воздействиях (800–1000 °С) происходит перекристаллизация исходных осадочных пород с образованием техногенных микрозернистых роговиков с оксидами железа и титана, а также пирометаморфических пород – шлаков, термобрекчий, клинкеров с новообразованным стеклом, оксидами алюминия и кремнезема.

Выделенные типы термопреобразованных пород существенно различаются по своим термобарическим параметрам и составу содержащихся в них газов. Причем отмеченные особенности носят типоморфный характер, что позволяет дифференцировать отвальные породы по термобарогеохимическим признакам. Вредные и токсичные газы продолжают загрязнять воздух, выделяясь при выветривании и дезинтеграции пироморфитов уже перегоревших или потушенных отвалов.

Исследования показали, что породы терриконов содержат большое количество различных элементов-примесей, в том числе токсичных. Этих вредных компонентов значительно больше в перегоревших отвалах по сравнению с негоревшими терриконами. В процессе горения экологически вредные элементы накапливаются в продуктах горения и термоизмененных породах, их накопление продолжается при выветривании продуктов перегоревших терриконов, за счет воздействия атмосферных осадков вредные компоненты высвобождаются, попадают в почвы и воды. Это необходимо учитывать при решении вопросов об утилизации терриконов и использовании продуктов отвалов угольных шахт Донбасса в качестве техногенных полезных ископаемых.

Литература

1. Айруни А.Т. Прогнозирование и предотвращение газодинамических явлений в угольных шахтах. М. : Наука, 1987. 310 с.
2. Лапин А.А., Меркулова А.П., Посыльный В.Я. Причины самовозгорания породных отвалов в антрацитовых районах Восточного Донбасса // Тр. ШахтНИУИ. 1963. Т. III. С. 86–105.
3. Рылов В.Г., Гамов М.И., Вялов В.И., Наставкин А.В. Оценка пожароопасности шахтопластов по

данным изучения склонности углей к самовозгоранию // Изв. вузов. Сев.-Кав. регион. Естеств. науки. 2012. № 4. С. 98–102.

4. Рылов В.Г., Мещанинов Ф.В. Типоморфные особенности высокоуглеродистых флюидизитов из перегоревших отвалов ликвидированных антрацитовых шахт Восточного Донбасса // Современные проблемы развития и освоения угольной сырьевой базы России : материалы XI Всерос. угольного совещания. Ростов н/Д. : ВНИГРИУголь, 2005. С. 87–89.

5. Труфанов В.Н., Гамов М.И., Майский Ю.Г., Рылов В.Г., Труфанов А.В. Углеводородная флюидизация ископаемых углей Восточного Донбасса. Ростов н/Д. : РГУ, 2004. 272 с.

6. Зинчук А.А., Калюжный В.А., Щирица А.С. Флюидный режим гидротермального минералообразования Донбасса. Киев : Наукова думка, 1983. 164 с.

7. Саранчук В.И., Баев Х.А. Теоретические основы самовозгорания углей. М. : Недра, 1976. 151 с.

8. Веселовский В.С., Виноградов Л.П. [и др.]. Прогноз и профилактика эндогенных пожаров. М. : Наука, 1975. 159 с.

9. Труфанов В.Н., Гамов М.И., Дудкевич Л.К., Майский Ю.Г., Труфанов А.В. Основы прикладной термобарогеохимии. Ростов н/Д. : ЮФУ, 2008. 280 с.

10. Закруткин В.Е., Гибков Е.В. Техногенные геохимические потоки угледобывающих территорий и их влияние на окружающую среду (на примере Донецкого бассейна) // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2016. № 3. С. 66–72.

11. Инструкция по изучению и оценке попутных твердых полезных ископаемых и компонентов при разведке месторождений угля и горючих сланцев. М. : Наука, 1987.

References

1. Airuni A.T. *Prognozirovanie i predotvrashchenie gazodinamicheskikh yavlenii v ugol'nykh shakhtakh* [Forecasting and prevention of gas-dynamic phenomena in coal mines]. Moscow, Nauka, 1987, 310 p.
2. Lapin A.A., Merkulova A.P., Posyl'nyi V.Ya. *Prichiny samovozgoraniya porodnykh otvalov v antratsitovykh raionakh Vostochnogo Donbassa* [The causes of spontaneous combustion of piles in the anthracite regions of the Eastern Donbass]. *Tr. ShakhtNIUI*. 1963, vol. III, pp. 86–105.
3. Rylov V.G., Gamov M.I., Vyalov V.I., Nastavkin A.V. *Otsenka pozharoопасnosti shakhtoplastov po dannym izucheniya sklonnosti uglei k samovozgoraniyu* [Estimation of the fire hazard of shlatoplast according to the study of the propensity of coals to spontaneous combustion]. *Izv. vuzov. Sev.-Kav. region. Estestv. nauki*. 2012, No. 4, pp. 98–102.
4. Rylov V.G., Meshchaninov F.V. [Typomorphic features of high-carbon fluidites from burnt dumps of the liquidated anthracite mines of the Eastern Donbass]. *Sovremennye problemy razvitiya i osvoeniya ugol'noi*

sy'r'evoi bazy Rossii [Modern problems of development and mastering of the Russian coal resource base]. Materials of the All-Russian Coal Conference. Rostov-on-Don, VNIGRIugol', 2005, pp. 87-89.

5. Trufanov V.N., Gamov M.I., Maiskii Yu.G., Rylov V.G., Trufanov A.V. *Uglevodorodnaya flyuidizatsiya iskopaemykh uglei Vostochnogo Donbassa* [Hydrocarbon fluidization of fossil coals of the Eastern Donbass]. Rostov-on-Don, RGU, 2004, 272 p.

6. Zinchuk A.A., Kalyuzhnyi V.A., Shchiritsa A.S. *Flyuidnyi rezhim gidrotermal'nogo mineraloobrazovaniya Donbassa* [Fluid regime of hydrothermal mineral formation of Donbass]. Kiev, Naukova dumka, 1983, 164 p.

7. Saranchuk V.I., Baev X.A. *Teoreticheskie osnovy samovozgoraniya uglei* [Theoretical basis of self-ignition of coals]. Moscow, Nedra, 1976, 151 p.

8. Veselovskii V.S., Vinogradov L.P. [i dr.]. *Prognoz i profilaktika endogennykh pozharov* [Forecast and prevention of endogenous fires]. Moscow, Nauka, 1975, 159 p.

9. Trufanov V.N., Gamov M.I., Dudkevich L.K., Maiskii Yu.G., Trufanov A.V. *Osnovy prikladnoi termobarogeokhimii* [Fundamentals of applied thermobarogeochemistry]. Rostov-on-Don, YuFU, 2008, 280 p.

10. Zakrutkin V.E., Gibkov E.V. *Tekhnogennye geokhimicheskie potoki ugledobyvayushchikh territorii i ikh vliyanie na okruzhayushchuyu sredu (na primere Donetskogo basseina)* [Technogenic geochemical flows of coal-mining territories and their impact on the environment (on the example of the Donetsk basin)]. *Izv. vuzov. Sev.-Kavk. region. Estestv. nauki.* 2016, No. 3, pp. 66-72.

11. *Instruktsiya po izucheniyu i otsenke poputnykh tverdykh poleznykh iskopaemykh i komponentov pri razvedke mestorozhdenii uglya i goryuchikh slantsev* [Instructions for the study and evaluation of associated solid minerals and components in the exploration of coal and shale deposits]. Moscow, Nauka, 1987.

Поступила в редакцию / Received

22 февраля 2017 г. / February 22, 2017

УДК 504.064

DOI 10.23683/0321-3005-2017-2-101-109

СОВРЕМЕННЫЙ ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ И ТЕНДЕНЦИИ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ КАЧЕСТВА РЕЧНЫХ ВОД ВОСТОЧНОГО ДОНБАССА*

© 2017 г. В.Е. Закруткин¹, О.С. Решетняк¹, Г.Г. Бабаян², Е.В. Гибков¹, Г.А. Саакян², В.Н. Решетняк¹

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

²Центр эколого-ноосферных исследований НАН Республики Армения, Ереван, Армения

MODERN CHEMICAL COMPOSITION AND TRENDS OF SPATIAL-TEMPORAL VARIABILITY OF THE WATER QUALITY OF THE EASTERN DONBASS RIVERS

V.E. Zakrutkin¹, O.S. Reshetnyak¹, G.G. Babayan², E.V. Gibkov¹, G.A. Sahakyan², V.N. Reshetnyak¹

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

²Center for Ecological and Noospheric Studies, National Academy of Sciences of Armenia, Yerevan, Armenia

Закруткин Владимир Евгеньевич – доктор геолого-минералогических наук, профессор, заведующий кафедрой геоэкологии и прикладной геохимии, Институт наук о Земле, Южный федеральный университет, ул. Зорге, 40, г. Ростов-на-Дону, 344090, Россия, e-mail: vezak@list.ru

Vladimir E. Zakrutkin – Doctor of Geology and Mineralogy, Professor, Head of the Department of Geoecology and Applied Geochemistry, Institute of Earth Sciences, Southern Federal University, Zorge St., 40, Rostov-on-Don, 344090, Russia, e-mail: vezak@list.ru

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, e-mail: olgare1@rambler.ru

Olga S. Reshetnyak – Candidate of Geography, Associate Professor, Department of Geoecology and Applied Geochemistry, Institute of Earth Sciences, Southern Federal University, Zorge St., 40, Rostov-on-Don, 344090, Russia, e-mail: olgare1@rambler.ru

Бабаян Гаяне Грантовна – доктор технических наук, старший научный сотрудник, отдел геохимии окружающей среды, Центр эколого-ноосферных исследований, НАН Республики Армения, ул. Абовяна, 68, г. Ереван, 0025, Армения, e-mail: gayane.babayan@cens.am

Gayane G. Babayan – Doctor of Technical Sciences, Senior Researcher, Department of Environmental Geochemistry, Center for Ecological and Noospheric Studies, National Academy of Sciences of Armenia, Abovyana St., 68, Yerevan, 0025, Armenia, e-mail: gayane.babayan@cens.am

Гибков Евгений Викторович – кандидат географических наук, старший преподаватель, кафедра геоэкологии и прикладной геохимии, Институт наук о Земле, Южный федеральный университет, ул. Зорге, 40, г. Ростов-на-Дону, 344090, Россия, e-mail: irvict@mail.ru

Eugeniy V. Gibkov – Candidate of Geography, Senior Lecturer, Department of Geoecology and Applied Geochemistry, Institute of Earth Sciences, Southern Federal University, Zorge St., 40, Rostov-on-Don, 344090, Russia, e-mail: irvict@mail.ru

Саакян Геворг Ашотович – лаборант-исследователь, отдел геохимии окружающей среды, Центр эколого-ноосферных исследований, НАН Республики Армения, ул. Абовяна, 68, г. Ереван, 0025, Армения, e-mail: gevorg.sahakyan@cens.am

Gevorg A. Sahakyan – Laboratory Assistant-Researcher, Department of Environmental Geochemistry, Center for Ecological and Noospheric Studies, National Academy of Sciences of Armenia, Abovyana St., 68, Yerevan, 0025, Armenia, e-mail: gevorg.sahakyan@cens.am

Решетняк Виктор Николаевич – студент, Институт наук о Земле, Южный федеральный университет, ул. Зорге, 40, г. Ростов-на-Дону, 344090, Россия, e-mail: vnresh3@gmail.com

Victor N. Reshetnyak – Student, Institute of Earth Sciences, Southern Federal University, Zorge St., 40, Rostov-on-Don, 344090, Russia, e-mail: vnresh3@gmail.com

Представлены результаты оценки современного химического состава и тенденций пространственно-временной изменчивости качества речных вод Восточного Донбасса (бассейны Тузлова и Северского Донца). Показано, что поверхностные воды стабильно загрязнены широкой гаммой макро- и микрокомпонентов. В их числе – сульфаты, ионы Na, K и Mg, а из микрокомпонентов – Fe, Al, Mn, Cu, Sr. Сравнительная оценка химического состава поверхностных вод двух бассейнов показала, что реки бассейна Тузлова превосходят реки бассейна Северского Донца по содержанию всех макро- и микрокомпонентов.

* Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 14-17-00376).

За период 2010–2015 гг. качество воды большинства участков рек практически не меняется во времени, а уровень загрязнения остается стабильно высоким (5-й класс качества – «экстремально грязная»). На отдельных участках рек намечается тенденция улучшения качества воды (для реки Калитва в целом, верхних створов рек Большой и Малый Несветай, устьев рек Грушевка, Большая Каменка и Лихая). Некоторое снижение качества воды, фиксируемое в центральной части Восточного Донбасса, в верховьях малых рек бассейна Тузлова (Аюта, Малый Несветай и Грушевка), вероятно всего, связано с влиянием объектов угольной промышленности.

Ключевые слова: химический состав, качество воды, тенденции изменения качества, речные воды, Восточный Донбасс.

Results of the assessment of the modern chemical composition and trends in the spatial and temporal variability of the quality of the Eastern Donbass river waters (the Tuzlov and Seversky Donets basins) was presented in the article. It is shown that surface waters are stably contaminated by a wide range of macro- and microcomponents. There are sulfates, ions of Na, K and Mg, and among from microcomponents - Fe, Al, Mn, Cu, Sr. A comparative assessment of the chemical composition of the surface waters of the two basins has shown that the rivers of the Tuzlov basin outperform the rivers of the Seversky Donets basin for the content of all macro- and microcomponents.

For 2010-2015 the water quality of the most sections of rivers is practically unchanged, and the pollution level remains stably high (grade 5 quality is "extremely dirty"). In some parts of the rivers there is a tendency to improve the water quality (for the Kalitva river, the upper reaches of the Bolshoi and Malyi Nesvetai rivers, the mouths of the Grushevka, Bolshaya Kamenska and Likhaya rivers). Some decline in water quality was recorded in the central part of the Eastern Donbass in the upper reaches of the small rivers of the Tuzlov basin (Ayuta, Malyi Nesvetai and Grushevka) and is most likely associated with the influence of coal industry objects.

Keywords: chemical composition, water quality, water quality trends, river water, Eastern Donbass.

Введение

Восточный Донбасс, расположенный на западе Ростовской области, является одним из наиболее проблемных в экологическом отношении регионов Российской Федерации. Природный комплекс здесь на протяжении многих лет подвергается интенсивному техногенному воздействию. При этом основной вклад в осложнение экологической ситуации вносят предприятия угольной промышленности. Начавшаяся в 90-е гг. реструктуризация угледобывающей отрасли, основу которой составляет ликвидация нерентабельных шахт (главным образом путем их затопления), заметно усилила негативные явления. Длительная разработка угольных месторождений и последующая массовая ликвидация шахт привели к значительной трансформации геохимических процессов на Восточном Донбассе. Особенно заметно это проявилось в преобразовании химического состава и качества поверхностных и подземных вод [1–3].

Основными водными артериями Восточного Донбасса являются реки Тузлов и Северский Донец, образующие вместе со своими притоками два одноименных бассейна. Важно подчеркнуть, что наибольшую техногенную нагрузку в пределах изучаемой территории испытывают малые реки (Большой и Малый Несветай, Аюта, Грушевка, Кадамовка, Кундрючья, Лихая и др.), многие из них фактически утратили свои естественные природные функции. При этом наблюдается не только ухудшение качества воды и состояния гидробиоце-

нозов, но и становится невозможным использование поверхностных вод для питьевых и хозяйственных целей.

Целью данного исследования являются оценка современного химического состава и выявление тенденций пространственно-временной изменчивости качества речных вод Восточного Донбасса (бассейны Тузлова и Северского Донца).

Работа выполнена по результатам, полученным при выполнении в 2014–2016 гг. гранта РФ «Интегральная оценка и прогноз состояния водных ресурсов и их качества в пределах техногенно нарушенных геосистем углепромышленных территорий на основе комплексных геохимических, геофизических и экотоксикологических исследований».

Объекты исследования – реки бассейнов Тузлова (Большой и Малый Несветай, Грушевка, Кадамовка, Аюта, Атюхта и Тузлов) и Северского Донца (Большая Каменка, Большая Гнилуша, Быстрая, Калитва, Кундрючья, Лихая, Малая Каменка и Северский Донец).

Пробы речной воды отбирались равномерно по длине водотоков, охватывая верховья рек, средние их участки выше источников загрязнения и устья или устьевые створы. Изучение химического состава поверхностных вод проводили по следующим показателям: рН, концентрация растворенного в воде кислорода, минерализация, содержание главных ионов – хлориды (Cl^-), сульфаты (SO_4^{2-}), гидрокарбонаты (HCO_3^-), кальций (Ca^{2+}), магний (Mg^{2+}), натрий и калий ($\text{Na}^+ + \text{K}^+$), а также микроэлементов – Fe, Al, Be, Cd, Li, Mn, Cu, Sr.

Результаты и их обсуждение

Как было показано нами ранее [4–6], современный химический состав речных вод Восточного Донбасса характеризуется следующими общими особенностями:

- нейтральной или слабощелочной реакцией среды (6,5–8,5);
- насыщенностью кислородом (от 6,8 до 14,9 мг/дм³);
- высоким содержанием сульфатов;
- высокой минерализацией речных вод (от 1,0 до 6,8 г/дм³).

Однако сравнительная оценка солевого состава речных вод двух бассейнов показала, что реки бассейна Тузлова по содержанию всех макрокомпонентов превосходят водотоки бассейна Северского Донца (табл. 1). Так, к примеру, среднегодовые концентрации суммы ионов Na⁺+K⁺ и SO₄²⁻ в речных водах бассейна Тузлова превышают таковые в водах бассейна Северского Донца более чем в 2 раза. Это, в частности, характерно для рек Атюхта, Аюта, Большой и Малый Несветай, где содержание Na⁺+K⁺ превышает ПДК в 9,6; 5,4; 5,5 и 5,7 раза; SO₄²⁻ – в 33,5; 26,0; 22,4 и 23,3 раза соответственно.

Что касается остальных макрокомпонентов – хлорид-ионов, ионов кальция и магния – их содержание либо не превышает ПДК в речных водах обоих бассейнов (Cl⁻), либо превышает в 1–3 раза (Ca²⁺ и Mg²⁺).

Выявленная неоднородность химического состава речных вод Восточного Донбасса как между исследуемыми реками, так и между бассейнами рек проявляется, как правило, на участках сконцентрированно-го влияния действующих и ликвидируемых шахт.

Присутствие микроэлементов (в том числе тяжелых металлов) в речных водах обусловлено как природными, так и антропогенными факторами. На

территории Восточного Донбасса одним из наиболее значимых источников загрязнения окружающей среды металлами являются действующие и ликвидируемые объекты угледобывающей промышленности и сопутствующая им инфраструктура. Влияние техногенных вод ликвидированных шахт в большей степени проявляется на участках рек, находящихся в зоне непосредственного их влияния, где отмечается не только повышение минерализации воды, содержания сульфатов и ионов натрия, но и обогащение речных вод микроэлементами, особенно марганцем, алюминием, железом и стронцием [7–9].

По распространенности микроэлементов в речных водах Восточного Донбасса выделяются следующие особенности. Уровень загрязнения речных вод кадмием низкий, поскольку соединения Cd обнаруживаются в концентрациях, как правило, ниже ПДК. Для Li и Be характерно превышение ПДК в большинстве проб, хотя и с относительно невысокой кратностью превышения норматива (до 10). Содержание в речных водах остальных микроэлементов – Fe, Al, Mn, Cu, Sr – заметно превышает установленные нормативы (соответственно до 19,0; 48,5; 135,0; 10,0 и 18,0 ПДК) с высокой частотой превышения (более 50 %). Именно эти металлы представляют наибольшую опасность для поверхностных вод Восточного Донбасса, загрязнение ими носит устойчивый характер, а уровень – высокий и экстремально высокий.

Химический состав речных вод позволяет оценить качество воды, выявить обеспеченность водной среды питательными веществами, необходимыми для развития водной биоты, установить уровень загрязненности воды и выявить источники загрязнения, определить соответствие воды требованиям конкретных видов водопользования и т.п.

Таблица 1

Содержание макрокомпонентов в речных водах Восточного Донбасса (2014–2015 гг.)
/ The content of macrocomponents in the river waters of the Eastern Donbass (2014–2015)

| Показатель | Na ⁺ + K ⁺ * | Ca ²⁺ | Mg ²⁺ | Cl ⁻ | SO ₄ ²⁻ | HCO ₃ ⁻ |
|---|------------------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| Бассейн Северского Донца | | | | | | |
| Диапазон концентраций, мг/дм ³ | 136,3–549,7 | 107,2–231,3 | 28,1–104,7 | 71,0–449,3 | 249,6–1420,8 | 207,5–585,8 |
| Средняя концентрация, мг/дм ³ | 265,3 | 159,0 | 55,2 | 254,5 | 764,5 | 377,3 |
| Кратность превышения ПДК** | <u>4,6</u> 2,2 | <u>1,3</u> 0,9 | <u>2,6</u> 1,4 | <u>1,5</u> 0,8 | <u>15,4</u> 7,6 | –*** |
| Бассейн Тузлова | | | | | | |
| Диапазон концентраций, мг/дм ³ | 189,9–1258 | 152,3–429,9 | 59,9–172,2 | 28,5–586,1 | 691,2–3360 | 146,4–738,3 |
| Средняя концентрация, мг/дм ³ | 538,6 | 254,4 | 112,4 | 280,2 | 1855 | 407,2 |
| Кратность превышения ПДК | <u>10,5</u> 4,5 | <u>2,4</u> 1,4 | <u>4,3</u> 2,8 | <u>1,9</u> 0,9 | <u>33,6</u> 18,5 | – |

* – ПДК взято по нормативу для Na⁺; ** – в числителе – максимальная, в знаменателе – кратность превышения по средней концентрации; *** – не нормируется.

Оценка качества поверхностных вод в пределах техногенно нарушенных геосистем Восточного Донбасса проведена согласно принятой в системе Росгидромета комплексной методике с использованием интегрального показателя УКИЗВ – удельного комбинаторного индекса загрязнения воды [10]. Оценка выполнена по данным 2014–2015 гг., при этом для расчета УКИЗВ использован широкий перечень показателей, включая микроэлементы (Cd, Sr, Li, Be и др.), содержание которых значительно превышает допустимые нормативы качества вод в исследуемых реках.

Как было показано нами ранее [2, 6], малые и средние реки Восточного Донбасса отличались достаточно высокой комплексностью загрязнения, т.е. широкой ассоциацией компонентов, содержание которых превышает ПДК. Средние значения коэффициента комплексности изменялись в створах рек бассейна Северского Донца в диапазоне 41–56, бассейна Тузлова – 41–59.

На современном этапе, как показывают данные табл. 2, наихудшим качеством характеризуется вода рек бассейна Тузлова.

Таблица 2

Качество поверхностных вод Восточного Донбасса в 2014–2015 гг.
/ The surface water quality of the Eastern Donbass in 2014–2015

| Река | Тип створа | УКИЗВ | Кол-во КПЗ | Степень загрязненности воды (класс качества) |
|---------------------------------|------------|-------|------------|--|
| Бассейн Тузлова | | | | |
| Атюхта | Устьевой | 7,05 | 7 | Экстремально грязная (5) |
| Аюта | Верхний | 7,37 | 9 | Экстремально грязная (5) |
| | Нижний | 6,09 | 7 | Экстремально грязная (5) |
| | Устьевой | 6,56 | 8 | Экстремально грязная (5) |
| Большой Несветай | Верхний | 4,85 | 4 | Очень грязная (4 «в») |
| | Нижний | 6,38 | 6 | Экстремально грязная (5) |
| | Устьевой | 6,73 | 6 | Экстремально грязная (5) |
| Грушевка | Верхний | 5,96 | 5 | Экстремально грязная (5) |
| | Нижний | 6,27 | 5 | Экстремально грязная (5) |
| | Устьевой | 6,19 | 4 | Очень грязная (4 «г») |
| Кадамовка | Верхний* | 6,33 | 5 | Экстремально грязная (5) |
| | Нижний | 7,03 | 6 | Экстремально грязная (5) |
| | Устьевой | 6,49 | 6 | Экстремально грязная (5) |
| Малый Несветай | Верхний* | 6,27 | 6 | Экстремально грязная (5) |
| | Нижний | 6,53 | 8 | Экстремально грязная (5) |
| | Устьевой | 6,56 | 5 | Экстремально грязная (5) |
| Тузлов | Верхний | 7,05 | 7 | Экстремально грязная (5) |
| | Устьевой | 5,72 | 5 | Экстремально грязная (5) |
| Бассейн Северского Донца | | | | |
| Большая Каменка | Устьевой | 5,32 | 4 | Очень грязная (4 «в») |
| Большая Гнилуша | Верхний | 6,72 | 8 | Экстремально грязная (5) |
| | Устьевой | 6,20 | 5 | Экстремально грязная (5) |
| Быстрая | Верхний | 4,06 | 2 | Грязная (4 «а») |
| | Устьевой | 5,14 | 3 | Грязная (4 «б») |
| Калитва | Верхний | 3,82 | 1 | Грязная (4 «а») |
| | Нижний | 4,04 | 3 | Грязная (4 «а») |
| | Устьевой | 4,39 | 4 | Очень грязная (4 «в») |
| Кундрючья | Нижний | 6,56 | 7 | Экстремально грязная (5) |
| | Устьевой | 6,06 | 5 | Экстремально грязная (5) |
| Лихая | Верхний | 5,45 | 6 | Экстремально грязная (5) |
| | Нижний | 5,32 | 5 | Очень грязная (4 «г») |
| | Устьевой | 5,91 | 5 | Экстремально грязная (5) |
| М. Каменка | Верхний | 6,03 | 6 | Экстремально грязная (5) |
| | Нижний | 5,55 | 5 | Экстремально грязная (5) |
| | Устьевой | 4,76 | 6 | Экстремально грязная (5) |
| Северский Донец | Верхний | 4,39 | 5 | Очень грязная (4 «в») |
| | Нижний | 4,15 | 5 | Очень грязная (4 «в») |
| | Устьевой | 4,54 | 5 | Очень грязная (4 «в») |

Примечание: «верхний», «нижний» – створ на участке реки выше или ниже сброса шахтных вод или другого источника загрязнения (* означает совпадение верхнего створа с верховьем реки); «устьевой» – створ на устьевом участке реки или самый нижний створ наблюдений на водотоке; КПЗ – критические показатели загрязнения воды [10].

По результатам комплексной оценки оно, в частности, оценивается 5-м классом – «экстремально грязная». В большинстве створов из 19 определяемых нормируемых ингредиентов 9–12 являются характерными загрязняющими веществами (т.е. превышают ПДК более чем в 50 % проб), а 4–9 – критическими показателями загрязнения (КПЗ) воды (табл. 2). В число последних входят как макрокомпоненты (сульфаты, ионы натрия и магния), так и микрокомпоненты (Fe, Al, Mn, Cu, Sr).

Несколько ниже загрязненность рек бассейна Северского Донца. Качество воды здесь по результатам комплексной оценки варьирует от 4-го класса («грязная» и «очень грязная») до 5-го класса («экстремально грязная») (табл. 2). Наибольшим уровнем загрязнения в этом бассейне характеризуются реки Большая Каменка, Кундрючья и Большая Гнилуша, а наименьшим (4-й класс) – реки Малая Каменка, Быстрая (верховья рек) и Северский Донец.

Таким образом, на протяжении многих лет качество воды рек в пределах техногенно нарушенных территорий Восточного Донбасса (особенно в местах ликвидации шахт) характеризуется высоким уровнем загрязнения. При этом наибольшую техногенную нагрузку испытывают реки бассейна Тузлова – Большой и Малый Несветай, Аюта, Грушевка, Кадамовка, Лихая, что наряду с их малой водностью определяет и более низкий уровень качества водной среды этих рек [4, 11–13].

Для выявления временных тенденций изменения качества речных вод проведена сравнительная оценка значений УКИЗВ за период с 2010 по 2015 г. При этом выделялись общие для участков рек КПЗ воды, высокие концентрации которых приводили к ухудшению её качества.

Соотношение участков рек в бассейнах Тузлова и Северского Донца с разными тенденциями изменчивости качества воды представлено на рис. 1. Как видно, для большинства рек Восточного Донбасса качество воды практически не меняется во времени, а уровень загрязнения остается стабильно высоким, особенно в бассейне Тузлова (5-й класс – «экстремально грязная» в подавляющем большинстве створов). Наибольший вклад в загрязнение поверхностных вод традиционно вносят сульфат-ионы (SO_4^{2-}), ионы Na^+ , соединения Fe, Al, Mn, Cu и Sr, которые являются типоморфными компонентами техногенных шахтных вод.

