

ISSN 0321–3005

DOI 10. 23683/0321-3005

ИЗВЕСТИЯ
ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

*Северо-Кавказский
регион*

ЕСТЕСТВЕННЫЕ

НАУКИ

2017

3-1

Журнал основан в 1972 г. Ю.А. Ждановым

Главная редакция:

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

Редакционная коллегия:

В.И. Колесников – главный редактор, академик РАН, доктор техн. наук, профессор, Ростовский государственный университет путей сообщения, Россия
В.Е. Закруткин – председатель редколлегии, доктор геол.-мин. наук, профессор, Южный федеральный университет, Россия
В.А. Бабешко – академик РАН, доктор физ.-мат. наук, профессор, Кубанский государственный университет, Россия
Б.С. Карамурзов – доктор техн. наук, профессор, Кабардино-Балкарский государственный университет, Россия
Ю.Ф. Коробейник – доктор физ.-мат. наук, профессор, Южный федеральный университет, Россия
А.Г. Кусраев – доктор физ.-мат. наук, профессор, Южный математический институт 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. Фаталь – доктор наук, профессор, Университет Нанта, Франция
Ю.А. Федоров – доктор геогр. наук, профессор, Южный федеральный университет, Россия
А.Д. Хованский – кандидат геол.-мин. наук, доктор геогр. наук, профессор, Южный федеральный университет, Россия
С.П. Чернышева – кандидат физ.-мат. наук, доцент Южный федеральный университет, Россия

Учредители:

Министерство образования и науки Российской Федерации, Дагестанский государственный технический университет, Дагестанский государственный университет, Донской государственный технический университет, Кабардино-Балкарский государственный университет, Кубанский государственный технологический университет, Кубанский государственный университет, Пятигорский государственный 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 26.09.2017. Выход в свет 29.09.2017. Формат 60×84 1/8. Бумага офсетная.
Шрифт Times. Усл. печ. л. 15,32. Уч.-изд. л. 19,01. Тираж 250 экз. Заказ № 5939

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 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 26.09.2017. The publication 29.09.2017. Format 60×84 1/8. Offset paper. Font Times.
Conv. print. sheets 15,32. Publ. sign. 19,01. Edition 250 copies. Order number 5939.

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 10.23683/0321-3005-2017-3-1

Регистрационный номер 011019
Комитета Российской Федерации по печати
Научно-образовательный и прикладной журнал
Издается с 1973 г.
Периодичность серии 4 номера в год
№ 3-1 (195-1) 2017 г.

Reg. No. 011019
Of the Committee of the Press of the Russian Federation
Scientifically educational and applied magazine
Was founded in 1973.
Period is 4 numbers per a year
No. 3-1 (195-1) 2017.

ЕСТЕСТВЕННЫЕ НАУКИ

NATURAL SCIENCE

СОДЕРЖАНИЕ

CONTENTS

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ

PHYSICAL AND MATHEMATICAL SCIENCES

<i>Беляева М.С., Данилова Н.В.</i> Расчёт справедливой цены для диффузионной модели со стохастической процентной ставкой.....	4
<i>Вакулов Б.Г., Костецкая Г.С.</i> Обобщенные пространства Гёльдера на сфере $H_k^\Phi(S_{n-1})$, $H_k^\Phi(S_{n-1}, \rho)$ и их связь с дифференциальными свойствами гармонических в шаре функций.....	8
<i>Ватульян А.О., Дударев В.В.</i> Об одном способе определения модуля сдвига двухслойной среды.....	14
<i>Денисенко В.В., Деундяк В.М.</i> Об ограниченности интегральных операторов с однородными ядрами на группе Гейзенберга с нормой Кораньи.....	21
<i>Долгих Т.Ф.</i> Решение задачи о переносе массы под действием электрического поля в двухкомпонентной смеси.....	28
<i>Свиридкин Д.О., Скороходов В.А.</i> О задаче размещения потребителей в сетях с распределением потока. I. NP-полнота.....	36

<i>Belyaeva M.S., Danilova N.V.</i> Calculation of Fair Price for Diffusive Model with the Stochastic Interest Rate	4
<i>Vakulov B.G., Kostetskaya G.S.</i> Hölder Generalized Spaces on the Sphere $H_k^\Phi(S_{n-1})$, $H_k^\Phi(S_{n-1}, \rho)$ and Their Connection with the Differential Properties of Harmonic Functions in the Balls	8
<i>Vatulyan A.O., Dudarev V.V.</i> On One Method of Determining the Shear Modulus of a Two-Layer Medium.....	14
<i>Denisenko V.V., Deundyak V.M.</i> On The Boundedness of Integral Operators with Homogeneous Kernels on the Heisenberg Group with Koranyi Norm	21
<i>Dolgikh T.F.</i> The Solution of the Mass Transfer Problem for the Two-Component Mixture under the Action of an Electric Field.....	28
<i>Sviridkin D.O., Skorokhodov V.A.</i> The Problems of Consumers Placement in Networks with Conditions of Flow Distribution. I. NP-Complexity	36

БИОЛОГИЧЕСКИЕ НАУКИ

BIOLOGICAL SCIENCES

<i>Демина О.Н., Борлакова Ф.М., Узденов И.Р., Дмитриев П.А.</i> Непрямая ординация травяной растительности Скалистого хребта (в пределах Карачаево-Черкессии).....	42
<i>Кочуев С.С., Златник Е.Ю., Демидова А.А., Новикова И.А., Пржедецкий Ю.В., Позднякова В.В., Хохлова О.В., Загора Г.И., Пржедецкая В.Ю., Непомнящая Е.М., Лысенко Е.П.</i> Разработка математической модели для расчета прогноза течения меланомы кожи.....	49

<i>Demina O.N., Borlakova F.M., Uzdenov I.R., Dmitriev P.A.</i> Indirect Ordination of the Grassy Vegetation of the Rocky Ridge (Within Karachay-Cherkessia).....	42
<i>Kochuev S.S., Zlatnik E.Yu., Demidova A.A., Novikova I.A., Przhedetsky Yu.V., Pozdnyakova V.V., Khokhlova O.V., Zakora G.I., Przhedetskaya V.Yu., Nepomnyashchaya E.M., Lysenko E.P.</i> Development of Mathematical Model for Calculation of Cutaneous Melanoma Prognosis	49

Цандекова О.Л., Седельникова Л.Л. Оценка устойчивости травянистых многолетников по уровню маломолекулярного диальдегида в условиях урбанизированной среды.....56

Tsandekova O.L., Sedelnikova L.L. Estimation of the Stability of Herbaceous Perennial Plants on the Level of Malondialdehyde under the Conditions of the Urbanized Environment56

НАУКИ О ЗЕМЛЕ

SCIENCE OF EARTH

Аветисян С.Р., Буряева Е.А., Новиковский Н.М. Элементный состав некоторых горных и степных почв юга европейской части России.....62

Avetisyan S.R., Buraeva E.A., Novikovskiy N.M. Elemental Composition of Some Mountainous and Steppe Soils of the South European Part of Russia62

Закруткин В.Е., Зубова Л.Г., Гибков Е.В., Зубов А.Р., Воробьев С.Г. Терриконы углепромышленных районов Донбасса как источник воздействия на окружающую среду69

Zakrutkin V.E., Zubova L.G., Gibkov E.V., Zubov A.R., Vorobiev S.G. Waste Dump of the Coal-Mining Areas of Donbass As Source of Impact on the Environment 69

Косенко Ю.В., Барабашин Т.О., Баскакова Т.Е. Динамика гидрохимических характеристик Азовского моря в современный период осолонения76

Kosenko J.V., Barabashin T.O., Baskakova T.E. Dynamics of Hydrochemical Characteristics of the Sea of Azov in Modern Period of Salinization.....76

Мельникова Е.В. Прогнозирование депрессии при освоении скважин на основе анализа геолого-промышленной информации.....83

Melnikova E.V. Well Clean-Up Depression Forecast Based on the Field-Geological Information Analysis.....83

Павленко Л.Ф., Клименко Т.Л., Анохина Н.С., Скрыпник Г.В., Экилик В.С., Вотинова Т.В., Севостьянова М.В. Загрязнение экосистемы Нижнего Дона нефтяными компонентами и полиароматическими углеводородами.....91

Pavlenko L.F., Klimenko T.L., Anokhina N.S., Skrypnik G.V., Ekilik V.S., Votinova T.V., Sevostyanova M.V. Pollution of the Ecosystem of the Lower Don by Oil Components and Polyaromatic Hydrocarbons91

Склярченко Г.Ю., Закруткин В.Е., Зубов А.Р., Зубова Л.Г., Решетняк О.С. Влияние угледобычи в Донбассе на подземные и поверхностные воды 100

Sklyarenko G.Yu., Zakrutkin V.E., Zubov A.R., Zubova L.G., Reshetnyak O.S. Influence of the Coal Mining in the Donbass on Underground and Surface Water100

Федоров Ю.А., Ярославцев В.М., Доценко И.В. Естественные и техногенные радионуклиды в донных отложениях (на примере р. Дон, ст. Маньчская).....108

Fedorov Yu.A., Yaroslavtsev V.M., Dotsenko I.V. Natural and Technogenic Radionuclides in Sediment Cores (the Case of the Don River, Manychskaya Village).....108

Хардииков А.Э., Астахова А.А. Изучение низкотемпературного метаморфизма золотовмещающих толщ Верхояно-Колымской складчатой области при проведении поисково-оценочных работ.....114

Khardikov A.E., Astakhova A.A. Research of Low Temperature Metamorphism of Gold Containing Complexes of Verkhoyansk-Kolyma Folder Area During Prospecting and Evaluation of Gold Deposits114

Шишкина Д.Ю. Экологическая оценка динамики сельскохозяйственных земель Ростовской области122

Shishkina D.Yu. Environmental Assessment of the Dynamics of Agricultural Land of the Rostov Region122

НАУЧНАЯ ЖИЗНЬ

SCIENTIFIC LIFE

Миноранский В.А. Сохраним природу степи вместе129

Minoranskii V.A. Save the Nature of Steppe Together.....129

Михалкович С.С., Штейнберг Б.Я. Всероссийская научная конференция «Языки программирования и компиляторы» (Ростов-на-Дону, 3–5 апреля 2017 г.).....131

Mikhalkovich S.S., Shteinberg B.Ya. All-Russian Scientific Conference "Programming Languages and Compilers" (Rostov-on-Don, April 3-5, 2017)131

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ

PHYSICAL AND MATHEMATICAL SCIENCES

УДК 519.2

DOI 10.23683/0321-3005-2017-3-1-4-7

РАСЧЁТ СПРАВЕДЛИВОЙ ЦЕНЫ ДЛЯ ДИФФУЗИОННОЙ МОДЕЛИ СО СТОХАСТИЧЕСКОЙ ПРОЦЕНТНОЙ СТАВКОЙ*

© 2017 г. М.С. Беляева¹, Н.В. Данилова¹

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

CALCULATION OF FAIR PRICE FOR DIFFUSIVE MODEL WITH THE STOCHASTIC INTEREST RATE

M.S. Belyaeva¹, N.V. Danilova¹

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

Беляева Мария Сергеевна – магистр, кафедра высшей математики и исследования операций, Институт математики, механики и компьютерных наук им. И.И. Ворovichа, Южный федеральный университет, ул. Мильчакова, 8а, г. Ростов-на-Дону, 344090, Россия, e-mail: mashka.taganrog@mail.ru

Maria S. Belyaeva – Master, Department of High Mathematics and Operations Research, Vorovich Institute of Mathematics and Computer Sciences, Southern Federal University, Milchakova St., 8a, Rostov-on-Don, 344090, Russia, e-mail: mashka.taganrog@mail.ru

Данилова Наталья Викторовна – кандидат физико-математических наук, доцент, кафедра высшей математики и исследования операций, Институт математики, механики и компьютерных наук им. И.И. Ворovichа, Южный федеральный университет, ул. Мильчакова, 8а, г. Ростов-на-Дону, 344090, Россия, e-mail: danilova198686@mail.ru

Natalia V. Danilova – Candidate of Physics and Mathematics, Associate Professor, Department of High Mathematics and Operations Research, Vorovich Institute of Mathematics and Computer Sciences, Southern Federal University, Milchakova St., 8a, Rostov-on-Don, 344090, Russia, e-mail: danilova198686@mail.ru

Предметом исследования статьи является модель (B,S)-рынка, описывающая динамику процентных ставок в форме стохастического дифференциального уравнения диффузионного типа. Целью данной статьи является нахождение справедливой цены для рассматриваемой модели. Определение справедливой цены финансовых инструментов является важным вопросом в исследовании финансовых рынков. В мировой практике получение формул, позволяющих проводить расчет справедливой цены для конкретных моделей финансовых рынков, оценивается очень высоко. Принцип определения стоимости традиционно разрабатывается на примере опциона. Рассматривается европейский тип опциона, который характеризуется тем, что исполняется точно в финальный момент времени. Приведено несколько алгоритмов расчета справедливой цены в случае опциона колл. Исследуется полный и безарбитражный рынок. В связи с этим рассчитывается не интервал цен, а одно значение справедливой цены. Вначале описывается алгоритм, который предполагает нахождение процесса плотности и применение преобразования Гирсанова. Также предложены две различные реализации метода Монте-Карло. Первая реализация основана на симуляции траекторий и применяется для расчёта математического ожидания, другая – для расчёта интеграла. Приведены численные эксперименты расчета справедливой цены и произведено сравнение полученных результатов.

Ключевые слова: модель (B,S)-рынка, европейский опцион колл, справедливая цена, процесс плотности, преобразование Гирсанова, метод Монте-Карло.

The object of the research is the model of the (B,S)-market. The interest rate in this model is presented in the form of stochastic differential equation of diffusion type. The purpose of this article is finding of the fair price for this model. Calculation of the fair price of financial instruments is a very important issue in a research of the financial markets. In the world practice

* Работа поддержана грантом РФФИ № 17-19-01038.

the obtaining of formulas allowing to carry out the calculation of the fair price for the definite models of the financial markets is highly evaluated. The principle of determination of the fair price is traditionally developed on the example of the option. The European type of the option is considered. Several algorithms of calculation of the fair price are given. In the beginning the algorithm supposes the density process and the Girsanov transform. Two different Monte Carlo algorithms are supposed. The first realization is applied to calculation of expectation value, and another - to calculation of integral. Numerical experiments of calculation of the fair price are given and comparison of the received results is made.

Keywords: (B,S)-market model, European call option, fair price, density process, Girsanov transform, Monte Carlo method.

Рассматривается модификация известной модели Блэка – Шоулса, отличие которой от модели Блэка – Шоулса заключается в том, что процентная ставка не является постоянной (диффузионная модель). В [1–3] приводятся подобные модели.

Рассмотрена задача расчёта справедливой цены европейского опциона колл. Один из способов расчёта основан на применении преобразования Гирсанова и нахождении процесса плотности. В качестве второго способа рассматривается метод Монте-Карло, который применяется для расчёта как математического ожидания, так и интеграла. Приводятся численный пример расчёта и сравнение результатов.

Описание модели. Постановка задачи

Рассматриваемая модель имеет вид [4]

$$\begin{cases} S_t = S_0 \exp\left(\left(\mu - \frac{\sigma^2}{2}\right)t + \sigma W_t\right) \\ B_t = B_0 \exp(r_t) \\ r_t = r_0 \exp\left(\left(\alpha - \frac{\gamma^2}{2}\right)t + \gamma W_t\right) \end{cases},$$

где $\mu, \alpha, \sigma > 0, \gamma > 0$ – константы; $(W_t)_{t \in [0, T]}$ – винеровский процесс.

Задачи продавца и покупателя соответственно в случае самофинансируемого портфеля имеют вид

$$\begin{cases} \min_{\gamma} X_0 \\ d\left(\frac{X_t}{B_t}\right) = \gamma_t d\left(\frac{S_t}{B_t}\right) \\ X_T \geq f_T \end{cases} \text{ и } \begin{cases} \max_{\gamma} X_0 \\ d\left(\frac{X_t}{B_t}\right) = \gamma_t d\left(\frac{S_t}{B_t}\right) \\ X_T \leq f_T \end{cases}, \quad (1)$$

где $t \in [0, T]$, $(X_t)_{t \in [0, T]}$ – капитал портфеля; $(\gamma_t)_{t \in [0, T]}$ – число единиц акций; $f_T = f_T(S_T) = \max(S_T - K, 0)$ – финансовое обязательство опциона call; K – контрактная цена.

Расчёт справедливой цены

Для решения задач будем применять преобразование Гирсанова [5], которое позволяет перейти от мартингальной меры P^* к исходной мере P .

Вводим процесс плотности Z_t : $Z_0 = 1, Z_t = \exp(a_t t + b_t W_t), t \in [0, T]$.