Вместе с тем на отдельных участках рек намечается тенденция улучшения качества воды. Она характерна для реки Калитва в целом, верхних створов рек Большой и Малый Несветай, устьев рек Грушевка, Большая Каменка и Лихая. Здесь качество воды меняется с 5-го на 4-й класс, а степень загрязненности воды оценивается как пере-

ходная от «экстремально грязной» к «очень грязной» или «грязной». Доля створов с такой тенденцией в бассейнах Тузлова и Северского Донца составляет соответственно 15,0 и 16,0 % (рис. 1).

Однако на некоторых участках рек, особенно в бассейне Северского Донца (р. Малая Каменка и Лихая), отмечаются незначительное снижение качества речных вод с 4-го на 5-й класс и переход степени загрязненности воды от «грязной» или «очень грязной» к «экстремально грязной».

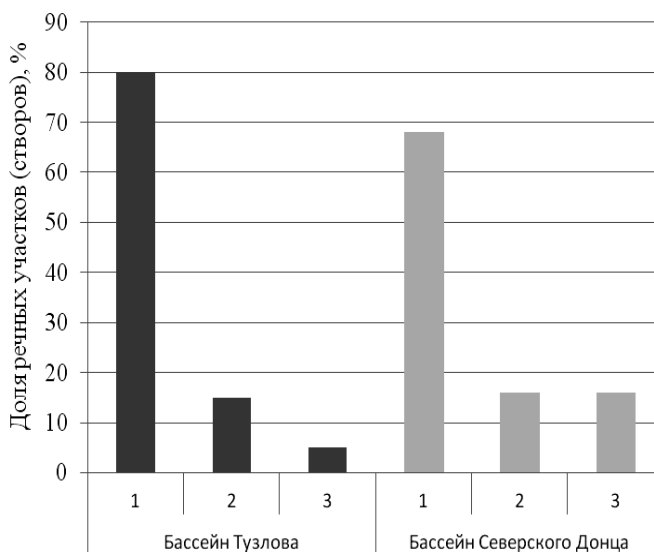


Рис. 1. Соотношение участков рек (створов) в бассейнах Тузлова и Северского Донца с разными тенденциями изменчивости качества воды: 1 – стабильно высокая степень загрязненности воды (4-й или 5-й класс качества); 2 – улучшение качества воды с 5-го на 4-й класс качества; 3 – ухудшение качества воды с 4-го на 5-й класс качества / Fig. 1. Ratio of river sections (point) in the Tuzlov and Seversky Donets basins with different trends in water quality variability: 1 - consistently high degree of water pollution (4th or 5th grade); 2 - improvement of water quality from the 5th to the 4th grade; 3 - water quality deterioration from 4th to 5th grade

Для визуализации пространственно-временной изменчивости качества речных вод с помощью инструмента ArcGis – растрового калькулятора – построена картосхема (рис. 2). Из неё видно, что на большей части территории Восточного Донбасса (около 70 %) наблюдается тенденция стабилизации гидроэкологической обстановки. Наряду с этим на периферийных участках, удаленных относительно воздействия объектов угольной промышленности (северная и юго-западная часть исследуемой территории), отмечается снижение степени загрязненности поверхностных вод по интегральному показателю УКИЗВ. И лишь в центральной части Восточного Донбасса в верховьях малых рек бассейна Тузлова (Аюта, Малый Несветай и Грушевка) фиксируется

некоторое ухудшение качества воды, что может быть связано с наличием в этой зоне «куста» из 5 шахт («Степановская», им. Ленина, им. газеты «Комсомольская правда», «Западная Капитальная» и «Юбилейная»), гидравлически связанных между собой.

В результате их ликвидации путем затопления они сформировали единое пространство, вмещаю-

щее значительные объемы высокоминерализованных техногенных шахтных вод. Зона распространения этого поля постепенно увеличивалась и, по нашим подсчетам, в настоящее время охватывает площадь примерно 60 км², что не могло не сказаться на масштабах взаимодействия поверхностных и подземных вод в пределах этой территории.

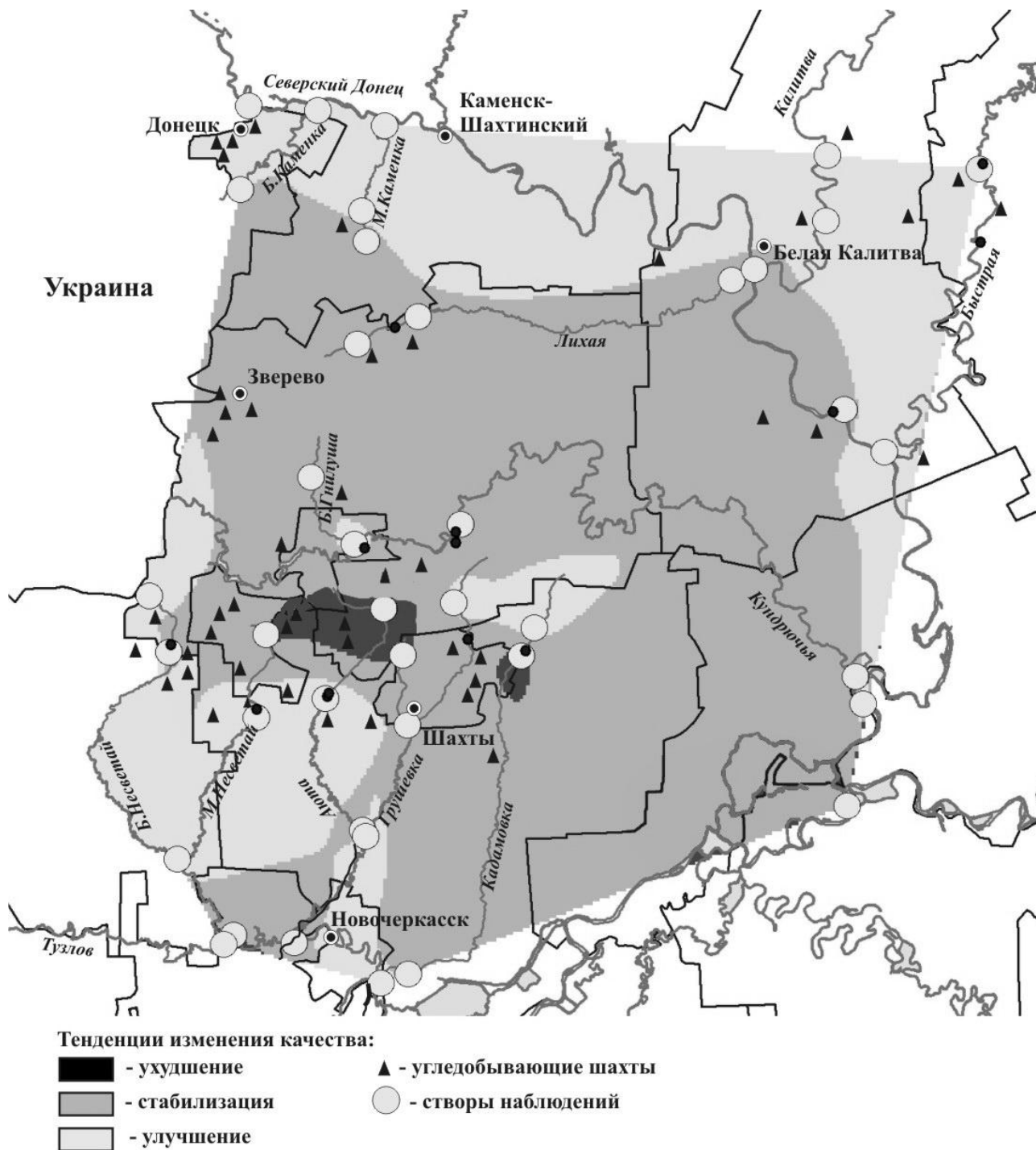


Рис. 2. Пространственно-временная изменчивость качества речных вод Восточного Донбасса (2010–2015 гг.)
/ Fig. 2. Spatial-temporal variability of the river water quality of the Eastern Donbass (2010–2015)

Главным следствием этого процесса стал рост объемов шахтных вод, поступающих в речную сеть в местах их разгрузки. Функционирующий же здесь водоотливной комплекс откачивает воду только из замыкающей систему перетоков шахты «Юбилейная», что, как видно из анализа пространственно-временной тенденции, оказывается недостаточным не только для улучшения, но и для стабилизации качества воды в этих реках.

Заключение

Проведенные исследования позволяют сделать следующие выводы.

Выявлены особенности современного химического состава речных вод, характерные как для углепромышленного региона Восточного Донбасса в целом, так и для отдельных речных бассейнов (Северского Донца и Тузлова). Установлено, что минерализация вод изменяется в широких пределах – от 1 до 7 г/л, достигая наибольших значений в зонах непосредственного влияния действующих или ликвидированных шахт. Воды стабильно загрязнены широкой гаммой макро- и микрокомпонентов. Среди макрокомпонентов особенно выделяются сульфат-ионы, Na^+ , K^+ и Mg^{2+} , содержания которых превышают ПДК в большинстве проб. Из микрокомпонентов особого внимания заслуживают Fe, Al, Mn, Cu, Sr. Именно металлы этой группы представляют наибольшую опасность для поверхностных вод Восточного Донбасса, поскольку загрязнение ими носит устойчивый характер, а уровень загрязнения – высокий и экстремально высокий. Сравнительная оценка химического состава поверхностных вод двух бассейнов показала, что реки бассейна Тузлова превосходят реки бассейна Северского Донца по содержанию всех макро- и микрокомпонентов. Это и следовало ожидать, так как именно на водосборном бассейне Тузлова локализовано наибольшее количество объектов добычи и переработки угля, ликвидированных шахт.

Проведена оценка тенденций изменения качества поверхностных вод по гидрохимическим показателям за период 2010–2015 гг. Для большинства рек качество воды практически не меняется во времени, а уровень загрязнения остается стабильно высоким («экстремально грязная»). Вместе с тем намечается тенденция улучшения качества воды на отдельных участках рек: для реки Калитва в целом, верхних створов рек Большой и Малый Несветай, устьев рек Грушевка, Большая Каменка и Лихая. Снижение степени загрязненности поверхностных вод отмечается, как правило, на участках, удален-

ных относительно воздействия объектов угольной промышленности. Некоторое ухудшение качества воды, фиксируемое в центральной части Восточного Донбасса в верховьях малых рек бассейна Тузлова, вероятнее всего, связано с широкомасштабным воздействием техногенных шахтных вод, сформировавших здесь единое поле ориентировочной площадью 60 км².

Выявленная положительная тенденция улучшения качества речных вод для отдельных участков рек Восточного Донбасса вселяет определенный оптимизм и свидетельствует об эффективности проводимых в последние годы природоохранных мероприятий. Однако если учесть, что в соответствии с Концепцией развития угольной промышленности Ростовской области на период до 2030 года планируется строительство новых угледобывающих предприятий на перспективных участках, то по-прежнему актуальными остаются разработка и принятие эффективных мер по реабилитации экологического состояния водосборных территорий Северского Донца и Тузлова, внедрение рациональной системы гидроэкологического мониторинга в регионе.

Литература

1. *Закруткин В.Е., Иваник В.М.* Состояние загрязненности воды рек Ростовской области в районах техногенного влияния ликвидируемых шахт Восточного Донбасса (реки бассейна Тузлова) // Современные фундаментальные проблемы гидрохимии и мониторинга качества поверхностных вод России : материалы науч.-практ. конф. с междунар. участием. Ч. 1. Ростов н/Д., 2009. С. 88–91.
2. *Закруткин В.Е., Иваник В.М., Гибков Е.В., Скляр В.В.* Оценка влияния ликвидируемых шахт Восточного Донбасса на гидрохимический состав малых рек бассейна Северского Донца // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2010. № 3. С. 84–87.
3. *Закруткин В.Е., Гибков Е.В., Скляренко Г.Ю., Решетняк О.С.* Сравнительная оценка качества поверхностных и подземных вод Восточного Донбасса по гидрохимическим показателям // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2016. № 2. С. 91–99.
4. *Никаноров А.М., Закруткин В.Е., Решетняк О.С., Гибков Е.В., Решетняк В.Н.* Изменчивость химического состава и качества поверхностных вод техногенно нарушенных геосистем Восточного Донбасса // Фундаментальные проблемы воды и водных ресурсов : тр. IV Всерос. науч. конф. с междунар. участием. Москва, 15–18 сентября 2015 г. М. : ИВП РАН, 2015. С. 186–188.

5. Решетняк О.С., Никаноров А.М., Закруткин В.Е. Современный химический состав речных вод на территории Восточного Донбасса // Современные проблемы гидрохимии и мониторинга качества поверхностных вод : материалы науч. конф. с междунар. участием. Ч. 2. Ростов н/Д., 2015. С. 263–267.

6. Reshetnyak O.S., Nikanorov A.M., Zakrutkin V.Ye., Gibkov Ye.V. The Chemical Composition of Surface Waters of Techno-genically Affected Geo-Systems in the Eastern Donbas Region // European Researcher. 2014. Vol. (86), № 11–1. P. 1978–1992.

7. Приваленко В.В. Загрязненность поверхностных вод // Проблемы и перспективы комплексного освоения минеральных ресурсов Восточного Донбасса. Ростов н/Д., 2005. С. 143–147.

8. Решетняк О.С., Закруткин В.Е., Гибков Е.В. Микроэлементы в речных водах Восточного Донбасса // Геоэкологические проблемы углепромышленных территорий : сб. тр. науч. конф. с междунар. участием. Ростов н/Д. : Изд-во ЮФУ, 2015. С. 283–295.

9. Экологический мониторинг ликвидации неперспективных шахт Восточного Донбасса / под ред. В.М. Еремеева. Шахты, 2001. 182 с.

10. РД 52.24.643-2002. Методические указания. Метод комплексной оценки степени загрязненности поверхностных вод по гидрохимическим показателям. СПб. : Гидрометеиздат, 2002. 49 с.

11. Решетняк В.Н., Решетняк О.С. Тенденции изменчивости качества воды реки Тузлов // Актуальные проблемы наук о Земле : сб. тр. науч. конф. студентов и молодых ученых с междунар. участием. Ростов н/Д. : Изд-во ЮФУ, 2015. С. 404–407.

12. Zakrutkin V.E., Gibkov E.V., Reshetnyak O.S., Sklyarenko G.Y. Changing hydrochemical indicators of the rivers of East Donbassin a consequence the liquidation of the unprofitable coal mines // 15th International Multidisciplinary Scientific GeoConference. Surveying Geology and Mining Ecology Management. SGEM. 2015. P. 113–120.

13. Zakrutkin V., Sklyarenko G., Reshetnyak O., Gibkov E. Comparative evaluation of surface water and groundwater quality of the Eastern Donbass by hydrochemical indicators // 16th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM. 2016. B. 3, vol. 1. P. 177–188.

References

1. Zakrutkin V.E., Ivanik V.M. [State of pollution of the rivers of the Rostov Region in the areas of technogenic influence of the liquidated mines of the Eastern Donbass (the Tuzlov river basin)]. *Sovremennye fundamental'nye problemy gidrokhimii i monitoringa kachestva poverkhnostnykh vod Rossii* [Modern fundamental problems of hydrochemistry and monitoring of the quality of the surface waters in Russia]. Proceedings

of the Scientific and Practical Conference with international participation. Ch. 1. Rostov-on-Don, 2009, pp. 88–91.

2. Zakrutkin V.E., Ivanik V.M., Gibkov E.V., Sklyarov V.V. Otsenka vliyaniya likvidiruemykh shakht Vostochnogo Donbassa na gidrokhimicheskii sostav mal'nykh rek basseina Severskogo Donsa [Assessment of the impact of the liquidated mines of the Eastern Donbass on the hydrochemical composition of small rivers in the Seversky Donets Basin]. *Izv. vuzov. Sev.-Kavk. region. Estestv. nauki*. 2010, No. 3, pp. 84–87.

3. Zakrutkin V.E., Gibkov E.V., Sklyarenko G.Yu., Reshetnyak O.S. Sravnitel'naya otsenka kachestva poverkhnostnykh i podzemnykh vod Vostochnogo Donbassa po gidrokhimicheskim pokazatelyam [Comparative assessment of the quality of the surface and groundwaters of the Eastern Donbass on hydrochemical indicators]. *Izv. vuzov. Sev.-Kavk. region. Estestv. nauki*. 2016, No. 2, pp. 91–99.

4. Nikanorov A.M., Zakrutkin V.E., Reshetnyak O.S., Gibkov E.V., Reshetnyak V.N. [Variability of the chemical composition and quality of surface waters of technogenically disturbed geosystems of the Eastern Donbass]. *Fundamental'nye problemy vody i vodnykh resursov* [Fundamental problems of water and water resources]. Proceedings of the Fourth All-Russian Scientific Conference with International Participation. Moscow, September 15–18, 2015. Moscow, IVP RAN, 2015, pp. 186–188.

5. Reshetnyak O.S., Nikanorov A.M., Zakrutkin V.E. [Modern chemical composition of river water in the territory of the Eastern Donbass]. *Sovremennye problemy gidrokhimii i monitoringa kachestva poverkhnostnykh vod* [Modern problems of hydrochemistry and surface water quality monitoring]. Materials of a scientific conference with international participation. Ch. 2. Rostov-on-Don, 2015, pp. 263–267.

6. Reshetnyak O.S., Nikanorov A.M., Zakrutkin V.Ye., Gibkov Ye.V. The Chemical Composition of Surface Waters of Techno-genically Affected Geo-Systems in the Eastern Donbas Region. *European Researcher*. 2014, vol. (86), No. 11–1, pp. 1978–1992.

7. Privalenko V.V. [Pollution of surface water]. *Problemy i perspektivy kompleksnogo osvoeniya mineral'nykh resursov Vostochnogo Donbassa* [Problems and prospects of integrated development of mineral resources of the Eastern Donbass]. Rostov-on-Don, 2005, pp. 143–147.

8. Reshetnyak O.S., Zakrutkin V.E., Gibkov E.V. [Microelements in the river waters of the Eastern Donbass]. *Geoekologicheskie problemy uglepromyshlennykh territorii* [Geoeological problems of coal-mining territories]. Collection of proceedings of a Scientific Conference with international participation. Rostov-on-Don, Izd-vo YuFU, 2015, pp. 283–295.

9. *Ekologicheskii monitoring likvidatsii neperspektivnykh shakht Vostochnogo Donbassa* [Ecological monitoring of the liquidation of unpromising mines of the Eastern Donbass]. Ed. V.M. Ereemeev. Shakhty, 2001, 182 p.

10. RD 52.24.643-2002. *Metodicheskie ukazaniya. Metod kompleksnoi otsenki stepeni zagryaznennosti poverkhnostnykh vod po gidrokhimicheskim pokazatelyam* [RD 52.24.643-2002. Methodical instructions. The method of integrated assessment of the degree of contamination of surface waters by hydrochemical indicators]. Saint Petersburg, Gidrometeoizdat, 2002, 49 p.

11. Reshetnyak V.N., Reshetnyak O.S. [Trends in the variability of water quality in the Tuzlov River]. *Aktual'nye problemy nauk o Zemle* [Actual problems of Earth Sciences]. Collection of proceedings of a Scientific

Conference of students and young scientists with international participation. Rostov-on-Don, Izd-vo YuFU, 2015, pp. 404-407.

12. Zakrutkin V.E., Gibkov E.V., Reshetnyak O.S., Sklyarenko G.Y. Changing hydrochemical indicators of the rivers of East Donbassin a consequence the liquidation of the unprofitable coal mines. *15th International Multidisciplinary Scientific GeoConference. Surveying Geology and Mining Ecology Management. SGEM*. 2015, pp. 113-120.

13. Zakrutkin V., Sklyarenko G., Reshetnyak O., Gibkov E. Comparative evaluation of surface water and groundwater quality of the Eastern Donbass by hydrochemical indicators. *16th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM*. 2016, b. 3, vol. 1, pp. 177-188.

Поступила в редакцию / Received

20 марта 2017 г. / March 20, 2017

УДК 616-036.22+574.224

DOI 10.23683/0321-3005-2017-2-110-117

ВЗАИМОСВЯЗЬ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ И ЭКОЛОГИЧЕСКИ ОБУСЛОВЛЕННОЙ ЗАБОЛЕВАЕМОСТИ НАСЕЛЕНИЯ НА ТЕРРИТОРИИ ТЕХНОГЕННОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ

© 2017 г. С.И. Лещук¹, И.В. Суркова², Н.В. Сенкевич³

¹Иркутский институт (филиал), Всероссийский государственный университет юстиции, Иркутск, Россия,

²Сибирская академия права, экономики и управления, Иркутск, Россия,

³Иркутское управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, Иркутск, Россия

INTERRELATION OF ENVIRONMENTAL POLLUTION AND ENVIRONMENTALLY CAUSED MORBIDITY IN THE TERRITORY OF TECHNOGENIC POLLUTION

S.I. Leshchuk¹, I.V. Surkova², N.V. Senkevich³

¹Irkutsk Institute (Branch), All-Russian State University of Justice, Irkutsk, Russia,

²Siberian Academy of the Law, Economy and Management, Irkutsk, Russia,

³Irkutsk Department of Hydrometeorology and Environmental Monitoring, Irkutsk, Russia

Лещук Светлана Ивановна – доктор биологических наук, профессор, кафедра естественных и информационных технологий, Иркутский институт (филиал), Всероссийский государственный университет юстиции, ул. Некрасова, 4, г. Иркутск, 664011, Россия, e-mail: leschuk.swet@yandex.ru

Svetlana I. Leshchuk – Doctor of Biology, Professor, Department of Natural and Information Technologies, Irkutsk Institute (Branch), All-Russian State University of Justice, Nekrasova St., 4, Irkutsk, 664011, Russia, e-mail: leschuk.swet@yandex.ru

Суркова Ирина Викторовна – аспирант, кафедра экологии, Сибирская академия права, экономики и управления, ул. Сурикова, 21, г. Иркутск, 664025, Россия, e-mail: suririna07@mail.ru

Irina V. Surkova – Postgraduate, Department of Ecology, Siberian Academy of the Law, Economy and Management, Surikova St., 21, Irkutsk, 664025, Russia, e-mail: suririna07@mail.ru,

Сенкевич Наталья Васильевна – ведущий специалист, Иркутское управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, ул. Партизанская, 76, г. Иркутск, 664047, Россия

Natalia V. Senkevich – Leading Specialist, Irkutsk Department of Hydrometeorology and Environmental Monitoring, Partizanskaya St., 76, Irkutsk, 664047, Russia

Масштабы вредного воздействия промышленного производства в г. Иркутске на окружающую человека среду в настоящее время достигли критического уровня, $IЗА \leq 15$. В регионе наблюдается наличие трудноустраняемых антропогенных загрязнителей всех компонентов биосферы, включая воду, почву и атмосферный воздух. Загрязненная атмосфера оказывает прямое влияние на снижение резистентности организма и усиливает действие патогенных агентов. Проведен анализ антропогенной нагрузки и природно-климатических условий г. Иркутска, дана экологическая характеристика изучаемой территории, охарактеризовано состояние популяционного здоровья и выявлена распространенность экологически обусловленной заболеваемости населения. Проведена эколого-гигиеническая оценка территории в период с 2008 по 2014 г. и определены приоритетные загрязнители атмосферного воздуха. Исследовалась динамика выбросов от стационарных источников, в том числе их общее количество. Выявлена корреляционная связь между степенью загрязнения атмосферы города и заболеваемостью детского, взрослого и подросткового населения. Состояние здоровья анализировалось на основании общей и впервые выявленной заболеваемости, которая оценивалась по основным классам болезней международной классификации: новообразования, инфекционные и паразитарные болезни, болезни органов дыхания, крови и кроветворных органов, органов пищеварения и др.

Ключевые слова: загрязнение атмосферного воздуха, источники загрязнения, климатические показатели, заболеваемость населения.

The purpose of the article was to study the effect of environmental factors and the anthropogenic impact on the health of the population of Irkutsk. The analysis of climatic conditions is made, as well as the anthropogenic load on the studied territory. The main air pollutants are presented (transport and energy companies), detail designated air pollutants. The impact of pollutants on human health described. The state of population health is analyzed and found the prevalence of environmentally induced disease.

The degree of closeness of the relationship between emissions of stationary sources of pollution of the city of Irkutsk for the 2008-2011, have established correlation coefficient r . If the values $0.1 < r < 0.3$, then the connection is weak if $0.3 < r < 0.5$, the bond reasonable if $0.5 < r < 0.7$ - rather strong dependence if the values $0.7 < r < 0.9$ - bond is high, if the values $0.9 < r < 0.99$ - the connection is very high. Indicators closeness of the connection between emissions calculated to Excel, given by the Cheddok's scale.

Research objects:

1. Natural and climatic terms of territory of the Irkutsk area.
2. Morbidity of population of the Irkutsk area.
3. To describe the state of population health and educe prevalence of the ecologically conditioned morbidity on the studied territory.

Article of research: state of health of population, formed under act of natural and ecological factors.

Keywords: air pollution, pollutants, sources of pollution, morbidity of the population.

Введение

Экологическое состояние территории Иркутской области. Общее экологическое состояние в Иркутской области характеризуется Министерством природных ресурсов РФ как зона со сложной экологической обстановкой [1, 2].

Постоянный мониторинг состояния загрязнения атмосферного воздуха в крупных городах Иркутской области, проводимый Иркутским управлением по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды в рамках федеральных программ, свидетельствует о его неудовлетворительном качестве. В восьми промышленных центрах области, что составляет 42 % от всех обследованных населенных пунктов, уровень загрязнения атмосферного воздуха оценивается как высокий и очень высокий: Ангарск, Братск, Зима, Иркутск – с очень высоким ($ИЗА \leq 15$); Усолье-Сибирское, Усть-Илимск, Черемхово и Шелехов – с высоким уровнем загрязнения воздушного бассейна ($ИЗА \leq 14$) [1, 3].

Состояние здоровья 70 % экономически активного населения оценивается как неудовлетворительное [1, 2, 4, 5]. Экологическая составляющая в промышленных городах напрямую связана с научно-техническим прогрессом, и этим определяется негативная нагрузка на окружающую среду. Антропогенная эмиссия аэрозольных частиц носит локальный характер, основными источниками которой являются энергетические объекты, промышленные предприятия, находящиеся вблизи от жилых массивов и транспорт [6, 7].

Материалы и методы

Оценка загрязнения атмосферного воздуха от стационарных источников проводилась по материалам отчетной формы № 2-ТП (воздух) за 1997–2014 гг. с установлением качественного и количественного состава и удельного веса выбросов. Было всего проанализировано около 200 форм отчетности № 2-ТП (воздух) «Сведения об охране атмо-

сферного воздуха», определены приоритетные загрязнители твердые, газообразные и жидкие, из них диоксид серы, оксид углерода, оксиды азота, углеводороды (без летучих органических соединений).

Степень загрязнения атмосферного воздуха определялась по комплексному показателю Р и К.

Состояние здоровья населения оценивалось на основании общей и впервые выявленной заболеваемости детей, подростков и взрослого населения.

Оценка состояния здоровья проведена по формам текущей отчетности лечебно-профилактических учреждений форма № 12 «Сведения о числе заболеваний, зарегистрированных у пациентов, проживающих в районе обслуживания медицинской организации» (форма № 12-у).

Статистическая обработка проводилась с использованием программы Microsoft Excel. Взаимосвязи между изучаемыми показателями анализировались с использованием коэффициента ранговой корреляции Спирмена (r). Показатели тесноты связью определялись по шкале Чеддока.

Результаты

Источники поступления и уровни содержания загрязняющих веществ в атмосферном воздухе. По данным ФГУЗ «Центр гигиены и эпидемиологии Иркутской области», всего в 2014 г. было исследовано 7335 проб воздуха, из них с превышением предельно допустимых концентраций (ПДК) – 238 проб, или 3,2 %, от 1,1 до 2,2 ПДК – 231 проба, от 2,1 до 5 ПДК – 7 проб, свыше 5 ПДК превышений не регистрировалось. Основную долю проб с превышением ПДК составляют взвешенные вещества (43,3 %), формальдегид – 16,7 %, углерод черный – 16,8, азота диоксид IV – 7,1, азота диоксид II – 3,4, бенз(а)пирен – 4,6 %. Превышения от 1 до 2 ПДК составляют 97 % всех проб, от 2,1 до 5 ПДК – 2,9 %. Оценка загрязнения атмосферного воздуха проводится по коэффициенту суммарного загрязнения, который учитывает влияние всех загрязняющих веществ на территории. Учитывая высо-

кий уровень загрязнения атмосферного воздуха ($ИЗА_{\leq 15}$) в большинстве городов Иркутской области, мы проводили исследование по областному центру г. Иркутску.

Источниками загрязнения атмосферного воздуха являются промышленность и транспорт. Основные загрязнители атмосферного воздуха города – это выхлопные газы автомобилей (52 % выбросов) и источники теплоэнергетики (46 % выбросов) и др.

В Иркутске насчитывается 196 предприятий, выбрасывающих в атмосферу загрязняющие вещества. 94 % всех выбросов стационарных источников составляют продукты горения (угольная и мазутная смолы, бензапирен, окись углерода, двуокись азота, сернистый ангидрид и др.).

Главными загрязнителями атмосферного воздуха города являются токсичные вещества: диоксид серы, оксид азота, оксид углерода, углеводороды и твердые частицы (пыль), образующиеся в процессе производственной деятельности. Их доля в общем объеме составляет 98 %, количественное содержание ежегодно выбрасываемых этих веществ приведено в табл. 1.

Из данных таблицы следует, что одним из основных по массе загрязнителей атмосферы является углекислый газ (CO_2), доля которого в XX в. увеличилась на 25 %, выброс его определяется в основном мировым потреблением и производством электроэнергии.

В распространении загрязняющих веществ играют важное значение метеорологические факторы. Наибольшая их повторяемость в г. Иркутске наблюдалась в 2009 и 2012 гг. с большой продолжительностью осадков: 199 и 218 дней соответственно, наименьшая повторяемость отмечена в 2008 и 2014 гг. При этом повторяемость ветров и застоев имеет одинаковый ход изменчивости в этом семилетнем периоде – 31–41 и 27–28 %, что подтверждается сравнением со среднемесячным ходом этих параметров, приведенных в табл. 2.

Метеопараметры приземного слоя атмосферы (инверсия температуры), ветра, туманы, осадки способствуют накоплению загрязнения этого слоя. Приземный слой атмосферы – часть пограничного слоя атмосферы от земной поверхности до высоты не-

сколько десятков метров, в котором скорость ветра, температура и влажность воздуха особенно быстро меняются. В табл. 2 приведена динамика годового хода изменений метеорологических параметров в период с 2008 по 2014 г. на изучаемой территории.

Уменьшение и увеличение концентрации вредных веществ в сезонные периоды года обуславливаются в основном комплексным воздействием как благоприятных, так и неблагоприятных метеоусловий.

Влияние перечисленных метеорологических параметров учитывалось при оценке концентрации загрязняющих и токсичных веществ длительного накопления.

Таблица 1

Средние объемы выбрасываемых в атмосферу токсичных веществ по г. Иркутску / The average volume of emitted toxic substances in the city of Irkutsk

| Вещество | Выбросы, млн т | | Доля антропогенных примесей от общих поступлений, % |
|-----------------|----------------|---------------|---|
| | естественные | антропогенные | |
| Твердые частицы | 3700 | 1000 | 27 |
| CO | 5000 | 304 | 5,7 |
| CH ₄ | 2600 | 88 | 3,3 |
| NO ₃ | 770 | 53 | 6,5 |
| SO ₂ | 650 | 150 | 13,3 |
| CO ₂ | 485000 | 22000 | 4,5 |

Таблица 2

Сводная таблица климатических показателей г. Иркутска в период с 2008 по 2014 г. / Summary table of climate indicators in the city of Irkutsk in the period from 2008 to 2014

| Метеорологические характеристики | Годы | | | | | | |
|---|----------------|---------------|--------------|--------------|---------------|--------------|--------------|
| | 2008 | 2009 | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 |
| Осадки, количество дней | 192 (132)* | 199 (132) | 196 (182) | 180 (182) | 218 (1865) | 184 (192) | 187 (193) |
| Скорость ветра, м/с | 2 (2,2) | 1,9 (2,2) | 2,1 (2,0) | 2,0 (2,0) | 2,0 (2,0) | 2,2 (2) | 2,1 (2) |
| Повторяемость приземных инверсий температуры | 54 (47) | 58 (47) | 52 (50) | 58 (50) | 59 (56) | 59 (56,2) | 63 (56) |
| Повторяемость застоев воздуха, % | 31 (31) | 33 (31) | 24 (27) | 31 (27) | 30 (41) | 24 (19,1) | 27 (19,1) |
| Повторяемость ветров со скоростью 0–1 м/с, % | 41 (36,1) | 40 (36,1) | 34 (40) | 38 (40) | 40 (40) | 32 (40) | 38 (39) |
| Повторяемость приподнятых инверсий температуры, % | 30 (9) | 35 (9) | 38 (35) | 34 (35,8) | 39 (440) | 46 (4) | 30 (41) |
| Повторяемость туманов, % | 16,4 (20,3) | 1,3 (20,3) | 1,3 (1,7) | 1,8 (1,7) | 3,4 (1,7) | 1,5 (9) | 1,3 (9) |

* – в скобках указаны многолетние значения всех указанных характеристик.

Среднегодовые характеристики метеопараметров в период 2008–2014 гг. имеют наименьшее значение повторяемости во второй половине семилетнего цикла с 2012 по 2014 г., кроме увеличения инверсий температуры и количества дней осадков (рис. 1).

Минимальные концентрации взвешенных веществ наблюдались в 2009 и 2012 гг., что обусловлено влиянием благоприятных метеорологических условий, в частности большим количеством осадков и ровным ходом повторяемости приземных инверсий (рис. 1, 2).

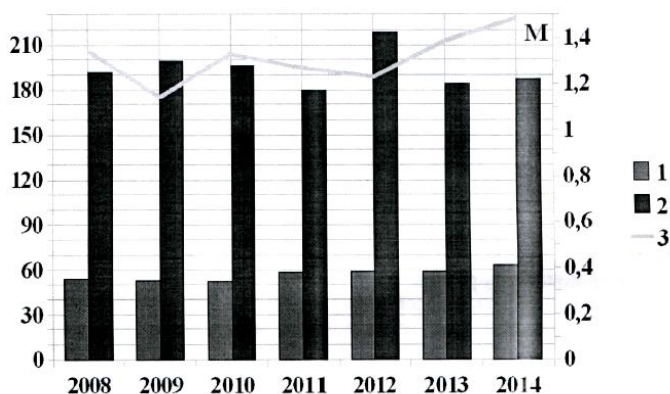


Рис. 1. Многолетний ход повторяемости приземных инверсий температуры (1), продолжительности осадков (2) и взвешенных веществ (3) / Fig. 1. Multiyear variations of the frequency of occurrence of surface temperature inversions (1), the duration of precipitation (2) and suspended solids (3)

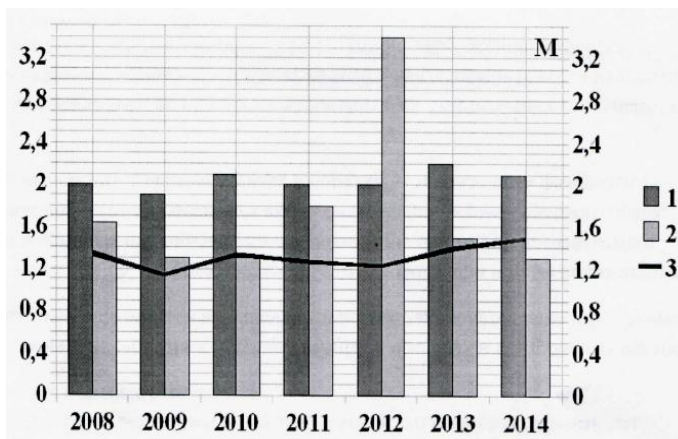


Рис. 2. Многолетние среднегодовые изменения повторяемости туманов (1), скорости ветра (2) и годовой ход бензапирена (3) / Fig. 2. Multiyear average annual changes of fog occurrence (1), wind speed (2) and the annual course of benzopyrene (3)

По вышеприведенным данным и графикам можно сделать следующие выводы:

1. Концентрация примесей взвешенных веществ в воздушном пространстве несколько уменьшается, так как со спадом производства сократи-

лось количество промышленных выбросов, при этом среднегодовая концентрация составляет 1,6 ПДК по взвешенным веществам, 1,4 ПДК – по бензапирену.

2. На концентрацию загрязняющих веществ (превышающих ПДК) существенное влияние оказывают такие характеристики метеорологических параметров, как высокая повторяемость приземных (более 80 %) и приподнятых (более 50 %) инверсий температуры при минимальных скоростях ветра (менее 1,5 м/с) и небольшой повторяемости застоев воздуха (наблюдается 7 %).

Такие примеси длительного загрязнения имеют наибольший коэффициент опасности (r) по ранжированию уровня ингаляционного риска: взвешенные вещества – 2,82, бензапирен – 3,6 и составляют в итоговом риске опасности 74,3 %, что указывает на очень высокое суммарное загрязнение атмосферы воздуха в г. Иркутске.

Обсуждение результатов

Как следует из приведенных выше данных, довольно трудно судить, как влияют отдельные загрязнители воздуха на проявление основных форм патологии человека. Сложность этой проблемы связана как с многофакторностью воздействия среды на организм, так и особенностями ответной реакции организма.

В табл. 3 представлены показатели, характеризующие динамику заболеваемости населения всех возрастных групп Иркутска за 2008–2014 гг., среднее арифметическое M случаев заболевания на 1000 населения. Ошибка репрезентативности (m) необходима для оценки достоверности результатов исследования. Уравнение регрессии показывает зависимость классов болезней от выбросов загрязняющих веществ в атмосферу.

Анализ данных табл. 3 показал, что по большинству классов заболеваний выявлен рост, вызванный загрязнителями воздуха. Из всех исследуемых групп болезней установлено снижение заболеваемости всех возрастных групп только в следующих классах болезней: инфекционные и паразитарные, психические расстройства, болезни кожи и подкожной клетчатки.

Следующим этапом исследования явилось изучение корреляционных связей между показателями заболеваемости групп населения и веществами, загрязняющими атмосферный воздух.

В табл. 4 представлены коэффициенты корреляции r между показателями заболеваемости по отдельным классам болезней и загрязнением атмосферного воздуха стационарными источниками загрязнения Иркутска за 2008–2014 гг.

Таблица 3

Показатели динамики заболеваемости групп населения г. Иркутска за 2008–2014 гг.
/ Indicators of the dynamics of morbidity of population groups in the city of Irkutsk for 2008-2014

| Классы болезней и группы населения (Д – дети; П – подростки; В – взрослые) | | М, ‰ | ±m | Уравнение регрессии | Темпы прироста, ‰ |
|--|-----|--------|-------|-----------------------|----------------------|
| Инфекционные и паразитарные болезни | Д | 82,3 | 9,8 | $-1,6 \times +166,8$ | -13,5 |
| | П | 64,2 | 29,3 | $-3,4 \times +247,6$ | -40,1 |
| | В | 37,1 | 9,2 | $-1,2 \times +102,0$ | -22,8 |
| Новообразования | Д | 6,1 | 1,2 | $0,2 \times -3,4$ | 26,0 |
| | П | 3,6 | 0,6 | $0,1 \times -1,3$ | 23,5 |
| | В | 13,5 | 0,8 | $0,1 \times +9,7$ | 5,3 |
| Болезни крови, кроветворных органов | Д | 16,2 | 1,3 | $0,1 \times +8,2$ | 6,4 |
| | П | 12,9 | 1,1 | $-0,01 \times +13,6$ | -2,6 |
| | В | 2,7 | 0,2 | $0,03 \times +1,3$ | 8,7 |
| Болезни эндокринной системы, рас- стройства питания, нарушение обмена веществ и иммунитета | Д | 42,2 | 1,4 | $-0,05 \times +44,9$ | -1,5 |
| | П | 130,1 | 6,3 | $-0,9 \times +176,8$ | -5,3 |
| | В | 20,7 | 1,5 | $0,02 \times +19,7$ | 0,2 |
| Психические расстройства | Д | 10,4 | 2,5 | $-0,2 \times +21,8$ | -13,0 |
| | П | 12,5 | 4,1 | $-0,5 \times +37,3$ | -16,3 |
| | В | 5,6 | 1,7 | $-0,2 \times +16,7$ | -31,7 |
| Болезни нервной системы и органов чувств | Д | 46,8 | 2,4 | $-0,4 \times +67,7$ | -7,0 |
| | П | 67,7 | 6,0 | $1,0 \times +16,1$ | 11,9 |
| | В | 16,2 | 0,9 | $0,1 \times +12,9$ | 2,1 |
| Болезни глаза | Д | 53,4 | 1,8 | $-0,2 \times +64,9$ | -3,8 |
| | П | 70,5 | 2,9 | $0,4 \times +50,2$ | 4,1 |
| | В | 39,9 | 3,8 | $0,4 \times +20,4$ | 5,9 |
| Болезни уха | Д | 53,7 | 4,6 | $0,8 \times +10,9$ | 13,0 |
| | П | 29,9 | 2,6 | $0,3 \times +13,2$ | 10,0 |
| | В | 22,2 | 1,1 | $0,2 \times +13,4$ | 5,4 |
| Болезни системы кровообращения | Д | 10,2 | 0,2 | $-0,01 \times +10,5$ | -0,3 |
| | П | 22,6 | 2,0 | $0,3 \times +6,5$ | 10,7 |
| | В | 48,8 | 4,1 | $-0,4 \times +71,0$ | -7,4 |
| Болезни органов дыхания | Д | 1361,6 | 81,9 | $14,4 \times +586,7$ | 8,8 |
| | П | 667,9 | 76,0 | $11,6 \times +46,1$ | 15,8 |
| | В | 159,1 | 13,2 | $2,0 \times +51,1$ | 10,3 |
| Болезни органов пищеварения | Д | 72,5 | 4,4 | $0,5 \times +47,5$ | 4,4 |
| | П | 62,5 | 5,5 | $0,8 \times +18,7$ | 10,1 |
| | В | 25,0 | 0,7 | $0,1 \times +20,9$ | 2,9 |
| Болезни кожи и подкожной клетчатки | Д | 62,4 | 12,8 | $-1,8 \times +157,1$ | -20,7 |
| | П | 57,9 | 14,6 | $-1,7 \times +149,5$ | -20,2 |
| | В | 22,1 | 6,7 | $-1,1 \times +78,5$ | -26,3 |
| Болезни костно-мышечной системы | Д | 49,3 | 5,0 | $0,1 \times +46,5$ | 0,1 |
| | П | 95,5 | 11,7 | $2,0 \times -10,9$ | 18,8 |
| | В | 65,5 | 2,8 | $0,4 \times +42,0$ | 5,9 |
| Болезни мочеполовой системы | Д | 68,4 | 4,4 | $0,3 \times +54,1$ | 2,0 |
| | П | 121,8 | 9,1 | $0,6 \times +92,1$ | 4,5 |
| | В | 58,8 | 2,1 | $-0,01 \times +59,3$ | 0,7 |
| Врожденные аномалии | Д | 19,9 | 0,8 | $-0,1 \times +25,9$ | -5,1 |
| | П | 5,5 | 0,6 | $0,1 \times +0,7$ | 14,8 |
| | В | 0,4 | 0,03 | $0,0003 \times +0,4$ | 0,0 |
| Травмы и отравления | Д | 179,2 | 2,8 | $-0,4 \times +200,5$ | -1,5 |
| | П | 147,3 | 4,8 | $-0,4 \times +166,5$ | -2,3 |
| | В | 148,0 | 7,0 | $0,9 \times +99,4$ | 4,2 |
| Все классы болезней | Д | 2228,3 | 73,9 | $11,4 \times +1616,7$ | 4,2 |
| | П | 1593,7 | 71,8 | $10,7 \times +1018,0$ | 6,0 |
| | В | 712,4 | 10,0 | $1,4 \times +634,8$ | 1,7 |
| | Все | 4534,5 | 148,1 | $23,6 \times +3269,5$ | 4,4 |

Таблица 4

Коэффициенты корреляции между показателями заболеваемости по отдельным классам болезней и загрязнением атмосферного воздуха г. Иркутска за 2008–2014 г. / The correlation coefficients between incidence rates for individual diseases and air pollution in the city of Irkutsk for 2008-2014*

| Классы болезней и группы населения | | Все выбросы | Твёрдые | SO ₂ | NO ₂ | CO |
|--|-----------|--------------|--------------|-----------------|-----------------|---------------|
| Инфекционные и паразитарные болезни | Дети | -0,9 | -0,6 | -0,976 | -0,8 | 0,6 |
| | Подростки | -0,7 | -0,2 | -0,8 | -0,5 | 0,9 |
| | Взрослые | -0,7 | -0,3 | -0,9 | -0,6 | 0,8 |
| Новообразования | Дети | 0,8 | 0,5 | 0,9 | 0,7 | -0,5 |
| | Подростки | 0,9 | 0,8 | 0,9 | 0,9 | -0,3 |
| | Взрослые | 0,5 | 0,8 | 0,4 | 0,6 | 0,4 |
| Болезни крови, кроветворных органов | Дети | 0,7 | 0,4 | 0,7 | 0,6 | -0,3 |
| | Подростки | -0,1 | 0,027 | -0,1 | -0,007 | 0,5 |
| | Взрослые | 0,6 | 0,9 | 0,4 | 0,7 | 0,5 |
| Болезни эндокринной системы, расстройства питания, нарушение обмена веществ и иммунитета | Дети | -0,2 | -0,002 | -0,3 | -0,1 | 0,6 |
| | Подростки | -0,8 | -0,4 | -0,9 | -0,7 | 0,8 |
| | Взрослые | 0,1 | 0,4 | -0,1 | 0,2 | 0,8 |
| Психические расстройства | Дети | -0,5 | 0,1 | -0,7 | -0,3 | 0,9 |
| | Подростки | -0,6 | -0,6 | -0,6 | -0,7 | -0,036 |
| | Взрослые | -0,7 | -0,2 | -0,8 | -0,5 | 0,9 |
| Болезни нервной системы и органов чувств | Дети | -0,9 | -0,8 | -0,9 | -0,9 | 0,3 |
| | Подростки | 0,9 | 0,8 | 0,9 | 0,9 | -0,1 |
| | Взрослые | 0,4 | -0,1 | 0,6 | 0,2 | -0,9 |
| Болезни глаза | Дети | -0,7 | -0,6 | -0,7 | -0,6 | 0,4 |
| | Подростки | 0,7 | 0,7 | 0,6 | 0,8 | 0,1 |
| | Взрослые | 0,5 | 0,3 | 0,6 | 0,5 | -0,3 |
| Болезни уха | Дети | 0,979 | 0,9 | 0,9 | 0,996 | -0,1 |
| | Подростки | 0,7 | 0,9 | 0,6 | 0,8 | 0,1 |
| | Взрослые | 0,8 | 0,5 | 0,9 | 0,8 | -0,4 |
| Болезни системы кровообращения | Дети | -0,1 | 0,4 | -0,4 | 0,1 | 0,983 |
| | Подростки | 0,9 | 0,7 | 0,8 | 0,8 | -0,2 |
| | Взрослые | -0,6 | -0,2 | -0,7 | -0,4 | 0,9 |
| Болезни органов дыхания | Дети | 0,997 | 0,9 | 0,962 | 0,987 | -0,3 |
| | Подростки | 0,9 | 0,8 | 0,8 | 0,9 | -0,2 |
| | Взрослые | 0,9 | 0,5 | 0,9 | 0,8 | -0,7 |
| Болезни органов пищеварения | Дети | 0,6 | 0,5 | 0,6 | 0,6 | 0,008 |
| | Подростки | 0,8 | 0,5 | 0,9 | 0,8 | -0,5 |
| | Взрослые | 0,6 | 0,8 | 0,5 | 0,7 | 0,1 |
| Болезни кожи и подкожной клетчатки | Дети | -0,8 | -0,3 | -0,9 | -0,6 | 0,8 |
| | Подростки | -0,7 | -0,2 | -0,8 | -0,5 | 0,9 |
| | Взрослые | -0,9 | -0,9 | -0,8 | -0,9 | -0,038 |
| Болезни костно-мышечной системы | Дети | 0,1 | 0,4 | -0,1 | 0,2 | 0,8 |
| | Подростки | 0,956 | 0,8 | 0,9 | 0,955 | -0,2 |
| | Взрослые | 0,9 | 0,989 | 0,8 | 0,950 | 0,1 |
| Болезни мочеполовой системы | Дети | 0,3 | 0,3 | 0,3 | 0,4 | 0,2 |
| | Подростки | 0,3 | 0,8 | 0,1 | 0,5 | 0,8 |
| | Взрослые | -0,026 | 0,2 | -0,1 | 0,014 | 0,046 |
| Врожденные аномалии | Дети | -0,8 | -0,7 | -0,7 | -0,7 | 0,3 |
| | Подростки | 0,8 | 0,9 | 0,7 | 0,9 | 0,2 |
| | Взрослые | 0,1 | -0,5 | 0,3 | -0,1 | -0,962 |
| Травмы и отравления | Дети | -0,8 | -0,4 | -0,9 | -0,7 | 0,7 |
| | Подростки | -0,4 | -0,1 | -0,6 | -0,3 | 0,8 |
| | Взрослые | 0,7 | 0,3 | 0,8 | 0,6 | -0,6 |
| Все классы болезней | Дети | 0,9 | 0,9 | 0,8 | 0,9 | 0,1 |
| | Подростки | 0,8 | 0,956 | 0,7 | 0,9 | 0,046 |
| | Взрослые | 0,8 | 0,985 | 0,7 | 0,9 | 0,3 |
| | Все | 0,9 | 0,993 | 0,8 | 0,968 | 0,1 |

* – выделены статистически значимые коэффициенты корреляции при $r \geq 0,5$.

Всего было рассчитано 240 коэффициентов корреляции (КК), из которых 157 (65,4 %) были статистически значимы ($r \geq 0,5$). Для каждого загрязнителя и вида заболеваемости по классам болезней рассчитывалось по 48 КК (по 16 для каждой группы населения). Выявлено, что наиболее часто статистически значимые КК выявлялись между заболеваемостью по классам болезней и общим количеством выбросов в атмосферу (37 КК, или 77 %), между заболеваемостью по классам болезней и выбросами твердых веществ (24 КК, или 50 %), между заболеваемостью по классам болезней и выбросами диоксида серы (37 КК, или 77 %), между заболеваемостью по классам болезней и выбросами оксида азота (36 КК, или 75 %), между заболеваемостью по классам болезней и оксидом углерода (23 КК, или 48 %).

Выявлено наиболее сильное влияние всех выбросов на болезни органов дыхания у детей, болезни костно-мышечной системы у подростков. Твердые загрязнители воздуха оказывают наиболее сильное воздействие на болезни костно-мышечной системы у взрослых. Диоксид серы вызывает появление у детей инфекционных и паразитарных болезней, болезней органов дыхания. Оксид азота провоцирует появление у детей болезней органов дыхания и болезней уха, болезни костно-мышечной системы у подростков и взрослых. Диоксид углерода наиболее сильно влияет на систему кровообращения у детей и взрослых и врожденные аномалии у детей [8].

Степень тесноты взаимосвязи между выбросами стационарных источников загрязнения Иркутска за 2008–2011 гг. позволили установить коэффициенты корреляции r . Если значения $0,1 < r < 0,3$, то связь слабая, если $0,3 < r < 0,5$, то связь умеренная, если $0,5 < r < 0,7$ – достаточно сильная зависимость, если значения $0,7 < r < 0,9$ – связь высокая, если значения $0,9 < r < 0,99$ – связь весьма высокая. Показатели тесноты связи между выбросами даны по шкале Чеддока (табл. 5).

Структура заболеваемости по осреднённым данным за 2008–2014 гг. показывает, что общая заболеваемость детей г. Иркутска обуславливается в половине случаев болезнями органов дыхания (47,96 %). Второе место занимают болезни органов пищеварения (4,70 %), третье – болезни мочеполовой системы (4,12 %) и болезни кожи и подкожной клетчатки (3,88 %), четвертое – болезни глаз (3,68 %). В целом перечисленные болезни формируют 2/3 (64,37 %) общей заболеваемости детей в изучаемом регионе. По сравнению с 2000 г. увеличилась заболеваемость болезнями эндокринной системы в 1,9 раза, болезнями глаза и мочеполовой системы – в 1,4, болезнями нерв-

ной системы и органов дыхания – в 1,2 раза. Проживание детей раннего возраста в районах с неблагоприятной экологической обстановкой приводит к ухудшению их здоровья, вызывает полиорганную патологию и аллергические заболевания. Постоянное нахождение детей на территориях с повышенным содержанием взвешенных веществ в атмосферном воздухе способствует развитию у них болезней органов дыхания и увеличивает длительность этих заболеваний.

Таблица 5

Матрица коэффициентов корреляции между выбросами по шкале Чеддока за 2008–2014 гг. / The matrix of correlation coefficients between emissions on a scale of Cheddok for 2008-2014

| | Твёрдые | SO ₂ | NO ₂ | CO |
|-----------------|----------------|--------------------------------|-----------------|--------------------------------|
| Твёрдые | 1 | Высокая | Весьма высокая | Слабая |
| SO ₂ | Высокая | 1 | Весьма высокая | Достаточно сильная зависимость |
| NO ₂ | Весьма высокая | Весьма высокая | 1 | Слабая |
| CO | Слабая | Достаточно сильная зависимость | Слабая | 1 |

Выводы

1. Определены основные загрязнители атмосферного воздуха г. Иркутска, которые представлены твердыми частицами (1000 млн т /год), диоксидом серы (150 млн т /год), оксидами азота (53 млн т /год), оксидом углерода (304 млн т /год).

2. У населения г. Иркутска выявлена экологозависимая патология (новообразования, болезни органов дыхания, болезни кожи, болезни крови и кроветворных органов, болезни органов пищеварения), что связано с количеством и характером выбросов в атмосферу.

3. Корреляционный анализ выявил зависимость между загрязнителями атмосферного воздуха и заболеваемостью населения г. Иркутска.

Литература

1. Петров С.Б. Эколого-эпидемиологическая оценка влияния взвешенных веществ в атмосферном воздухе на развитие болезней системы кровообращения // Экология человека. 2011. № 2. С. 3–7.

2. Савилов Е.Д. Проявления инфекционной патологии в условиях загрязнения окружающей среды // Бюл. Восточно-Сибирского науч. отдела СО РАМН. 2007. № 2. С. 84–89.

3. Государственный доклад о состоянии и об охране окружающей природной среды Иркутской области (2000–2015 гг.). Иркутск, 2001–2016.

4. Петров С.Б., Онучина Е.Н., Петров Б.А. Эколого-эпидемиологическое исследование влияния атмосферных выбросов городского промышленно-энергетического комплекса на здоровье населения // Экология человека. 2012. № 3. С. 11–15.

5. Семечкина В.С. Влияние техногенного прессинга на показатель заболеваемости туберкулезом органов дыхания // Изв. ЮФУ. Техн. науки. 2009. № 7. С. 7–12.

6. Орлова Г.П., Демидова С.В., Фридман К.Б., Лим Т.Е. Влияние аэроплютантов на соотношение неспецифического и атопического процессов при формировании болезней органов дыхания в экологических условиях Санкт-Петербурга // Биосфера. 2010. Т. 2, № 4. С. 566–575.

7. Струкова Е.Б., Балбус Дж., Голуб А.А. Риск для здоровья и экономическая оценка ущерба от загрязнения воздуха в России // Климат, качество атмосферного воздуха и здоровье москвичей. М., 2006. С. 141–176.

8. Суркова И.В., Лещук С.И. Эколого-экономическая оценка потерь здоровья населения. LAP Lambert Academic Publishing, 2014. 72 с.

References

1. Petrov S.B. Ekologo-epidemiologicheskaya otsenka vliyaniya vzveshennykh veshchestv v atmosfernom vozdukh na razvitie boleznei sistemy krovoobrashcheniya [Ecological and epidemiological assessment of the influence of suspended solids in the atmospheric air on the development of diseases of the circulatory system]. *Ekologiya cheloveka*. 2011, No. 2, pp. 3-7.