Коэффициенты a_t и b_t находятся из условий:

$$1. EZ_t = 1. \quad 2. E\left(\frac{S_t Z_t}{B_t}\right) = \frac{S_0}{B_0}.$$

Из первого условия

$$a_t = -\frac{b_t^2}{2}, \quad (2)$$

из (2) и второго условия

$$\frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\exp\left(\left(\mu - \frac{\sigma^2}{2}\right)t + \sigma x\right) \exp\left(-\frac{b_t^2}{2}t + b_t x\right)}{\exp\left(r_0 \exp\left(\left(\alpha - \frac{\gamma^2}{2}\right)t + \gamma x\right)\right)} \times \exp\left(-\frac{x^2}{2t}\right) dx = 1. \quad (3)$$

Решения задач (1) в силу полноты (B,S)-рынка совпадают и имеют вид

$$C = X_0 = E^*\left(\frac{f_T(S_T)}{B_T}\right) = E\left(\frac{f_T(S_T)}{B_T} Z_T\right). \quad (4)$$

Математическое ожидание:

$$\begin{aligned} E\left(\frac{f_T(S_T)}{B_T} Z_T\right) &= \\ &= \int_d^{+\infty} \left[\frac{\left(S_0 \exp\left(\left(\mu - \frac{\sigma^2}{2}\right)T + \sigma x\right) - K \right) \exp\left(-\frac{b_T^2}{2}T + b_T x\right)}{B_0 \exp\left(r_0 \exp\left(\left(\alpha - \frac{\gamma^2}{2}\right)T + \gamma x\right)\right)} \right] p(x) dx, \\ d &= \frac{1}{\sigma} \left[\ln\left(\frac{K}{S_0}\right) - \left(\mu - \frac{\sigma^2}{2}\right)T \right], \end{aligned}$$

где $p(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi T}} \exp\left(-\frac{x^2}{2T}\right)$ – плотность распределения винеровского процесса, $W_T \sim N(0, T)$.

$$C = \frac{1}{\sqrt{2\pi T}} \int_d^{+\infty} \frac{\left[S_0 \exp\left(\left(\mu - \frac{\sigma^2}{2}\right)T + \sigma x\right) - K \right] \exp\left(-\frac{b_T^2}{2}T + b_T x\right)}{B_0 \exp\left(r_0 \exp\left(\left(\alpha - \frac{\gamma^2}{2}\right)T + \gamma x\right)\right)} \exp\left(-\frac{x^2}{2T}\right) dx. \quad (5)$$

Метод Монте-Карло

В статье будут рассмотрены два варианта применения метода Монте-Карло.

Первый основан на симуляции траекторий и численного расчёта математического ожидания, второй – на численном расчёте интеграла в формуле (5).

Алгоритм первого варианта метода Монте-Карло [6].

1. Отрезок $[0, T]$ разбиваем на N частей с шагом $h = \frac{T}{N}$. Дискретизацию процессов S, B, r

можно записать в виде

$$S_n = S_0 \exp\left(\left(\mu - \frac{\sigma^2}{2}\right)h + \sigma\sqrt{h}\varepsilon_n\right),$$

$$r_n = r_0 \exp\left(\left(\alpha - \frac{\gamma^2}{2}\right)h + \gamma\sqrt{h}\varepsilon_n\right),$$

$$B_n = B_0 \exp(r_n), \text{ где } \varepsilon_n \sim N(0,1), n = 1, \dots, N.$$

2. Проводим L экспериментов. Тогда значение справедливой цены европейского опциона вычисляется по формуле

$$C = X_0 \approx \frac{1}{L} \sum_{i=1}^L \frac{f(S_N^i)}{B_N^i}, \quad (6)$$

где S_N^i, B_N^i – значения стоимости акции и банковского счёта в i -м эксперименте.

Второй вариант метода Монте-Карло [6].

Обозначим через $g(x)$ подынтегральную функцию в формуле (5).

$$g(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi T}} \times$$

$$\times \left[\frac{\left[S_0 \exp\left(\left(\mu - \frac{\sigma^2}{2}\right)T + \sigma x\right) - K \right] \exp\left(-\frac{b_T^2}{2}T + b_T x\right)}{B_0 \exp\left(r_0 \exp\left(\left(\alpha - \frac{\gamma^2}{2}\right)T + \gamma x\right)\right)} \right] \times \exp\left(-\frac{x^2}{2T}\right).$$

Для нахождения математического ожидания достаточно найти b_T из уравнения (3).

Итак, получаем следующую формулу для вычисления справедливой цены:

В силу правила трёх сигм [7] формулу (5) можно переписать в виде $C = \int_d^{3\sqrt{T}} g(x) dx$.

Рассмотрим случайную величину u , равномерно распределённую на отрезке интегрирования $[d, 3\sqrt{T}]$. Тогда $g(u)$ также будет случайной величиной, причём её математическое ожидание

$$Eg(u) = \int_d^{3\sqrt{T}} g(x)\varphi(x)dx, \text{ где } \varphi(x) \text{ – плотность распределения случайной величины } u, \text{ равная}$$

$\frac{1}{3\sqrt{T} - d}$ на отрезке $[d, 3\sqrt{T}]$. Таким образом, искомый интеграл представим в виде

$$\int_d^{3\sqrt{T}} g(x)dx = (3\sqrt{T} - d)Eg(u). \text{ Но математическое}$$

ожидание случайной величины $g(u)$ легко оценить, смоделировав эту случайную величину и посчитав выборочное среднее.

Итак, бросаем L точек, равномерно распределённых на $[d, 3\sqrt{T}]$, и для каждой точки u_i вычисляем значение $g(u_i)$. Затем считаем выборочное среднее: $\frac{1}{L} \sum_{i=1}^L g(u_i)$. В итоге получаем оценку интеграла и значение для справедливой цены

теграла и значение для справедливой цены

$$C = \int_d^{3\sqrt{T}} g(x)dx \approx \frac{3\sqrt{T} - d}{L} \sum_{i=1}^L g(u_i). \quad (7)$$

Сравнение результатов

Рассмотрим пример. Начальные данные: $S_0=1, B_0=1, r_0=0,04, K=1, \mu=0,05, \sigma=0,3, \gamma=0,1, \alpha=0,2, T=1, L=1000$.

С помощью Maple 13 находим справедливую цену различными методами, т.е. вычисляем ее по формулам (5), (6) и (7) (таблица). Параметр b_T в формуле (5) находим, запрограммировав метод Симпсона.

Сравнение результатов / Comparison of results

N (число разбиений отрезка $[0, T]$)	Формула C		
	(5)	(6)	(7)
1	0,1442921003	0,1336086680	0,1417733891
3		0,1221249003	
5		0,1100013272	
6		0,1071259835	

Легко убедиться, что справедливая цена, посчитанная по формулам (5) и (7), совпадает до сотых, т.е. до копеек, если переводить в денежную систему. А справедливая цена, посчитанная по формуле (6), совпадает со справедливой ценой других методов до десятых.

Литература

1. Chan K.C., Karolyi G.A., Longstaff F.A., Sanders A.B. An empirical comparison of alternative models of the short-term interest rate // *The J. of Finance*. 1992. № 3. P. 1209–1227.
2. Merton R.C. Theory of rational option pricing // *The Bell J. of Economics and Management Science*. 1973. Vol. 4, № 1. P. 141–183.
3. Nowman K.B. Gaussian Estimation of Single-Factor Continuous Time Models of The Term of Interest Rates // *The J. of Finance*. 1997. № 4. P. 1695–1706.
4. Stradi B.A. Term structure of interest rates // *Rev. Mate. Teor. Aplic.* 2005. № 12. P. 129–138.

5. Джекел П. Применение методов Монте-Карло в финансах. М. : Интернет-трейдинг, 2004. 256 с.
6. Ширяев А.Н. Вероятность. М. : МЦНМО, 2011. 552 с.
7. Ширяев А.Н. Основы стохастической финансовой математики. Т. 1 : Факты, модели. М. : ФАЗИС, 2004. 512 с.

References

1. Chan K.C., Karolyi G.A., Longstaff F.A., Sanders A.B. An empirical comparison of alternative models of the short-term interest rate. *The J. of Finance*. 1992, No. 3, pp. 1209-1227.
2. Merton R.C. Theory of rational option pricing. *The Bell J. of Economics and Management Science*. 1973, vol. 4, No. 1, pp. 141-183.
3. Nowman K.B. Gaussian Estimation of Single-Factor Continuous Time Models of the Term of Interest Rates. *The J. of Finance*. 1997, No. 4, pp. 1695-1706.
4. Stradi B.A. Term structure of interest rates. *Rev. Mate. Teor. Aplic.* 2005, No. 12, pp. 129-138.
5. Dzhekel P. *Primenenie metodov Monte-Karlo v finansakh* [Application of Monte Carlo methods in finance]. Moscow: Internet-treiding, 2004, 256 p.
6. Shiryayev A.N. *Veroyatnost'* [Probability]. Moscow: MTsNMO, 2011, 552 p.
7. Shiryayev A.N. *Osnovy stokhasticheskoi finansovoi matematiki* [Fundamentals of stochastic financial mathematics]. T. 1 : *Fakty, modeli* [Vol. 1. Facts and models]. Moscow: FAZIS, 2004, 512 p.

ОБОБЩЕННЫЕ ПРОСТРАНСТВА ГЁЛЬДЕРА НА СФЕРЕ $H_k^\varphi(S_{n-1})$, $H_k^\varphi(S_{n-1}, \rho)$ И ИХ СВЯЗЬ С ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫМИ СВОЙСТВАМИ ГАРМОНИЧЕСКИХ В ШАРЕ ФУНКЦИЙ

© 2017 г. Б.Г. Вакулов¹, Г.С. Костецкая¹

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

HÖLDER GENERALIZED SPACES ON THE SPHERE $H_k^\varphi(S_{n-1})$, $H_k^\varphi(S_{n-1}, \rho)$ AND THEIR CONNECTION WITH THE DIFFERENTIAL PROPERTIES OF HARMONIC FUNCTIONS IN THE BALLS

B.G. Vakulov¹, G.S. Kostetskaya¹

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

Вакулов Борис Григорьевич – кандидат физико-математических наук, доцент, кафедра дифференциальных и интегральных уравнений, Институт математики, механики и компьютерных наук имени И.И. Воровича, Южный федеральный университет, ул. Мильчакова, 8а, г. Ростов-на-Дону, 344090, Россия, e-mail: bgvakulov@sfnu.ru

Boris G. Vakulov - Candidate of Physics and Mathematics, Associate Professor, Department of Differential and Integral Equations, Vorovich Institute of Mathematics and Computer Science, Southern Federal University, Milchakova St., 8a, Rostov-on-Don, 344090, Russia, e-mail: bgvakulov@sfnu.ru

Костецкая Галина Сергеевна – кандидат физико-математических наук, доцент, кафедра дифференциальных и интегральных уравнений, Институт математики, механики и компьютерных наук имени И.И. Воровича, Южный федеральный университет, ул. Мильчакова, 8а, г. Ростов-на-Дону, 344090, Россия, e-mail: galina.kostezkaya@gmail.com

Galina S. Kostetskaya - Candidate of Physics and Mathematics, Associate Professor, Department of Differential and Integral Equations, Vorovich Institute of Mathematics and Computer Science, Southern Federal University, Milchakova St., 8a, Rostov-on-Don, 344090, Russia, e-mail: galina.kostezkaya@gmail.com

В настоящее время проведено большое число исследований по обобщению классических задач математической физики. Хорошо известны задачи Дирихле для шара в случае непрерывных граничных значений. В работе рассматривается решение задачи Дирихле в случае гладких граничных значений. Гладкость на сфере определяется в терминах обобщённых пространств Гёльдера старших порядков. Для определения старших порядков гёльдеровости используются дробные степени оператора Бельтрами – Лапласа и эквивалентные им операторы сферических сверток с растущими мультипликаторами Фурье – Лапласа, имеющими заданную асимптотику на бесконечности. Приведены условия независимости этих пространств (с точностью до эквивалентности норм) от выбора такого мультипликатора как в безвесовом, так и весовом (для степенного веса) случае. Эти пространства часто являются классами корректности для многомерных интегральных уравнений первого рода. Получена также оценка типа Зигмунда, оценивающая скорость сходимости по радиусу оператора Пуассона к граничному значению из обобщённого класса Гёльдера. Доказаны необходимые условия принадлежности обобщённому пространству Гёльдера старшего порядка в случае его характеристики из класса Бари – Стечкина.

Ключевые слова: обобщённые пространства Гёльдера старших порядков, мультипликатор Фурье – Лапласа, оператор Пуассона.

At present a great number of studies has been made to generalize classical problems on mathematical physics. The Dirichlet problems for a ball in the case of continuous boundary values are well known. This paper considers a solution of the Dirichlet problem in the case of smooth boundary values. Smoothness on a sphere is defined in terms of generalized Hölder spaces of higher order. To determine the Hölder higher orders fractional powers of the Beltrami-Laplace operator and their equivalent operators of spherical convolutions with growing Fourier-Laplace multipliers having a given asymptotic at infinity are used. We provide some conditions for the independence of these spaces (with the accuracy up to the equivalence of norms) from the choice of such a multiplier in both weightless and weight (for the power weight) case are given. These spaces are often correctness classes for multidimensional integral equations of the first kind. We also obtained an estimate of the Zygmund type, which evaluates the rate of convergence in the radius of the Poisson operator to the boundary value from the generalized Hölder class. The work proves the necessary conditions for belonging to the generalized Hölder space of the highest order in the case of its characteristics from the Bari-Stechkin class.

Keywords: top order Hölder generalized spaces, Fourier-Laplace multiplier, Poisson operator.

При решении интегральных уравнений первого рода часто возникает вопрос о построении классов корректности. Для многих типов такого рода уравнений такими классами являются пространства Гельдера. Поэтому свойства этих пространств и различные их обобщения в последнее время получили широкое распространение в математических исследованиях. Пространства Гельдера старших порядков можно определять разными способами. Например, с помощью старших разностей или принадлежности производных порядка целой части числа к классу Гельдера порядка дробной части этого числа.

В настоящей работе рассматриваются пространства обобщенной Гельдеровости старших порядков на единичной сфере в n -мерном евклидовом пространстве, определяемые с помощью мультипликативных производных, и условия их независимости от выбора растущего мультипликатора. Получены необходимые условия принадлежности функций указанным пространствам в терминах пуассоновских аппроксимаций. Показана связь этих условий с решением задачи Дирихле для шара в случае граничных значений из этих пространств.

**Основные обозначения,
 вспомогательные сведения и формулы**

Используются стандартные обозначения гармонического анализа на сфере (см., например, [1–4]).

Рассматриваются гармонические продолжения $P_r f$ функции в шар $|x| = 1$, P_r – оператор Пуассона

$$(P_r f)(x') = \frac{1}{C_n} \int_{S_{n-1}} \frac{1-r^2}{|x'r - \sigma|^n} f(\sigma) d\sigma,$$

$$r = |x|, \quad x' = \frac{x}{|x|}, \quad C_n = \frac{2\pi^{n/2}}{\Gamma\left(\frac{n}{2}\right)}.$$

Справедлива формула для сферической свертки [1]

$$\int_{S_{n-1}} f(x \cdot \sigma) \psi(\sigma) d\sigma =$$

$$= \frac{2\pi^{(n-1)/2}}{\Gamma\left(\frac{n-1}{2}\right)^{-1}} \int_0^1 f(t) (T_t \psi)(x) (1-t^2)^{(n-3)/2} dt, \quad (1)$$

где $(T_t)(x)$ – средние по сфере, например, при $n \geq 3$

$$(T_t f)(x) = \frac{1}{|S_{n-2}| (1-t^2)^{(n-2)/2}} \int_{x \cdot \sigma = t} f(\sigma) dS_\sigma,$$

$$|x| = 1, \quad -1 < t < 1.$$

Обозначим через $\gamma_{n-1}(\alpha)$ потенциал на сфере

$$(K^\alpha f)(x) = \frac{1}{\gamma_{n-1}(\alpha)} \int_{S_{n-1}} \frac{f(\sigma) d\sigma}{|x - \sigma|^{n-1-\alpha}},$$

$$x \in S_{n-1}, \quad \alpha > 0, \quad \alpha \neq n-1, n+1, \dots,$$

$$K^\alpha f = \frac{1}{\gamma_{n-1}(\alpha)} \int_{S_{n-1}} \frac{\ln \frac{|x - \sigma|}{\sqrt{2}}}{|x - \sigma|^{n-1-\alpha}} f(\sigma) d\sigma,$$

$$\alpha = n-1, n+1, \dots,$$

$\gamma_{n-1}(\alpha)$ – известная константа

$$\gamma_{n-1}(\alpha) = 2^\alpha \pi^{(n-1)/2} \frac{\Gamma\left(\frac{\alpha}{2}\right)}{\Gamma\left(\frac{n-1-\alpha}{2}\right)}.$$

Дадим определение модуля непрерывности функции f , заданной на сфере

$$\omega(f, t) = \sup_{\substack{|x - \sigma| \leq t \\ x, \sigma \in S_{n-1}}} |f(\sigma) - f(x)|.$$

Справедливо неравенство

$$\omega(f, \lambda t) \leq \left(1 + \frac{\pi}{2} \lambda\right) \omega(f, t). \quad (2)$$

Нам понадобится формула [4]

$$\int_{|x - \sigma| > \delta} \frac{f(|x - \sigma|)}{|x - \sigma|^\beta} d\sigma \leq \int_{\delta}^2 \frac{f(u)}{u^{\beta+2-u}} du, \quad x \in S_{n-1}. \quad (3)$$

Мультипликатором Фурье – Лапласа по сферическим гармоникам называются собственные числа оператора сферической свертки, вычисляемые по

формуле $k_m = |S_{n-2}| \int_{-1}^1 k(t) P_m(t) (1-t^2)^{(n-3)/2} dt$, где

$P_m(t)$ – известные полиномы Лежандра; $k(t)$ – ядро сферической свертки.

Нам также понадобится известное числовое неравенство

$$\left| \frac{1}{a^\alpha} - \frac{1}{b^\alpha} \right| \leq \frac{c |a - b| (a + b)^{\alpha-1}}{(ab)^\alpha}, \quad a, b > 0, \quad (4)$$

где c не зависит от a, b .

**О сферической свёртке с мультипликатором,
 имеющим степенной характер убывания**

Рассмотрим оператор K сферической свёртки с мультипликатором $\{k_m\}_{m=0}^\infty$ (по сферическим гармоникам).

Удобно ввести обозначение $W_{\lambda, N}$ для класса мультипликаторов $\{k_m\}_{m=0}^\infty$, $k_m \neq \infty$, $m = 0, 1, \dots$,

$k_m \neq 0$, $m \geq p$, по сферическим гармоникам, допускаящим при $m \rightarrow \infty$ асимптотику

$$k_m = \sum_{j=0}^N c_j m^{\lambda-j} + o(m^{\lambda-N-\varepsilon}), \quad c_0 \neq 0,$$

при некотором $\varepsilon > 0$; $\lambda \in R^1$, $N = 0, 1, 2, \dots$

Справедлива [3, 4]

Лемма 1. Пусть $\{k_m\} \in W_{-\lambda, N}$, $\lambda \geq 0$,

$N \geq \left[\frac{n+1}{2} \right] - \lambda$. Тогда $K\varphi = a\varphi(x) + \int_{S_{n-1}} k(x \cdot \sigma)\varphi(\sigma)d\sigma$,

где $\int_{S_{n-1}} |k(x \cdot \sigma)|d\sigma < \infty$ и $a = 0$ при $\lambda > 0$;

$a = \lim_{m \rightarrow \infty} k_m$ при $\lambda = 0$.