2. Savilov E.D. Proyavleniya infektsionnoi patologii v usloviyakh zagryazneniya okruzhayushchei sredy

[Manifestations of infectious pathology in environmental contamination]. *Byul. Vostochno-Sibirskogo nauch. otdela SO RAMN*. 2007, No. 2, pp. 84-89.

3. Gosudarstvennyi doklad o sostoyanii i ob okhrane okruzhayushchei prirodnoi sredy Irkutskoi oblasti (2000–2015 gg.) [State report on the state and protection of the environment of the Irkutsk region (2000-2015)]. Irkutsk, 2001-2016.

4. Petrov S.B., Onuchina E.N., Petrov B.A. Ekologo-epidemiologicheskoe issledovanie vliyaniya atmosferykh vybrosov gorodskogo promyshlenno-energeticheskogo kompleksa na zdorov'e naseleniya [Ecological and epidemiological study of the influence of atmospheric emissions of urban industrial-energy complex on public health]. *Ekologiya cheloveka*. 2012, No. 3, pp. 11-15.

5. Semechkina V.S. Vliyanie tekhnogenogo pressinga na pokazatel' zaboлеваemosti tuberkulezom organov dykhaniya [Influence of technogenic pressure on the incidence rate of respiratory tuberculosis]. *Izv. YuFU. Tekhn. nauki*. 2009, No. 7, pp. 7-12.

6. Orlova G.P., Demidova S.V., Fridman K.B., Lim T.E. Vliyanie aeropollyutantov na sootnoshenie nespetsificheskogo i atopicheskogo protsessov pri formirovani boleznei organov dykhaniya v ekologicheskikh usloviyakh Sankt-Peterburga [Influence of airplants on the ratio of nonspecific and atopic processes in the formation of respiratory diseases in the environmental conditions of St. Petersburg]. *Biosfera*. 2010, vol. 2, No. 4, pp. 566-575.

7. Strukova E.B., Balbus Dzh., Golub A.A. [Risk to health and economic assessment of damage from air pollution in Russia]. *Klimat, kachestvo atmosfernogo vozdukh i zdorov'e moskvichei* [Climate, air quality and health of Muscovites]. Moscow, 2006, pp. 141-176.

8. Surkova I.V., Leshchuk S.I. *Ekologo-ekonomicheskaya otsenka poter' zdorov'ya naseleniya* [Ecological and economical assessment of public health losses]. LAP Lambert Academic Publishing, 2014, 72 p.

УДК 504.454

DOI 10.23683/0321-3005-2017-2-118-127

ПОЛИЦИКЛИЧЕСКИЕ АРОМАТИЧЕСКИЕ УГЛЕВОДОРОДЫ В АКВАЛЬНЫХ ЛАНДШАФТАХ ДЕЛЬТЫ РЕКИ ДОН В ЗИМНИЙ ПЕРИОД*

© 2017 г. Т.С. Кошовский¹, О.В. Ткаченко¹, А.Н. Ткаченко¹, А.С. Цибарт¹, М.Ю. Лычагин¹
¹Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

POLYCYCLIC AROMATIC HYDROCARBONS IN THE AQUATIC LANDSCAPES OF THE DON RIVER DELTA IN WINTER

T.S. Koshovskii¹, O.V. Tkachenko¹, A.N. Tkachenko¹, A.S. Tsibart¹, M.Yu. Lychagin¹
¹Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

Кошовский Тимур Сергеевич – инженер, географический факультет, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Ленинские горы, 1, г. Москва, 119991, Россия, e-mail: tkzv@ya.ru

Timur S. Koshovskii – Engineer, Faculty of Geography, Lomonosov Moscow State University, Leninskie Gory, 1, Moscow, 119991, Russia, e-mail: tkzv@ya.ru

Ткаченко Олег Валерьевич – лаборант, географический факультет, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Ленинские горы, 1, г. Москва, 119991, Россия, e-mail: tov1989@ya.ru

Oleg V. Tkachenko – Laboratory Assistant, Faculty of Geography, Lomonosov Moscow State University, Leninskie Gory, 1, Moscow, 119991, Russia, e-mail: tov1989@ya.ru

Ткаченко Анна Николаевна – кандидат географических наук, научный сотрудник, географический факультет, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Ленинские горы, 1, г. Москва, 119991, Россия, e-mail: tkachenkomsu@yandex.ru

Anna N. Tkachenko – Candidate of Geography, Researcher, Faculty of Geography, Lomonosov Moscow State University, Leninskie Gory, 1, Moscow, 119991, Russia, e-mail: tkachenkomsu@yandex.ru

Цибарт Анна Сергеевна – кандидат географических наук, научный сотрудник, географический факультет, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Ленинские горы, 1, г. Москва, 119991, Россия, e-mail: tsibann@gmail.com

Anna S. Tsibart – Candidate of Geography, Researcher, Faculty of Geography, Lomonosov Moscow State University, Leninskie Gory, 1, Moscow, 119991, Russia, e-mail: tsibann@gmail.com

Лычагин Михаил Юрьевич – кандидат географических наук, доцент, географический факультет, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Ленинские горы, 1, г. Москва, 119991, Россия, e-mail: Lychagin2008@gmail.ru

Michail Yu. Lychagin – Candidate of Geography, Associate Professor, Faculty of Geography, Lomonosov Moscow State University, Leninskie Gory, 1, Moscow, 119991, Russia, e-mail: Lychagin2008@gmail.ru

Исследованы содержание и состав ассоциаций полициклических ароматических углеводородов (ПАУ) во взвешенном веществе воды, льда, снежного покрова и в донных отложениях аквальных ландшафтов дельты реки Дон. Анализ содержания ПАУ проводился спектрофлуориметрическим методом. Пылевые выпадения из атмосферы имеют концентрацию от 8 000 до 100 000 нг/г. Содержание ПАУ в воде колеблется от 4 до 77 нг/л при концентрации во взвеси 700–15 500 нг/г, при этом повышенные значения характерны для слабопроточных ериков. Крупные судоходные протоки характеризуются пониженными концентрациями полиаренов. Содержание ПАУ во льду выше, чем в воде, что связывается с их накоплением за счёт вмержания углеводородной плёнки, скапливающейся у поверхности. Концентрация суммы ПАУ в донных отложениях дельты составила 33 нг/г, что значительно меньше концентрации во взвеси и свидетельствует о высокой интенсивности процессов деградации полиаренов. Верхний слой донных отложений с окислительной обстановкой имеет пониженные концентрации ПАУ в сравнении с нижними слоями. Индивидуальные соединения сгруппированы по их способности к сохранению в донных отложениях: а) бенз(ghi)перилен и антрацен обладают максимальной скоростью деградации; б) фенантрен, нафталин и тетрафен имеют среднюю скорость деградации; в) бенз(a)пирен и хризен наиболее устойчивы. Общий уровень загрязнения дельты Дона полициклическими углеводородами оценён как низкий.

Ключевые слова: полициклические ароматические углеводороды, дельты рек, аквальные ландшафты, ледовый покров, донные отложения, взвесь, растворённое органическое вещество.

* Работа выполнена при поддержке проектов РГО-РФФИ 13-05-41528 РГО_а и проекта РГО «Комплексная экспедиция «Дельты рек юга России».

The content and composition of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) are evaluated in suspended matter, ice, snow cover and bottom sediments of aquatic landscapes of the Don River delta. PAHs were studied by spectrofluorimetry at low temperatures. Atmospheric dust in snow cover had concentration from 8 000 to 100 000 ng/g. PAH content in the water ranges from 4 to 77 ng/l in the suspended matter from 700 to 15500 ng/g. Higher values of PAH content are typical for weakly running streams. Major shipping channels have lower concentrations, PAH content in the ice higher than in the water, because of their accumulation on the ice surface due to freezing in a hydrocarbon film. PAH content in the bottom sediments is about 33 ng/g, which is significantly less than the concentration in the suspended matter. The upper layer of sediments with the oxidizing atmosphere has reduced levels of PAH as compared with the lower layers. Individual PAHs are grouped by their ability to conservation in the bottom sediment: (i) benzo(ghi)perylene and anthracene have maximum degradation rate; (ii) phenanthrene, naphthalene and benzantracene have an average degradation rate, (iii) benzo(a)pyrene and chrysene are the most stable. The level of the Don River delta pollution by polycyclic aromatic hydrocarbons estimated as low.

Keywords: polycyclic aromatic hydrocarbons, river delta, aquatic landscapes, ice sheet, bottom sediments, suspended matter, dissolved organic matter.

Введение

Содержание и состав ассоциаций полициклических ароматических углеводородов (ПАУ) в природных средах – информативный показатель степени и характера антропогенного воздействия. Актуальность изучения полиаренов усиливается тем, что многие индивидуальные ПАУ являются приоритетными загрязнителями, обладающими канцерогенным эффектом. Источниками ПАУ в ландшафтах служат высокотемпературное воздействие на органическое вещество при антропогенной деятельности, а также природные углеводородные потоки литогенного происхождения и биогеохимические процессы. Особенно актуально изучение ПАУ в геохимически подчинённых ландшафтах – дельтах и эстуариях крупных рек, куда поступает вещество с большой по площади территории, отражающее её экологическое состояние.

Оценка содержания полиаренов проводилась в дельтах Волги [1], Невы [2], Дуная [3], Дона [4, 5], и др. Важными особенностями аквальных ландшафтов (АЛ) дельт являются сложность их латеральной и радиальной структур, многокомпонентность. АЛ представляют собой динамическую систему, состоящую из связанных потоками вещества водной толщи, взвешенного вещества, биоты, донных отложений и других компонентов [6]. В силу этого комплекс собранных данных является только начальным звеном в описании углеводородного состояния [7] АЛ; требуется расширение информации в географическом плане и в плане изучения дополнительных компонентов ландшафта.

Целью текущей работы стала оценка трансформации состава и содержания ПАУ в АЛ дельты. Были поставлены следующие задачи: 1) выявление закономерностей распределения содержания и состава ПАУ в дельте Дона во взвешенном веществе и в донных отложениях; 2) оценка трансформации ПАУ при переходе из воды и снега в другие ком-

поненты – лёд и донные отложения; 3) общая характеристика степени загрязнения дельты Дона полиаренами.

Объекты и методы исследования

Дельта реки Дон расположена в суббореальном ландшафтном поясе. Климат умеренный тёплый, средние температуры января и июля составляют -3°C и $+20^{\circ}\text{C}$ соответственно. Среднегодовое количество осадков составляет 555 мм, 20 % из них выпадают в твердом виде [8]. Ледовый покров становится в конце декабря, толщина льда достигает 30–40 см; средняя температура воды в зимний период 4°C . Общая площадь дельты составляет 40 км², она имеет разветвлённую систему с наличием крупных протоков, средних по размеру гирл и мелких ериков. Степень хозяйственной освоенности высокая: крупные протоки используются для судоходства, в пределах дельты располагаются городские и сельские поселения, имеется несколько крупных промышленных предприятий. Значительный вклад в загрязнение вносят автомобильный транспорт и местные отопительные системы.

Полевые исследования проходили в зимние периоды при наличии ледового покрова в феврале 2013 г. и снежного и ледового покровов в феврале 2014 г. Объектами исследования были дельтовые протоки различных порядков. Крупные протоки включают основное русло Дона в окрестностях г. Ростова-на-Дону (станции К-12 и К-11), ст. Елизаветинская (К-06) и пос. Узьяк (К-13), гирло Большая Кутерьма и р. Мертвый Донец; мелкие протоки – гирла Кривое (К-07) и Свиное (К-09), ерик Кабашный (К-05). Также опробование произведено на взморье (К-03 и К-08) и в устье р. Кагальник (К-01 и К-02) (рис. 1). На каждой точке отбирались пробы воды объёмом 1,5–3 л и пробы донных отложений с использованием дночерпателя Ван-Вина. Выделение взвешенных наносов и мутность определялись по массе вещества, оставшегося после

фильтрации определённого объёма воды через мембранный фильтр (размер пор 0,45 мкм). Послойный отбор проб донных отложений по глубинам 0–5, 5–15 и 15–40 см проводился в четырёх точках (К-01, 03, 07 и 09) с использованием специального донно-колоночного пробоотборника. Пробы речного и морского льда отобраны в точках К-05 и К-08 в 2013 г. Опробование снежного покрова осуществлено в 2014 г. по 11 точкам.

В образцах донных отложений и взвеси было определено содержание ПАУ спектрофлуориметрическим методом при температуре жидкого азота (спектроскопия Шпольского) в лаборатории углеродистых веществ биосферы географического факультета МГУ (кафедра геохимии ландшафтов и географии почв). Анализ проб 2013 г. проводился на спектрофлуориметре Fluorolog 322 фирмы Jobin Yvon, анализ проб 2014 года – на приборе «Флюорат-Панорама» («Люмэкс», Санкт-Петербург), дополненном моно-

хроматором ЛМ-3 и приставкой «КРИО-1». Пробо-подготовка включала: для льда и снега – растапливание при комнатной температуре, фильтрование через мембранные фильтры посредством установки Millipore, сушку и взвешивание фильтра; для воды – то же, но без этапа растапливания; для донных отложений – высушивание при комнатной температуре и растирку с просеиванием в сите с ячейкой 0,25 мм. Далее фильтры и навеску пробы экстрагировали н-гексаном, полученный экстракт замораживали при температуре жидкого азота. Смесь ПАУ в замороженном экстракте облучалась ультрафиолетовым светом, регистрировался спектр люминесценции на длинах волн, оптимальных для каждого ПАУ. Образцы анализировали на содержание 14 соединений: дифенила, флуорена, нафталина, фенантрена, хризена, пирена, антрацена, тетрафена, бенз(а)пирена, бенз(ghi)перилена, перилена, ретена, бенз(е)пирена.

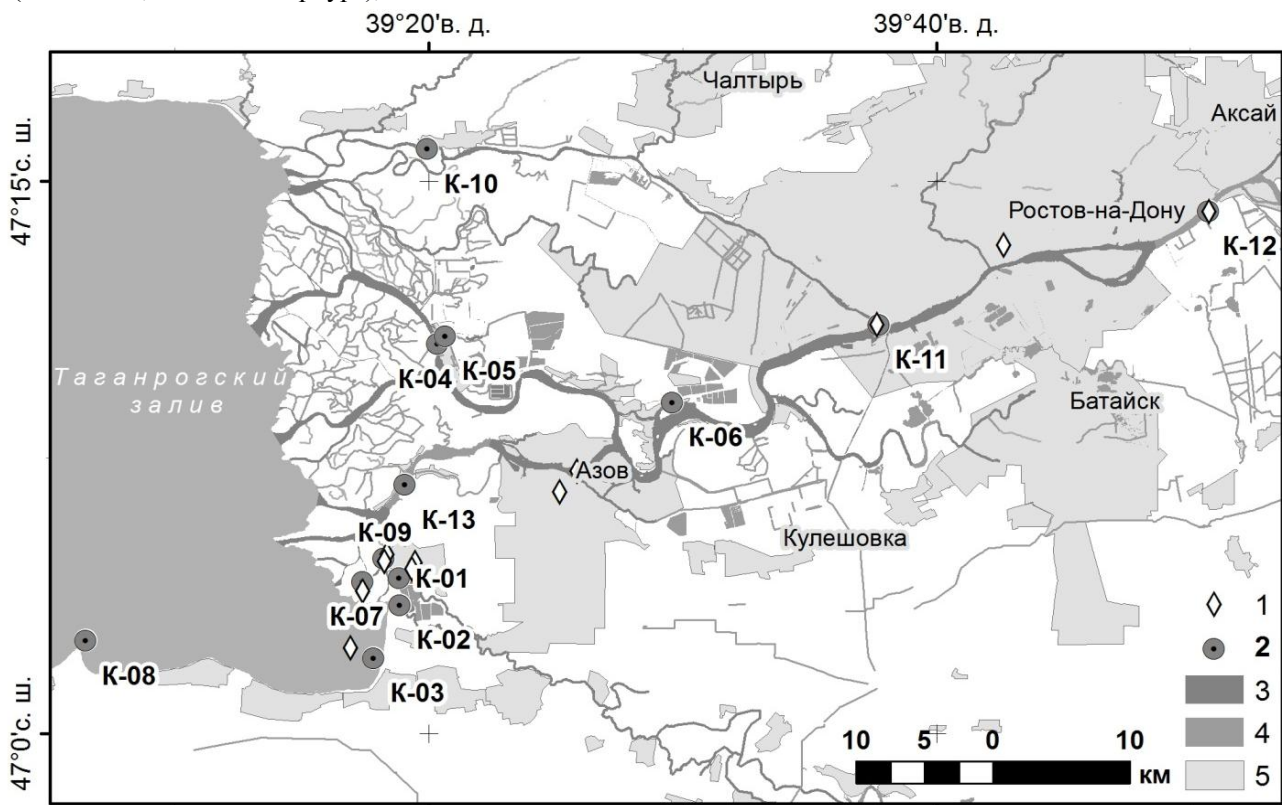


Рис. 1. Картограмма фактического материала: 1 – точки отбора проб снега; 2 – станции отбора проб воды и донных отложений; 3 – водные объекты дельты; 4 – Азовское море; 5 – земли поселений / Fig. 1. Schematic map of factual material: 1 - points of snow sampling; 2 - stations of water sampling and bottom deposits; 3 - water bodies of the delta; 4 - the Sea of Azov; 5 - settlement land

Результаты и обсуждение

Поступление ПАУ из атмосферы. Оценка состава и объёмов поступления ПАУ из атмосферы может быть получена при анализе атмосферных осадков. Отмечено, что снежные хлопья захватывают пыле-

вые частицы более эффективно, чем капли дождя, благодаря большей площади поверхности и меньшей скорости падения. Концентрации ПАУ в атмосферной пыли максимальны среди изученных сред; суммарное содержание колеблется в пределах от 8 200 до 460 000 нг/г пыли при медианном значении

40 000 нг/г. При выявленной пылевой нагрузке 11 г/м^2 в год и допущении равномерности выпадений по сезонам данная концентрация соответствует поступлению около 450 мкг/м^2 , с разбросом от 80 до 1400 мкг/м^2 в год. В ассоциации ПАУ снежного покрова полностью преобладает группа лёгких 2–3-ядерных ПАУ: фенантрен (85 %), нафталин (8 %), дифенил и антрацен (3 %). Содержание 4–6-ядерных ПАУ обычно не превышает 4–7 % от общей суммы, среди них преобладают пирен (1,5 %), хризен (1,1 %) и бенз(ghi)перилен (1 %).

Особенности распределения индивидуальных полиаренов в снежном покрове дельтовых ландшафтов зависит от пространственного и количественного соотношения различных источников ПАУ. Выявление типов источников возможно с использованием статистического метода главных компонент [9]. Проведённый в пакете Statistica 8.0 факторный анализ (варимакс нормализованных) позволяет выявить два фактора, объясняющих основное варьирование значений в исследованных точках (73 % от общей дисперсии); при этом чётко выделяется приуроченность каждого из факторов к одному типу полиаренов. Так, распределение в снежном покрове группы лёгких ПАУ – нафталина, дифенила, фенантрена и антрацена – контролируется первым фактором (рис. 2).

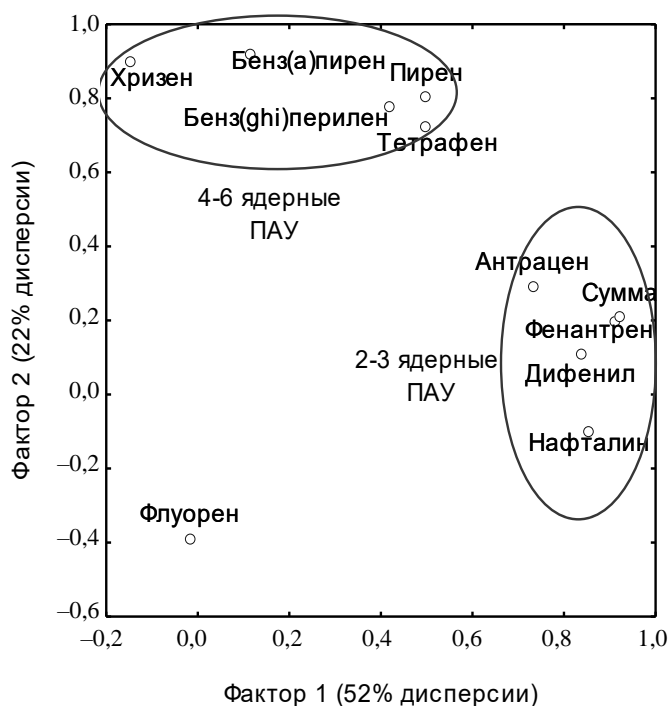


Рис. 2. Диаграмма факторных нагрузок для первых двух главных компонент (факторов) для ПАУ в снежном покрове / Fig. 2. Diagram of factor loadings for first two principal components (factors) for PAHs in snow cover

Согласно литературным данным, источником данных полиаренов является сжигание древесины в бытовых целях и биомассы при сельскохозяйственных нуждах [9, 10]. Распределение группы высокомолекулярных ПАУ – хризена, бенз(ghi)перилена, бенз(а)пирена, тетрафена, пирена – в большей части контролируется фактором 2. Данный фактор, вероятно, соответствует промышленным предприятиям, в цикле которых находится сжигание угля и нефтяных углеводородов [10].

Распределение ПАУ во взвешенном веществе вод дельты. Поступление ПАУ в водную среду дельтовых ландшафтов возможно непосредственно из атмосферы, из расположенных выше по течению реки источников, а также в результате взмучивания верхнего слоя донных отложений. Растворимость полиаренов в воде низкая [7, 11], в силу чего их нахождение и миграция в воде происходят по большей части в сорбированном твердофазными частицами виде. Мутность вод (взвесь с размером более 0,53 мкм) составила около 7,4 мг/л при варьировании от 3 до 18 мг/л.

Содержание ПАУ в водной среде в среднем по опробованным протокам дельты Дона составляет 18 нг/л, варьируя в пределах от 4 до 77 нг/л, при этом осреднённая концентрация ПАУ в расчёте на взвешенное вещество составила 3 000 нг/г. Состав ассоциации фенантрено-нафталино-антраценовый – 44/37/17 % соответственно, также обнаружены тетрафен (1,4 %), пирен (0,6 %) и бенз(ghi)перилен (0,3 %).

В распределении общего количества и состава ПАУ по АЛ дельты отмечается приуроченность повышенных концентраций ПАУ к слабопроточным ерикам и гирлам (ерик Кабашный, гирла Свиное, Кривое). Крупные протоки Дона, несмотря на близость отбора проб к промышленным и урбанистическим центрам (г. Ростов-на-Дону, г. Азов), характеризуются пониженными концентрациями ПАУ во взвешенном веществе (рис. 3). Возможно, в данных условиях происходит усиленное разбавление в силу повышенных расходов воды. Также повышенная скорость может подводить к переходу из сорбированного в растворённое состояние лёгких ПАУ, в силу чего их содержание в отфильтрованной взвеси снижается. Наконец, вероятно ускорение деградации ПАУ в крупных протоках за счёт повышенной турбулентности, позднего ледостава и, соответственно, более интенсивного воздействия ультрафиолетовой радиации. Застойные условия способствуют задерживанию тонкодисперсных частиц совместно с сорбированными углеводородами.

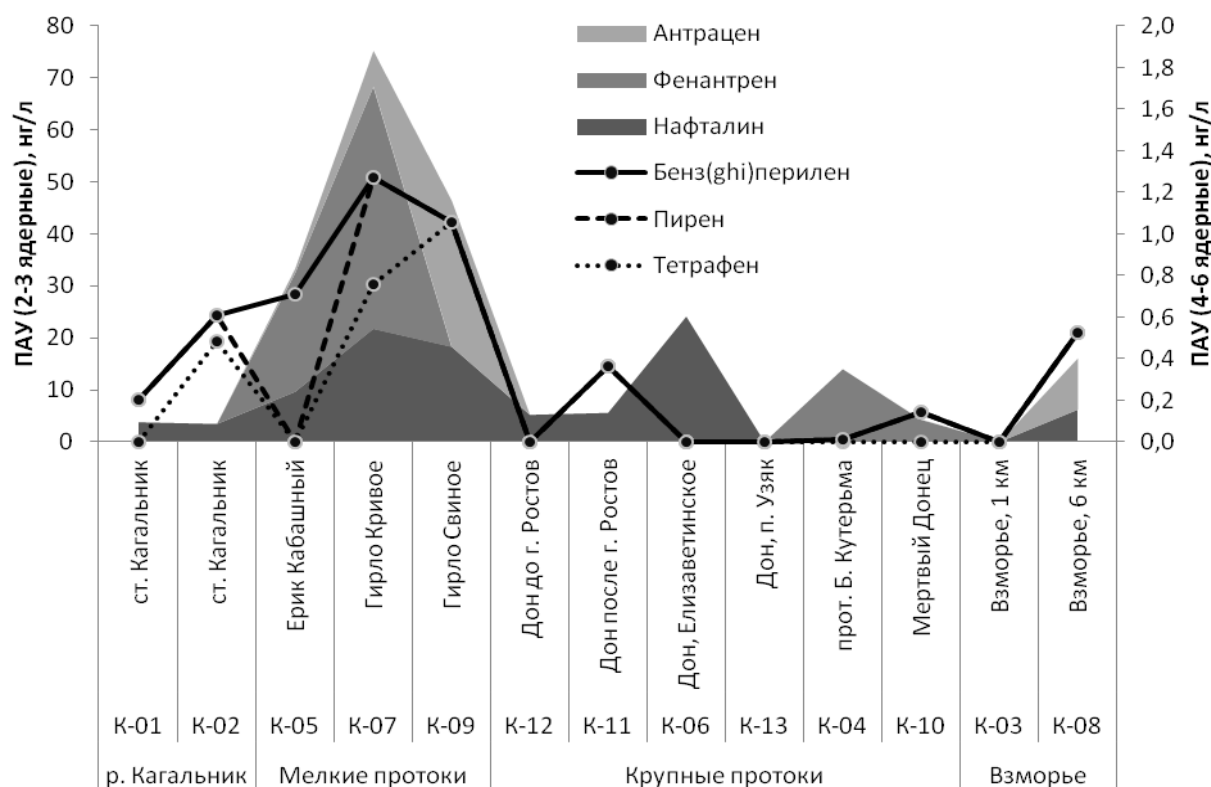


Рис. 3. Содержание ПАУ во взвешенном веществе аквальных систем дельты р. Дон
 / Fig. 3. The content of PAH in suspended matter in the aquatic systems of the Don River delta

ПАУ в ледовом покрове. Лед в АЛ выполняет барьерную и экранирующую функции, так как находится на двойной границе – с водной толщей и с атмосферой. В силу этого накопление углеводородов во льду может происходить как с пылевыми выпадениями из атмосферы, так и из взвешенного вещества в воде. Формирование ледового покрова в большинстве случаев происходит в результате замерзания речной воды на его нижней кромке; соответственно, основная часть веществ, содержащихся во льду, наследуется от водной среды. При замораживании происходит изменение состава содержащихся в воде веществ, выражающееся в уменьшении минерализации и количества растворённых органических веществ. В то же время количество взвешенных веществ во льду (7,7 мг/л) значительно отличается от их количества в водах дельты (от 3 до 18 мг/л), а в пробе льда на взморье значительно их превосходит (37 мг/л). Вероятно, здесь сказываются специфические условия зимы 2013 г., когда формирование речного и морского льда покрова происходило при отсутствии снежного покрова. Соответственно, ветровой перенос веществ с не покрытых снегом территорий способствовал их накоплению на поверхности льда при частых оттепелях, перешедших в ледяную толщу. В 2014 г.

пылевые выпадения концентрировались в снежном покрове, находящемся на поверхности льда.

В результате общее содержание полициклических углеводородов во льду оказалось в целом выше, чем в воде (60 нг/л при концентрации во взвеси 7700 нг/л). В составе ассоциации преобладают нафталин (39 %), антрацен (34 %) и фенантрен (23 %); относительно водной толщи повышена доля высокомолекулярных ПАУ – пирена (2 %) тетрафена (1 %) и бенз(ghi)перилена (0,6 %).

ПАУ в донных отложениях. Донные отложения, а также сформированные в их поверхностном слое подводные почвы [12] обыкновенно характеризуются повышенными концентрациями полиароматических углеводородов, что связано с их привносом из источников, расположенных выше по течению реки. В Санкт-Петербурге (дельта Невы) общее содержание ПАУ в донных отложениях колеблется от 4 200 до 710 000 нг/г, при этом преобладают тяжёлые, 5–6-ядерные полиарены [2]. Очень высокими концентрациями – от 73 000 до 4 991 000 нг/г – характеризуются донные отложения дельты Дуная [3]. Донные отложения дельты Дона в этом ряду сравнительно низко загрязнены – среднее содержание 52 нг/г при разбросе от 3,1 до 260 нг/г, ассоциация нафталин-фенантрен-пиреновая (46/37/11 %). Механический

состав отобранных донных отложений сходен и относится преимущественно к алевротовым и песчано-алевритовым илам. Опесчанность выше в донных отложениях крупных проток. Отметим, что, несмотря на седиментационный генезис донных отложений, выявленная концентрация суммы ПАУ в их верхнем слое в 40–60 раз меньше, чем концентрация во взвешенном веществе водной толщи. Данные различия свидетельствуют о высокой интенсивности происходящих процессов деградации ПАУ в приповерхностном слое подводных почв.

Распределение ПАУ по протокам дельты дифференцировано и не выявляет чёткой приуроченности максимальных содержаний к более мелким протокам, как это наблюдается для взвешенных частиц. Вероятно, деградационные процессы происходят довольно активно и при слабой скорости течения. Минимальные концентрации ПАУ в донных отложениях характерны для основного русла, несмотря на его использование для судоходства; скорость течения здесь повышена, и потому меньше условий для накопления тонкодисперсной фракции взвеси, обогащённой сорбированными полиаренами. Максимальные концентрации обнаружены в протоках Большая Кутерьма (до 100 нг/г) и Мертвый Донец (80 нг/г).

Трансформация состава ПАУ в АЛ. Сравнительный анализ содержания отдельных ПАУ по компонентам АЛ (лёд, водная толща, подводные почвы и донные отложения) позволяет сделать ряд заключений по особенностям перехода отдельных полиаренов из взвеси в лёд, в донные отложения. Для точек отбора в дельте были подсчитаны средние значения по содержанию ПАУ во взвеси и в донных отложениях (табл. 1). Исходя из этих данных, в целях оценки характера перехода из одного компонента АЛ в другой для каждого ПАУ были рассчитаны коэффициенты концентрации, равные соотношению концентраций ПАУ в компонентах ландшафта:

$$K1^i = C_{0-5\text{см ДО}}^i / C_{\text{взвесь в воде}}^i,$$

где $C_{\text{взвесь в воде}}^i$ – концентрация i -го ПАУ во взвешенном веществе воды; $C_{0-5\text{см ДО}}^i$ – концентрация i -го ПАУ в 0–5 см донных отложений. Коэффициент $K2$ – отношение концентраций ПАУ во взвеси льда к концентрации во взвеси воды; $K3$ – отношение концентраций в слое донных отложений 5–15 см к

слою 0–5 см; $K4$ – слоя 15–35 см к слою 5–15 см; $K5$ – отношение концентраций во взвеси снега к взвеси в воде. Рассчитанные коэффициенты показаны на графике (рис. 4), ПАУ расположены по убыванию отношения $K1$. Коэффициенты $K1$ – $K4$ рассчитаны по данным проб 2013 г., $K5$ – по данным проб 2015 г.

По соотношению ПАУ во взвешенном веществе вод и в донных отложениях можно выделить четыре группы ПАУ. Первые три группы включают ПАУ-деконцентраторы, коэффициент концентрации $K1$ которых много меньше единицы, т.е. осаждающиеся в донных отложениях наносы обладают значительно меньшими содержаниями ПАУ, чем взвешенное в воде вещество. К группе 1 относятся бенз(ghi)периллен и антрацен с содержанием в донных отложениях, более чем в 1000 раз меньшим, чем во взвеси; к группе 2 – нафталин, фенантрен и тетрафен с содержанием в донных отложениях, в 80–140 раз меньшим, чем во взвеси; к группе 3 относится пирен с концентрацией в донных отложениях, в 5 раз меньшей, чем во взвешенном веществе. Приведённые отличия между поведением индивидуальных ПАУ можно объяснить разницей в интенсивности деградации. Устойчивость антрацена минимальна среди изученных полиаренов за счёт его низкой энергии ароматизации, связанной с единственностью в его строении секстета – бензоидного сопряжения π -систем [13]. Деградация средней интенсивности характерна для фенантрена, нафталина и тетрафена. Кроме того, часть выявленных различий может быть обусловлена и избирательной седиментацией: к примеру, полиарены с низкими коэффициентами концентрации могут быть преимущественно связаны с очень тонкими фракциями взвеси, осаждение которых происходит медленнее в сравнении с крупными фракциями, однако этот вопрос требует дополнительных исследований.

Таблица 1

Средние содержания индивидуальных ПАУ в основных средах АЛ, нг/г / The average content of individual PAHs in the main environments of aquatic landscapes, ng/g

| ПАУ | Пробы 2013 г. | | | | | Пробы 2014 г. | |
|-------------------|---------------------|------|----------------------|------|-------|---------------------|--------|
| | Взвешенные вещества | | Донные отложения, см | | | Взвешенные вещества | |
| | Лёд | Вода | 0–5 | 5–16 | 16–37 | Снег | Вода |
| Нафталин | 1460 | 1200 | 14 | 33 | 7,6 | 6 920 | 6 400 |
| Фенантрен | 410 | 1570 | 12 | 27 | 6,5 | 71 700 | 69 700 |
| Хризен | <ПО* | <ПО | 0,1 | 1,4 | 0,2 | 920 | 51 |
| Пирен | 145 | 19 | 3,6 | 7,7 | 6,5 | 1 230 | 638 |
| Антрацен | 2600 | 510 | <ПО | <ПО | <ПО | 2 200 | 1 800 |
| Тетрафен | 63 | 33 | 0,3 | 1,3 | 0,3 | 266 | 102 |
| Бенз(а)пирен | 3,9 | <ПО | 0,1 | 1,8 | 0,2 | 81 | 4,6 |
| Бенз(ghi)периллен | 45 | 12 | <ПО | <ПО | <ПО | 836 | 1,0 |
| Сумма ПАУ | 4740 | 3330 | 30 | 71 | 21 | 86 500 | 80 200 |

* <ПО – содержание ниже предела обнаружения.

Наконец, выделяется группа 4 ПАУ-концентра-
 торов, содержание которых в донных отложениях
 больше, чем во взвешен-
 ном веществе вод; к ним
 относятся бенз(а)пирен и
 хризен. Вероятно, в дан-
 ных физико-химических
 условиях эти ПАУ сравни-
 тельно устойчивы и слабо
 подвергаются разруше-
 нию, в силу чего в осаж-
 дённых наносах их содер-
 жание постепенно увели-
 чивается. Высокая устой-
 чивость бенз(а)пирена под-
 тверждается в литературе
 [14].

Сходный спектр на-
 блюдается при анализе со-
 отношения взвеси во льду
 и в воде (рис. 4, коэффици-
 ент концентрации К2). Од-
 нако здесь для всех ПАУ,
 исключая фенантрен, во
 льду наблюдается возраст-
 ание концентрации; наи-
 большим возрастанием ха-
 рактеризуются бенз(а)пи-
 рен (в 390 раз), пирен (в 7 раз), антрацен (в 5 раз) и
 бенз(ghi)перилен (в 3 раза). Исследования показы-
 вают возможность накопления во льду ПАУ и атмо-
 сферного происхождения, и из взвеси водной толщи
 [11]. Спектр концентрации льда также близок к
 спектру концентрации для снега (К4), что подтвер-
 ждает атмосферный генезис большей части ПАУ в
 ледовом покрове. Однако ряд ПАУ испытывает
 большую концентрацию во льду по сравнению со
 снегом (бенз(а)пирен, пирен, антрацен). Возможно,
 существенную роль здесь играет гидрофобность их
 или их частиц-носителей, в силу которой при попа-
 дании в воду происходят поднятие частиц к поверх-
 ности и аккумуляция в ледовом покрове. В случаях
 наличия в водах некоторого содержания нефтепро-
 дуктов (горюче-смазочных материалов) последние
 интенсивно растворяют в себе ПАУ и совместно с
 растворёнными полиаренами поднимаются к по-
 верхности. Формирование льда происходит за счёт
 замерзания воды на её верхней границе с поверхно-
 стью, в силу чего углеводородная плёнка переходит
 в ледовый покров.

Судьба ПАУ при захоронении в донных отложе-
 ниях на различных глубинных уровнях неодинакова.
 Для всех изученных ПАУ на примере ряда точек
 выявлено возрастание содержания на глубине 5–

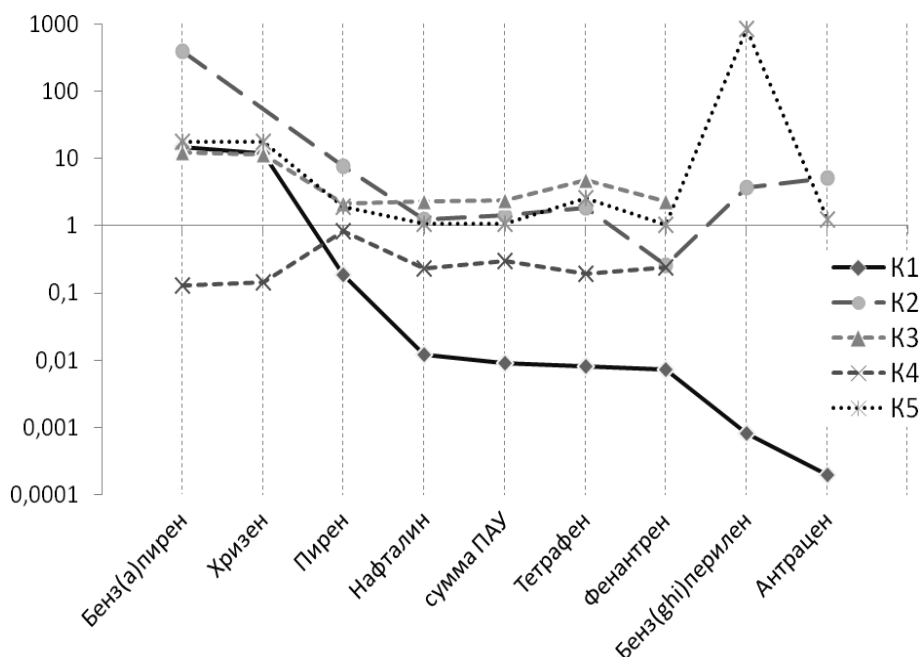


Рис. 4. Спектры ПАУ по интенсивности накопления в основных средах АЛ. Коэффициенты концентрации, т.е. отношения концентраций: К1 – донные отложения / взвесь; К2 – лёд / взвесь; К3 – донные отложения 5–15 см / 0–5 см; К4 – донные отложения 15–35 см / 5–15 см; К5 – снег / взвесь / Fig. 4. Spectra of PAHs in intensity accumulation in the main environments of aquatic landscapes. Concentration ratios, i.e. the ratio of concentrations: K1 - sediment / suspended matter; K2 - ice / suspended matter; K3 - bottom 5-15 cm / 0-5 cm; K4 - sediment 15-35 cm / 5-15 cm; K5 - snow / suspended matter

15 см по сравнению с глубиной 0–5 см (табл. 1, рис. 4). Хотя загрязнение ПАУ происходит с поверхности, в верхней части профиля подводных почв (0–3 см) часто наблюдается окислительная обстановка (заметная по охристому цвету поверхности донных осадков), что позволяет микроорганизмам интенсивно перерабатывать и разрушать высокомолекулярные органические соединения. При небольших глубинах возможны процессы фотохимического окисления [15]. Ниже 10 см формируется восстановительная обстановка, характеризующаяся более слабыми темпами разложения ПАУ. Накопление и консервация ПАУ, вероятно, происходят в периоды с интенсивным выпадением взвеси, когда скорость процессов деградации на поверхности подводных почв меньше скорости осадения. Тенденции возрастания суммы ПАУ в донных отложениях на глубинах 5–10 и 10–15 см по сравнению с поверхностным слоем 0–5 см были обнаружены в устье р. Волги [1], что объяснялось изменением состава привносимого вещества в последние десятилетия. На глубине 15–30 см обнаружены более низкие концентрации ПАУ в сравнении со слоем 5–15 см, что может быть связано как с меньшей загрязнённостью наносов, выпадавших ранее, так и с их разложением за счёт более длительного существования.

Оценка экологической опасности. Проведённые исследования позволяют провести оценку загрязнения АЛ полиароматическими углеводородами. Степень опасности для экосистем и для человека отдельных полиаренов существенно варьирует от безвредных (нафталин, фенантрен) до крайне опасных (бенз(а)пирен, бенз(ghi)перилен), что необходимо учитывать для определения уровня загрязнения. В ряде работ предложен расчёт коэффициент опасности $K_{\text{ПАУ}}$, в котором учитываются уровень токсичности и концентрация вещества [2]:

$$K_{\text{ПАУ}} = \sum_{i=1}^n (I_{t_i} \cdot C_i), \text{ где } C_i - \text{содержание индивидуального } i\text{-го ПАУ, нг/г; } I_{t_i} - \text{индекс токсичности}$$

индивидуального ПАУ, выраженный в долях единицы относительно канцерогенной опасности бенз(а)пирена; из исследуемых веществ он составляет 0,001 – для нафталина, флуорена, фенантрена; 0,01 – для антрацена, 0,05 – для тетрафена, 0,08 – для пирена, 0,09 – для хризена, 1,0 – для бенз(а)пирена и бенз(ghi)перилена [2]. Результаты расчёта приведены в табл. 2. В большинстве случаев взвесь и донные отложения характеризуются очень низкими коэффициентами опасности; несколько повышены они для снега (для сравнения, коэффициенты опасности, рассчитанные в донных отложениях рек и каналов г. Санкт-Петербурга, колеблются в пределах 1 000–100 000).

Таблица 2

Расчётный коэффициент опасности $K_{\text{ПАУ}}$
/ The estimated hazard ratio $K_{\text{РАН}}$

| № точки | Место-положение | Снег, нг/л | Взвесь, нг/л | Донные отложения, нг/г |
|---------|-----------------------|------------|--------------|------------------------|
| К-01 | с. Кагальник | 17 | 0,020 | 1,8 |
| К-02 | с. Кагальник | 8,8 | 0,038 | – |
| К-05 | Ерик Кабашный | –* | 0,75 | 0,36 |
| К-07 | Гирло Кривое | 1,2 | 0,22 | 0,029 |
| К-09 | Гирло Свиное | – | 0,35 | 0,18 |
| К-12 | Дон, до г. Ростова | – | 0,005 | 0,016 |
| К-11 | Дон, после г. Ростова | 60 | 0,024 | 0,10 |
| К-06 | Дон, Елизаветинская | 0,7 | 0,024 | 0,003 |
| К-13 | Дон, п. Узьяк | 15 | 0,000 | 0,089 |
| К-04 | Протока Б. Кутерьма | – | 0,015 | 1,4 |
| К-10 | Мертвый Донец | – | 0,016 | 0,77 |
| К-03 | Взморье, 1 км | 9,5 | 0,000 | 0,003 |
| К-08 | Взморье, 6 км | – | 0,13 | – |

* – нет данных.

Заключение

В результате проведённых исследований можно сделать ряд выводов:

1. Выявлены два типа источников, обеспечивающих поступление ПАУ из атмосферы, – первый тип источников, предположительно, бытовое отопление, даёт ассоциацию легких полиаренов (нафталин, дифенил, фенантрен, антрацен), второй тип источников, предположительно, промышленные предприятия с циклом сжигания угля и нефтепродуктов – ассоциацию тяжёлых полиаренов (бенз(а)пирен, бенз(ghi)перилен, хризен и пирен).

2. Взвешенное вещество водной массы обладает высокими концентрациями ПАУ, при этом в слабопроточных ериках их содержание увеличивается, а в крупных судоходных протоках – уменьшается, что может быть связано с более интенсивным разбавлением, повышением растворимости лёгких ПАУ при увеличенных скоростях течения, а также возрастающей скоростью разложения полиаренов за счёт усиленной аэрации и действия аэробных микроорганизмов.

3. Содержание ПАУ в донных отложениях крупных проток минимально за счёт повышенной скорости течения, максимальные концентрации наблюдаются в протоках среднего размера.

4. Концентрация полиаренов в донных отложениях много меньше, чем во взвешенном веществе, что свидетельствует об их деградации в водной обстановке. Наибольшей скоростью деградации характеризуются бенз(ghi)перилен и антрацен, средней скоростью обладают фенантрен, нафталин, тетрафен. Для бенз(а)пирена и хризена, напротив, наблюдается слабая концентрация в донных отложениях, вероятно, благодаря повышенной устойчивости к разложению.

5. Выявлено обогащение ледового покрова большинством ПАУ, что может быть связано с их гидрофобностью, поднятием к поверхности взвеси и углеводородной плёнки, обогащённых полиаренами, с последующим вмержанием в лёд.

6. Подповерхностные горизонты донных отложений характеризуются условиями, способствующими консервации и сохранению ПАУ. В поверхностном слое донных отложений господствует окислительная обстановка, в силу чего концентрация ПАУ сильно снижена.

7. Общая степень загрязнения АЛ дельты реки Дон полициклическими углеводородами может быть принята низкой, современные нормативы по бенз(а)пирену в исследованных объектах не превышены.

Авторы выражают благодарность коллективу Южного научного центра РАН за помощь в проведении исследований.

Литература

1. Немировская И.А., Бреховских В.Ф., Казмирук В.Д. Алифатические и полиароматические углеводороды в донных осадках устьевого взморья р. Волги // Водные ресурсы. 2006. Т. 33, № 3. С. 300–310.
2. Опекунов А.Ю., Митрофанова Е.С., Санны С., Коммедал Р., Опекунова М.Г., Баги А.С. Полициклические ароматические углеводороды в донных отложениях рек и каналов Санкт-Петербурга // Вестн. Санкт-Петербургского ун-та. 2015. Т. 4, № 7. С. 98–109.
3. Романенко В.Д., Ляшенко А.В., Афанасьев С.А., Коновец И.Н., Кипнис Л.С., Зорина-Сахарова Е.Е., Терлецкая А.В., Миллюкин М.В., Демченко В.Я., Бургес Р.М., Хо К.Т. Комплексная характеристика донных отложений разнотипных водных объектов авандельты Килийского рукава Дуная // Гидробиол. журн. 2011. Т. 3, № 47. С. 3–20.
4. Кузнецов А.Н., Федоров Ю.А. Нефтяные компоненты в устьевой области р. Дон и Азовском море (результаты многолетних исследований) // Водные ресурсы. 2014. Т. 41, № 1. С. 49–59.
5. Матишов Г.Г., Степаньян О.В., Харьковский В.М., Соьер В.Г. Нефтяное загрязнение Азовского и Черного морей растет // Природа. 2016. № 5. С. 64–69.
6. Хованский А.Д. Геохимия аквальных ландшафтов. Ростов н/Д.: Изд-во РГУ, 1993. 240 с.
7. Пиковский Ю.И., Исмаилов Н.М., Дорохова М.Ф. Основы нефтегазовой геоэкологии. М.: ИНФРА-М, 2015. 400 с.
8. Научно-прикладной справочник по климату СССР. Сер. 3: Многолетние данные. Ч. 1–6, вып. 13. Л.: Гидрометеиздат, 1990. 725 с.
9. Wang D.G., Yang M., Jia H.L., Zhou L. Polycyclic aromatic hydrocarbons in urban street dust and surface soil: Comparisons of concentration, profile, and source // Arch. Environ. Contam. Toxicol. 2009. Vol. 56, № 2. P. 173–180.
10. Zhang X.L., Tao S., Liu W.X., Yang Y., Zuo Q., Liu S.Z. Source diagnostics of polycyclic aromatic hydrocarbons based on species ratios: A multimedia approach // Environ. Sci. Technol. 2005. Vol. 39, № 23. P. 9109–9114.
11. Немировская И.А. Углеводороды в океане (снег – лед – вода – взвесь – донные осадки). М.: Научный мир, 2004. 318 с.
12. Tkachenko A.N., Gerasimova M.I., Lychagin M.Yu., Kasimov N.S., Kroonenberg S.B. Bottom sediments in deltaic shallow-water areas – are they soils? // Geography, Environment, Sustainability. 2016. № 3. P. 39–52.
13. Крылов В.А., Мосягин П.В., Крылов А.В., Бочкарева Л.В., Маткивская Ю.О. Влияние света люминесцентных ламп на стабильность образцов,

содержащих полициклические ароматические углеводороды // Вестн. Нижегородского ун-та им. Н.И. Лобачевского. 2010. Т. 4, № 1. С. 79–85.

14. Khaustov A., Redina M. Polyaromatic hydrocarbons: Identification of sources of environmental pollution at the sites of production, storage and transportation of oil using the pah indicator ratios // Pet. Abstr. 2015. Vol. 55, № 47. P. 105.

15. Федоров Ю.А., Страдомская А.Г., Кузнецов А.Н. Закономерности трансформации нефтяного загрязнения в водотоках по данным многолетних наблюдений // Водные ресурсы. 2006. Т. 33, № 3. С. 327–337.

References

1. Nemirovskaya I.A., Brekhovskikh V.F., Kazmi-ruk V.D. Alifaticeskie i poliaromaticeskie uglevodorody v donnykh osadkakh ust'evogo vzmor'ya r. Volgi [Aliphatic and polyaromatic hydrocarbons in bottom sediments of the estuary seashore of the Volga River]. *Vodnye resursy*. 2006. vol. 33, No. 3, pp. 300-310.
2. Opekunov A.Yu., Mitrofanova E.S., Sanni S., Kommedal R., Opekunova M.G., Bagi A.S. Politsiklicheskie aromaticeskie uglevodorody v donnykh otlozheniyakh rek i kanalov Sankt-Peterburga [Polycyclic aromatic hydrocarbons in bottom sediments of rivers and canals of St. Petersburg]. *Vestn. Sankt-Peterburgskogo un-ta*. 2015, vol. 4, No. 7, pp 98-109.
3. Romanenko V.D., Lyashenko A.V., Afanas'ev S.A., Konovets I.N., Kipnis L.S., Zorina-Sakharova E.E., Terletskaia A.V., Milyukin M.V., Demchenko V.Ya., Byurges R.M., Kho K.T. Kompleksnaya kharakteristika donnykh otlozhenii raznotipnykh vodnykh ob"ektov avandel'ty Kiliiskogo rukava Dunaya [Complex characterization of bottom sediments of various types of water bodies in the avandely of the Kilian sleeve of the Danube]. *Gidrobiol. zhurn*. 2011. vol. 3, No. 47, pp. 3-20.
4. Kuznetsov A.N., Fedorov Yu.A. Neftyanye komponenty v ust'voi oblasti r. Don i Azovskom more (rezul'taty mnogoletnikh issledovani) [Oil components in the estuary region of the river Don and the Sea of Azov (the results of many years of research)]. *Vodnye resursy*. 2014, vol. 41, No. 1, pp. 49-59.
5. Matishov G.G., Stepan'yan O.V., Khar'kovskii V.M., Soier V.G. Neftyanoie zagryaznenie Azovskogo i Chernogo morei rastet [Oil pollution of the Azov and Black Seas is growing]. *Priroda*. 2016, No. 5, pp. 64-69.
6. Khovanskii A.D. *Geokhimiya akval'nykh landshaftov* [Geochemistry of aquatic landscapes]. *Rostov-on-Don, Izd-vo RGU*, 1993, 240 p.
7. Pikovskii Yu.I., Ismailov N.M., Dorokhova M.F. *Osnovy neftegazovoi geoekologii* [Fundamentals of oil and gas geocology]. Moscow, INFRA-M, 2015, 400 p.
8. *Nauchno-prikladnoi spravochnik po klimatu SSSR*.

Ser. 3 : Mnogoletnie dannye [Scientific and applied handbook on the climate of the USSR. Ser. 3. Perennial data]. Ch. 1-6, iss. 13. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1990, 725 p.

9. Wang D.G., Yang M., Jia H.L., Zhou L. Polycyclic aromatic hydrocarbons in urban street dust and surface soil: Comparisons of concentration, profile, and source. *Arch. Environ. Contam. Toxicol.* 2009, vol. 56, No. 2, pp. 173-180.

10. Zhang X.L., Tao S., Liu W.X., Yang Y., Zuo Q., Liu S.Z. Source diagnostics of polycyclic aromatic hydrocarbons based on species ratios: A multimedia approach. *Environ. Sci. Technol.* 2005, vol. 39, No. 23, pp. 9109-9114.

11. Nemirovskaya I.A. *Uglevodorody v okeane (sneg – led – voda – vzyes' – donnye osadki)* [Hydrocarbons in the ocean (snow - ice - water - suspended matter - bottom sediments)]. Moscow, Nauchnyi mir, 2004, 318 p.

12. Tkachenko A.N., Gerasimova M.I., Lychagin M.Yu., Kasimov N.S., Kroonenberg S.B. Bottom sediments in deltaic shallow-water areas – are they soils? *Geography, Environment, Sustainability.* 2016, No. 3, pp. 39-52.

13. Krylov V.A., Mosyagin P.V., Krylov A.V., Bochkareva L.V., Matkivskaya Yu.O. Vliyanie sveta lyuminestnykh lamp na stabil'nost' obraztsov, sodержashchikh politsiklicheskie aromatische uglevodorody [Influence of light of fluorescent lamps on the stability of samples containing polycyclic aromatic hydrocarbons]. *Vestn. Nizhegorodskogo un-ta im. N.I. Lobachevskogo.* 2010, vol. 4, No. 1, pp. 79-85.

14. Khaustov A., Redina M. Polyaromatic hydrocarbons: Identification of sources of environmental pollution at the sites of production, storage and transportation of oil using the pah indicator ratios. *Pet. Abstr.* 2015, vol. 55, No. 47, p. 105.

15. Fedorov Yu.A., Stradomskaya A.G., Kuznetsov A.N. Zakonomernosti transformatsii nefryanogo zagryazneniya v vodotokakh po dannym mnogoletnikh nablyudenii [Regularities of the transformation of oil pollution in watercourses according to the data of long-term observations]. *Vodnye resursy.* 2006, vol. 33, No. 3, pp. 327-337.

УДК 553.98; 550.812

DOI 10.23683/0321-3005-2017-2-128-135

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ЗАЛЕЖЕЙ УГЛЕВОДОРОДОВ И ПЕРСПЕКТИВЫ НЕФТЕГАЗОНОСНОСТИ МЕЗОЗОЙСКОГО КОМПЛЕКСА ВАЛА КАРПИНСКОГО И ВОСТОЧНО-МАНЫЧСКОГО ПРОГИБА В РЕСПУБЛИКЕ КАЛМЫКИЯ

© 2017 г. Ю.В. Куранов¹, В.Ф. Шарафутдинов¹, В.В. Калабин¹, Э.С. Сианисян², Д.А. Шлыгин¹

¹ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг», Москва, Россия,

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

THE FEATURES OF FORMING OF HYDROCARBON RESERVOIRS AND PETROLEUM PROSPECTS OF THE MESOZOIC DEPOSITS OF KARPINSKY RIDGE AND EAST-MANYCH TROUGH IN THE REPUBLIC OF KALMYKIA

Yu. V. Kuranov¹, V. F. Sharafutdinov¹, V. V. Kalabin¹, E. S. Sianisyan², D. A. Shlygin¹

¹ООО «LUKOIL-Engineering», Moscow, Russia,

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

Куранов Юрий Вячеславович – ведущий специалист, управление геолого-разведочных работ, ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг», Покровский бульвар, 3, стр. 1, г. Москва, 109028, Россия, e-mail: Yury.Kuranov@Lukoil.com

Yury V. Kuranov – Leading Specialist, Geological Exploration Department, ООО «LUKOIL-Engineering», Pokrovskii Blud, 3, build. 1, Moscow, 109028, Russia, e-mail: Yury.Kuranov@Lukoil.com

Шарафутдинов Вадим Фоатович – доктор геолого-минералогических наук, начальник отдела литолого-фациального анализа, управление геолого-разведочных работ, ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг», Покровский бульвар, 3, стр. 1, г. Москва, 109028, Россия

Vadim F. Sharafutdinov – Doctor of Geology and Mineralogy, Head of Lithofacies Analysis Division, Geological Exploration Department, ООО «LUKOIL-Engineering», Pokrovskii Blud, 3, build. 1, Moscow, 109028, Russia

Калабин Василий Викторович – ведущий специалист, управление геолого-разведочных работ, ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг», Покровский бульвар, 3, стр. 1, г. Москва, 109028, Россия

Vasily V. Kalabin – Leading Specialist, Geological Exploration Department, ООО «LUKOIL-Engineering», Pokrovskii Blud, 3, build. 1, Moscow, 109028, Russia

Сианисян Эдуард Саркисович – доктор геолого-минералогических наук, профессор, кафедра геологии нефти и газа, Институт наук о Земле, Южный федеральный университет, ул. Зорге, 40, г. Ростов-на-Дону, 344090, Россия, e-mail: edward@sfedu.ru

Eduard S. Sianisyan – Doctor of Geology and Mineralogy, Professor, Department of Oil and Gas Geology, Institute of Earth Sciences, Southern Federal University, Zorge St., 40, Rostov-on-Don, 344090, Russia, e-mail: edward@sfedu.ru

Шлыгин Дмитрий Артемович – управление геолого-разведочных работ, ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг», Покровский бульвар, 3, стр. 1, г. Москва, 109028, Россия

Dmitrii A. Shlygin – Geological Exploration Department, ООО «LUKOIL-Engineering», Pokrovskii Blud, 3, build. 1, Moscow, 109028, Russia

Рассмотрены особенности формирования залежей углеводородов мезозойского комплекса на юге Калмыкии в пределах Восточно-Маньчского прогиба и вала Карпинского. К отложениям мезозойского возраста приурочены не только значительная часть уже открытых в Калмыкии месторождений, но и немалое количество перспективных в отношении нефтегазоносности и неопроискованных бурением структур. С использованием всех доступных геолого-геохимических данных авторами проанализированы геотермическая обстановка, степень катагенеза рассеянного органического вещества, определены предполагаемое время и условия формирования залежей мезозойского возраста, предложена принципиальная схема направлений миграции углеводородов и размещения возможных зон нефтегазонакопления. По мнению авторов, потенциал мезозойских отложений на территории республики пока полностью не раскрыт и не вовлечен в разработку, в связи с чем выделены перспективные направления дальнейших геолого-разведочных работ на юге Калмыкии, включающие доизучение как традиционно продуктивных для данной территории мелового и юрского нефтегазоносных комплексов, так и недостаточно изучавшегося в Калмыкии ранее триасового нефтегазоносного комплекса.