Если $N \geq n-1-\lambda$, то $k(t)$ представимо в виде

$$k(t) = \begin{cases} (1-t)^{\frac{\lambda-n+1}{2}} \ell(t), & \lambda > 0; \\ (1-t)^{\frac{2-n}{2}} \ell(t), & \lambda = 0, \end{cases}$$

где $\ell(t) \in C([-1, 1])$, причем

$$\ell(1) = \frac{2^{\frac{\lambda-n+1}{2}}}{\gamma_{n-1}(\lambda)} \lim_{m \rightarrow \infty} k_m m^\lambda \quad \text{при } \lambda > 0 \text{ и}$$

$$\ell(1) = \frac{2^{\frac{2-n}{2}}}{\gamma_{n-1}(1)} \lim_{m \rightarrow \infty} m(k_m - a) \quad \text{при } \lambda = 0.$$

Если $N > n+1$, то

$$K\varphi = \int_{S_{n-1}} k(x \cdot \sigma)\varphi(\sigma)d\sigma + \sum_{j=0}^N b_j K^{j+\lambda} \varphi, \quad \text{если } \lambda > 0,$$

$$\text{и } K\varphi = b_0 \varphi + \int_{S_{n-1}} k(x \cdot \sigma)\varphi(\sigma)d\sigma + \sum_{j=1}^N b_j K^{j+\lambda} \varphi,$$

если $\lambda = 0$. Здесь $k(t) \in C^1([-1, 1])$, $b_0 = \lim_{m \rightarrow \infty} k_m$.

Основные результаты

Наряду с обычными пространствами Гёльдера $H^\lambda(S_{n-1})$ старших порядков $\lambda > 1$ на сфере в теории функций рассматриваются и обобщённые пространства Гёльдера [5–8]. Дадим точные определения.

Определение 1. Через $H_k^\varphi(S_{n-1})$, $k = 0, 1, \dots$, обозначим класс функций $f(\sigma) \in C^k(S_{n-1})$ таких, что $\omega(D^k f, h) \leq c\varphi(h)$;

$$\|f\|_{H_k^\varphi} = \|f\|_{C^k} + \sup_{h>0} \frac{\omega(D^k f, h)}{\varphi(h)}.$$

Здесь оператор D^k имеет мультипликатор $\{d_m\}_{m=0}^\infty \in W_{k, \left[\frac{n+1}{2} \right]}$, $D^0 f = f$.

В случае $k = 0$ будем писать $H_0^\varphi = H^\varphi$.

Справедлива

Теорема 1. Пространства $H_k^\varphi(S_{n-1})$, $\varphi \in \Phi_1^0$, не зависят от выбора оператора D^k (с точностью до эквивалентности норм), если его мультипликатор принадлежит классу $W_{k, N}$, $N \geq \left[\frac{n+1}{2} \right]$. Здесь

Φ_1^0 – класс Бари – Стечкина [5, 6].

Доказательство. Независимость классов $C^k(S_{n-1})$ от выбора D^k была доказана в [3, 4].

Пусть D_1^k и D_2^k – операторы с мультипликаторами $\{d_m^1\}$, и $\{d_m^2\}$; $\{d_m^1\}, \{d_m^2\} \in W_{k, N}$, $N \geq \left[\frac{n+1}{2} \right]$.

Тогда в силу леммы 1

$$D_1^k f = A_1 f + B_1 D_2^k f + a_0 D_2^k f, \quad \text{где оператор } B_1$$

имеет мультипликатор $\{k_m^*\}_{m=0}^\infty$:

$$k_m^* = \begin{cases} 0, & \text{при } m = 0, 1, 2, \dots, p-1; \\ \sum_{i=1}^N \frac{a_i}{m^i} + o\left(\frac{1}{m^{N+2}}\right), & \text{при } m \geq p. \end{cases}$$

Число p выбирается так, что для всех $m \geq p$ выполнялись соотношения: $d_m^2 \neq 0$ и

$$\frac{d_m^2}{d_m^1} = a_0 + \sum_{i=1}^N \frac{a_i}{m^i} + o\left(\frac{1}{m^{N+\varepsilon}}\right) \quad \left(\text{это всегда возможно,}\right.$$

так как $\{d_m^1\}, \{d_m^2\} \in W_{k, N}$); оператор A_1 имеет мультипликатор

$$k_m = \begin{cases} d_m^1 - a_0 d_m^2, & \text{при } m = 0, 1, 2, \dots, p-1; \\ 0, & \text{при } m \geq p. \end{cases}$$

Совершенно аналогично получаем

$$D_2^k f = A_2 f + B_2 D_1^k f + b_0 D_1^k f.$$

Очевидно, что для доказательства независимости классов $H_k^\varphi(S_{n-1})$ от выбора D^k достаточно показать ограниченность операторов B_1, B_2 в пространствах $H^\varphi(S_{n-1})$, а для функций $A_1 f, A_2 f$ – липшицевость (Гёльдеровость 1-го порядка). Последнее очевидно в силу того, что ядра операторов A_1 и A_2 из $C^\infty([-1, 1])$, а $\varphi \in \Phi_1^0$.

Ограниченность операторов B_1, B_2 очевидна в силу формулы (1), причем, вообще, справедлива оценка $\omega(B_i f, h) \leq c\omega(f, h), i = 1, 2$.

Теорема доказана.

Определение 2. Пусть $\rho(x) = \prod_{m=0}^{\ell} |x - a_m|^{\beta_m}$;

$x, a_m \in S_{n-1}, m = 0, 1, \dots, \ell; \beta_m \in R$.

$$H_k^\varphi(S_{n-1}, \rho) = \{f : f \in C(S_{n-1}), \rho D^k f \in H^\varphi(S_{n-1})\}.$$

Здесь D^k – оператор сферической свёртки с мультипликатором $\{d_m\}, d_m \neq 0, m = 0, 1, \dots$, из класса $W_{k, N}, N > n + 1$.

Лемма 2. Пусть оператор имеет вид $A = \sum_{j=1}^N c_j K^j f + Lf + c_0 I, c_j$ – постоянные; L – оператор сферической свёртки с непрерывно-дифференцируемым ядром. Тогда оператор A сохраняет обобщенный класс Гёльдера $H^\varphi(S_{n-1}, \rho), \varphi \in \Phi_1^0$.

Для доказательства утверждения леммы достаточно заметить, что оператор K^j – риссов потенциал порядка j – сохраняет класс $H^\varphi(S_{n-1}, \rho)$ [7, 8]. Тем более это справедливо для оператора L .

С помощью леммы 2 доказывается

Теорема 2. Классы $H_k^\varphi(S_{n-1}, \rho), \varphi \in \Phi_1^0$, не зависят (с точностью до эквивалентности норм) от выбора оператора D^k , если его мультипликатор $\{d_m\}$ из класса $W_{k, N}, N > n + 1$, и $d_m \neq 0, m = 0, 1, 2, \dots$

Доказательство. Пусть D_1^k и D_2^k – операторы с мультипликаторами $\{d_m^1\}$ и $\{d_m^2\}$ соответственно из $W_{k, N}, N > n + 1, d_m^i \neq 0, m = 0, 1, 2, \dots;$

$i = 1, 2$. Тогда в силу леммы 1 $\left\{ \frac{d_m^1}{d_m^2} \right\}_{m=0}^{\infty}$ и

$\left\{ \frac{d_m^2}{d_m^1} \right\}_{m=0}^{\infty}$ принадлежат классу $W_{0, N}, N > n + 1$.

Поэтому (лемма 1) справедливы представления $D_1^k f = a_0 D_2^k f + A_1 D_2^k f; D_2^k f = b_0 D_1^k f + A_2 D_1^k f$, где a_0, b_0 – константы в асимптотическом разложении мультипликаторов $\{d_m^1/d_m^2\}, \{d_m^2/d_m^1\}$;

операторы $A_i, i = 1, 2$, имеют вид

$$A_i f = \sum_{j=1}^N c_j K^j f + \int_{S_{n-1}} a_j(x, \sigma) f(\sigma) d\sigma.$$

Здесь $a_i(t) \in C^1([-1, 1])$. Для доказательства теоремы достаточно показать, что оператор $A_i, i = 1, 2$, сохраняет обобщенную Гёльдеровость с весом. А это следует из вида оператора A_i и леммы 2.

В заключение приведем также необходимое условие принадлежности функций классу $H_k^\varphi(S_{n-1}), \varphi \in \Phi_1^0$, в терминах пуассоновских аппроксимаций, что тесно связано с решением задачи Дирихле для шара в случае граничных значений из обобщенного пространства Гёльдера.

Теорема 3. Пусть $f \in C(S_{n-1})$, тогда справедлива оценка

$$\begin{aligned} |P_r f(x) - f(x)| &\leq \\ &\leq c \left\{ \omega(f, 1-r) + (1-r) \int_{1-r}^2 \frac{\omega(f, t)}{t^2} dt + \right. \\ &\left. + (1-r)^2 \int_{1-r}^2 \frac{\omega(f, t)}{t^3} dt \right\}, \end{aligned} \quad (5)$$

$$|x| = 1.$$

Доказательство. Введём $r_1 > r$. Оценим разность

$$|P_r f(x) - f(x)| \leq |P_r f - P_{r_1} f| + |P_{r_1} f - f| = J_1 + J_2.$$

Так как $f \in C(S_{n-1})$, то $P_{r_1} f \rightarrow f$ при $r_1 \rightarrow 0$.

Поэтому, выбрав r_1 так, чтобы

$$J_1 = |P_{r_1} f - f| < \omega(f, 1-r), \quad (6)$$

получим оценку J_1 .

$$\text{Ввиду того, что } \frac{\Gamma\left(\frac{n}{2}\right)}{2\pi^{n/2}} \int_{S_{n-1}} \frac{1-r^2}{|x'r - \sigma|} d\sigma \equiv 1,$$

$$x' = \frac{x}{|x|}, \text{ имеем}$$

$$|(P_r f)(x') - (P_{r_1} f)(x')| = \frac{\Gamma\left(\frac{n}{2}\right)}{2\pi^{n/2}} \times \quad (7)$$

$$\times \left| \int_{S_{n-1}} \{f(\sigma) - f(x')\} \left\{ \frac{1-r_1^2}{|x'r - \sigma|^n} - \frac{1-r^2}{|x'r - \sigma|^n} \right\} d\sigma \right|.$$

Выберем $k > 1$. С учетом (7) для J_1 имеем

$$J_1 \leq \frac{\Gamma\left(\frac{n}{2}\right)}{2\pi^{\frac{n}{2}}} \left\{ \int_{|x'-\sigma| < k(1-r)} \frac{\omega(f, |x'-\sigma|)(1-r_1^2)}{|x'r_1-\sigma|^n} d\sigma + \int_{|x'-\sigma| < k(1-r)} \frac{\omega(f, |x'-\sigma|)(1-r^2)}{|x'r-\sigma|^n} d\sigma + \int_{|x'-\sigma| > k(1-r)} \frac{\omega(f, |x'-\sigma|)(r_1^2-r^2)}{|x'r_1-\sigma|^n} d\sigma + (1-r) \times \int_{|x'-\sigma| < k(1-r)} \omega(f, |x'-\sigma|) \left\{ \frac{1}{|r_1x'-\sigma|^n} - \frac{1}{|rx'-\sigma|^n} \right\} d\sigma \right\} = I_1 + I_2 + I_3 + I_4.$$

Оценим каждое слагаемое. В силу формулы (2)

$$I_1 \leq c\omega(f, k(1-r)) \times \int_{|x'-\sigma| > k(1-r)} \frac{1-r_1^2}{|r_1x'-\sigma|^n} d\sigma \leq \tilde{c}\omega(f, 1-r). \quad (8)$$

Аналогично получаем

$$I_2 \leq c\omega(f, 1-r). \quad (9)$$

Оценим I_3 . $I_3 \leq c(r_1-r) \int_{|x'-\sigma| > k(1-r)} \frac{\omega(f, |x'-\sigma|)}{|r_1x'-\sigma|^n} d\sigma$.

Используя тот факт, что $|x'-\sigma| > k(1-r) > k(1-r_1)$, а также неравенство треугольника $|x'-\sigma| \leq |rx'-\sigma| + |r_1x'-x'|$, получаем $|x'-\sigma| \leq |r_1x'-\sigma| + \frac{1}{k}|x'-\sigma|$. Следовательно,

$|x'-\sigma| < \frac{k}{k-1}|x'r_1-\sigma|$. Поэтому (с учетом формулы (3))

$$I_3 \leq c(r_1-r) \int_{|x'-\sigma| > k(1-r)} \frac{\omega(f, |x'-\sigma|)}{|x'-\sigma|^n} d\sigma \leq c(1-r) \int_{1-r}^2 \frac{\omega(f, t)}{t^2} dt. \quad (10)$$

В заключение проведем оценку I_4 . Ввиду оценки (4) имеем

$$I_4 \leq c(1-r)(r_1-r) \times \int_{|x'-\sigma| > k(1-r)} \frac{\omega(f, |x'-\sigma|)(|rx'-\sigma| + |r_1x'-\sigma|)^{n-1}}{|x'r-\sigma|^n |r_1x'-\sigma|^n} d\sigma \leq c(1-r)(r_1-r) \times$$

$$\int_{|x'-\sigma| > k(1-r)} \frac{\omega(f, |x'-\sigma|) \left(1 + \frac{|r_1x'-\sigma|}{|rx'-\sigma|}\right)^{n-1} |r_1x'-\sigma|}{|x'r_1-\sigma|^{n+1}} d\sigma.$$

Очевидно, что $|x'-\sigma| \leq \frac{k}{k-1}|x'r_1-\sigma|$. Тогда в силу оценок

$$|r_1x'-\sigma| \leq |rx'-\sigma| + (r_1-r) < |x'r-\sigma| + \frac{1}{k}|x'-\sigma| \leq |x'r_1-\sigma| + \frac{1}{k-1}|x'r-\sigma| = \frac{1}{k-1}|x'r-\sigma|$$

имеем

$$\frac{|x'r_1-\sigma|}{|rx'-\sigma|} < \frac{k}{k-1}. \quad (12)$$

Учитывая (12), из (11) получаем

$$I_4 \leq c(1-r)^2 \int_{|x'-\sigma| > k-rk} \frac{\omega(f, |x'-\sigma|)}{|x'r-\sigma|^{n+1}} d\sigma \leq \tilde{c}(1-r)^2 \int_{|x'-\sigma| > k(1-r)} \frac{\omega(f, |x'-\sigma|)}{|x'-\sigma|^{n+1}} d\sigma \leq \tilde{c}_1 \int_{1-r}^2 \frac{\omega(f, t)}{t^3} dt \cdot (1-r)^2.$$

Учитывая (6), (8)–(10), (13), приходим к (5).

Теорема 4. Если $f \in H_k^\varphi(S_{n-1})$, $\varphi \in \Phi_1^0$, то

$$\left| (P_r D^k f)(x') - (D^k f)(x) \right| \leq c\varphi(1-r). \quad (14)$$

Доказательство. (14) содержательно для $k=0$.

Пусть $\varphi \in \Phi_1^0$. Так как $\Phi_2^0 \subset \Phi_1^0$, то (14) следует из (5).

Теорема 4 была известна для случая $k=0$, $\varphi(t) = t^\lambda$, $0 < \lambda < 1$ [9]. Близкое к теореме 4 утверждение рассмотрено в [10], в случае $n=3$.

Литература

1. Самко С.Г. Гиперсингулярные интегралы и их приложения. Ростов н/Д.: Изд-во РГУ, 1984. 208 с.
2. Samko S.G., Kilbas A.A., Marichev O.I. Fractional Integrals and Derivatives. Theory and Applications. London; N.Y.: Gordon and Breach., Sci. Publ, 1993. 1002 p.
3. Вакулов Б.Г., Самко С.Г. Об эквивалентных нормировках в пространствах функций дробной гладкости на сфере типа $S^\lambda(S_{n-1})$, $H^\lambda(S_{n-1})$ // Изв. вузов. Математика. 1987. № 12. С. 68–71.
4. Samko S.G., Vakulov B.G. On equivalent norms in fractional order functions spaces of continuous functions on the unit sphere // Fract. Calculus and Appl. Analysis. 2000. Vol. 3, № 4. P. 401–433.
5. Гусейнов А.И., Мухтаров Х.Ш. Введение в теорию нелинейных сингулярных интегральных уравнений. М.: Наука, 1980. 307 с.
6. Бари Н.К., Стечкин С.Б. Наилучшие приближения и дифференциальные свойства двух сопряженных функций // Тр. Моск. мат. общ-ва. 1956. Т. 5. С. 483–522.
7. Вакулов Б.Г. Оператор типа потенциала на сфере в обобщенных классах Гельдера // Изв. вузов. Математика. 1986. № 11. С. 66–69.

8. Вакулов Б.Г. Сферические операторы типа потенциала в обобщенных пространствах Гёльдера с весом на сфере // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 1999. № 4. С. 5–10.

9. Plessis Du.N. Spherical fractional integrals // Trans. Amer. Math. Soc. 1975. Vol. 84, № 1. P. 262–272.

10. Джафаров А.С. Некоторые применения теории наилучших приближений функций посредством конечных сумм к изучению структурных свойств гармонических в шаре функций // Спец. вопросы функционального анализа и их применение. Баку, 1968. С. 58–96.

References

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

2. Samko S.G., Kilbas A.A., Marichev O.I. *Fractional Integrals and Derivatives. Theory and Applications*. London; New York: Gordon and Breach., Sci. Publ, 1993, 1002 p.