Ключевые слова: перспективы нефтегазоносности, Калмыкия, вал Карпинского, Восточно-Маньчский прогиб, формирование мезозойских залежей.

This article describes the features of forming of hydrocarbon reservoirs of the Mesozoic age on the south of Kalmykia in the areas of East-Manych Trough and Karpinsky Ridge. The sediments of Mesozoic age included here as a significant part of already discovered fields in Kalmykia, so too a considerable number of promising structures, which has not yet been investigated by drilling. Using all available geological and geochemical data let to analyze geothermal environment and the level of catagenesis of organic substance, to determine estimated time and conditions for forming deposits of Mesozoic age, to propose schematic diagram of possible directions of migration and zones of accumulation of hydrocarbons. According to the authors, the potential of Mesozoic deposits is not fully disclosed on the territory of Republic. Authors suggest prospective areas for further exploration in the southern part of Kalmykia. These areas include as additional exploration of traditionally productive on this territories sediments of the Jurassic and Cretaceous systems, so too the Triassic complex, which insufficiently studied previously in Kalmykia.

Keywords: *petroleum prospects, Kalmykia, Karpinsky Ridge, East-Manych Trough, forming of Mesozoic deposits.*

В последние годы проведение бассейнового анализа, включающего моделирование бассейнов седиментации и нефтегазоносных систем, стало важной составляющей геолого-разведочных проектов по изучению эволюции осадочных бассейнов и оценке их перспектив нефтегазоносности. Восстановление истории накопления и преобразования осадочных пород и органического вещества (ОВ) позволяет определить временные интервалы интенсивной генерации углеводородов (УВ), время миграции УВ, что, в свою очередь, дает возможность оценить условия формирования скоплений УВ, размеры и фазовый состав, соотношение жидких и газообразных УВ в перспективных объектах. Подобные исследования, проводимые на стадии планирования геолого-разведочных работ (ГРП), способствуют снижению рисков при поисково-разведочном бурении.

Ранее изучением перспектив нефтегазоносности юга Калмыкии, в том числе и мезозойских отложений, занимались А.А. Ярошенко, Л.М. Зорькин, Ю.А. Волож, В.Э. Бембеев, А.В. Бембеев, О.Г. Одолев, Г.О. Одолев, О.Г. Бражников, Н.И. Воронин, Д.Л. Федоров, А.П. Козуб и др. [1–5].

В 2014–2015 гг. в рамках региональных работ по геологическому изучению территории Калмыкии авторами выполнен анализ большого объема данных геолого-геофизической изученности, в том числе и новейших данных последних лет. Территория республики относится к областям с установленной нефтегазоносностью и по-прежнему перспективна для дальнейших ГРП на нефть и газ [6]. Значительная часть запасов УВ открытых месторождений и перспективных объектов приурочена к мезозойским отложениям, потенциал которых, по мнению авторов, пока полностью не раскрыт и не вовлечен в разработку.

Основным направлением ГРП на юге Калмыкии многие годы являлись отложения среднеюрского и нижнемелового комплексов. Установленными зонами концентрации залежей данных комплексов в Калмыкии являются Промысловский блок вала (кряжа) Карпинского и северный борт Восточно-Маньчского прогиба (рис. 1).

Подавляющая часть месторождений УВ вала Карпинского в Калмыкии приурочена к среднеюрским и нижнемеловым песчаникам Каспийско-Камышанской структурной ступени и к нижнемеловым песчаникам Промысловско-Цубукской зоны. Нефтегазоносность юрских отложений в пределах Промысловско-Цубукской зоны, несмотря на наличие коллекторов, не установлена. Продуктивные пласты мезозойского возраста вала Карпинского отличаются тонкоритмичным строением, литологической изменчивостью, повышенной глинистостью, неоднородностью емкостных и фильтрационных свойств по площади и разрезу. Глубины залегания составляют от 620 до 2360 м. Самыми крупными месторождениями в юрско-меловом комплексе калмыцкой части вала Карпинского являются газонефтяное Олейниковское и нефтяное Курганное [1].

Характерной особенностью месторождений с залежами среднеюрского и нижнемелового возраста вала Карпинского являются их многопластовость и наличие в пределах одного поднятия залежей различного типа. Нередко продуктивный горизонт, содержащий на отдельных площадях промышленные скопления нефти или газа, на соседней площади в сходных литолого-стратиграфических условиях полностью лишен УВ. Это свидетельствует о большом разнообразии условий формирования залежей.

Одно из таких условий было выявлено Н.И. Ворониным и Д.Л. Федоровым, которые установили связь между временем образования ловушек и характером их продуктивности. Нефтяные залежи в юрских отложениях установлены на структурах, сформировавшихся в качестве ловушек к концу среднеюрской эпохи. В нижнемеловых отложениях скопления УВ открыты на структурах, сформировавшихся к началу сантонского века, в то время как на поднятиях, образовавшихся по нижнемеловым горизонтам в более позднее время, залежи УВ отсутствуют (Шарын-Гольская, Ачинерская, Салхинская, Меклетинская, Бурульская структуры на валу Карпинского) [7].



Рис. 1. Схема миграции УВ в пределах вала Карпинского и Восточно-Манычского прогиба / Fig. 1. The scheme of migration of hydrocarbons within the Karpinsky Ridge and East-Manych Trough

Другая важная закономерность формирования залежей определяется заполнением ловушек вала Карпинского углеводородами и в значительной степени связана с местоположением очагов генерации УВ, о чем будет сказано ниже.

В калмыцкой части Восточно-Манычского прогиба, в пределах его северного борта, залежи в юрско-меловом комплексе отложений приурочены к Комсомольско-Артезианской ступени. Здесь установлены ловушки УВ структурного типа, тектонически экранируемые с элементами литологического замещения. Открытые залежи – пластовые, сводовые, неполнопластовые сводовые, частично тектонически и литологически экранированные. В юрских отложениях Восточно-Манычского прогиба выявленные скопления УВ связаны с пластами песчано-алевролитовой толщи ааленского возраста (нефтяные месторождения Майли-Харанское, Таша, Комсомольское, Северо-Комсомольское и др.) и байосскими пачками песчаников и алевролитов (Шахметское нефтяное месторождение). Продуктивные пласты мелового возраста связаны с залежами нижнего апта и отличаются

неоднородностью внутреннего строения, невыдержанностью по простиранию, частыми литолого-фациальными замещениями.

Геохимическими исследованиями ОВ, проводившимися в данном регионе с 50-х гг. XX в. большим количеством исследователей (Н.Б. Вассоевич, И.А. Конюхов, Н.А. Еременко, Д.В. Жабрев, Л.А. Польштер, Д.А. Мирзоев, Л.И. Джапаридзе, Г.И. Тимофеев, Ю.И. Корчагина, Б.А. Соколов, П.А. Карпов, Н.П. Гречишников, Б.К. Чичуа, О.В. Скрипнюк и др.), установлено, что генерирующими толщами УВ Средне-Каспийского нефтегазозносного бассейна в мезозойских отложениях являются триасовые (нефтекумская свита нижнего триаса, средний и, возможно, верхний триас), нижне-, среднеюрские (тоарские, ааленские, бат-байосские) и нижнемеловые (апт-альбские) отложения [8–11].

Выполненный в ходе региональных работ анализ геотермических условий недр и уровня катагенеза территории юга Калмыкии позволяет заключить, что на палеозойском этапе развития палеозойские комплексы вала Карпинского погружались на значительные глубины, затем подвергались про-

цессам тектонического напряжения и сжатия, что в итоге привело к интенсивным дислокациям и складчатости палеозойского комплекса и в результате к высокому уровню термической «зрелости» пород и содержащегося в них ОВ. Последующее воздымание, сохранявшееся на протяжении мезозой-кайнозойского этапа развития, определило относительно приподнятое положение вала Карпинского и обусловило сокращенные толщины мезозойского комплекса отложений, незначительные глубины их погружения и, соответственно, низкий уровень термической «зрелости».

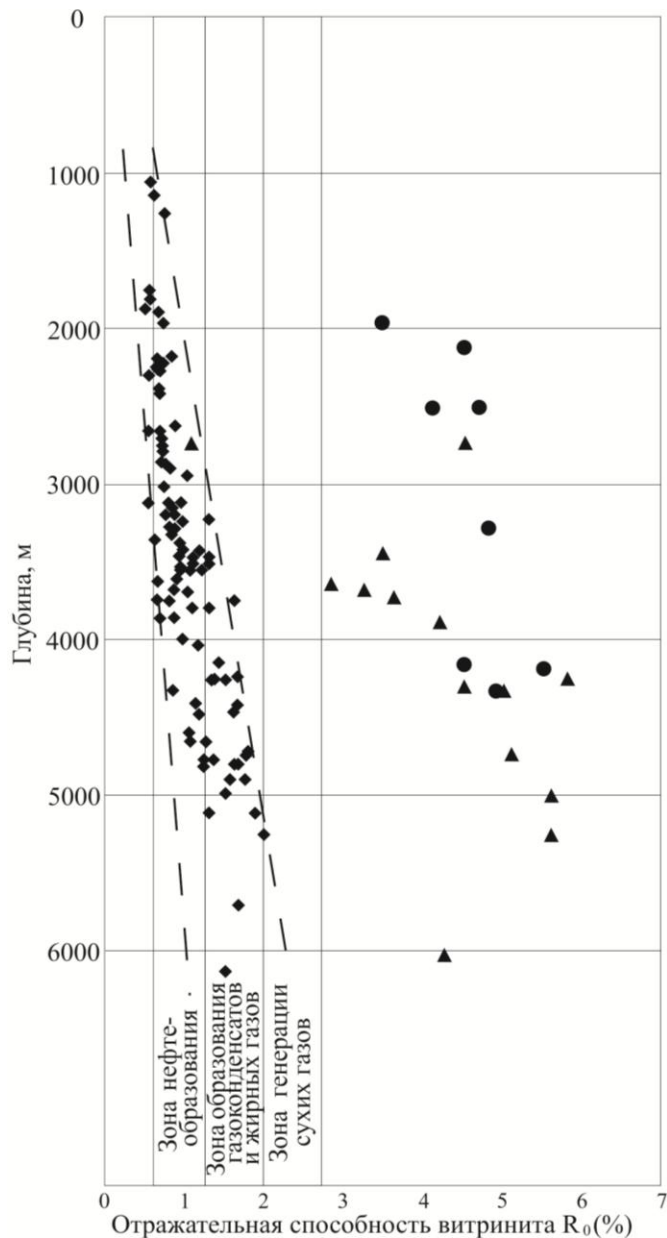
Формирование Восточно-Маньчского прогиба в теле Скифской платформы началось в конце палеозойской – начале мезозойской эры на этапе киммерийского рифтогенеза [2, 3]. Палеозойские отложения, образующие складчатый фундамент Скифской плиты, претерпели значительное термическое воздействие, обусловленное процессами герцинского этапа складчатости и захоронением на значительные глубины. Мезозойские (позднепермско-триасовые, юрские и меловые) отложения, заполнившие глубокий Восточно-Маньчский прогиб в соответствии со значительными глубинами погружения на платформенном этапе развития территории, достигли средних и поздних градаций катагенеза, что обусловило необходимые термодинамические условия для протекания процессов нефтегазообразования. Таким образом, в южной части Калмыкии наиболее вероятным источником генерации УВ, в том числе для вала Карпинского, являются области Восточно-Маньчского прогиба.

Проведенные исследования свидетельствуют о наличии в зоне Маньчских прогибов и на южном склоне вала Карпинского закономерного увеличения отражательной способности витринита (R_0 , %) с глубиной в соответствии с зависимостью, характерной для мезозойских образований платформенных чехлов молодых платформ (рис. 2).

Отложения мезозоя характеризуются нормальным закономерным возрастанием степени катагенетической преобразованности осадочных пород и термической «зрелости» керогена. В соответствии с этим фиксируется глубинная зональность процессов нефтегазообразования, свойственная для большинства осадочных бассейнов. Зона протокатагенеза, в которой рассеянное органическое вещество (РОВ) обладает недостаточным уровнем зрелости для генерации УВ, распространяется до глубины 1,5–2 тыс. м ($R_0 < 0,5–0,7$ %).

Глубже располагается главная зона генерации жидких УВ, начальные этапы которой приурочены к глубине около 2 тыс. м. Максимальная интенсивность генерации жидких УВ отмечается при $R_0 = 0,8–1,1$ %, что соответствует глубине 2,5–4 тыс. м.

С глубины 4–4,5 тыс. м начинается зона преимущественной генерации газоконденсатов и жирных газов ($R_0=1,2–1,8$ %). По завершении этого этапа значительная доля генерационного потенциала оказывается исчерпанной, и глубже остаточный кероген может генерировать преимущественно сухой метановый газ.



◆ - MZ ● - PZ — вал Карпинского ▲ - PZ – Вост.- Маньчский прогиб

Рис. 2. Зависимость величины отражательной способности витринита (R_0 , %) от глубины / Fig. 2. Dependence of the reflectivity of vitrinite (R_0 , %) on the depth

Таким образом, собранные фактические данные свидетельствуют о том, что мезозойские образования зоны Маньчских прогибов не достигли усло-

вий генерации сухих газов, но на глубине более 3,5–4 тыс. м могут генерировать значительную долю газоконденсатов.

В пределах исследуемой территории нефтегазоматеринские породы (НГМП) нижнего и среднего триаса в настоящее время находятся на глубинах, характерных для главной зоны нефтеобразования (ГЗН). Наиболее погруженной частью Восточно-Маньчского прогиба являются Величаевско-Максимокумский вал и юго-восток Арзгирского прогиба. Здесь НГМП нижнего триаса вошли в ГЗН в раннемеловую эпоху, а вышли из нее в раннем миоцене, породы среднего триаса – вошли в раннеолигоценное время, а вышли в раннем плиоцене. На современном этапе геологического развития ниже-среднетриасовые НГМП отмеченных выше тектонических элементов находятся в главной зоне газообразования (ГЗГ).

В восточной части южного склона вала Карпинского и в зоне Маньчских прогибов НГМП юрского возраста вступили в ГЗН в раннем олигоцене, а НГМП раннемелового возраста – в позднеолигоценное время. И те, и другие НГМП продолжают оставаться в ГЗН и в настоящее время.

На основе анализа комплекса геолого-геохимических данных по составу и свойствам исходного ОВ пород, характера нефтегазоносности и условий развития региона составлена схема местоположения основных очагов генерации УВ и направлений их миграции на юге Калмыкии. Как уже отмечалось выше, нефтегазоносность основной части территории вала Карпинского связана с областями генерации УВ, расположенными в погруженных частях Кумо-Маньчской системы прогибов (рис. 1 и 3).

Мезозой-кайнозойский чехол вала Карпинского, включающего отложения мел-палеогенового и неоген-четвертичного возраста, не содержит прослоев НГМП (за исключением небольшой части юрских отложений). Кроме того, эти отложения залегают на небольших глубинах, недостаточных для развития процессов нефтегазообразования. Л.Ф. Сивцова [12] отмечала в своих работах присутствие в нижнемеловых нефтях и конденсатах вала Карпинского спор, пыльцы и акритарх, распространение которых ограничено только промежуточным (пермо-триасовым) комплексом, что подтверждает предположения о связи нефтей вала Карпинского с материнскими породами доюрского возраста и их вероятную миграцию из Восточно-Маньчского прогиба.

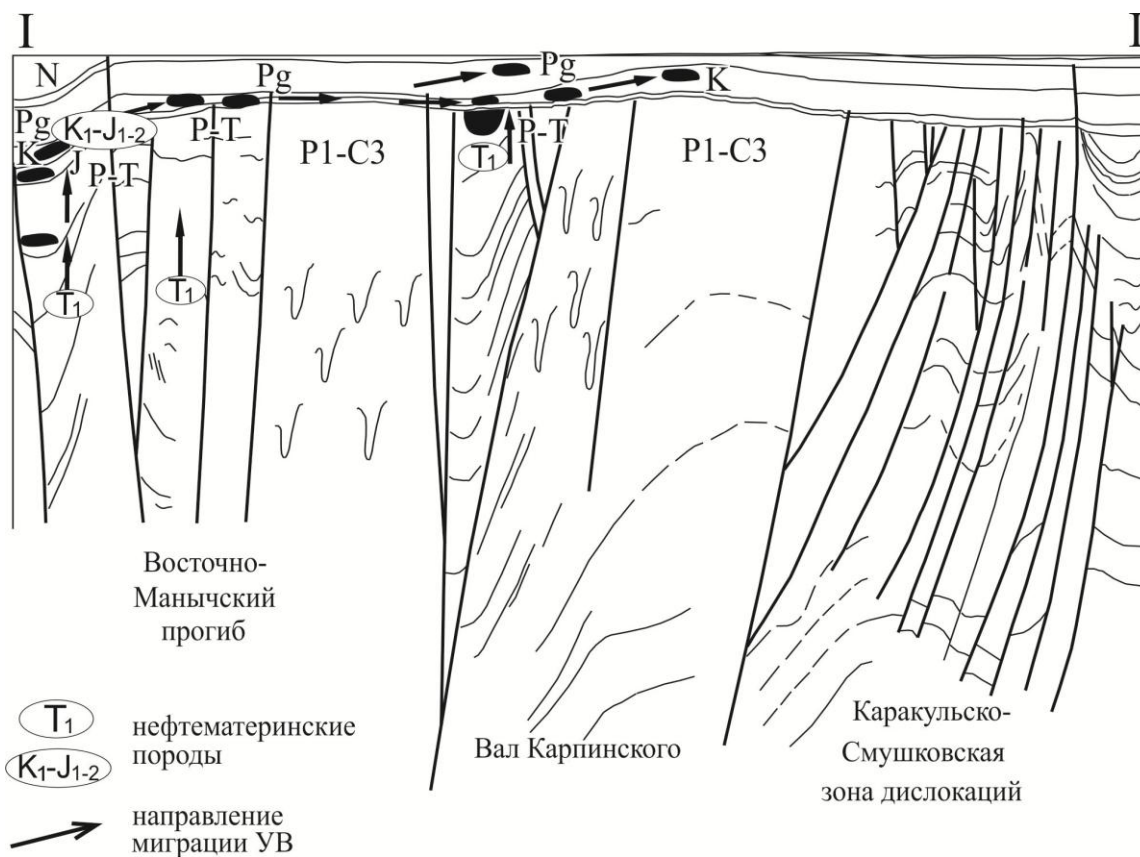


Рис. 3. Линия геологического разреза по профилю I – I / Fig. 3. Geological section line among profile I – I

Именно в погруженных зонах Кумо-Манычского прогиба отмечается развитие нефтегазоматеринских отложений триасового, юрского и нижнемелового возраста, достигших необходимого уровня термической «зрелости» во второй половине мезозойской эры и начале кайнозоя. К этому времени были сформированы основные структурные ловушки, закончилось формирование основных продуктивных горизонтов, представленных нижнетриасовыми карбонатными коллекторами, песчаными и песчано-алевритовыми породами юрского и нижнемелового возраста, сформировались экранящие комплексы позднемелового и палеоген-неогенового времени. В результате сложились благоприятные условия для миграции образовавшихся УВ из областей генерации вверх по восстанию пластов и далее до зон аккумуляции.

В то же время нельзя исключить накопление НГМП в триасовых отложениях, заполняющих грабенообразные (рифтовые) прогибы, отмечаемые в теле палеозойского поднятия вала Карпинского. Примером подобных объектов является Промысловский тафроген – палеоврез значительных размеров (протяженностью до 100 км и шириной около 5 км), зафиксированный в южной части Промысловского блока вала Карпинского, в котором могли формироваться УВ в основном газового состава из триасовых нефтегазоматеринских толщ. Непосредственно над этим палеоврезом были открыты газовые месторождения в юрских и меловых отложениях, что позволяет косвенно предположить наличие вертикальной миграции УВ из триасовых отложений. Подобные высокоамплитудные и значительные по размерам палеоврезы выявлены также на Каспийско-Камышанской структурной ступени Промысловского блока.

Таким образом, на территории юга Калмыкии в восточной части системы Манычских прогибов сформировался очаг генерации углеводородов в основном нефтяного ряда в нефтегазоматеринских отложениях триаса, юры и нижнего мела, и только в самых погруженных частях образовывались газоконденсатные и газовые УВ. Распространение миграционных потоков из триасовых, юрских, нижнемеловых источников ограничивалось южными и центральными, наиболее приподнятыми участками вала Карпинского. Они не могли проникать в пределы северного склона вала Карпинского, что, по всей видимости, объясняет отсутствие там скопленных УВ.

В свете вышесказанного, оценивая перспективы нефтегазоносности территории юга Калмыкии, необходимо отметить, что значительная часть открытых залежей в среднеюрском и в меловом комплексе в настоящее время выработана или находится на

завершающей стадии разработки. В то же время результаты геолого-геофизических исследований территории Калмыкии последних лет, в том числе сейсморазведочные работы МОГТ 2D-ВРС, позволили открыть Долбанское нефтяное месторождение, уточнить геологические модели Тенгутинского, Олейниковского, Межевого, Промысловского, Каспийского, Улан-Хольского, Ермолинского месторождений, в ряде случаев нарастив их ресурсную базу. По-прежнему не опоскован бурением ряд перспективных структур в отложениях юры и мела, из которых наиболее крупными ресурсами УВ обладают Джалыковская и Антоновская структуры. Открытия небольших залежей можно ожидать на таких непоискованных бурением структурах, как Отгонная, Бобровская, Западно-Разгирская, Восточно-Бударинская, Свиридовская, Бабаевская и др. Все это позволяет сделать вывод о том, что нефтегазоносный потенциал меловых и юрских отложений юга Калмыкии еще не исчерпан.

В то же время на первый план на исследуемой территории может выйти изучение триасового (тафрогенного) комплекса, нефтегазоносность которого уже доказана открытием ряда месторождений УВ в отложениях нижнего и среднего триаса на сопредельных территориях Дагестана и Ставропольского края.

Непосредственно на юге Калмыкии залежей УВ в триасовом комплексе пока не открыто, что объясняется недостаточным объемом его исследований. Выявленные в пределах Промысловского блока вала Карпинского в тафрогенном комплексе грабены, о которых уже говорилось выше, на предыдущих стадиях поисков УВ игнорировались, не были стратифицированы и изучены бурением. Данных для объективной количественной оценки их ресурсного потенциала пока недостаточно, но не принимать во внимание нефтегазогенерирующий и аккумулирующий потенциал подобных объектов нельзя, так как в перспективе они могут стать самостоятельным направлением для дальнейших ГРП на юге Калмыкии.

Не менее перспективны отложения триасового возраста и в пределах Восточно-Манычского прогиба, где в 1970-е гг. было выявлено крупное валобразное поднятие в триасе – Комсомольско-Артезианская ступень (вал) протяженностью более 100 км. Научно обоснованными направлениями ГРП на данной территории являются рифогенные известняки нефтекумской свиты и крупнозернистые песчаники и гравелиты куманской свиты, с которыми могут быть связаны нефтяные, конденсатные и газовые залежи. В период с 1977 по 1991 гг. сейсморазведочными работами вдоль границы республик Калмыкия и Дагестан в полосе

барьерного рифа была выделена цепочка локальных поднятий в отложениях нефтекумской свиты нижнего триаса: Озёрное, Западно-Озёрное, Новая Надежда, Барьерное, Рыбачье, Цекертинское, Южно-Даргинское, Бирюзакское. На Озёрном и Ново-Надеждинском поднятиях, расположенных в Дагестане, продуктивность нефтекумских известняков уже доказана. В начале 2000-х гг. на Цекертинской структуре на юге Калмыкии при бурении скважины 8-Цекертинская из нижнетриасовых отложений был зафиксирован аварийный выброс нефти и газа. В случае бурения на Цекертинской структуре скважины-дублера можно с большой степенью вероятности ожидать открытия нового месторождения. В настоящее время в Калмыкии в бурении на нефтекумскую свиту находится Барьерная структура. Результатов бурения скважины 1-Барьерная можно ожидать уже в этом году. Установление продуктивности нефтекумской свиты на Барьерной структуре может придать значительный импульс дальнейшему развитию данного направления ГРП в Калмыкии.

Подводя итог выполненным исследованиям, выделим их основные результаты:

1. Основные области генерации нефтяных и газовых УВ юга Калмыкии сосредоточены в пределах Восточно-Маньчского прогиба, где основными нефтематеринскими толщами являются отложения нижнего триаса (нефтекумская свита оленекского яруса), нижней и средней юры (тоарские, ааленские, бат-байосские) и нижнего мела (апт-альбские). Нижнетриасовые материнские породы здесь являются источником генерации нефти, газа и конденсата, ниже-, среднеюрские и раннемеловые материнские породы – преимущественно нефти. За счет миграции УВ по вертикали и латерали из очагов их генерации в Восточно-Маньчском прогибе были заполнены ловушки Восточно-Маньчского прогиба и вала Карпинского.

2. В мезозойских отложениях юга Калмыкии установлено нормальное закономерное возрастание степени катагенетической преобразованности осадочных пород и термической зрелости керогена. Зона протокатагенеза, в которой РОВ обладает недостаточным уровнем зрелости для генерации УВ, распространяется до глубины 1,5–2 тыс. м ($R_0 < 0,5–0,7$ %). Глубже располагается главная зона генерации жидких УВ, начальные этапы которой приурочены к глубине около 2 тыс. м. Максимальная интенсивность генерации жидких УВ отмечается при $R_0 = 0,8–1,1$ %, что соответствует глубине 2,5–4 тыс. м. С глубины 4–4,5 тыс. м начинается зона преимущественной генерации газоконденсатов и жирных газов ($R_0 = 1,2–1,8$ %). К этому этапу значительная доля генерационного потенциала оказывается ис-

черпанной, и ниже остаточный кероген может генерировать преимущественно сухой газ. Собранные фактические данные свидетельствуют: мезозойские образования зоны Маньчских прогибов преимущественно не достигли условий генерации сухих газов, но на глубине более 3,5–4 тыс. м могут генерировать значительную долю газоконденсатов.

3. Перспективы нефтегазоносности мезозойских отложений юга Калмыкии связаны с доизучением среднеюрского и нижнемелового комплекса, в которых можно ожидать открытия мелких залежей УВ в структурных и стратиграфических ловушках.