3. Vakulov B.G., Samko S.G. Ob ekvivalentnykh normirovokakh v prostranstvakh funktsii drobnnoi gladkosti na sfere tipa $C^\lambda(S_{n-1})$, $H^\lambda(S_{n-1})$ [On equivalent normalizations in spaces of functions of fractional smoothness on a sphere of type $C^\lambda(S_{n-1})$, $H^\lambda(S_{n-1})$]. *Izv. vuzov. Matematika*. 1987, No. 12, pp. 68-71.

4. Samko S.G., Vakulov B.G. On equivalent norms in fractional order functions spaces of continuous functions on the unit sphere. *Fract. Calculus and Appl. Analysis*. 2000, vol. 3, No. 4, pp. 401-433.

5. Guseinov A.I., Mukhtarov Kh.Sh. *Vvedenie v teoriyu nelineinykh singulyarnykh integral'nykh uravnenii* [Introduction to the theory of nonlinear singular integral equations]. Moscow: Nauka, 1980, 307 p.

6. Bari N.K., Stechkin S.B. Nailuchshie priblizheniya i differentsial'nye svoistva dvukh sopryazhennykh funktsii [Best approximations and differential properties of two conjugate functions]. *Tr. Mosk. mat. obshch-va*. 1956, vol. 5, pp. 483-522.

7. Vakulov B.G. Operator tipa potentsiala na sfere v obobshchennykh klassakh Gel'dera [The operator of potential type on a sphere in generalized Hölder classes]. *Izv. vuzov. Matematika*. 1986, No. 11, pp. 66-69.

8. Vakulov B.G. Sfericheskie operatory tipa potentsiala v obobshchennykh prostranstvakh Gel'dera s vesom na sfere [Spherical operators of potential type in generalized Hölder spaces with weight on a sphere]. *Izv. vuzov. Sev.-Kavk. region. Estestv. nauki*. 1999, No. 4, pp. 5-10.

9. Plessis Du.N. Spherical fractional integrals. *Trans. Amer. Math. Soc.* 1975, vol. 84, No. 1, pp. 262-272.

10. Dzhafarov A.S. [Some applications of the theory of best approximation of functions by means of finite sums to the study of the structure properties of harmonic functions in a ball]. *Spets. voprosy funktsional'nogo analiza i ikh primenenie* [Special questions of functional analysis and their application]. Baku, 1968, pp. 58-96.

УДК 534

DOI 10.23683/0321-3005-2017-3-1-14-20

ОБ ОДНОМ СПОСОБЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МОДУЛЯ СДВИГА ДВУСЛОЙНОЙ СРЕДЫ*

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

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

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

ON ONE METHOD OF DETERMINING THE SHEAR MODULUS OF A TWO-LAYER MEDIUM

A.O. Vatulyan^{1,2}, V.V. Dudarev^{1,2}

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

Дударев Владимир Владимирович – кандидат физико-математических наук, доцент, 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; старший научный сотрудник, Южный математический институт – филиал Владикавказского научного центра РАН, ул. Маркуса, 22, г. Владикавказ, РСО-Алания, 362027, Россия, e-mail: dudarev_vv@mail.ru

Vladimir V. Dudarev - Candidate of Physics and Mathematics, Associate Professor, Department of Elasticity Theory, Vorovich Institute of Mathematics, Mechanics and Computer Sciences, Southern Federal University, Milchakova St., 8a, Rostov-on-Don, 344090, Russia; Senior Researcher, Southern Mathematical Institute - Branch of the Vladikavkaz Scientific Center, Russian Academy of Sciences, Marcusa St., 22, Vladikavkaz, Republic of North Ossetia - Alania, 362027, Russia, e-mail: e-mail: dudarev_vv@mail.ru

Рассмотрена задача об установившихся антиплоских колебаниях неоднородного упругого слоя с жестко закрепленным основанием. Модуль сдвига является переменным по толщине. В качестве конкретного случая рассмотрен двусоставный слой. После преобразования Фурье по продольной координате решение прямой безразмерной задачи относительно трансформанты компоненты вектора смещения получено в аналитическом виде. Сформулировано трансцендентное уравнение для отыскания резонансных значений безразмерного параметра, пропорционального частоте колебаний. На основе численного решения этого уравнения построены графики изменения первых трех резонансных значений безразмерных частот для различных значений модуля сдвига и толщины слоев. Рассмотрена новая обратная задача об определении величины модуля сдвига составного слоя по данным об амплитудно-частотной характеристике, измеренной в конечном наборе точек. Предложено разложение функции трансформанты смещения по степеням безразмерной частоты колебаний в диапазоне до первого резонанса. На основе этого представления решение сформулированной обратной задачи об определении значений модуля сдвига двусоставного слоя сведено к численному исследованию системы двух алгебраических уравнений. Описаны особенности структуры этой системы. Проведены численные эксперименты по восстановлению неизвестных величин при разном количестве удерживаемых слагаемых в разложении и значений амплитудно-частотной характеристики. Дана оценка точности реконструкции при различном уровне погрешности входных данных.

Ключевые слова: антиплоские колебания, двуслойная среда, упругий слой, модуль сдвига, обратная задача, идентификация.

* Работа выполнена при поддержке гранта Президента Российской Федерации (проект МК-3179.2017.1) и программы фундаментальных исследований по стратегическим направлениям развития науки Президиума РАН № 1 «Фундаментальные проблемы математического моделирования» (114072870112), «Математическое моделирование неоднородных и многофазных структур».

The problem of steady-state antiplane vibrations of an inhomogeneous elastic layer with a rigidly fixed foundation is presented in the present paper. The shear modulus is considered to be variable in thickness. As a specific case, a two-component layer is regarded. After applying the Fourier transform with respect to the longitudinal coordinate, the solution of the direct dimensionless problem for the transformant of the displacement vector component has been obtained analytically. A transcendental equation for finding the resonant values of the dimensionless parameter proportional to the oscillations frequency is formulated. On the basis of the numerical solution of this equation, the graphs of the first three resonant values of the dimensionless frequencies for different values of the shear modulus and the layers thickness are plotted. We consider a new inverse problem on determining the value of the shear modulus of a composite layer from the amplitude-frequency characteristic data that are measured in a finite set of points. The expansion of the displacement transform function by the powers of the dimensionless oscillation frequency in the range below the first resonance is proposed. On the basis of this representation, the solution of the formulated inverse problem on determining the values of the shear modulus of the two-component layer has been reduced to the numerical investigation of a system of two algebraic equations. The features of the structure of this system are described. The numerical experiments on a restoration of the unknown quantities for different numbers of the components kept in the expansion and for different values of the amplitude-frequency characteristic have been carried out. The reconstruction accuracy is estimated at different levels of the input data error.

Keywords: antiplane vibrations, bilayer medium, elastic layer, shear modulus, inverse problem, identification.

Введение

На сегодняшний день одними из наиболее перспективных материалов, обладающих разнообразным сочетанием механических свойств, являются слоистые композиты и функционально-градиентные материалы (ФГМ). К широко распространенным композитным материалам можно отнести железобетон, сэндвич-панели, углеродное волокно, углепластик фибробетон, асбестоцемент и др. [1]. Несмотря на то что композиты имеют множество преимуществ по сравнению с однородными структурами, у них есть и ряд недостатков, которые существенно сужают область их применения [2]. Среди них можно выделить высокую вероятность появления трещин и отслоений в результате действия эксплуатационных нагрузок и больших перепадов температур, а также низкую ремонтпригодность [3]. В свою очередь, современные технологии создания ФГМ позволяют получать изделия с еще более разнообразными законами изменения механических свойств по объему и существенно более низким риском возникновения концентраторов напряжений [4]. Благодаря этим преимуществам такие материалы находят применение при решении сложных прикладных задач современной механики [5].

Важным аспектом создания ФГМ и композитов являются контроль качества и аттестация готового изделия по заданным критериям и нормам. Среди них наибольшее значение имеет проверка на соответствие полученных и требуемых законов изменения моделируемых свойств. Подобные проблемы можно отнести к обратным задачам механики деформируемого твердого тела. В настоящее время среди таких задач выделяют класс обратных коэффициентных задач, которые получили широкое применение и теоретическое развитие [6]. Следует отметить, что задачи об определении механических

параметров объекта особенно важны в авиа- и судостроении, строительной промышленности и биомеханике. В силу этого современное исследование задач идентификации неоднородных свойств слоистых композитов и ФГМ является важной практической проблемой. На первоначальном этапе основное внимание при решении этих задач уделяется исследованию моделей, учитывающих неоднородность свойств рассматриваемого объекта в определенной ориентации.

Точное определение характеристик слоистых материалов позволяет моделировать реальное поведение объектов с существенно неоднородными свойствами и тем самым расширяет возможности создания новых более перспективных и совершенных конструкций. Проблемы идентификации свойств неоднородных слоистых сред являются в общем случае нелинейными и некорректными и требуют развития новых подходов для их решения [7, 8]. На сегодняшний день уже разработаны базовые подходы к решению подобных задач, основанные на построении итерационных алгоритмов и соответствующих вычислительных схем и комплексов программ.

В настоящей работе представлены прямая и обратная задачи об определении значений упругого модуля сдвига двусоставного по толщине слоя в рамках метода акустического зондирования.

Прямая задача для слоя

Общая постановка прямой задачи об определении поля смещений u_i , полей деформаций и напряжений в декартовой системе координат для тела с поверхностью $S = S_u \cup S_\sigma$, находящегося в режиме установившихся колебаний, имеет вид [9]

$$\sigma_{ij,j} + \rho \omega^2 u_i = 0, \quad \sigma_{ij} = \lambda \theta \delta_{ij} + 2\mu \epsilon_{ij},$$

$$e_{ij} = \frac{1}{2}(u_{i,j} + u_{j,i}), \quad (1)$$

$$u_i|_{S_u} = 0, \quad \sigma_{ij}n_j|_{S_\sigma} = p_i, \quad i, j = 1..3, \quad (2)$$

где σ_{ij} – компоненты тензора напряжений Коши; ρ – плотность материала; ω – частота установившихся колебаний; λ, μ – параметры Ляме; n_j – компоненты единичного вектора внешней нормали к поверхности S ; e_{ij} – компоненты тензора деформаций; $\theta = e_{11} + e_{22} + e_{33}$ – след тензора деформаций.

Используя постановку (1), (2), рассмотрим установившиеся антиплоские колебания упругого изотропного слоя толщиной h . Нижняя грань слоя жестко закреплена, на верхней границе приложена сосредоточенная периодическая нагрузка с амплитудой p . Будем считать, что модуль сдвига μ является функцией, изменяющейся по толщине слоя. С учетом выбранной ориентации системы координат ненулевой компонентой вектора смещения является компонента $u_1 = u_1(x_1, x_3)$. Тогда постановка задачи для слоя примет вид

$$\begin{cases} \mu u_{1,22} + (\mu u_{1,3})_{,3} + \rho \omega^2 u_1 = 0, \\ u_1(x_2, 0) = 0, \\ \mu(x_3) u_{1,3}(x_2, x_3)|_{x_3=h} = p \delta(x_2). \end{cases} \quad (3)$$

Из (3) видно, что уравнение колебаний есть дифференциальное уравнение второго порядка с переменными коэффициентами относительно компоненты u_1 . Для исследования рассматриваемой задачи применим интегральное преобразование Фурье по продольной координате x_2 :

$$\begin{cases} -\alpha^2 \mu(x_3) \tilde{u}_1(\alpha, x_3) + (\mu(x_3) \tilde{u}_1'(\alpha, x_3))' + \rho \omega^2 \tilde{u}_1(\alpha, x_3) = 0, \\ \tilde{u}_1(\alpha, 0) = 0, \\ \mu(h) \tilde{u}_1'(\alpha, h) = p, \end{cases} \quad (4)$$

здесь $\tilde{u}_1(\alpha, x_3)$ – трансформанта, штрихом обозначена производная по координате x_3 . Для простоты дальнейшего анализа решения положим в задаче (4) $\alpha = 0$, что соответствует осреднению по координате x_2 :

$$\begin{cases} (\mu(x_3) \tilde{u}_1'(x_3))' + \rho \omega^2 \tilde{u}_1(x_3) = 0, \\ \tilde{u}_1(0) = 0, \\ \mu(h) \tilde{u}_1'(h) = p. \end{cases} \quad (5)$$

Далее введем безразмерные параметры и функции: $\tilde{u}_1(x_3) = hu(\xi)$, $\mu(x_3) = \mu_0 g(\xi)$,

$$\xi = x_3 / h \in [0, 1], \quad \kappa^2 = h^2 \rho \omega^2 / \mu_0, \quad p^* = p / \mu_0.$$

Учитывая линейность задачи, положим $p^* = 1$,

тогда постановка (5) примет вид, аналогичный задаче для стержня

$$\begin{cases} (g(\xi)u'(\xi))' + \kappa^2 u(\xi) = 0, \\ u(0) = 0, \\ g(1)u'(1) = 1. \end{cases} \quad (6)$$

В общем случае неоднородности модуля сдвига по координате x_3 прямая задача об определении функции $u(\xi)$ (6) может быть решена численно, например, путем сведения к интегральному уравнению Фредгольма 2-го рода и последующего применения метода коллокаций [6, 10], либо после перехода к системе двух дифференциальных уравнений 1-го порядка с помощью метода стрельбы [10]. Полученные численные решения показали существенное влияние вида и структуры закона $g(\xi)$ на изменение амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) $u(1, \kappa)$ в окрестности значений параметра κ , пропорциональных первым трем резонансным частотам.

В случае двусоставного слоя (рис. 1), т.е. когда слой состоит из двух однородных частей с точкой раздела ξ_0 , отличающихся значениями параметра μ , $g(\xi)$ может быть представлена в виде кусочно-постоянной функции:

$$g(\xi) = \begin{cases} g_1, \xi \in [0, \xi_0), \\ g_2, \xi \in [\xi_0, 1], \end{cases} \quad (7)$$

где g_1 – безразмерный модуль сдвига нижней части, g_2 – верхней.

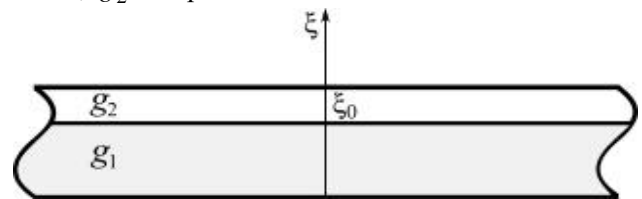


Рис. 1. Двусоставной слой / Fig. 1. Two-part layer

В этом случае решение прямой задачи может быть представлено в аналитическом виде

$$u(\xi) = \begin{cases} C \sin \beta_1 \xi + D \cos \beta_1 \xi, \xi \in [0, \xi_0), \\ A \sin \beta_2 \xi + B \cos \beta_2 \xi, \xi \in [\xi_0, 1], \end{cases} \quad (8)$$

где $\beta_1 = \kappa / \sqrt{g_1}$; $\beta_2 = \kappa / \sqrt{g_2}$; A, B, C, D – постоянные, которые определяются из решения системы алгебраических уравнений, построенной по двум граничным условиям из (6) и двум условиям непрерывности функции смещения и напряжений в точке $\xi = \xi_0$:

$$A = - \frac{\sqrt{k} \cos(\beta_2 \xi_0) \cos(\beta_1 \xi_0) + \sin(\beta_2 \xi_0) \sin(\beta_1 \xi_0)}{g_2 \beta_2 \Delta},$$

$$B = -\frac{\sqrt{k} \cos(\beta_1 \xi_0) \sin(\beta_2 \xi_0) - \cos(\beta_2 \xi_0) \sin(\beta_1 \xi_0)}{g_2 \beta_2 \Delta},$$

$$C = -\frac{1}{g_2 \beta_2 \Delta}, \quad D = 0,$$

$$\Delta = -\sqrt{k} \cos(\beta_1 \xi_0) \cos(\beta_2 (\xi_0 - 1)) + \sin(\beta_1 \xi_0) \sin(\beta_2 (1 - \xi_0)), \quad (9)$$

где $k = g_1 / g_2$. Отметим, что формулы (9) могут быть использованы для отыскания резонансных значений параметра k из уравнения

$$\Delta(k) = 0. \quad (10)$$

На рис. 2 приведен график зависимости 1-го резонансного значения параметра k от значений параметров ξ_0 и k .

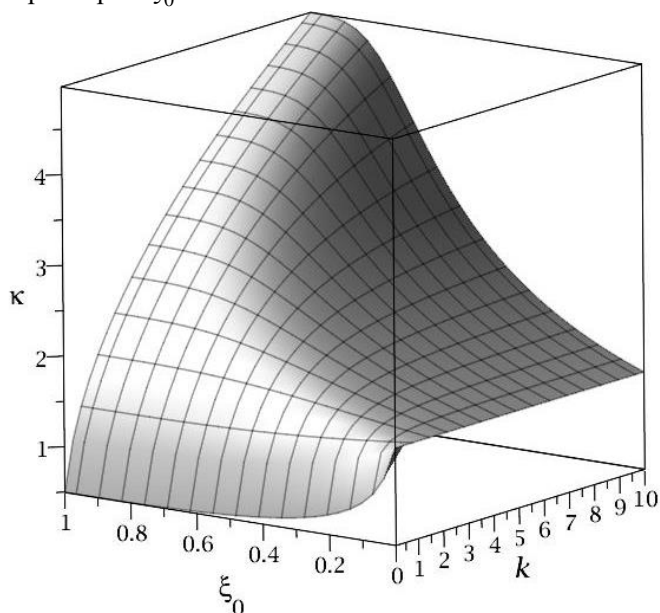


Рис. 2. График изменения первого резонансного значения k / Fig. 2. Graph of the first resonance value k

Аналогичный график построен для 2-го резонансного значения k (рис. 3). Отметим, что здесь есть диапазон изменения параметров (ξ_0, k) , которые несущественно влияют на изменение значения второй резонансной частоты (пологий участок на поверхности). Для графика, соответствующего 3-му резонансному значению k , выявлено уже два таких диапазона (рис. 4).

Таким образом, из приведенных графиков можно сделать вывод, что, зная значение параметра k , соответствующего только одной резонансной частоте, однозначно определить значения параметров ξ_0 , g_1 и g_2 нельзя, так как одному значению параметра k соответствует множество сочетаний параметров ξ_0 , g_1 и g_2 . Из-за выявленных осо-

бенностей реконструкцию этих параметров рекомендуется проводить в частотном диапазоне до 1-го резонанса.

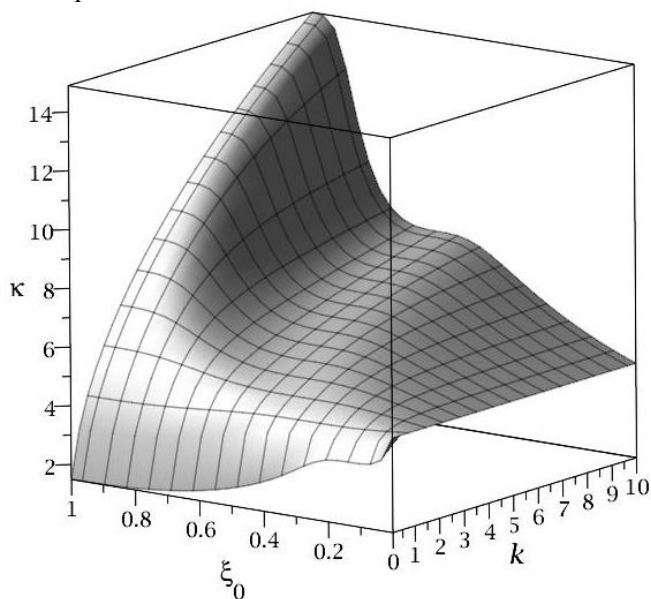


Рис. 3. График изменения второго резонансного значения k / Fig. 3. Graph of the second resonance value k

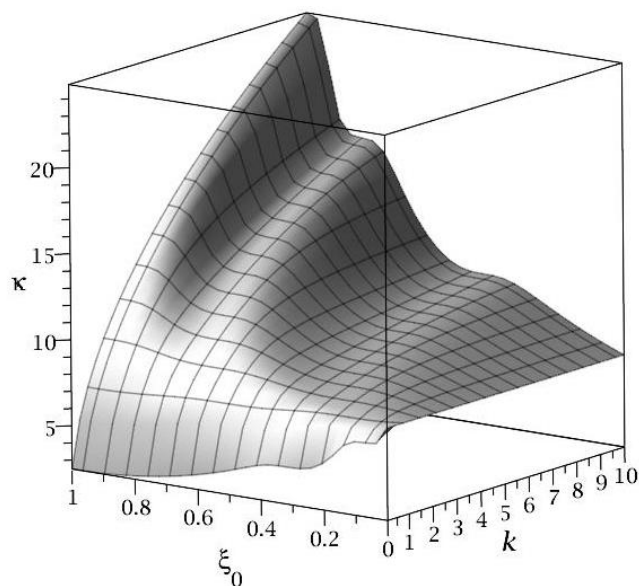


Рис. 4. График изменения третьего резонансного значения k / Fig. 4. Graph of the third resonance value k

Обратная задача

Рассмотрим обратную задачу для двусоставного слоя о восстановлении значений параметров ξ_0 , g_1 и g_2 по дополнительным данным о 3 первых резонансных значениях параметра k (k_1, k_2, k_3). В рамках этой постановки решение может быть получено на основе частотного уравнения (10), которое рас-

считается как уравнение относительно искомых параметров при фиксированном значении κ . Таким образом, имеем систему из трех трансцендентных уравнений

$$\begin{cases} \Delta_1 = -\sqrt{k} \cos(\beta_{11}\xi_0) \cos(\beta_{21}(\xi_0 - 1)) + \\ \quad + \sin(\beta_{11}\xi_0) \sin(\beta_{21}(1 - \xi_0)) = 0, \\ \Delta_2 = -\sqrt{k} \cos(\beta_{12}\xi_0) \cos(\beta_{22}(\xi_0 - 1)) + \\ \quad + \sin(\beta_{12}\xi_0) \sin(\beta_{22}(1 - \xi_0)) = 0, \\ \Delta_3 = -\sqrt{k} \cos(\beta_{13}\xi_0) \cos(\beta_{23}(\xi_0 - 1)) + \\ \quad + \sin(\beta_{13}\xi_0) \sin(\beta_{23}(1 - \xi_0)) = 0, \end{cases} \quad (11)$$

где $\beta_{1i} = \kappa_i / \sqrt{g_1}$, $\beta_{2i} = \kappa_i / \sqrt{g_2}$, $i = 1..3$. В табл. 1 приведён пример решения этой системы при точных входных данных о значениях κ_i .

Таблица 1

Пример реконструкции значений параметров ξ_0 , g_1 , g_2
 / Example of reconstruction of parameters ξ_0 , g_1 and g_2

κ_i	Точные	Восстановленные
$\kappa_1 = 1,01666$	$\xi_0 = 0,5$	$\xi_0 = 0,499$
$\kappa_2 = 2,68937$	$g_1 = 0,5$	$g_1 = 0,5$
$\kappa_3 = 4,62239$	$g_2 = 0,25$	$g_2 = 0,249$

Рассмотрим другую постановку обратной задачи, в которой в качестве дополнительной информации считается известным значение АЧХ $u(1, \kappa)$ в конечном наборе точек κ_i , расположенных до первого резонанса

$$\begin{cases} s'(\xi) = -\kappa^2 u(\xi), \\ u'(\xi) = G(\xi) s(\xi), \\ u(0) = 0, \\ s(1) = 1, \end{cases} \quad (12)$$

$$u(1, \kappa_i) = f(\kappa_i), \quad \kappa_i \in [\kappa^-, \kappa^+], \quad (13)$$

где для удобства введена новая функция $G(\xi) = 1/g(\xi)$. Решение сформулированной задачи осуществим с использованием метода разложения по степеням $\gamma = \kappa^2$ функций $u(\xi, \kappa)$ и $s(\xi, \kappa)$, справедливого до первого резонанса:

$$\begin{cases} u(\xi, \kappa) = \sum_{j=0}^{\infty} \gamma^j u_j(\xi), \\ s(\xi, \kappa) = \sum_{j=0}^{\infty} \gamma^j s_j(\xi). \end{cases} \quad (14)$$

Подставив эти представления в (12), получим

$$\begin{cases} \sum_{j=0}^{\infty} \gamma^j s'_j = -\gamma \sum_{j=0}^{\infty} \gamma^j u_j, \\ \sum_{j=0}^{\infty} \gamma^j u'_j = G \sum_{j=0}^{\infty} \gamma^j s_j, \\ \sum_{j=0}^{\infty} \gamma^j u_j(0) = 0, \\ \sum_{j=0}^{\infty} \gamma^j s_j(1) = 1. \end{cases} \quad (15)$$

Сформулируем задачи при одинаковых степенях γ и их решения:

$$j=0, \begin{cases} s'_0 = 0, \\ u'_0 = Gs_0, \\ u_0(0) = 0, \\ s_0(1) = 1, \end{cases} \begin{cases} s_0(\xi) = 1, \\ u_0(\xi) = \int_0^\xi G(\xi) d\xi, \\ 0 \end{cases}$$

$$j=1, \begin{cases} s'_1 = -u_0, \\ u'_1 = Gs_1, \\ u_1(0) = 0, \\ s_1(1) = 0, \end{cases} \begin{cases} s_1(\xi) = \int_0^\xi u_0(\xi) d\xi, \\ \xi \\ u_1(\xi) = \int_0^\xi G(\xi) s_1(\xi) d\xi, \\ 0 \end{cases}$$

...

$$j=n, \begin{cases} s'_n = -u_{n-1}, \\ u'_n = Gs_n, \\ u_n(0) = 0, \\ s_n(1) = 0, \end{cases} \begin{cases} s_n(\xi) = \int_0^\xi u_{n-1}(\xi) d\xi, \\ \xi \\ u_n(\xi) = \int_0^\xi G(\xi) s_n(\xi) d\xi. \\ 0 \end{cases}$$

Отметим, что, начиная с $j = 1$, все задачи одно-типны, а решение каждой последующей может быть получено из решения предыдущей. Таким образом, с помощью предложенного разложения можно аппроксимировать функцию $u(\xi, \kappa)$ до первого резонанса, оставляя в (14) конечное число n слагаемых. Проведенные численные сравнения АЧХ $u(1, \kappa)$, соответствующей аналитическому решению (8), и АЧХ, полученной на основе представления (14), показали, что точность такой аппроксимации существенно снижается с приближением к резонансу, а в окрестности нуля зависит от конкретных значений параметров ξ_0 , g_1 , g_2 и количества n удерживаемых слагаемых.

Перейдем к решению рассматриваемой обратной задачи по известной дополнительной информации об АЧХ, считая известной точку раздела ξ_0 . Для этого на основе приближения функции АЧХ

разложением вида (14) с n слагаемыми составим два уравнения, соответствующих двум фиксированным значениям параметра κ из диапазона, расположенного до первого резонанса.

$$\begin{cases} u(1, \kappa_1) = \sum_{j=0}^n \kappa_1^{2j} u_j(1) \approx f(\kappa_1), \\ u(1, \kappa_2) = \sum_{j=0}^n \kappa_2^{2j} u_j(1) \approx f(\kappa_2). \end{cases} \quad (16)$$

Представленные уравнения являются алгебраическими относительно искомых параметров $G_1 = 1/g_1$ и $G_2 = 1/g_2$. Для наглядности выпишем в качестве примера вид первого уравнения этой системы при различном количестве удерживаемых слагаемых в разложении:

$$\begin{aligned} u(1, \kappa) &= u_0(1) = G_1 \xi_0 + (1 - \xi_0) G_2 \quad \text{при } n=0, \\ u(1, \kappa) &= u_0(1) + \kappa^2 u_1(1) = \\ &= G_1 \xi_0 + (1 - \xi_0) G_2 + \kappa^2 \left(\left(-\frac{2}{3} \xi_0 + 1 \right) \xi_0^2 G_1^2 + \right. \\ &\left. + G_1 G_2 \xi_0 (1 - \xi_0)^2 + \frac{1}{3} (1 - \xi_0)^3 G_2^2 \right) \quad \text{при } n=1. \end{aligned}$$

Отметим следующие особенности структуры компонент $u_n(1, \kappa)$: $u_0(1, \kappa)$ – линейная форма относительно G_1, G_2 с коэффициентами, линейно зависящими от ξ_0 ; $u_1(1, \kappa)$ – квадратичная форма относительно G_1, G_2 с коэффициентами в виде полиномов третьей степени от ξ_0 .

В табл. 2 приведены примеры реконструкции параметров G_1, G_2 при заданной АЧХ в двух точках: $f(0,02) = 2,60234$, $f(0,04) = 2,60438$ и разном количестве удерживаемых слагаемых в (16) с указанием относительной погрешности δ . В таблице 3 приведены также примеры реконструкции других значений G_1, G_2 и параметра ξ_0 при заданной АЧХ $f(0,3) = 5,11747$, $f(0,5) = 6,50664$.

Таблица 2

Реконструкция параметров G_1, G_2 при $\xi_0 = 0,7$ /
 Reconstruction of parameters G_1, G_2 when $\xi_0 = 0,7$

	Точные значения	Восстановленные значения			
		$n=2$	$\delta, \%$	$n=3$	$\delta, \%$
G_1	2	2,00443	0,2	2,00108	0,05
G_2	4	3,99520	0,1	4,00302	0,08

Таблица 3

Реконструкция параметров G_1, G_2 при $\xi_0 = 0,6$ /
 Reconstruction of parameters G_1, G_2 when $\xi_0 = 0,6$

	Точные значения	Восстановленные значения			
		$n=3$	$\delta, \%$	$n=5$	$\delta, \%$
G_1	3	3,67154	22,1	3,15203	5,06
G_2	7	5,82784	16,7	7,38764	5,53

Проведенный анализ результатов численных экспериментов по реконструкции G_1, G_2 показал, что предложенный подход наиболее эффективен при малых значениях параметра κ и при удержании трех и более слагаемых в разложении (14). Единственность решения нелинейной системы (16) обеспечивается условиями положительности и ограниченности параметров G_1, G_2 . Следует отметить существенное влияние уровня погрешности входных данных АЧХ на точность реконструкции. Например, уровень погрешности более 2 % может привести к ситуации, когда система (16) становится несовместной.

Заключение

Рассмотрена прямая задача об определении трансформанты компоненты поперечного смещения двусоставного слоя, жестко закрепленного у основания. На основе полученного безразмерного аналитического решения построены графики изменения первых трех резонансных значений параметра κ для различных значений модуля сдвига и толщины слоев. Отмечены особенности построенных поверхностей значений параметра κ . Сформулирована обратная задача об определении величины модуля сдвига двусоставного слоя по данным об АЧХ, измеренной в двух точках. На основе разложения (14) с сохранением n слагаемых решение задачи сведено к анализу алгебраической системы двух уравнений относительно двух неизвестных параметров G_1, G_2 , характеризующих модуль сдвига составных частей слоя. Описаны особенности структуры разложения в зависимости от величины n . Проведены численные эксперименты по реконструкции G_1 и G_2 при различных значениях n и АЧХ, измеренной до первого резонанса. Дана оценка точности полученных результатов и влияния погрешности входных данных на результат реконструкции.

Литература

1. Аверченко Г.А., Квитко А.В. Композитный материал – нераскрытый материал индустриализации // Современная наука: актуальные проблемы и пути их решения. 2015. № 2 (15). С. 30–32.
2. Кристенсен Р. Введение в механику композитов. М.: Мир, 1982. 334 с.
3. Гуменюк Н.С., Грушин С.С. Применение композитных материалов в судостроении // Современные наукоемкие технологии. 2013. № 8-1. С. 116–117.
4. Селяев В.П., Низина Т.А. Разработка и применение функционально-градиентных покрытий для усиления и защиты железобетонных конструкций // Вестн. Томского гос. архитектурно-строительного ун-та. 2008. № 3. С. 143–148.
5. Степаненко Д.А., Минченя В.Т. Методика расчета и возможные применения функционально-градиентных ультразвуковых волноводов // Механика машин, механизмов и материалов. 2013. № 2 (23). С. 19–23.
6. Ватульян А.О. Обратные задачи в механике деформируемого твердого тела. М.: Физматлит, 2007. 224 с.
7. Ватульян А.О., Явруян О.В., Богачев И.В. Идентификация упругих характеристик неоднородного по толщине слоя // Акуст. журн. 2011. Т. 57, № 6. С. 723–730.
8. Ватульян А.О., Явруян О.В., Богачев И.В. Идентификация неоднородных свойств ортотропного упругого слоя // Акуст. журн. 2013. Т. 59, № 6. С. 752–758.
9. Лурье А.И. Теория упругости. М.: Наука, 1970. 940 с.
10. Калиткин Н.Н. Численные методы. СПб.: БХВ-Петербург, 2011. 592 с.

References

1. Averchenko G.A., Kvitko A.V. Kompozitnyi material - neraskrytyi material industrializatsii [Composite

material - undisclosed material of industrialization]. *Sovremennaya nauka: aktual'nye problemy i puti ikh resheniya*. 2015, No. 2 (15), pp. 30-32.

2. Kristensen R. *Vvedenie v mekhaniku kompozitov* [Introduction to composite mechanics]. Moscow: Mir, 1982, 334 p.

3. Gumenyuk N.S., Grushin S.S. *Primenenie kompozitnykh materialov v sudostroenii* [Application of composite materials in shipbuilding]. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii*. 2013, No. 8-1, pp. 116-117.

4. Selyaev V.P., Nizina T.A. *Razrabotka i primeneniye funktsional'no-gradientnykh pokrytii dlya usileniya i zashchity zhelezobetonnykh konstruksii* [Development and application of functional gradient coatings for reinforcement and protection of reinforced concrete structures]. *Vestn. Tomskogo gos. arkhitekturno-stroitel'nogo un-ta*. 2008, No. 3, pp. 143-148.

5. Stepanenko D.A., Minchenya V.T. *Metodika rascheta i vozmozhnye primeneniya funktsional'no-gradientnykh ul'trazvukovykh volnovodov* [Calculation technique and possible applications of functionally gradient ultrasonic waveguides]. *Mekhanika mashin, mekhanizmov i materialov*. 2013, No. 2 (23), pp. 19-23.

6. Vatulyan A.O. *Obratnye zadachi v mekhanike deformiruemogo tverdogo tela* [Inverse problems in the mechanics of a deformable solid]. Moscow: Fizmatlit, 2007, 224 p.

7. Vatulyan A.O., Yavruyan O.V., Bogachev I.V. *Identifikatsiya uprugikh kharakteristik neodnorodnogo po tolshchine sloya* [Identification of the elastic characteristics of a layer inhomogeneous in thickness]. *Akust. zhurn*. 2011, vol. 57, No. 6, pp. 723-730.

8. Vatulyan A.O., Yavruyan O.V., Bogachev I.V. *Identifikatsiya neodnorodnykh svoistv ortotropnogo uprugogo sloya* [Identification of the inhomogeneous properties of an orthotropic elastic layer]. *Akust. zhurn*. 2013, vol. 59, No. 6, pp. 752-758.