Не менее перспективным направлением ГРП является дальнейшее изучение триасового (тафрогенного) комплекса, ресурсный потенциал которого может быть сосредоточен в стратиграфических ловушках приграбленных зон вала Карпинского и в структурных, стратиграфических ловушках, а также в карбонатных постройках (нефтекумского возраста) Восточно-Маньчского прогиба.

Литература

1. *Одолеев О.Г., Калинин В.В., Одолеев Г.О.* Геология и нефтегазоносность Калмыкии. Волгоград : Изд-во ВолГУ, 2008. 158 с.
2. *Волож Ю.А., Антипов М.П., Леонов Ю.Г., Морозов А.Ф., Юров Ю.А.* Строение кряжа Карпинского // Геотектоника. 1999. № 1, т. 33. С. 28–43.
3. *Капустин Н.И., Кирюхин А.Г., Бембеев В.Э.* Геологическое строение и нефтегазоносность Калмыкии. Элиста : Калм. кн. изд-во, 1986. 156 с.
4. *Гасангусейнов Г.Г., Шарафутдинов Ф.Г., Мирзоев Д.А., Воцалевский З.С. [и др.].* О нефтегазоносности пермских и триасовых отложений Южной Калмыкии // Геология нефтегазоносных комплексов мезозоя Дагестана. 1979. Вып. 4 (23).
5. *Глумов И.Ф., Маловицкий Я.П., Новиков А.А., Сенин Б.В.* Региональная геология и нефтегазоносность Каспийского моря. М. : Недра, 2004. 342 с.
6. *Куранов Ю.В.* Оценка перспектив нефтегазоносности и ресурсной базы Калмыкии на основе новейших геолого-геофизических данных // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2017. № 1. С. 101–109.
7. *Каминов В.Э.Г.* Составление палеотектонических карт осадочного чехла территории Калмыцкой АССР в связи с прогнозом перспектив промышленной нефтегазоносности / ПГО «Нижневожскгеология». 1983. 125 с.
8. *Золова И.В., Шлыгин Д.А., Шарафутдинов В.Ф., Катаев О.И., Мусихин В.А., Калабин В.В.* Нефтегазоматеринские отложения Среднего Каспия и его обрамления (Средне-Каспийский нефтегазоносный бассейн) // Тр. Ин-та геологии Даг. науч. центра РАН. 2016. Вып. 66. С. 56–59.

9. Скрипнюк О.В. Геолого-геохимические условия нефтегазоносности мезозойских отложений зоны Маньчских прогибов и южного склона кряжа Карпинского : автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. Краснодар, 2010. 24 с.

10. Мирзоев Д.А., Пирбудагов В.М., Саидова С.А. Рассеянное органическое вещество и геохимические образования мезозойских отложений Восточного Предкавказья // Органическое вещество нефтеproducing пород – основной УВ нефти и газа. Ташкент : Изд-во САИГНМС, 1975. С. 233–245.

11. Шарифутдинов В.Ф., Бембеев А.В., Куранов Ю.В., Калабин В.В., Бембеев В.А. Нефтегазоносные комплексы Восточно-Маньчского прогиба Калмыкии // Природно-ресурсный потенциал Прикаспия и сопредельных территорий: проблемы его рационального использования. Элиста, 2016. С. 17–27.

12. Сивцова Л.Ф. Применение результатов споропыльцевого анализа для решения вопросов нефтяной геологии на примере мезозойских нефтегазоносных комплексов Восточного Предкавказья : автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. Грозный, 1974. 18 с.

References

1. Odoleev O.G., Kalinin V.V., Odoleev G.O. *Geologiya i neftegazonosnost' Kalmykii* [Geology and oil and gas content of Kalmykia]. Volgograd, Izd-vo VolGU, 2008, 158 p.

2. Volozh Yu.A., Antipov M.P., Leonov Yu.G., Morozov A.F., Yurov Yu.A. *Stroenie kryazha Karpinskogo* [The structure of the Karpinsky Ridge]. *Geotektonika*. 1999, No. 1, vol. 33, pp. 28-43.

3. Kapustin N.I., Kiryukhin A.G., Bembeev V.E. *Geologicheskoe stroenie i neftegazonosnost' Kalmykii* [Geological structure and oil and gas potential of Kalmykia]. Elista, Kalm. kn. izd-vo, 1986, 156 p.

4. Gasanguseinov G.G., Sharafutdinov F.G., Mirzoev D.A., Votsalevskii Z.S. [i dr.]. O neftegazonosnosti permskikh i triasovykh otlozhenii Yuzhnoi Kalmykii [About oil and gas content of Permian and Triassic sediments of Southern Kalmykia]. *Geologiya neftegazonosnykh kompleksov mezozoya Dagestana*. 1979, iss. 4 (23).

5. Glumov I.F., Malovitskii Ya.P., Novikov A.A., Senin B.V. *Regional'naya geologiya i neftegazonosnost' Kaspiiskogo morya* [Regional geology and oil and gas potential of the Caspian Sea]. Moscow, Nedra, 2004, 342 p.

6. Kuranov Yu.V. Otsenka perspektiv neftegazonosnosti i resursnoi bazy Kalmykii na osnove noveishikh geologo-geofizicheskikh dannykh [Estimation of pro-

spects of oil and gas potential and resource base of Kalmykia on the basis of the newest geological and geophysical data]. *Izv. vuzov. Sev.-Kavk. region. Estestv. nauki*. 2017, No. 1, pp. 101-109.

7. Kaminov V.E.-G. *Sostavlenie paleotektonicheskikh kart osadochnogo chekhla territorii Kalmytskoi ASSR v svyazi s prognozom perspektiv promyshlennoi neftegazonosnosti* [Compilation of paleotectonic maps of the sedimentary cover of the territory of the Kalmyk ASSR in connection with the forecast of the prospects of industrial oil and gas bearing]. PGO «Nizhnevolskgeologiya». 1983, 125 p.

8. Zolova I.V., Shlygin D.A., Sharafutdinov V.F., Kataev O.I., Musikhin V.A., Kalabin V.V. *Neftegazomaterinskiye otlozheniya Srednego Kaspiya i ego obramleniya (Sredne-Kaspiiskii neftegazonosnyi bassein)* [Oil and gas maternal deposits of the Middle Caspian and its surroundings (Middle Caspian oil and gas basin)]. *Tr. In-ta geologii Dag. nauch. tsentra RAN*. 2016, iss. 66, pp. 56-59.

9. Skripnyuk O.V. *Geologo-geokhimicheskie usloviya neftegazonosnosti mezozoiskikh otlozhenii zony Manychskikh progibov i yuzhnogo sklona kryazha Karpinskogo* : avtoref. dis. ... kand. geol.-min. nauk [Geological and geochemical conditions of oil and gas content of the Mesozoic deposits of the Manichsky trough zone and the southern slope of the Karpinsky ridge]. Krasnodar, 2010, 24 p.

10. Mirzoev D.A., Pirbudagov V.M., Saidova S.A. [Dissipated organic matter and geochemical formations of the Mesozoic deposits of the Eastern Ciscaucasia]. *Organicheskoe veshchestvo nefteprodukiyashchikh porod – osnovnoi UV nefiti i gaza* [Organic matter of oil-producing rocks is the main hydrocarbon oil and gas]. Tashkent, Izd-vo SAIGNMS, 1975, pp. 233-245.

11. Sharafutdinov V.F., Bembeev A.V., Kuranov Yu.V., Kalabin V.V., Bembeev V.A. [Oil and gas bearing complexes of the East Manych trough of Kalmykia]. *Prirodno-resursnyi potentsial Prikaspiya i sopredel'nykh territorii: problemy ego ratsional'nogo ispol'zovaniya* [Natural and resource potential of the Caspian and adjacent territories: problems of its rational use]. Elista, 2016, pp. 17-27.

12. Sivtsova L.F. *Primenenie rezul'tatov sporopyl'tsevogo analiza dlya resheniya voprosov neftyanoi geologii na primere mezozoiskikh neftegazonosnykh kompleksov Vostochnogo Predkavkaz'ya* : avtoref. dis. ... kand. geol.-min. nauk [Application of the results of spore-pollen analysis to solve the problems of petroleum geology on the example of the Mesozoic oil and gas bearing complexes of the Eastern Ciscaucasia]. Grozny, 1974, 18 p.

УДК 502.574.5: 574.64

DOI 10.23683/0321-3005-2017-2-136-141

ОСОБЕННОСТИ «ЦВЕТЕНИЯ» ВОДЫ ЦИМЛЯНСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА СИНЕ-ЗЕЛЁНЫМИ МИКРОВОДОРОСЛЯМИ

© 2017 г. Н.А. Мартышева¹, Т.А. Хоружая^{1,2}

¹Гидрохимический институт, Ростов-на-Дону, Россия,

²Институт водных проблем РАН, Ростов-на-Дону, Россия

FEATURES OF WATER «FLOWERING» OF BLUE-GREEN ALGAE IN TSIMLYANSK RESERVOIR

N.A. Martysheva¹, T.A. Khoruzhaya^{1,2}

¹Hydrochemical Institute, Rostov-on-Don, Russia,

²Institute of Water Problems RAS, Rostov-on-Don, Russia

Мартышева Наталья Александровна – младший научный сотрудник, Гидрохимический институт, пр. Стачки, 198, г. Ростов-на-Дону, 344090, Россия, e-mail: natalia.ghi@yandex.ru

Natalia A. Martysheva – Junior Researcher, Hydrochemical Institute, Stachki Ave., 198, Rostov-on-Don, 344090, Russia, e-mail: natalia.ghi@yandex.ru

Хоружая Татьяна Алексеевна – доктор биологических наук, профессор, Гидрохимический институт; главный научный сотрудник, южный отдел Института водных проблем РАН, пр. Стачки, 198, г. Ростов-на-Дону, 344090, Россия, e-mail: khorugajat@mail.ru

Tatyana A. Khoruzhaya – Doctor of Biology, Professor, Hydrochemical Institute; Main Researcher, Southern Department, Institute of Water Problems RAS, Stachki Ave., 198, Rostov-on-Don, 344090, Russia, e-mail: khorugajat@mail.ru

В результате анализа данных мониторинга Росгидромета за 1984–1991 гг. и исследований авторов за 2009–2015 гг. установлен ряд закономерностей развития и пространственного распределения фитопланктона в Цимлянском водохранилище. Показано, что в современный период, как и ранее, сине-зелёные, в том числе токсигенные виды, занимают доминирующее положение в сообществе. Пространственное распределение сине-зелёных водорослей на водохранилище варьировало во времени, хотя прослеживалась тенденция усиления цветения от верхнего участка к приплотинному. Результаты обсуждаются с учетом последних публикаций по токсичности при биотестировании воды, а также связи с сине-зелёными и их токсинами.

Ключевые слова: Цимлянское водохранилище, цветение, сине-зелёные водоросли, токсигенные виды, токсичность воды.

The analysis of biomonitoring materials of Roshydromet for 1984-1991 and reseaches of authors for 2009-2015 reveals a number of regularities in phytoplankton development and spatial distribution in Tsimlyansk Reservoir. It is shown that in recent time as before blue-green algae, including toxigenic species, occupy a dominant position in the phytoplankton community. The spatial distribution of blue-green algae in Tsimlyansk Reservoir varied with time, although there was a trend of flowering extension in the direction from the top part to the bottom. The results are being discussed in view of recent publications on biotesting of water toxicity in Tsimlyansk Reservoir and the relationship of toxicity with blue-green algae and the presence of algae toxins.

Keywords: Tsimlyansk Reservoir, flowering, blue-green algae, toxigenic species, toxicity of water.

Цимлянское водохранилище – крупнейшее гидротехническое сооружение на юге России. Оно служит одним из основных звеньев Волго-Донского водного пути, обеспечивает транзитные перевозки грузов и нефтеналивных танкеров, используется для снабжения электроэнергией, питьевой водой городов и поселков с населением несколько миллионов человек, а также для орошения около 180 000 га земель, прилегающих к водохранилищу, и засушливых земель по рекам бассейна Нижнего Дона.

Экологические проблемы Цимлянского водохранилища активно изучаются специалистами в связи с его значением для крупного региона юга России и интенсивной эксплуатацией. В последние годы большое внимание уделяется ряду негативных событий и внутриводоемных процессов: понижению уровня заполнения чаши водохранилища, нарушению процессов самоочищения, эвтрофированию, токсичности воды при биотестировании [1–4].

Ежегодно наблюдается «цветение» воды водохранилища при интенсивном развитии в фитопланктоне сине-зелёных микроводорослей, в том числе образующих токсины. В связи с этим на первый план выходят экологические аспекты формирования качества воды в условиях возможного воздействия токсигенных водорослей.

Цель работы – изучить в многолетнем аспекте пространственно-временные характеристики «цветения» и роль сине-зелёных микроводорослей в формировании качества воды Цимлянского водохранилища с учетом накопленных данных по биотестированию токсичности.

Задачи работы: 1) провести анализ имеющихся материалов биомониторинга Росгидромета по показателям фитопланктона Цимлянского водохранилища и результатов научных исследований; 2) изучить закономерности развития и пространственного распределения фитопланктона и сине-зелёных микроводорослей в Цимлянском водохранилище в многолетнем плане и в современный период; 3) сопоставить характеристики развития токсигенных видов сине-зелёных микроводорослей с результатами биотестирования токсичности воды.

Материалы и методика исследования

Анализ состояния и развития фитопланктона Цимлянского водохранилища проведен по материалам биомониторинга Росгидромета, проводившегося на Цимлянском водохранилище в 1984–1991 гг., и данным наших экспедиционных гидробиологических исследований в современный период (2009–2015 гг.). Эти исследования выполнены по стандартным методам, на материалах проб, отобранных на вертикалях в приплотинной части водохранилища ежемесячно в вегетационный период (апрель – октябрь) 2011–2015 гг. Результаты сопоставлены с данными по токсичности воды и донных отложений при биотестировании на дафниях, хирономидах и водорослях, полученными нами ранее.

Результаты исследования

Сине-зелёные микроводоросли в фитопланктоне Цимлянского водохранилища. Анализ многолетних данных мониторинга Росгидромета (1984–1991 гг.) показал, что в Цимлянском водохранилище наблюдается значительная межгодовая изменчивость показателей количественного развития фитопланктона и сине-

зелёных микроводорослей. Экстремально высокие величины биомасс фитопланктона наблюдались в Цимлянском водохранилище уже во второй половине 80-х гг. XX в. и к 90-м гг. остались высокими.

Период 1984–1991 гг. характеризуется интенсивным развитием сине-зелёных микроводорослей; численность их достигала 82,79 тыс. клеток/см³, а биомасса – 896,63 мг/дм³. Доля их в сообществе иногда доходила почти до 100 % общей численности клеток фитопланктона (таблица).

Экспедиционные исследования, проведенные в 2009–2015 гг., позволили детализировать состояние фитопланктона водохранилища в многолетнем плане. Установлено, что видовой состав фитопланктона в приплотинной части Цимлянского водохранилища был весьма разнообразен и представлен 108 видами и разновидностями. Сезонность в развитии фитопланктона водохранилища со сменой основных отделов водорослей ярко выражена, что иллюстрирует пример данных за 2011 г. (рис. 1).

Весной структура сообщества представлена преимущественно диатомовыми. В июне начинается смена весеннего фитопланктона на летний, появляются сине-зелёные. Они развиваются наравне с другими таксонами; доля их варьирует от 20 до 40 % от общей численности. В августе-сентябре численность сине-зелёных достигает высоких значений (75,68 – 99,31 тыс. клеток/см³), а в отдельные годы – экстремальных. Так, в 2009 и 2012 гг. осенью показатели составляли 108,79 и 185,20 тыс. клеток/см³ соответственно (рис. 2).

Следует отметить, что интенсивное развитие сине-зелёных микроводорослей наблюдается в настоящее время не только в Цимлянском, но и в других крупных водохранилищах России, например в Рыбинском [5].

Развитие сине-зелёных микроводорослей в Цимлянском водохранилище в годы наблюдений Росгидромета / The development of blue-green algae in Tsimlyansk Reservoir in the years of observations conducted by Roshydromet

| Годы наблюдений | Диапазон колебаний биомассы, мг/дм ³ | Диапазон колебаний численности, тыс.клеток/см ³ | Доля в общей численности фитопланктона, % |
|-----------------|---|--|---|
| 1984 | 0,1711–7,3773 | 0,07–1,83 | 5–41 |
| 1985 | 0,8074–8,3324 | 0,1–3,91 | 5,1–53,2 |
| 1986 | 0,7496–188,8275 | 0,15–50,84 | 1,1–88,6 |
| 1987 | 0,0055–27,049 | 0,03–4,38 | 5,1–88,1 |
| 1988 | 0,1069–25,438 | 0,04–6,70 | 6,7–98,7 |
| 1989 | 0,13–896,63 | 0,02–82,79 | 7,5–98,4 |
| 1990 | 0,15–19,61 | 0,05–20,58 | 5,5–86,2 |
| 1991 | 0,89–17,39 | 0,35–12,15 | 26,5–86,8 |

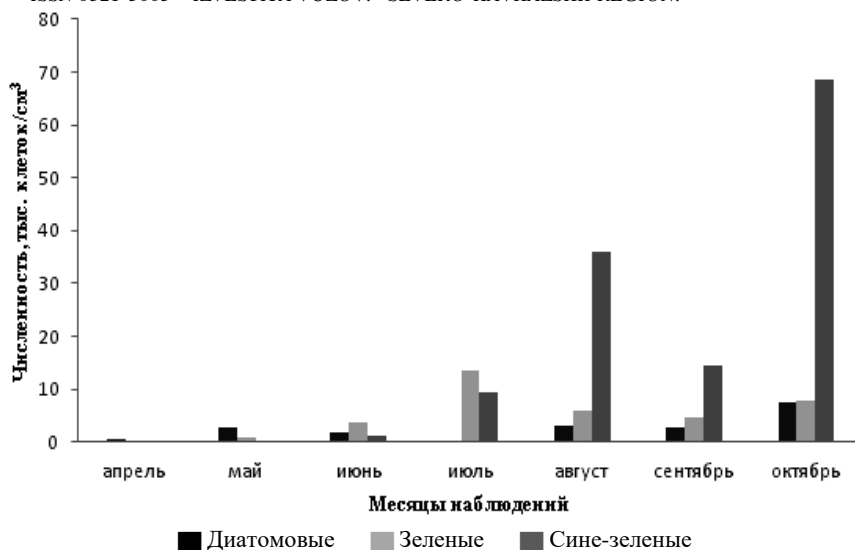


Рис. 1. Численность основных отделов водорослей в приплотинной части Цимлянского водохранилища (2011 г.) / Fig. 1. The number of major divisions of algae in a dam part of the Tsimlyansk Reservoir (2011)

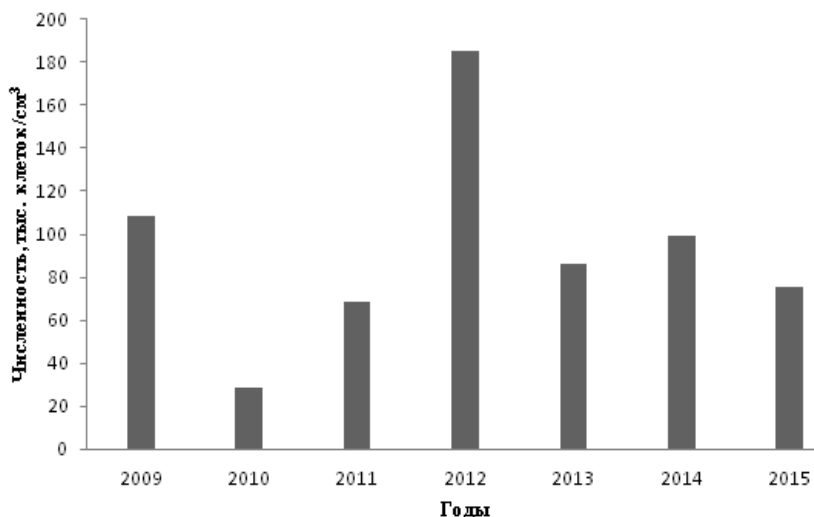


Рис. 2. Численность сине-зеленых водорослей в период «цветения» на приплотинном участке Цимлянского водохранилища (максимальные показатели за 2009–2015 гг.) / Fig. 2. The number of blue-green algae in the period of «flowering» in the dam area of the Tsimlyansk Reservoir (maximum values over 2009–2015)

Пространственное распределение сине-зелёных микроводорослей. Пространственно-временные колебания общих показателей развития фитопланктона Цимлянского водохранилища были весьма значительными.

Анализ данных мониторинга за 1984–1991 гг. показал, что на верхнем участке регистрировались относительно невысокие значения биомассы сине-зелёных (10–100 мг/дм³), на центральном они увеличивались (100–1000 мг/дм³), а на приплотинном варьировали от невысоких до высоких (1000 мг/дм³) (рис. 3). Наиболее высокие биомассы регистрируются на глубоководных участках. Полученные результаты соответствуют данным литературы

[6], свидетельствующим о том, что биомасса сине-зелёных микроводорослей растёт от верхней к нижней части водохранилища.

Наши исследования в приплотинной части водохранилища в 2009–2015 гг. показали, что ежегодно наблюдается интенсивное «цветение» сине-зелёных на больших площадях со скоплением в прибрежных участках и с экстремальными значениями в отдельные годы. Это связано с прогреванием мелководий и нагонными явлениями.

Токсигенные виды сине-зелёных. В водохранилище обитают и часто доминируют сине-зелёные: *Aphanizomenon flos-aquae* (L.) Ralfs, *Microcystis aeruginosa* Kutz. emend. Elenk, *Planktothrix agardhii* (Gom.) Anagn. et Kom. (*Oscillatoria agardhii* (Gom.)), *Pseudanabaena limnetica* (Lemm.) Kom. (*Oscillatoria limnetica* (Lemm.)), *Anabaena flos-aquae* (Lyngb.) Vreb. Эти виды, как известно, считаются «токсигенными» [7]. Токсины образуются живыми клетками и попадают в водную среду в процессе жизнедеятельности или при отмирании. Часть их отмирает уже в поверхностных слоях воды, большинство же оседает на дно.

Токсины сине-зелёных (цианотоксины) представляют собой сложные органические соединения, из которых наиболее изучен микроцистин, выделенный из *M. aeruginosa* [7]. В то же время само наличие видов, известных как «токсичные», еще не доказывает факт образования ими токсинов. Генетические исследования показали, что ген, ответственный за

выработку токсинов, не всегда присутствует у этих видов [8]. Во время интенсивного «цветения» воды Цимлянского водохранилища в 2009 г. микроцистин в воде не был обнаружен, хотя в пробах было большое количество сине-зелёных, в том числе токсигенных видов [9]. Однако недавно впервые было выявлено присутствие в фитопланктоне Цимлянского водохранилища микроцистин-продуцирующих популяций *Microcystis* и *Planktothrix*, а также видов, способных к синтезу анатоксина-а [10]. Более того, в биомассе фитопланктона идентифицированы цианотоксины: 5 видов микроцистина и анатоксин-а.



▲ – пункты наблюдений; * – вертикали; ▨ биомасса сине-зеленых 0–10 мг/дм³; ▩ биомасса сине-зеленых 10–100 мг/дм³; ▪ биомасса сине-зеленых 100–1000 мг/дм³; ▣ доля токсичных видов более 50 % биомассы сине-зеленых

Рис. 3. Распределение токсичных видов сине-зеленых водорослей по станциям наблюдений Росгидромета на Цимлянском водохранилище (1984–1992 гг.) / Fig. 3. The distribution of toxic species of blue-green algae in the observation stations of Roshydromet in Tsimlyansk Reservoir (1984–1992)

Связь сине-зелёных микроводорослей с токсичностью воды. В исследованиях 2011–2012 гг. нами установлено, что все пробы воды и донных отложений, отобранные на вертикалях приплотинного участка водохранилища, оказывали при биотестировании острое, подострое или хроническое токсическое действие (ОТД, ПОТД или ХТД соответственно) на дафний, хирономид и водоросли [11]. В результате биотестирования выявлено ПОТД на дафний (с отличиями от контроля от 25 до 50 %) и ОТД (с отличиями от контроля 50 % и более). Токсичными оказались 67 % проб.

По результатам экспедиционных исследований [4, 12] вода и донные отложения Цимлянского водохранилища были токсичными для водорослей, дафний, парамеций, коловраток и хирономид. Таким образом, анализ публикаций [1–4, 11, 12] показывает, что вода и донные отложения Цимлянского водохранилища в отдельные годы могут оказывать

токсическое действие на гидробионтов разных трофических уровней водной экосистемы.

Токсические свойства воды при биотестировании были выявлены и в ходе мониторинга, осуществляемого управлением водными ресурсами Цимлянского водохранилища. Например, в 2003 г. умеренная токсичность обнаружена в воде в районе пгт. Нижний Чир, х. Красноярский, г. Волгодонск, а также в притоках водохранилища – реках Мышкова, Кумшак [13].

Проведенное нами ранее сопоставление результатов биотестирования с гидробиологическими данными в синхронизированных пробах показало, что токсичность, возможно, связана с сине-зелёными микроводорослями [11]. Так, по мере увеличения токсичности воды для дафний регистрируется рост доли в фитопланктоне *M. aeruginosa*. Для другого токсигенного вида *Aph. flos-aquae* такой четкой закономерности не замечено, хотя пробы с

его высоким относительным содержанием (от 20 до 60 %) оказывали ПОТД на дафний. В то же время в части проб с ОТД доля этого вида была небольшой (до 20 %). При биотестировании на водорослях степень токсичности почти всех проб была незначительной, и четкой зависимости от присутствия в воде токсигенных видов не было выявлено [11].

Таким образом, накоплены данные, как свидетельствующие в пользу предположения о вкладе токсинов сине-зелёных в формирование токсичности воды водохранилищ, так и не подтверждающие его. Вероятность токсического влияния сине-зелёных микроводорослей Цимлянского водохранилища впервые подтверждена идентификацией цианотоксинов и выделением токсин-продуцирующих популяций водорослей [10]. Очевидно, что токсигенность сине-зелёных является особенностью «цветения» воды Цимлянского водохранилища, однако для других водохранилищ такие влияния без специальных исследований не очевидны. Неопределённости, по-видимому, связаны с особенностями синтеза цианотоксинов, прежде всего микроцистина (наличием или отсутствием соответствующих генов), путями его попадания в водную среду (прижизненно или при отмирании клеток водорослей). При этом нельзя исключить, что и другие продукты жизнедеятельности водорослей (в частности, фенолы) участвуют в формировании токсических свойств воды.

Заключение

Проведен анализ данных гидробиологических наблюдений Росгидромета по фитопланктону, которые выполнялись на Цимлянском водохранилище в течение 1984–1991 гг., а также исследований авторов в современный период (2009–2015 гг.). Показано, что в многолетнем плане сообщество обычно преимущественно диатомовыми, сине-зелёными и зелёными микроводорослями, при этом ярко выражена сезонность в развитии фитопланктона.

Изменения количественных показателей определялись особенностями развития ведущих отделов микроводорослей. Характерно, что сине-зелёные практически ежегодно вызывают летне-осеннее «цветение» воды и занимают доминирующее положение в сообществе. Важно, что значительная доля сине-зелёных микроводорослей представлена токсигенными видами родов *Microcystis*, *Aphanizomenon*, *Anabaena*, *Planktothrix*, *Pseudanabaena* и др. К особенностям их пространственного распределения относится увеличение количественных показателей развития от верхнего участка водохранилища к нижнему; наиболее высокие значения регистрируются в глубоководных и прибрежных зонах приплотинного участка.

Анализ данных публикаций по биотестированию, полученных в современный период [1–4, 11, 12], показал, что вода и донные отложения в отдельные годы оказывают токсическое действие на водные организмы разных трофических уровней. Учитывая, что в фитопланктоне преобладают токсигенные виды сине-зелёных, представляется возможной связь токсичности с их присутствием в сообществе. Действительно, как было нами ранее установлено [11], по мере увеличения в пробах фитопланктона доли *M. aeruginosa* токсическое действие воды на дафний увеличивается.

Токсичность воды, выявляемая при биотестировании, существенный вклад токсигенных видов в состав фитопланктона при цветении, обнаружение цианотоксинов в биомассе водорослей указывают на возможное влияние сине-зелёных микроводорослей на формирование токсичности воды Цимлянского водохранилища, что может быть опасным не только для водной экосистемы, но и для питьевого водоснабжения населения.