9. Lur'e A.I. *Teoriya uprugosti* [Theory of elasticity]. Moscow: Nauka, 1970, 940 p.

10. Kalitkin N.N. *Chislennye metody* [Numerical methods]. Saint Petersburg: BKhV-Peterburg, 2011, 592 p.

УДК 517.9

DOI 10.23683/0321-3005-2017-3-1-21-27

ОБ ОГРАНИЧЕННОСТИ ИНТЕГРАЛЬНЫХ ОПЕРАТОРОВ С ОДНОРОДНЫМИ ЯДРАМИ НА ГРУППЕ ГЕЙЗЕНБЕРГА С НОРМОЙ КОРАНЬИ

© 2017 г. В.В. Денисенко¹, В.М. Деундяк¹

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

ON THE BOUNDEDNESS OF INTEGRAL OPERATORS WITH HOMOGENEOUS KERNELS ON THE HEISENBERG GROUP WITH KORANYI NORM

V.V. Denisenko¹, V.M. Deundyak¹

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

Денисенко Виктор Владимирович – аспирант, кафедра алгебры и дискретной математики, Институт математики, механики и компьютерных наук имени И.И. Воровича, Южный федеральный университет, ул. Мильчакова, 8а, г. Ростов-на-Дону, 344090, Россия, e-mail: ru.victa@gmail.com

Victor V. Denisenko – Postgraduate, Department of Algebra and Discrete Mathematics, Vorovich Institute of Mathematics, Mechanics and Computer Science, Southern Federal University, Milchakova St., 8a, Rostov-on-Don, 344090, Russia, e-mail: ru.victa@gmail.com

Деундяк Владимир Михайлович – кандидат физико-математических наук, доцент, кафедра алгебры и дискретной математики, Институт математики, механики и компьютерных наук имени И.И. Воровича, Южный федеральный университет, ул. Мильчакова, 8а, г. Ростов-на-Дону, 344090, e-mail: vlade@math.sfedu.ru

Vladimir M. Deundyak – Candidate of Physics and Mathematics, Associate Professor, Department of Algebra and Discrete Mathematics, Vorovich Institute of Mathematics, Mechanics and Computer Science, Southern Federal University, Milchakova St., 8a, Rostov-on-Don, 344090, Russia, e-mail: vlade@math.sfedu.ru

Изучение интегральных операторов с однородными ядрами в L_p -пространстве на группе \mathbf{R}^n начато Михайловым и продолжалось в ряде работ других авторов, в которых рассматривались вопросы ограниченности, фредгольмовости, вычисления индекса, применимости проекционных методов решения соответствующих операторных уравнений. В связи с развитием некоммутативного гармонического анализа и его применением в различных областях науки и техники актуальным является распространение теории операторов с однородными ядрами с группы \mathbf{R}^n на некоммутативные группы. Одним из наиболее важных и востребованных примеров некоммутативных групп является группа Гейзенберга. В настоящей работе в пространстве $L_p(\mathbf{H}_n)$, где \mathbf{H}_n – группа Гейзенберга, $1 < p < \infty$, строится и исследуется новый класс линейных интегральных операторов с однородными ядрами.

Ограниченность многомерных интегральных операторов с однородными ядрами в пространстве $L_p(\mathbf{R}^n)$ исследована Н.К. Карпетянцем (1981). В настоящей работе получены как необходимые, так и достаточные условия ограниченности и регулярности операторов с однородными ядрами в пространстве $L_p(\mathbf{H}_n)$.

На группе Гейзенберга рассматриваются норма Кораньи, оператор растяжения α_δ , где $\delta \in \mathbf{R}_+$, и их свойства. Для интегрального оператора K_K с однородным степени $(-2n-2)$ ядром K по ядру и некоторой полумультимпликативной функции ξ определяются две вспомогательные функции ω_1, ω_2 на единичной сфере \mathbf{S}_n группы \mathbf{H}_n с нормой Кораньи и доказывается, что если $\omega_1(\sigma), \omega_2(\sigma) \in L_\infty(\mathbf{S}_n)$, то оператор K_K ограничен и регулярен в пространстве $L_p(\mathbf{H}_n)$. Для оператора K_K доказывается также необходимое условие ограниченности и регулярности: $\chi_1(\sigma), \chi_2(\sigma) \in L_1(\mathbf{S}_n)$, где функции $\chi_1(\sigma), \chi_2(\sigma)$ определяются ядром K .

Ключевые слова: группа Гейзенберга, линейные интегральные операторы, интегральные операторы с однородными ядрами, ограниченность линейных интегральных операторов.

The first studies on the problem of integral operators with homogeneous kernels in the space $L_p(\mathbf{H}_n)$ were made by L.G. Mikhailov. The problems of boundedness, Fredholm property, and calculation of the index of the integral operators with

homogeneous kernels in the space $L_p(\mathbf{R}^n)$ as well as the problem of the applicability of projection methods for solving the operator equations have been widely studied by many researchers such as N.K. Karapetyants, S.G. Samko, O.G. Avsyankin and others. Non-commutative harmonic analysis is widely used in various fields of science and technology and it is important to extend the theory of operators with homogeneous kernels from a \mathbf{R}^n group to non-commutative groups. The Heisenberg group is the most important and well-known example of a non-commutative group. In the present paper, a new class of linear integral operators with homogeneous kernels in the space $L_p(\mathbf{H}_n)$ is studied, where \mathbf{H}_n is the Heisenberg group, $1 < p < \infty$.

The problem of boundedness of multidimensional integral operators with homogeneous kernels in space $L_p(\mathbf{R}^n)$ was investigated by N.K. Karapetyants in 1981. The necessary and sufficient conditions for the boundedness and regularity of operators with homogeneous kernels in the space $L_p(\mathbf{H}_n)$ are obtained in the present paper.

The notion of the Koranyi norm and the notion of the dilation α_δ , where $\delta \in \mathbf{R}_+$, on the Heisenberg group are introduced as well as their properties are discussed. For an integral operator K_κ with a homogeneous $(-2n-2)$ degree kernel κ the sufficient conditions for boundedness are obtained: if $\omega_1(\sigma), \omega_2(\sigma) \in L_\infty(\mathbf{S}_n)$, then the operator K_κ is bounded and regular in space $L_p(\mathbf{H}_n)$, where functions ω_1, ω_2 are defined on the unit sphere \mathbf{S}_n of the group \mathbf{H}_n and determined by the kernel κ and a certain semi-multiplicative function ζ . For the operator K_κ the necessary conditions for boundedness and regularity are also obtained: $\chi_1(\sigma), \chi_2(\sigma) \in L_1(\mathbf{S}_n)$, where the functions $\chi_1(\sigma), \chi_2(\sigma)$ are determined by the kernel κ .

Keywords: Heisenberg group, linear integral operators, integral operators with homogeneous kernels, boundedness of linear integral operators.

Введение

Изучение интегральных операторов с однородными ядрами в L_p -пространстве на группе \mathbf{R}^n начато Л.Г. Михайловым и продолжилось в работах Н.К. Карапетянца, С.Г. Самко, О.Г. Авсянкина и других авторов ([1–3] и цитированные там источники). В этих работах рассматривались вопросы ограниченности, фредгольмовости, вычисления индекса и применимости проекционных методов решения операторных уравнений. В связи с развитием в последнее время некоммутативного гармонического анализа и его применением в различных областях науки и техники [4] представляется актуальным распространить теорию операторов с однородными ядрами с группы \mathbf{R}^n на некоммутативные группы. В настоящей статье вводятся интегральные операторы с однородными ядрами на группе Гейзенберга.

Ограниченность многомерных интегральных операторов с однородными ядрами в L_p -пространстве на группе \mathbf{R}^n исследована в работе Н.К. Карапетянца [5]. Целью настоящей статьи является перенос результатов Н.К. Карапетянца на группу Гейзенберга, а именно получение как необходимых, так и достаточных условий ограниченности интегральных операторов с однородными ядрами в пространстве $L_p(\mathbf{H}_n)$, где \mathbf{H}_n – n -мерная группа Гейзенберга.

Интегральные операторы с однородными ядрами на группе Гейзенберга

Прежде всего, приведем необходимые сведения о группе Гейзенберга (см., например, [6, с. 209–212]). Пусть \mathbf{C}^n – n -мерное унитарное пространство со скалярным произведением

$$z \cdot w = \sum_{k=1}^n z_k \cdot \bar{w}_k \quad \text{и нормой} \quad |z| = \left(\sum_{k=1}^n |z_k|^2 \right)^{\frac{1}{2}}, \quad \text{где}$$

$z = (z_1, \dots, z_n), \quad w = (w_1, \dots, w_n) \in \mathbf{C}^n$. Пусть \mathbf{R} – группа вещественных чисел. Группой Гейзенберга называется множество $\mathbf{H}_n = \mathbf{C}^n \times \mathbf{R}$ с бинарной операцией $(z, a)(w, b) = (z + w, a + b + 2\text{Im}(z \cdot w))$, где $(z, a), (w, b) \in \mathbf{H}_n$. Отметим, что в некоторых источниках групповая операция может определяться иначе (см. например, [7, с. 13]). Нейтральный элемент группы имеет вид $e = (0, 0)$, обратный вычисляется по формуле $(z, a)^{-1} = (-z, -a)$.

Пусть \mathbf{R}_+ – группа положительных чисел с операцией умножения. Для любого $\delta \in \mathbf{R}_+$ существует автоморфизм $\alpha_\delta: \mathbf{H}_n \rightarrow \mathbf{H}_n$, называемый растяжением $\alpha_\delta(z, a) = (\delta z, \delta^2 a)$, где $(z, a) \in \mathbf{H}_n$. Отметим, что группа автоморфизмов $\{\alpha_\delta\}_{\delta \in \mathbf{R}_+}$ с операцией композиции изоморфна группе \mathbf{R}_+ , при

этом $\alpha_\delta^{-1} = \alpha_{1/\delta}$. Группа \mathbf{H}_n может быть снабжена нормой Кораньи $\|(z, a)\| = (|z|^4 + a^2)^{1/4}$, которая удовлетворяет условию однородности

$$\|\alpha_\delta(h)\| = \delta\|h\|, \quad (1)$$

где $h=(z, a) \in \mathbf{H}_n$.

Норма Кораньи позволяет определить на группе Гейзенберга единичную сферу $\mathbf{S}_n = \{h \in \mathbf{H}_n : \|h\| = 1\}$ и единичный шар $\mathbf{B}_n = \{h \in \mathbf{H}_n : \|h\| \leq 1\}$ с центром в точке $(0,0) \in \mathbf{H}_n$. Введём сферическую систему координат на группе Гейзенберга. Пусть $h=(z, a) \in \mathbf{H}_n$, $h \neq 0$ и $r = \|(z, a)\|$. Тогда $(z, a) = \alpha_r(\zeta, \eta) = (r\zeta, r^2\eta)$, где $\theta = (\zeta, \eta)$ – некоторая однозначно определяемая по $h=(z, a)$ точка сферы \mathbf{S}_n . Соотношение $(z, a) \mapsto (\theta, r)$ определяет на группе Гейзенберга преобразование декартовых координат в сферические. Якобиан этого преобразования координат $|J| = r^{2n+1}$.

Стандартная мера Лебега на группе \mathbf{R}^{2n+1} задает бинвариантную меру Хаара на группе Гейзенберга \mathbf{H}_n [6, с. 192]. Ниже будем рассматривать лебеговы банаховы пространства $L_p(\mathbf{H}_n)$, $1 \leq p < \infty$, и $L_\infty(\mathbf{H}_n)$.

Функция $\kappa : \mathbf{H}_n \times \mathbf{H}_n \rightarrow \mathbf{C}$ называется однородной степени $m \in \mathbf{R}$, если для любых $\delta \in \mathbf{R}_+$ и $h, g \in \mathbf{H}_n$ выполняется условие

$$\kappa(\alpha_\delta(h), \alpha_\delta(g)) = \delta^m \kappa(h, g) \quad (2)$$

[6, с. 215]. Отметим, что понятие однородности для функций, определенных на группе \mathbf{H}_n , отличается от понятия квазиоднородности для функций, определенных на группе \mathbf{R}^{2n+1} [5].

Целью настоящей статьи является изучение в пространстве $L_p(\mathbf{H}_n)$ линейных интегральных операторов с однородными ядрами, т.е. интегральных операторов вида

$$(K_\kappa f)(h) = \int_{\mathbf{H}_n} \kappa(h, g) f(g) dg, \quad (3)$$

где ядро κ является измеримой однородной функцией степени $-2n-2$.

Достаточные условия ограниченности

Пусть p, p' – вещественные числа, $1 < p, p' < \infty, 1/p + 1/p' = 1$. Напомним, что интегральный оператор $T_u : L_p(X, \mu) \rightarrow L_p(Y, \nu)$ с ядром $u(s, t)$

называется регулярным, если интегральный оператор $(T_u f)(s) = \int_X |u(s, t)| f(t) d\mu(t)$ определен на всем $L_p(X, \mu)$ и действует в $L_p(Y, \nu)$ [8, с. 46].

Функция $\xi : \mathbf{R}_+ \rightarrow \mathbf{R}_+$ на мультипликативной группе \mathbf{R}_+ называется полумультипликативной, если для любых $a, b \in \mathbf{R}_+$ выполняется условие

$$\xi(ab) \leq \xi(a)\xi(b). \quad (4)$$

Теорема 1. Рассмотрим оператор K_κ вида (3) с однородным ядром κ . Если найдется такая измеримая полумультипликативная функция $\xi : \mathbf{R}_+ \rightarrow \mathbf{R}_+$, что

$$\omega_1(\sigma) = \int_{\mathbf{H}_n} |\kappa(\sigma, g)| \xi^{1/p}(\|g\|) dg \in L_\infty(\mathbf{S}_n), \quad (5)$$

$$\omega_2(\theta) = \int_{\mathbf{H}_n} |\kappa(h, \theta)| \xi^{1/p'}(\|h\|) dh \in L_\infty(\mathbf{S}_n), \quad (6)$$

то оператор K_κ ограничен и регулярен в $L_p(\mathbf{H}_n)$.

Для доказательства теоремы 1 нам понадобится [8, теорема 4.8]. Приведем формулировку этой теоремы применительно к операторам, действующим в пространствах $L_p(\mathbf{H}_n)$.

Теорема 2. Пусть $v : \mathbf{H}_n \times \mathbf{H}_n \rightarrow \mathbf{C}$ – произвольная измеримая функция. Для того чтобы определяемый равенством $(T_v f)(h) = \int_{\mathbf{H}_n} v(h, g) f(g) dg$

линейный интегральный оператор был ограничен и регулярен в $L_p(\mathbf{H}_n)$, необходимо и достаточно, чтобы существовали измеримые функции $\varphi, \psi : \mathbf{H}_n \rightarrow \mathbf{R}_+$ такие, что

$$\chi_1(s) = \psi^{p'}(s) \int_{\mathbf{H}_n} |v(s, t)| \varphi(t) dt \in L_\infty(\mathbf{H}_n), \quad (7)$$

$$\chi_2(t) = \varphi^{p'}(t) \int_{\mathbf{H}_n} |v(s, t)| \psi(s) ds \in L_\infty(\mathbf{H}_n). \quad (8)$$

Доказательство теоремы 1. Предположим, что существует измеримая полумультипликативная функция ξ такая, что условия (5), (6) выполняются. Докажем, что выполняются условия

$$\hat{\chi}_1(s) = \xi^{-1/p}(\|s\|) \int_{\mathbf{H}_n} |\kappa(s, t)| \xi^{1/p}(\|t\|) dt \in L_\infty(\mathbf{H}_n), \quad (9)$$

$$\hat{\chi}_2(t) = \xi^{-1/p'}(\|t\|) \int_{\mathbf{H}_n} |\kappa(s, t)| \xi^{1/p'}(\|s\|) ds \in L_\infty(\mathbf{H}_n). \quad (10)$$

Произведем под интегралом (9) замену переменной $t = \alpha_{\|s\|}(g)$, $dt = \|s\|^{2n+2} dg$ [6, с. 209] и воспользуемся свойством однородности нормы Кораньи (1):

$$\hat{\chi}_1(s) = \xi^{-\frac{1}{p}(\|s\|)} \int_{\mathbf{H}_n} |\kappa(s, \alpha_{\|s\|}(g))| \xi^{\frac{1}{p}(\|s\| \|g\|)} \|s\|^{2n+2} dg.$$

Далее, воспользовавшись условиями однородности функции κ (2) и полумультимпликативности функции ξ (4), получим

$$\hat{\chi}_1(s) \leq \int_{\mathbf{H}_n} |\kappa(\alpha_{\|s\|}^{-1}(s), g)| \xi^{\frac{1}{p}(\|g\|)} dg = \omega_1(\alpha_{\|s\|}^{-1}(s)).$$

Таким образом, для любых $s \in \mathbf{H}_n$ справедливо неравенство $\hat{\chi}_1(s) \leq \omega_1(\alpha_{\|s\|}^{-1}(s))$, откуда с учетом условия (5) получим, что $\hat{\chi}_1 \in L_\infty(\mathbf{H}_n)$, т.е. условие (9) выполняется. Аналогичным образом доказывается, что $\hat{\chi}_2 \in L_\infty(\mathbf{H}_n)$, т.е. условие (10) выполняется.

Пусть для любых $s \in \mathbf{H}_n$

$$\varphi(s) = \xi^{\frac{1}{p}(\|s\|)}, \quad \psi(s) = \xi^{\frac{1}{p'}(\|s\|)}.$$

Тогда из (9), (10) получим $\psi^{-\frac{p'}{p}}(s) \int_{\mathbf{H}_n} |\kappa(s, t)| \varphi(t) dt \in L_\infty(\mathbf{H}_n)$,

$$\varphi^{-\frac{p}{p'}}(t) \int_{\mathbf{H}_n} |\kappa(s, t)| \psi(s) ds \in L_\infty(\mathbf{H}_n).$$

Таким образом, существуют измеримые функции φ, ψ такие, что условия (7) и (8) теоремы 2 выполняются. Следовательно, по теореме 2 линейный интегральный оператор (3) ограничен и регулярен в $L_p(\mathbf{H}_n)$. Теорема доказана.

Для рассмотрения примера интегрального оператора на группе Гейзенберга с однородным ядром нам понадобится техническая

Лемма. 1. Если $\alpha \in \mathbf{R}$, то

$$\int_{\mathbf{H}_n \setminus \mathbf{B}_n} \frac{1}{\|h\|^\alpha} dh = \begin{cases} \frac{|\mathbf{S}_n|}{\alpha - 2n - 2}, & \text{если } \alpha > 2n + 2, \\ \infty, & \text{если } \alpha \leq 2n + 2, \end{cases} \quad (11)$$

где $|\mathbf{S}_n|$ – площадь сферы \mathbf{S}_n .

2. Если $\alpha \in \mathbf{R}$, то

$$\int_{\mathbf{B}_n} \frac{1}{\|h\|^\alpha} dh = \begin{cases} \frac{|\mathbf{S}_n|}{2n + 2 - \alpha}, & \text{если } \alpha < 2n + 2, \\ \infty, & \text{если } \alpha \geq 2n + 2. \end{cases} \quad (12)$$

3. Если $a, b \in \mathbf{R}$ и $a > b$, то

$$\int_{\mathbf{H}_n} \frac{dh}{\|h\|^{a(2n+2)} + \|h\|^{b(2n+2)}} = \begin{cases} < \infty, & \text{если } a > 1 \text{ и } b < 1, \\ \infty, & \text{если } a < 1 \text{ или } b > 1. \end{cases} \quad (13)$$

Доказательство. Аналог этой леммы хорошо известен в случае группы \mathbf{R}^n . Однако формулировка леммы учитывает геометрические особенности группы Гейзенберга, поэтому для полноты приведем ее доказательство.

Докажем утверждение 1. В интеграле (11) перейдем к сферическим координатам, тогда

$$\begin{aligned} \int_{\mathbf{H}_n \setminus \mathbf{B}_n} \frac{1}{\|h\|^\alpha} dh &= |\mathbf{S}_n| \int_1^\infty \rho^{2n+1-\alpha} d\rho = \\ &= |\mathbf{S}_n| \begin{cases} \lim_{r \rightarrow \infty} \frac{r^{2n+2-\alpha} - 1}{2n+2-\alpha}, & \text{если } \alpha \neq 2n+2 \\ \lim_{r \rightarrow \infty} \ln|x|, & \text{если } \alpha = 2n+2 \end{cases} = \\ &= \begin{cases} \frac{|\mathbf{S}_n|}{\alpha - 2n - 2}, & \text{если } \alpha > 2n + 2, \\ \infty, & \text{если } \alpha \leq 2n + 2. \end{cases} \end{aligned}$$

Докажем утверждение 2. В интеграле (12) перейдем к сферическим координатам, тогда

$$\begin{aligned} \int_{\mathbf{B}_n} \frac{1}{\|h\|^\alpha} dh &= |\mathbf{S}_n| \int_0^1 \rho^{2n+1-\alpha} d\rho = \\ &= |\mathbf{S}_n| \begin{cases} \lim_{r \rightarrow 0} \frac{1 - r^{2n+2-\alpha}}{2n+2-\alpha}, & \text{если } \alpha \neq 2n+2 \\ \lim_{r \rightarrow 0} -\ln|x|, & \text{если } \alpha = 2n+2 \end{cases} = \\ &= \begin{cases} \frac{|\mathbf{S}_n|}{2n+2-\alpha}, & \text{если } \alpha < 2n+2, \\ \infty, & \text{если } \alpha \geq 2n+2. \end{cases} \end{aligned}$$

Докажем утверждение 3. Представим интеграл (13) в виде

$$\begin{aligned} \int_{\mathbf{H}_n} \frac{dh}{\|h\|^{a(2n+2)} + \|h\|^{b(2n+2)}} &= \\ &= \int_{\mathbf{H}_n \setminus \mathbf{B}_n} \frac{dh}{\|h\|^{a(2n+2)} + \|h\|^{b(2n+2)}} + \\ &+ \int_{\mathbf{B}_n} \frac{dh}{\|h\|^{a(2n+2)} + \|h\|^{b(2n+2)}}. \end{aligned}$$

Так как существует конечный предел

$$\lim_{\|h\| \rightarrow \infty} \frac{\|h\|^{a(2n+2)}}{\|h\|^{a(2n+2)} + \|h\|^{b(2n+2)}} = 1, \quad \text{то интегралы}$$

$$\int_{\mathbf{H}_n \setminus \mathbf{B}_n} \frac{dh}{\|h\|^{a(2n+2)} + \|h\|^{b(2n+2)}}, \quad \int_{\mathbf{H}_n \setminus \mathbf{B}_n} \frac{dh}{\|h\|^{a(2n+2)}}$$

сходятся и расходятся одновременно. Тогда из утверждения 1 следует, что при $a > 1$ оба интеграла сходятся, а при $a \leq 1$ – расходятся. Так как существует конечный предел

$$\begin{aligned} & \lim_{\|h\| \rightarrow 0} \frac{\|h\|^{b(2n+2)}}{\|h\|^{a(2n+2)} + \|h\|^{b(2n+2)}} = \\ & = \lim_{\|h\| \rightarrow 0} \frac{\|h\|^{b(2n+2)}}{\left(\|h\|^{(a-b)(2n+2)} + 1\right)\|h\|^{b(2n+2)}} = 1, \end{aligned}$$

то интегралы

$$\int_{\mathbf{B}_n} \frac{dh}{\|h\|^{a(2n+2)} + \|h\|^{b(2n+2)}}, \quad \int_{\mathbf{B}_n} \frac{dh}{\|h\|^{b(2n+2)}}$$

сходятся и расходятся одновременно. Тогда из утверждения 2 следует, что при $b < 1$ оба интеграла сходятся, а при $b \geq 1$ – расходятся. Таким образом, для сходимости интеграла (13) необходимо и достаточно, чтобы одновременно выполнялись неравенства $a > 1$ и $b < 1$. Утверждение 3 доказано.

Пример. Рассмотрим функцию

$$\begin{aligned} \kappa_1(h, g) &= \frac{1}{\|h\|^{2(2n+2)}\|g\|^{-(2n+2)} + \|h\|^{-(2n+2)}\|g\|^{2(2n+2)}} \times \\ & \times f\left(\alpha_{\|h\|}^{-1}(h), \alpha_{\|g\|}^{-1}(g)\right), \end{aligned} \quad (14)$$

где $f \in L_\infty(\mathbf{S}_n \times \mathbf{S}_n)$. Нетрудно видеть, что функция κ_1 удовлетворяет условию однородности степени $(-2n-2)$. Чтобы доказать ограниченность и регулярность в пространстве $L_p(\mathbf{H}_n)$ интегрального оператора (3) с ядром κ_1 , проверим выполнение условий (5), (6). Предположим, что в (5), (6) функция ξ имеет вид $\xi(a) = 1 + a^{-2n-2}$.

$$\begin{aligned} \text{Тогда } \omega_1(\sigma) &= \int_{\mathbf{H}_n} \left[\frac{1}{\|g\|^{-(2n+2)} + \|g\|^{2(2n+2)}} \times \right. \\ & \left. \times f\left(\sigma, \alpha_{\|g\|}^{-1}(g)\right) \left(1 + \|g\|^{-2n-2}\right)^{\frac{1}{p}} \right] dg. \end{aligned}$$

Оценим функцию ω_1 сверху

$$\omega_1(\sigma) \leq \|f\|_\infty \int_{\mathbf{H}_n} \frac{1}{\|g\|^{-(2n+2)} + \|g\|^{2(2n+2)}} \left(1 + \|g\|^{-2n-2}\right) dg.$$

Воспользовавшись аддитивностью интеграла, получим

$$\begin{aligned} \omega_1(\sigma) &\leq \|f\|_\infty \left[\int_{\mathbf{H}_n} \frac{1}{\|g\|^{-(2n+2)} + \|g\|^{2(2n+2)}} dg + \right. \\ & \left. + \int_{\mathbf{H}_n} \frac{1}{1 + \|g\|^{3(2n+2)}} dg \right]. \end{aligned} \quad (15)$$

Оба интеграла в правой части неравенства (15) сходятся в силу утверждения 3 леммы, и, следовательно, условие (5) выполняется.

Аналогично проверяется выполнение условия (6). Следовательно, по теореме 2 интегральный оператор (3) с ядром (14) ограничен и регулярен в $L_p(\mathbf{H}_n)$.

Необходимые условия ограниченности

Теорема 3. Рассмотрим оператор K_κ вида (3) и предположим, что он ограничен и регулярен в пространстве $L_p(\mathbf{H}_n)$. Тогда

$$\chi_1(\sigma) = \int_{\mathbf{H}_n} |\kappa(\sigma, g)| \|g\|^{-\frac{2n+2}{p}} dg \in L_1(\mathbf{S}_n), \quad (16)$$

$$\chi_2(\theta) = \int_{\mathbf{H}_n} |\kappa(h, \theta)| \|h\|^{-\frac{2n+2}{p'}} dh \in L_1(\mathbf{S}_n). \quad (17)$$

Доказательство. Из ограниченности и регулярности в пространстве $L_p(\mathbf{H}_n)$ оператора K_κ следует ограниченность в $L_p(\mathbf{H}_n)$ оператора $K_{|\kappa|}$ [9, с. 401]. Тогда для любых $\varphi \in L_p(\mathbf{H}_n)$ и $\psi \in L_{p'}(\mathbf{H}_n)$ справедливо неравенство

$$\left| \int_{\mathbf{H}_n} (K_{|\kappa|}\varphi)(s) \psi(s) ds \right| \leq \|K_{|\kappa|}\|_p \|\varphi\|_p \|\psi\|_{p'}, \quad (18)$$

[9, с. 232]. Преобразуем левую часть неравенства (18), выполняя замену $t = \alpha_{\|s\|}(g)$, $dt = \|s\|^{2n+2} dg$:

$$\begin{aligned} \left| \int_{\mathbf{H}_n} (K_{|\kappa|}\varphi)(s) \psi(s) ds \right| &= \int_{\mathbf{H}_n} \int_{\mathbf{H}_n} |\kappa(s, t)| \varphi(t) \psi(s) dt ds = \\ &= \int_{\mathbf{H}_n} \int_{\mathbf{H}_n} |\kappa(s, \alpha_{\|s\|}(g))| \varphi(\alpha_{\|s\|}(g)) \psi(s) \|s\|^{2n+2} dg ds. \end{aligned}$$

Воспользуемся свойством однородности функции κ (2)

$$\begin{aligned} \left| \int_{\mathbf{H}_n} (K_{|\kappa|}\varphi)(s) \psi(s) ds \right| &= \\ &= \int_{\mathbf{H}_n} \int_{\mathbf{H}_n} |\kappa(\alpha_{\|s\|}^{-1}(s), g)| \varphi(\alpha_{\|s\|}(g)) \psi(s) dg ds. \end{aligned}$$

Перейдем к сферическим координатам $s = \alpha_r(\sigma)$, $ds = r^{2n+1} dr d\sigma$ и, учитывая, что $\|\sigma\| = 1$ и $\|s\| = \|\alpha_r(\sigma)\| = r$, получим

$$\left| \int_{\mathbf{H}_n} (K_{|\kappa|} \varphi)(s) \psi(s) ds \right| = \int_{\mathbf{H}_n} \int_{\mathbf{S}_n} \int_0^\infty [\kappa(\alpha_r^{-1}(\alpha_r(\sigma)), g) \times \varphi(\alpha_r(g)) \psi(\alpha_r(\sigma)) r^{2n+1}] dr d\sigma dg. \quad (19)$$

Определим функции $\varphi \in L_p(\mathbf{H}_n)$ и $\psi \in L_{p'}(\mathbf{H}_n)$ следующим образом:

$$\varphi(h) = \begin{cases} \|h\|^{-\varepsilon - \frac{2n+2}{p}}, & \text{если } \|h\| > 1, \\ 0, & \text{если } \|h\| \leq 1, \end{cases} \quad (20)$$

$$\psi(h) = \varphi^{p'}(h) = \varphi^{p-1}(h), \quad (21)$$

где ε – некоторое положительное число. Функции φ и ψ принимают в правой части (19) ненулевые значения только в том случае, если выполняются неравенства $\|\alpha_r(g)\| > 1$, $\|\alpha_r(\sigma)\| > 1$. Перепишем эти неравенства, воспользовавшись свойством однородности нормы Кораньи $r\|g\| > 1$, $r > 1$. Оба неравенства будут выполнены одновременно, если $r > \max(\|g\|^{-1}, 1)$. Следовательно, левая часть неравенства (18) принимает вид

$$\left| \int_{\mathbf{H}_n} (K_{|\kappa|} \varphi)(s) \psi(s) ds \right| = \int_{\mathbf{H}_n} \int_{\mathbf{S}_n} \int_{r > \max(\|g\|^{-1}, 1)} [\kappa(\sigma, g) \times \|\alpha_r(g)\|^{-\varepsilon - \frac{2n+2}{p}} \|\alpha_r(\sigma)\|^{-\varepsilon - \frac{2n+2}{p}}]^{(p-1)} r^{2n+1} dr d\sigma dg.$$

Из свойства однородности нормы Кораньи вытекает, что

$$\left| \int_{\mathbf{H}_n} (K_{|\kappa|} \varphi)(s) \psi(s) ds \right| = \int_{\mathbf{H}_n} \int_{\mathbf{S}_n} [\kappa(\sigma, g) \times \|g\|^{-\varepsilon - \frac{2n+2}{p}} \int_{r > \max(\|g\|^{-1}, 1)} r^{-\varepsilon p - 1} dr] d\sigma dg.$$

Вычислим отдельно интеграл

$$\int_{r > \max(\|g\|^{-1}, 1)} r^{-\varepsilon p - 1} dr = \lim_{\rho \rightarrow \infty} \left(\int_{\max(\|g\|^{-1}, 1)}^\rho r^{-\varepsilon p - 1} dr \right) =$$

$$= \lim_{\rho \rightarrow \infty} \left(\frac{1}{-\varepsilon p} \left(\rho^{-\varepsilon p} - \max(\|g\|^{-1}, 1)^{-\varepsilon p} \right) \right) = \frac{1}{\varepsilon p} \left(\max(\|g\|^{-1}, 1)^{-\varepsilon p} \right).$$

Тогда

$$\left| \int_{\mathbf{H}_n} (K_{|\kappa|} \varphi)(s) \psi(s) ds \right| = \frac{1}{\varepsilon p} \int_{\mathbf{H}_n} \int_{\mathbf{S}_n} [\kappa(\sigma, g) \times \|g\|^{-\varepsilon - \frac{2n+2}{p}} \max(\|g\|^{-1}, 1)^{-\varepsilon p}] d\sigma dg.$$

Теперь преобразуем правую часть неравенства (18). Воспользовавшись определением функции ψ (21), получим

$$\begin{aligned} \|K_{|\kappa|}\|_p \|\varphi\|_p \|\psi\|_{p'} &= \|K_{|\kappa|}\|_p \left(\int_{\mathbf{H}_n} |\varphi(h)|^p dh \right)^{\frac{1}{p}} \left(\int_{\mathbf{H}_n} |\varphi(h)|^p dx \right)^{\frac{1}{p'}} = \\ &= \|K_{|\kappa|}\|_p \|\varphi\|_p^p. \end{aligned}$$

Вычислим отдельно $\|\varphi\|_p^p$. Для этого перейдем к сферической системе координат $h = \alpha_r(\sigma)$, $dh = r^{2n+1} dr d\sigma$ и воспользуемся равенством (20)

$$\begin{aligned} \|\varphi\|_p^p &= \int_{\mathbf{H}_n} |\varphi(h)|^p dh = \int_{\mathbf{H}_n} \int_{\mathbf{S}_n} |\varphi(\alpha_r(\sigma))|^p r^{2n+1} dr d\sigma = \\ &= \int_{\mathbf{S}_n} \int_1^\infty \|\alpha_r(\sigma)\|^{-\varepsilon - \frac{2n+2}{p}} r^{2n+1} dr d\sigma = \int_{\mathbf{S}_n} \int_1^\infty r^{-\varepsilon p - 1} dr d\sigma = \\ &= |\mathbf{S}_n| \lim_{\rho \rightarrow \infty} \left(\frac{1}{-\varepsilon p} (\rho^{-\varepsilon p} - 1) \right) = \frac{|\mathbf{S}_n|}{\varepsilon p}. \end{aligned}$$

Таким образом, неравенство (18) принимает вид

$$\int_{\mathbf{H}_n} \int_{\mathbf{S}_n} |\kappa(\sigma, g)| \|g\|^{-\varepsilon - \frac{2n+2}{p}} \max(\|g\|^{-1}, 1)^{-\varepsilon p} d\sigma dg \leq \|K_{|\kappa|}\|_p |\mathbf{S}_n|. \quad (22)$$

Применяя к (22) теорему Фату [5; 10, с. 324], приходим к неравенству

$$\int_{\mathbf{S}_n} \int_{\mathbf{H}_n} |\kappa(\sigma, g)| \|g\|^{-\frac{2n+2}{p}} dg d\sigma \leq \|K_{|\kappa|}\|_p |\mathbf{S}_n|,$$

из которого следует, что условие (16) выполняется.

Применяя аналогичные рассуждения к сопряженному оператору $K_\kappa^* : L_{p'}(\mathbf{H}_n) \rightarrow L_p(\mathbf{H}_n)$, можно получить неравенство

$$\int_{\mathbf{S}_n} \int_{\mathbf{H}_n} |\kappa(h, \theta)| \|h\|^{-\frac{2n+2}{p'}} dh d\theta \leq \|K_{|\kappa|}^*\|_{p'} |\mathbf{S}_n|, \quad (24)$$

из которого следует, что условие (17) выполняется. Теорема доказана.