Литература

1. Никаноров А.М., Хоружая Т.А. Внутриводоемные процессы в крупных водохранилищах юга России: загрязнение, эвтрофирование, токсификация // География и природные ресурсы. 2014. № 2. С. 35–43.
2. Никаноров А.М., Хоружая Т.А., Мартышева Н.А. Современные характеристики и тенденции многолетних изменений эколого-токсикологического состояния Цимлянского водохранилища // Метеорология и гидрология. 2012. № 4. С. 75–85.
3. Никаноров А.М., Хоружая Т.А., Минина Л.И., Мартышева Н.А. Опасность «цветения» Цимлянского водохранилища // Водоочистка. Водоподготовка. Водоснабжение. 2011. № 2. С. 70–74.
4. Бакаева Е.Н., Игнатова Н.А., Черникова Г.Г. Экоотоксичность вод приплотинного участка Цимлянского водохранилища // Глобальная ядерная безопасность. 2012. № 3. С. 5–11.
5. Лаврова О.Ю., Соловьев Д.М., Строчков А.Я., Шендрок В.Д. Спутниковый мониторинг интенсивного цветения водорослей в Рыбинском водохранилище // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014. Т. 11, № 3. С. 54–72.
6. Калинина С.Г., Ходяков Е.А., Яковлев С.В. Улучшение экологического состояния приплотинного плеса Цимлянского водохранилища методом альголизации // Глобальная ядерная безопасность. 2012. № 3. С. 72–82.
7. Волошко Л.Н., Плющ А.В., Тутова Н.Н. Токсины цианобактерий Cyanophyta, Cyanobacteria // Альгология. 2008. Т. 18, № 1. С. 3–20.
8. Кожевников И.В., Кожевникова Н.А., Скоробогатько Н.Е. Изучение потенциальной микроцистин-токсичности сине-зелёных водорослей Красноярского водохранилища // Антропогенное влияние на водные организмы и экосистемы : материалы III Всерос. конф. по водной токсикологии, посвященной памяти

Б.А. Флерова. Борок, 11–16 ноября 2008 г. Борок : Ярославский печатный двор, 2008. Ч. 3. С. 47–51.

9. Матишов Г.Г., Ковалева Г.В. «Цветение» воды в водоемах юга России и сбои в водоснабжении (на примере г. Волгодонска) // Вестн. ЮНЦ РАН. 2010. Т. 6, № 1. 129 с.

10. Сиделев С.И., Голоколенова Т.Б., Чернова Е.Н., Русских Я.В. Анализ фитопланктона Цимлянского водохранилища (Россия) на наличие цианобактериальных гепато- и нейротоксинов // Микробиология. 2015. Т. 84, № 6. С. 732–742.

11. Хоружая Т.А., Мартышева Н.А. Связана ли токсичность воды водохранилищ с сине-зелеными водорослями? // Вода: химия и экология. 2014. № 7. С. 110–114.

12. Бакаева Е.Н., Никаноров А.М., Игнатова Н.А., Черникова Г.Г. Эколого-токсикологическая ситуация Цимлянского водохранилища в современный период // Вода и водные ресурсы: системообразующие функции в природе и экономике : материалы всерос. науч. конф. (г. Цимлянск, 23–28 июля 2012 г.). Новочеркасск : ЮРГТУ (НПИ), 2012. С. 151–157.

13. О состоянии окружающей среды и природных ресурсов Ростовской области в 2003 г. : государственный доклад // Экол. вестн. Дона. Ростов н/Д. : Администрация Ростовской области, Комитет по охране окружающей среды и природных ресурсов Администрации РО, 2004. 262 с.

References

1. Nikanorov A.M., Khoruzhaya T.A. Vnutrivodnoemnye protsessy v krupnykh vodokhranilishchakh yuga Rossii: zagryaznenie, evtrofirovaniye, toksifikatsiya [Intra-water processes in large reservoirs of the South of Russia: pollution, eutrophication, toxification]. *Geografiya i prirodnye resursy*. 2014, No. 2, pp. 35-43.

2. Nikanorov A.M., Khoruzhaya T.A., Martysheva N.A. Sovremennyye kharakteristiki i tendentsii mnogoletnikh izmenenii ekologo-toksikologicheskogo sostoyaniya Tsimlyanskogo vodokhranilishcha [Modern characteristics and trends of long-term changes in the ecological and toxicological state of the Tsimlyansk Reservoir]. *Meteorologiya i gidrologiya*. 2012, No. 4, pp. 75-85.

3. Nikanorov A.M., Khoruzhaya T.A., Minina L.I., Martysheva N.A. Opasnost' «tsveteniya» Tsimlyanskogo vodokhranilishcha [The danger of Tsimlyansk Reservoir "flowering"]. *Vodoochistka. Vodopodgotovka. Vodosnabzhenie*. 2011, No. 2, pp. 70-74.

4. Bakaeva E.N., Ignatova N.A., Chernikova G.G. Ekotoksichnost' vod priplotinnogo uchastka Tsimlyanskogo vodokhranilishcha [Ecotoxicity of the waters of the dam of the Tsimlyansk Reservoir]. *Global'naya yadernaya bezopasnost'*. 2012, No. 3, pp. 5-11.

5. Lavrova O.Yu., Solov'ev D.M., Strochkov A.Ya., Shendrik V.D. Sputnikovyy monitoring intensivnogo tsveteniya vodoroslei v Rybinskom vodokhranilishche [Satellite

monitoring of intense algae blooms in the Rybinsk Reservoir]. *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2014, vol. 11, No. 3, pp. 54-72.

6. Kalinina S.G., Khodyakov E.A., Yakovlev S.V. Uluchsheniye ekologicheskogo sostoyaniya priplotinnogo plesa Tsimlyanskogo vodokhranilishcha metodom al'golizatsii [Improvement of the ecological state of the dam of the Tsimlyansk Reservoir by the algalization method]. *Global'naya yadernaya bezopasnost'*. 2012, No. 3, pp. 72-82.

7. Voloshko L.N., Plyushch A.V., Titova N.N. Toksiny tsianobakterii Cyanophyta, Cyanobacteria [Toxins of cyanobacteria Cyanophyta, Cyanobacteria]. *Al'gologiya*. 2008, vol. 18, No. 1, pp. 3-20.

8. Kozhevnikov I.V., Kozhevnikova N.A., Skorobogat'ko N.E. Izuchenie potentsial'noi mikrostsistin-toksichnosti sine-zelenykh vodoroslei Krasnoyarskogo vodokhranilishcha [A study of the potential microcystin toxicity of the blue-green algae of the Krasnoyarsk Reservoir]. *Antropogennoye vliyaniye na vodnye organizmy i ekosistemy* [Anthropogenic impact on aquatic organisms and ecosystems]. Materials of the III All-Russian Conference on Aquatic Toxicology, dedicated to the memory of B.A. Flerov. Borok, Yaroslavskii pechatnyi dvor, 2008, ch. 3, pp. 47-51.

9. Matishov G.G., Kovaleva G.V. «Tsveteniye» vody v vodoemakh yuga Rossii i sboui v vodosnabzhenii (na primere g. Volgodonska) ["Flowering" of water in the reservoirs of the South of Russia and disruptions in water supply (by the example of Volgodonsk)]. *Vestn. YuNTs RAN*. 2010, vol. 6, No. 1, 129 p.

10. Sidelev S.I., Golokolenova T.B., Chernova E.N., Russkikh Ya.V. Analiz fitoplanktona Tsimlyanskogo vodokhranilishcha (Rossiya) na nalichie tsianobakterial'nykh gepato- i neirotoksinov [Phytoplankton analysis of the Tsimlyansk Reservoir (Russia) for the presence of cyanobacterial hepato- and neurotoxins]. *Mikrobiologiya*. 2015, vol. 84, No. 6, pp. 732-742.

11. Khoruzhaya T.A., Martysheva N.A. Svyazana li toksichnost' vody vodokhranilishch s sine-zelenymi vodoroslyami? [Is the toxicity of the reservoir water related to blue-green algae?]. *Voda: khimiya i ekologiya*. 2014, No. 7, pp. 110-114.

12. Bakaeva E.N., Nikanorov A.M., Ignatova N.A., Chernikova G.G. [Ecological and toxicological situation of the Tsimlyansk Reservoir in the modern period]. *Voda i vodnye resursy: sistemoobrazuyushchie funktsii v prirode i ekonomike* [Water and water resources: system-forming functions in nature and economy]. Materials of the All-Russian Scientific Conference (Tsimlyansk, July 23-28, 2012). Novocherkassk, YuRGTU (NPI), 2012, pp. 151-157.

13. [On the state of the environment and natural resources of the Rostov Region in 2003: the state report]. *Ekol. vestn. Dona* [The Ecological Herald of the Don]. Rostov-on-Don, Administration of the Rostov Region, Committee for Environmental Protection and Natural Resources of the Administration, 2004, 262 p.

НАУЧНАЯ ЖИЗНЬ

SCIENTIFIC LIFE

DOI 10.23683/0321-3005-2017-2-142-143

VII МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ «СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ И ПРОБЛЕМЫ ТЕОРИИ ОПЕРАТОРОВ И ГАРМОНИЧЕСКОГО АНАЛИЗА И ИХ ПРИЛОЖЕНИЯ», ПОСВЯЩЕННАЯ ПАМЯТИ Н.К. КАРАПЕТЯНЦА

(Ростов-на-Дону, 23–28 апреля 2017 г.)

VII INTERNATIONAL CONFERENCE «MODERN METHODS AND PROBLEMS OF OPERATOR THEORY AND HARMONIC ANALYSIS AND THEIR APPLICATIONS» DEDICATED TO THE MEMORY OF N.K. KARAPETJANTS

(Rostov-on-Don, April 23-28, 2017)

С 23 по 28 апреля 2017 г. в Ростове-на-Дону на базе Южного федерального университета и Донского государственного технического университета состоялась VII Международная конференция «Современные методы и проблемы теории операторов и гармонического анализа и их приложения», проходившая при частичной финансовой поддержке РФФИ и Международного сообщества ISAAC (International Society for Analysis its Applications and Computation).

Конференция была посвящена 75-летию со дня рождения замечательного ученого-математика, доктора физико-математических наук, профессора, заведующего кафедрой дифференциальных и интегральных уравнений Ростовского государственного университета Николая Карапетовича Карапетянца (1942–2005). Н.К. Карапетянц родился 22 января 1942 г. в Ростове-на-Дону. В 1964 г. он успешно окончил физико-математический факультет РГУ и продолжил обучение в аспирантуре под руководством профессора В.С. Рогожина. В 1969 г. Н.К. Карапетянц защитил кандидатскую диссертацию, а в 1989 г. – докторскую «Интегральные операторы свертки и с однородными ядрами с переменными коэффициентами». Вся его трудовая деятельность была связана с Ростовским государственным университетом, с кафедрой дифференциальных и интегральных уравнений. На этой кафедре он прошел все ступени от ассистента до профессора, заведующего кафедрой. На протяжении многих лет он возглавлял диссертационный совет при мехма-те РГУ.

Николай Карапетович являлся специалистом мирового уровня в области интегральных операторов и смежных областях анализа. Он внёс большой вклад в развитие теории сингулярных интегральных операторов, операторов типа свёртки в дискретном и континуальном случаях, интегральных операторов с однородными и квазиоднородными ядрами, интегральных уравнений со сдвигом, дробного интегро-дифференцирования и некоторых других разделов математики. Им было опубликовано более 150 научных работ в российских и зарубежных журналах, а также две монографии. Особо отметим монографию *Equations with Involution Operators*, написанную в соавторстве с С.Г. Самко. Научные результаты Н.К. Карапетянца получили широкое международное признание. Он многократно был приглашенным докладчиком на конференциях в России, Армении, Белоруссии, Германии, Грузии, Мексике и Португалии.

Н.К. Карапетянц был не только блестящим ученым-математиком, но и прекрасным педагогом-новатором. Он разработал и прочитал на механико-математическом и физическом факультетах РГУ целый ряд общеобразовательных и специальных курсов. Очень много внимания Николай Карапетович уделял работе с аспирантами и студентами. Под его руководством были защищены восемь кандидатских диссертаций (подробнее биографию Н.К. Карапетянца см. в [1]).

Вернёмся к нашей конференции, которая явилась уже седьмой в серии конференций «Современные методы и проблемы теории операторов и

гармонического анализа и их приложения». На этот раз в рамках конференции была организована работа шести секций:

1. «Функциональный анализ и теория операторов».
2. «Теория функций и теория приближений».
3. «Дифференциальные уравнения и математическая физика».
4. «Хаусдорфовы операторы и смежные вопросы».
5. «Вероятностно-аналитические модели и методы».
6. «Биоинформатика и математическое моделирование».

Регламент конференции предусматривал пленарные получасовые лекции, секционные доклады продолжительностью 15 или 30 минут, а также стендовые доклады.

В работе конференции приняли участие более 200 математиков, в числе которых были ведущие российские и зарубежные ученые. Среди участников конференции были математики из Армении, Азербайджана, Белоруссии, Германии, Израиля, Индии, Италии, Ирана, Казахстана, Литвы, Мексики, Объединенных Арабских Эмиратов, Польши, Португалии, Сербии, Турции, Украины и Швеции. В связи с большим количеством зарубежных участников почти все пленарные доклады и значительная часть секционных докладов были представлены на английском языке.

На конференции обсуждались вопросы фундаментальной и прикладной математики. Ведущими учеными прочитаны 28 пленарных лекций, охватывающих различные аспекты современной математики. Для молодых исследователей были предоставлены уникальные возможности получить экспертное мнение по интересующим вопросам от специалистов с мировым именем. По итогам конференции между участниками сформировались новые научные контакты.

Перейдем к более подробному анализу научных направлений, представленных на конференции. Одним из основных направлений работы секции «Функциональный анализ и теория операторов» стала теория пространств функций нестандартного роста, возникающих в современном анализе (пространства типа Бергмана, Морри, Орлича, гранд-пространства Лебега и Орлича и т.д.). Другое важное направление в работе этой секции – это интегральные операторы и их приложения. Были затронуты современные аспекты теории операторов типа

свертки и теплицевых операторов. Ещё одним направлением работы секции стала теория операторов в пространствах голоморфных функций.

Отметим, что по решению программного комитета конференции теория важного класса интегральных операторов – операторов Хаусдорфа – была выделена в отдельную секцию, что обусловлено бурным развитием этой тематики в последние годы.

По направлению «Теория функций и теория приближений» особый интерес вызвали доклады, посвященные вейвлетам и интерполяции операторов в пространствах Соболева.

Весьма многочисленной на конференции была секция «Дифференциальные уравнения и математическая физика» (в общей сложности более 60 докладов). В рамках этой секции четко прослеживаются два основных научных направления. Первое – это общие вопросы теории уравнений с частными производными, второе – приложение дифференциальных уравнений к современным проблемам механики, физики и исследованию характеристик материалов со сложной структурой.

Уже в третий раз в рамках данной конференции организуется работа секции «Вероятностно-аналитические модели и методы». На этой секции обсуждались современные вероятностные методы исследования различных задач финансовой математики, дифференциальных уравнений, математической физики, а также алгоритмы численного решения этих задач.

Относительно небольшой была в этом году секция «Биоинформатика и математическое моделирование». Её участники рассмотрели некоторые прикладные аспекты эффективного использования математических методов и суперкомпьютерных ресурсов применительно к фундаментальным проблемам биоинформатики (например, к проблеме быстрой обработки нуклеотидных и аминокислотных последовательностей).

В заключение отметим, что все материалы конференции можно найти на сайте: <http://otha.sfedu.ru/conf2017>.

Литература

1. Авсянкин О.Г., Бабешко В.А., Белоконь В.А., Вакулов Б.Г., Ерусалимский Я.М., Карапетянц А.Н., Карякин М.И., Самко С.Г. Николай Карапетович Карапетянц (1942–2005, к семидесятилетию со дня рождения) // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2012. № 1. С. 141–142.

*О.Г. Авсянкин, доктор физико-математических наук, доцент,
Южный федеральный университет*

НАШИ ЮБИЛЯРЫ

OUR PERSONS

DOI 10.23683/0321-3005-2017-2-144-146

Юбилей Якова Михайловича Ерусалимского (70 лет со дня рождения)

Yakov Michailovich Erusalimsky (To the 70th Anniversary)



28 марта отметил юбилей доктор технических наук, профессор, заслуженный работник высшей школы РФ Яков Михайлович Ерусалимский, выпускник мехмата РГУ (ЮФУ).

Его научным руководителем был блестящий ученый и педагог, разносторонний математик И.Б. Симоненко – ведущий в стране специалист в области интегральных уравнений, теории операторов, алгебраической топологии, методов математической физики. Он поставил перед Яковом Михайловичем задачу: исследовать свойства операторов типа мультипликативной дискретной свертки.

В 1976 г. Я.М. Ерусалимский защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по теме «Операторы мультипликативной дискретной свертки. Нетеровость индекса».

После успешной защиты главным словом в дальнейшем исследовании стало слово «дискретность». Он изменил тематику научных исследований и стал погружаться в новую для него дисциплину – теорию графов. Для советских и российских ученых это было нетрадиционное направление, которым занимались лишь единицы, хотя теория графов содержит большое количество нерешенных проблем и гипотез.

Не всякий способен резко сменить тематику научных исследований. Многие ученые всю жизнь продолжают работать в рамках той научной темы, которую ему поставили в аспирантуре. Это неважно, что другие научные направления стали более актуальными. Так удобно. Здесь уже есть публикации, а рецензенты будут относиться к новым статьям с большим доверием, если в них есть ссылки на предшествующие статьи автора. А если в новой тематике рядом нет эксперта, у которого можно проконсультироваться, – смена тематики вдвойне сложнее.

Вскоре появились и первые результаты, причем хорошего уровня. Решена проблема описания трехсвязных графов и вместе с учеником опубликована в ведущем советском журнале по теории алгоритмов (Ерусалимский Я.М., Светлов Г.Г. Бимосты, библоки, точки бисочленения орграфов // Кибернетика. 1980. № 1. С. 37–39). С этого момента на мехмате РГУ Яков Михайлович Ерусалимский стал главным консультантом по теории графов.

Математика едина, и ее деление на непрерывную и дискретную весьма условно. Математики первой величины И. Ньютон и Л. Эйлер вошли в историю и в одной и в другой частях математики. Более того, эти разделы математики взаимно переплетаются. Такое переплетение случилось и на мехмате РГУ. Ведущий специалист (с результатами мирового значения!) в области топологических пространств, профессор мехмата Михаил Михайлович Драгилев, рассматривая проблему существ-

ования базиса в одном классе топологических пространств, столкнулся с задачей теории графов. И как раз к этому моменту у Я.М. Ерусалимского вышла статья по графам совместно с ученицей Е. Басанговой. Проблема Михаила Михайловича была решена (опубликована в журнале «Математические заметки»), и было начато новое направление исследований в теории графов – «графы с нестандартной достижимостью». Точнее – «алгоритмы на графах с нестандартной достижимостью», поскольку большинство рассматриваемых задач имеет в качестве решения алгоритмы. Это направление развивалось Яковом Михайловичем вместе со многими учениками. Исследования легли в основу многих кандидатских диссертаций учеников Якова Михайловича и докторской его самого.

Достижимость – это наличие пути на графе между некоторыми вершинами. Нестандартная достижимость может состоять в том, что дуги графа раскрашены в несколько цветов и рассматриваются пути, в которых не все сочетания цветов соседних дуг допускаются. Или допускаются с некоторой вероятностью. Или рассматриваются другие формальные ограничения на допустимые пути.

Основные задачи теории графов связаны с вопросами достижимости. Ищутся пути минимальные, максимальные, надежные, с хорошей пропускной способностью, замкнутые или разомкнутые, гамильтоновы, эйлеровы и пр. Ищутся множества путей – потоки. Ищутся узкие места для множеств путей – разрезы, мосты, точки сочленения. Ищутся разбиения множества вершин (в том числе раскраски), на которых достигаются экстремальные свойства разрезов, которые являются узкими местами для потоков... и т.д. Ищутся графы с ограниченными степенями вершин, у которых наибольшее количество вершин, и имеющие минимальный диаметр (максимальный из кратчайших путей). Итак, теория графов исследует вопросы достижимости. Значение работ Я.М. Ерусалимского состоит в расширении основного понятия теории графов – понятия достижимости. Им рассмотрены графы с различными видами нестандартной достижимости. Этим самым расширен круг задач теории графов.

В 2015 г. Я.М. Ерусалимский защитил докторскую диссертацию, посвященную разработке и исследованию методов решения экстремальных задач на ориентированных графах и сетях с ограничениями на достижимость. У Якова Михайловича опубликовано более 180 научных и методических трудов; из них 5 монографий и 6 учебников. Им разработано множество общих и специальных курсов: «Теория множеств и математическая логика»,

«Дискретная математика», «Математическая логика и теория алгоритмов», «Алгебра и геометрия», «Теория конечных графов».

Его учебник «Математика. Общий курс» (соавторы Б.М. Владимирский, А.Б. Горстко) был признан лучшим среди учебников нового поколения в конкурсе Министерства образования РФ.

В 1989 г. Яков Михайлович сменил на посту декана А.В. Белокопя, избранного ректором ЮФУ. Почти 20 лет он возглавлял мехмат (1989–2008). Профессионализм, высокая научная и образовательная культура, коммуникабельность, умение правильно строить отношения с высшими организациями (ректорат, министерство) и многое другое – вот что определяет работу декана и его команды.

Декан отвечает за все, что происходит на факультете. В частности, декан воспитывает студентов и, иногда, преподавателей (последнее относится в основном к опозданиям). В давние, еще советские времена у студентов мехмата было массовое увлечение преферансом. Это карточная игра, требующая развитого интеллекта, свойственного студентам мехмата, которые стараются в этом превзойти друг друга. Эта игра воспета многими классиками литературы, но она не должна существовать в пределах факультета... Декан Яков Михайлович, засекая игроков в аудиториях, собрал большую коллекцию карточных колод, отведя для этой коллекции целую полку в деканате.

А была еще одна другая нижняя полка в шкафу деканата, на которой хранились плоскогубцы, отвертка и прочие инструменты, необходимые декану для подкручивания винтиков в расшатанных стульях и смены пришедших в негодность замков.

Кстати, когда появились персональные компьютеры и, как следствие, массовое увлечение компьютерными играми. Яков Михайлович сам придумал компьютерную игру «Лавина», а один из учеников эту игру программно реализовал. Это было еще в эпоху DOS.

Главное достижение декана Я.М. Ерусалимского: this is the house that Jacob build. Мехмат имеет самое новое здание ЮФУ. Строительство было начато еще в советские времена, но в начале 90-х заморожено. Каркас из свай этого здания был виден из подвала помещения физфака, где мехмат временно размещался. Здание предназначалось другому факультету, но прошло много времени, сменился социальный строй в нашей стране, а с ним и приоритеты: старое здание, но в центре города, общественным факультетам ценнее, а математика не любит излишней суеты – и замороженная стройка оказалась переориентирована на мехмат.

Яков Михайлович придирчиво следил за стройкой, заставлял переделывать замечаемые им отклонения от норм, выполнял функции прораба. В итоге мехмат имеет лучшее здание университета, у нас любит заседать ректор, у нас располагается приемная комиссия, т.е. через наше здание абитуриенты воспринимают условия будущей возможной учебы в университете.

Но факультет – это прежде всего моральный дух, который в здании поддерживается. Борьба за истину заложена в самой природе математики. Будущий математик формируется решениями тысяч задач и изучением сотен строгих доказательств теорем. Но с резким расширением инженерной составляющей на мехмате возникают желающие (в основном школьники, собирающиеся стать математиками) прийти к успеху, минуя многие трудности. Яков Михайлович давно не оставляет без внимания «заимствование чужих текстов», представляемых на конкурсы и для публикаций. Математика требует честности во всем.

Деканы бывшими не бывают. Каждый из обучавшихся в университете помнит некоторых своих учителей и обязательно помнит своего декана. Яков Михайлович – символ мехмата для целого поколения студентов. На встречах выпускников выстраивается очередь пообщаться с Яковом Михайловичем, который помнит практически всех студентов мехмата многих поколений.

Учить математике школьников – это не такая престижная деятельность, как учить студентов мехмата, не говоря уже об аспирантах. Но на самом деле многие ученые-математики формируются в школьные годы. Работой со школьниками не пренебрегали великие математики XX в. А. Колмогоров

(основатель физико-математической школы-интерната при МГУ) и И. Гельфанд (основатель заочной математической школы при МГУ). Герой нашего рассказа также не чужд внимания к детям. Многолетнее ведение регулярного нулевого курса мехмата в гимназии № 5, постоянное участие в днях открытых дверей, выступление с популярными лекциями на Фестивалях науки ЮФУ, постоянное участие (в жюри) в сессиях Донской академии юных исследователей (ДАНЮИ) – далеко не всё, что делает Яков Михайлович.

С чем пришел к юбилею Яков Михайлович

- Кандидат физико-математических наук, доктор технических наук, профессор, заслуженный работник высшей школы Российской Федерации, обладатель медали Ушинского.
- Трижды сороковский доцент, а затем и сороковский профессор. Если вспомнить процедуру присвоения этих званий – то это в первую очередь признание студентов. Причем постоянное, устойчивое.
- Председатель экспертного совета ЮФУ по математике.
- Член УМО по прикладной математике Минобрнауки РФ.
- Заместитель председателя редколлегии журнала «Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки».
- Аттестованный эксперт Рособнадзора.
- Десять учеников Я. Ерусалимского защитили кандидатскую диссертацию, некоторые из которых на этом не собираются останавливаться.

*Б.Я. Штейнберг, доктор физико-математических наук,
профессор,
Южный федеральный университет*

Редакция и редколлегия журнала присоединяются ко всем поздравлениям, отмечая со своей стороны многолетний бескорыстный труд Якова Михайловича на благо нашего журнала, желают ему крепкого здоровья на многие лета, благодарных учеников и покровления новых творческих вершин!

**НАУЧНО-ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЙ И ПРИКЛАДНОЙ ЖУРНАЛ
ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ.
СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ РЕГИОН. ЕСТЕСТВЕННЫЕ НАУКИ**

Журнал «Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки», имеющий статус центрального издания, включенного в перечень ВАК, продолжает прием работ по следующим отраслям науки:

1. Физико-математические науки (математика, механика).
2. Биологические науки (общая биология, физико-химическая биология).
3. Науки о Земле.

Также публикуются материалы в разделах:

- заметки о книгах;
- научная жизнь;
- штрихи к портрету.

Журнал издается с периодичностью 4 номера в год. Помимо основных номеров выходят специальные тематические выпуски, посвященные разным научным направлениям, работам отдельных организаций, а также научные труды вузов, приуроченные к юбилейным датам. С электронной версией журнала можно ознакомиться на сайте Научной электронной библиотеки http://elibrary.ru/title_about.asp?id=7362.

Публикация материалов, на которые получена положительная рецензия, оплачивается лично автором или организацией. Стоимость работ – договорная.

Оформление работ осуществляется согласно правилам:

1. Печатный и электронный вариант статьи. В начале статьи указать индекс УДК.
2. Текст должен быть набран в редакторе MicroSoft Office 98 Word 2000, 2003, 2007, 2010 через 1,5 интервала, шрифтом Times New Roman, размером 14 пт, страницы пронумерованы. Для записи формул применять только редактор формул Equation 3.0.
3. Сопроводительное или рекомендательное письмо, если статья представляется от организации.
4. Полное название организации и ее адрес на русском и английском языках.
5. Сведения об авторах с указанием адреса, по которому будет вестись переписка, на русском и английском языках.
6. Название статьи и фамилии авторов на русском и английском языках.
7. Аннотация на русском и английском языках (1000–1500 знаков/150–200 слов).
8. Ключевые слова на русском и английском языках (8–10 слов).

Журнал распространяется по подписке – через ОАО «Роспечать». Подписной индекс – 70415 (подписка на полугодие).

В неподписной период отдельные номера журнала за нынешний и прошлые годы можно приобрести в редакции.

Адрес для переписки: 344006, г. Ростов-на-Дону, ул. Б. Садовая, 105/42, ЮФУ.

Редакция журнала «Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки».

Тел./факс главной редакции (863) 218-40-00 добавочный 11-093, 11-094.

E-mail: izvestiya@sfedu.ru

Адрес в Интернете: www.izvestiya.sfedu.ru