Литература

1. Karapetians N., Samko S. *Equations with Involutive Operators*. Boston : Birkhauser, 2001. 427 p.
2. Авсянкин О.Г. О C^* -алгебре, порожденной многомерными интегральными операторами с однородными ядрами и операторами мультипликативного сдвига // Докл. РАН. 2008. Т. 419, вып. 6. С. 727–728.
3. Deundyak V.M. Convolution Operators with Weakly Oscillating Coefficients in Hilbert Moduli on Groups and Applications // *J. of Mathematical Sciences*. 2015. Vol. 208, № 1. P. 100–108.
4. Chirikjian G.S., Kyatkin A.B. *Engineering applications of noncommutative harmonic analysis: with emphasis on rotation and motion groups*. Boca Raton : CRC Press, 2001. 698 p.
5. Карпетянц Н.К. О необходимых условиях ограниченности оператора с неотрицательным квазиоднородным ядром // *Мат. заметки*. 1981. Т. 30, вып. 5. С. 787–794.
6. Krantz S.G. *Explorations in harmonic analysis: with applications to complex function theory and the Heisenberg group*. Boston : Birkhauser, 2009. 360 p.
7. Capogna L., Danielli D., Pauls S.D., Tyson J. *An Introduction to the Heisenberg Group and the Sub-Riemannian Isoperimetric Problem*. Basel : Birkhauser, 2007. 224 p.
8. Коротков В.Б. *Интегральные операторы*. Новосибирск : Наука, 1983. 225 с.
9. Канторович Л.В., Акилов Г.П. *Функциональный анализ*. М. : Наука, 1984. 752 с.
10. Колмогоров А.Н., Фомин С.В. *Элементы теории функций и функционального анализа*. М. : Физматлит, 2004. 572 с.

References

1. Karapetians N., Samko S. *Equations with Involutive Operators*. Boston: Birkhauser, 2001, 427 p.
2. Avsyankin O.G. О C^* -алгебре, порожденной многомерными интегральными операторами с однородными ядрами и операторами мультипликативного сдвига [On the C^* -algebra generated by multidimensional integral operators with homogeneous kernels and multiplicative shift operators]. *Dokl. RAN*. 2008, vol. 419, iss. 6, pp. 727-728.
3. Deundyak V.M. Convolution Operators with Weakly Oscillating Coefficients in Hilbert Moduli on Groups and Applications. *J. of Mathematical Sciences*. 2015, vol. 208, No. 1, pp. 100-108.
4. Chirikjian G.S., Kyatkin A.B. *Engineering applications of noncommutative harmonic analysis: with emphasis on rotation and motion groups*. Boca Raton: CRC Press, 2001, 698 p.
5. Karapetyants N.K. О необходимых условиях ограниченности оператора с неотрицательным квазиоднородным ядром [On the necessary conditions for the boundedness of an operator with a nonnegative quasi-homogeneous kernel]. *Mat. zametki*. 1981, vol. 30, iss. 5, pp. 787-794.
6. Krantz S.G. *Explorations in harmonic analysis: with applications to complex function theory and the Heisenberg group*. Boston: Birkhauser, 2009, 360 p.
7. Capogna L., Danielli D., Pauls S.D., Tyson J. *An Introduction to the Heisenberg Group and the Sub-Riemannian Isoperimetric Problem*. Basel: Birkhauser, 2007, 224 p.
8. Korotkov V.B. *Integral'nye operatory* [Integral operators]. Novosibirsk: Nauka, 1983, 225 p.
9. Kantorovich L.V., Akilov G.P. *Funktsional'nyi analiz* [Functional analysis]. Moscow: Nauka, 1984, 752 p.
10. Kolmogorov A.N., Fomin S.V. *Elementy teorii funktsii i funktsional'nogo analiza* [Elements of the theory of functions and functional analysis]. Moscow: Fizmatlit, 2004, 572 p.

УДК 532.5

DOI 10.23683/0321-3005-2017-3-1-28-35

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ О ПЕРЕНОСЕ МАССЫ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ В ДВУХКОМПОНЕНТНОЙ СМЕСИ*

© 2017 г. Т.Ф. Долгих¹

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

THE SOLUTION OF THE MASS TRANSFER PROBLEM FOR THE TWO-COMPONENT MIXTURE UNDER THE ACTION OF AN ELECTRIC FIELD

T.F. Dolgikh¹

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

Долгих Татьяна Федоровна – аспирант, кафедра вычислительной математики и математической физики, Институт математики, механики и компьютерных наук им. И.И. Воровича, Южный федеральный университет, ул. Мильчакова, 8а, г. Ростов-на-Дону, 344090, Россия, e-mail: dolgikh@sfedu.ru

Tatiana F. Dolgikh - Postgraduate, Department of Numerical Methods and Mathematic Physics, Vorovich Institute of Mathematics, Mechanics and Computer Science, Southern Federal University, Milchakova St., 8a, Rostov-on-Don, 344090, Russia, e-mail: dolgikh@sfedu.ru

Исследована система эллиптических квазилинейных уравнений в частных производных первого порядка, описывающих процесс переноса массы в многокомпонентной смеси под действием электрического поля. Эти уравнения моделируют зональный электрофорез (фракционирование многокомпонентной смеси) в случае, когда концентрации компонент смеси достаточно большие. При помощи варианта метода годографа, основанного на законах сохранения, построено неявное решение задачи с начальными данными. Представлен аналитико-численный метод восстановления явного решения. Этот метод позволяет сводить решение задачи для уравнений в частных производных к задаче для обыкновенных дифференциальных уравнений. Исследование эволюции решения с течением времени представлено для пространственно-периодических начальных данных, которые обычно используются для описания поведения неустойчивых квазигазовых сред типа газа Чаплыгина. Поведение решения описывается при помощи пространственных изолиний и изохрон (временных изолиний). Дополнительно приведен анализ качественных изменений структур решений с помощью якобиана преобразования годографа. Представленные результаты позволяют сделать вывод о том, что с течением времени пространственно-периодические начальные данные преобразуются в структуры из кноидальных неподвижных волн, как и для неустойчивых сплошных сред типа газа Чаплыгина.

Ключевые слова: зональный электрофорез, метод годографа, пространственно-периодические начальные данные.

We investigate system of the elliptic quasi-linear equations of first order which describes the process of mass transfer in a multicomponent mixture under the action of an electric field. These equations simulate the zonal electrophoresis (fractionation of a multicomponent mixture) in the case when the concentration of mixture components is enough large. Using the variant of the hodograph method, based on the conservation laws, the implicit solution of the problem with the initial data is constructed. The analytical-numerical method recovering the explicit solutions of the problem is presented. This method allows us to transform the solution problem for equations in partial derivatives to the problem for ordinary differential equations. We study the evolution of solutions over time for spatially periodic initial data, which are typically used to describe the behavior of the unstable quasi-gaseous continuous media similar to the Chaplygin gas. We describe the behavior of the solution with the help spatial isoline and isochrone (temporary isoline). Additionally, we analyze the qualitative changes of the solution structures using the Jacobian of the hodograph transformation. The presented results allow us to conclude that the spatially periodic initial data are transformed into stationary cnoidal waves.

Keywords: zonal electrophoresis, the hodograph method, spatially periodic initial data.

* Работа выполнена в рамках базовой части государственного задания Министерства образования и науки РФ № 1.5169.2017/БЧ по теме «Фундаментальные и прикладные задачи математического моделирования».

Введение

Процесс переноса вещества под действием электрического поля в достаточно длинном капилляре с непроницаемыми боковыми стенками называется зональным электрофорезом. Метод переноса широко применяется в медицине, биологии, химии как для определения, так и для выделения отдельных составляющих многокомпонентной смеси.

В данной работе рассматривается модель зонального электрофореза в случае сильных электролитов – вещества полностью диссоциировали на ионы, и нейтральные элементы, кроме растворителя (воды), в смеси отсутствуют. Кроме этого, в уравнениях не будет учитываться диффузия. Связано это с тем, что на начальной стадии процесса разделения смеси на отдельные составляющие электромиграционные эффекты играют более значимую роль в изменении профиля концентраций индивидуальных компонент смеси, чем диффузионные эффекты.

Известно, что при изменении количества ионов в смеси в зависимости от параметров компонент (например, зарядности, подвижности) проводимость всей смеси может как увеличиваться, так и уменьшаться. Объясняется такой эффект электронейтральностью раствора. Если в некоторую область раствора поместить ионы с большой подвижностью, то в силу сохранения электронейтральности всей смеси они будут вытеснены менее подвижными ионами, и в данной области понизится общая проводимость раствора. Наоборот, если добавить в раствор компонент с малым значением подвижности, то он вытеснит более подвижные соседние ионы и тем самым понизит проводимость смеси в этой точке капилляра [1, 2]. Как правило, бездиффузионная модель зонального электрофореза представляет собой систему квазилинейных уравнений гиперболического типа в частных производных первого порядка. В случаях, когда проводимость многокомпонентной смеси уменьшается при увеличении концентрации некоторых компонент, тип уравнений становится эллиптическим.

Случаи гиперболических уравнений рассмотрены в работах [3–5], где, в частности, показано, что решения таких уравнений описывают движение нелинейных волн, т.е. перенос вещества. В данной статье, а также в работах [5–9] представлены исследования уравнений эллиптического типа.

В случае квазилинейных уравнений в частных производных первого порядка независимые переменные времени t и пространственные координаты x равноправны. Поэтому о задаче для таких уравнений с данными на какой-либо линии принято говорить как о задаче Коши [10]. Для эллиптических

уравнений не принято говорить о начальных данных, но в представленной статье сохраняется название задачи Коши, так как будут задаваться концентрации в начальный момент времени.

В работе [11] показано, что сплошные среды, которые описываются уравнениями эллиптического типа, ведут себя как неустойчивые квазигазовые среды типа газа Чаплыгина. Для исследования таких сред часто используются пространственно-периодические начальные данные. Такие же начальные распределения концентраций рассмотрены и в данной статье для анализа эволюции решений задачи зонального электрофореза.

Постановка задачи

Система уравнений, описывающая процесс разделения многокомпонентной смеси веществ на отдельные компоненты под действием внешнего электрического поля, в общем виде для безразмерных переменных записывается в виде

$$\frac{\partial c^k}{\partial t} + \operatorname{div}(-D^k \nabla c^k + \gamma^k c^k z^k \mathbf{E}) = 0, \quad k = 0, 1, \dots, n+1, \quad (1)$$

$$\mathbf{j} = \sum_{k=0}^{n+1} z^k (-D^k \nabla c^k + \gamma^k c^k z^k \mathbf{E}),$$

$$\operatorname{div} \mathbf{j} = 0, \quad \sum_{k=0}^{n+1} z^k c^k = 0,$$

где $c^k = c^k(x, t)$ – концентрации компонент смеси; D^k – коэффициент диффузии k -й компоненты; γ^k и z^k – подвижность и зарядность компонент; \mathbf{j} – плотность электрического тока; \mathbf{E} – напряженность электрического поля.

Рассматривается задача о разделении смеси в длинном капилляре (пространственно одномерный случай) и без учета диффузии ($D^k \rightarrow 0$). Сделав замены переменных $\mu^k = \gamma^k z^k$, $u^k = \alpha^k c^k$ (α^k – коэффициент влияния концентрации k -й компоненты на проводимость), исключив из (1) напряженность электрического поля \mathbf{E} [5] и положив $n=2$, получим модель переноса вещества в двухкомпонентной смеси под действием электрического поля в бездиффузионном приближении

$$\frac{\partial u^k}{\partial t} + \mu^1 \mu^2 \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\mu^k u^k}{1+s} \right) = 0,$$

$$k = 1, 2, \quad s = u^1 + u^2. \quad (2)$$

Здесь $\mu^k = \operatorname{const}$ и $u^k = u^k(x, t)$ – электрофоретические подвижности и «эффективные» концентрации компонент смеси соответственно.

Следует отметить, что подвижности компонент смеси μ^k – это всегда положительные величины. «Эффективные» же концентрации учитывают и концентрации, и зарядности каждой компоненты смеси. Поэтому они могут принимать как положительные, так и отрицательные значения. Однако полная проводимость всей смеси $1+s=1+u^1+u^2$ – всегда положительная величина. Она может как увеличиваться, так и уменьшаться при изменении концентраций компонент отдельных смесей. Действительно, положительным значениям u^k соответствует увеличение проводимости смеси при увеличении концентрации, а отрицательным u^k – уменьшение проводимости при увеличении $|u^k|$.

В случае, когда рассматривается двухкомпонентная смесь, квазилинейная система уравнений в частных производных первого порядка (2) всегда имеет инварианты Римана R^i и записывается в виде

$$\frac{\partial R^i}{\partial t} + \lambda^i \frac{\partial R^i}{\partial x} = 0, \quad \lambda^i = R^i R^1 R^2, \quad i = 1, 2.$$

Инварианты Римана R^i и исходные функции u^i связаны соотношениями

$$R^1 = \frac{B - \sqrt{D}}{2A}, \quad R^2 = \frac{B + \sqrt{D}}{2A},$$

$$A = 1 + s, \quad B = \mu^1 + \mu^2 + u^1 \mu^2 + u^2 \mu^1,$$

$$C = \mu^1 \mu^2, \quad D = B^2 - 4AC.$$

На плоскости (u^1, u^2) линия $D(u^1, u^2) = 0$ является параболой. Известно, что в области $D > 0$, $s > -1$ уравнения (2) имеют гиперболический тип; в области $D < 0$ – эллиптический.

В случае эллиптичности уравнений (2) собственные значения λ^i и инварианты Римана R^i будут комплексно-сопряженными.

Для дальнейшего упрощения записи введем замену для инвариантов Римана вида $R^i = 1/K^i$. Тогда система (2) примет вид

$$\frac{\partial K^i}{\partial t} + \Lambda^i \frac{\partial K^i}{\partial x} = 0, \quad \Lambda^i = \frac{1}{K^i K^1 K^2}, \quad i = 1, 2. \quad (3)$$

Пусть на контуре $\Gamma = \{(x, t): x = x(\tau), t = t(\tau), a \leq \tau \leq b\}$, который не является характеристикой, определены начальные данные

$$K^i \Big|_{\Gamma} = K_0^i(\tau), \quad i = 1, 2, \quad (4)$$

где $K_0^1(\tau)$ и $K_0^2(\tau)$ – заданные функции.

Метод решения

Для решения задачи Коши (3), (4) используется метод годографа, основанный на законах сохранения [5, 12–14]. Этот метод позволяет получить неявные решения $x = x(K^1, K^2)$, $t = t(K^1, K^2)$ уравнений (3), по которым восстанавливается явный вид функций $u^1(x, t)$, $u^2(x, t)$.

Следуя [13], предположим, что имеется закон сохранения $\varphi_t + \psi_x = 0$, где $\varphi(K^1, K^2)$, $\psi(K^1, K^2)$ – функция плотности и плотность потока. Это функции, для которых выполняются соотношения

$$\psi_{K^1} = \Lambda^1 \varphi_{K^1}, \quad \psi_{K^2} = \Lambda^2 \varphi_{K^2}. \quad (5)$$

Условия разрешимости дают линейные дифференциальные уравнения второго порядка с переменными коэффициентами

$$\varphi_{K^1 K^2}^t - \frac{1}{K^1 - K^2} \varphi_{K^1}^t + \frac{1}{K^1 - K^2} \varphi_{K^2}^t = 0, \quad (6)$$

$$\psi_{K^1 K^2}^x + \frac{K^1}{K^2(K^1 - K^2)} \psi_{K^1}^x - \frac{K^2}{K^1(K^1 - K^2)} \psi_{K^2}^x = 0. \quad (7)$$

Эти уравнения дополняются условиями

$$\left(\psi^t - \Lambda^1 \varphi^t \right) \Big|_{K^1=k^1} = 1, \quad \left(\psi^t - \Lambda^2 \varphi^t \right) \Big|_{K^2=k^2} = -1, \quad (8)$$

$$\left(\psi^x - \Lambda^1 \varphi^x \right) \Big|_{K^1=k^1} = \Lambda^1 \Big|_{K^1=k^1},$$

$$\left(\psi^x - \Lambda^2 \varphi^x \right) \Big|_{K^2=k^2} = -\Lambda^2 \Big|_{K^2=k^2}. \quad (9)$$

Здесь верхние индексы t, x соответствуют задачам для определения $t(K^1, K^2)$, $x(K^1, K^2)$.

Решением $\varphi^t(K^1, K^2)$ задачи (6), (8) с точностью до множителя является функция Римана – Грина

$$\varphi^t(K^1, K^2) = \frac{2}{\Lambda^2(k^1, k^2) - \Lambda^1(k^1, k^2)} \Phi(K^1, K^2 | k^1, k^2).$$

Для исследуемых уравнений (3) вид функции Римана – Грина хорошо известен [15]

$$\Phi(K^1, K^2 | k^1, k^2) = \frac{(K^1 + K^2)(k^1 + k^2) - 2K^1 K^2 - 2k^1 k^2}{(k^1 - k^2)^2}.$$

Из задачи (7), (9) определяется плотность потока

$$\psi^x(K^1, K^2) = \frac{2\Lambda^1(k^1, k^2)\Lambda^2(k^1, k^2)}{\Lambda^2(k^1, k^2) - \Lambda^1(k^1, k^2)} \Phi(K^1, K^2 | k^1, k^2),$$

зная которую можно определить функцию потока, интегрируя одно из выражений в (5)

$$\varphi^x(k^1, K^2) = \frac{\psi^x(k^1, K^2)}{\Lambda^1(k^1, K^2)} - 1 \quad \text{или}$$

$$\varphi^x(K^1, k^2) = \frac{\psi^x(K^1, k^2)}{\Lambda^1(K^1, k^2)} + 1.$$

Рассмотрим случай, когда в качестве контура Γ в начальных условиях (4) берется отрезок оси $t = t_0$. Тогда неявное решение задачи Коши (3), (4)

$$\text{имеет вид } t = t_0 + \frac{1}{2} \int_a^b \varphi^t d\tau, \quad x = \frac{a+b}{2} + \frac{1}{2} \int_a^b \varphi^x d\tau.$$

В случае комплексно-сопряженных инвариантов Римана K^1, K^2 комплексно-сопряженными будут и параметры a и b , определяющие контур Γ . Для дальнейшего упрощения записи постановки и решения задачи удобно ввести следующие замены переменных:

$$a = u + iv, \quad b = u - iv, \quad a^* = b,$$

$$k = k^1 = K_0^1(b) = p + iq,$$

$$k^* = k^2 = K_0^2(a) = p - iq,$$

$$K = K^1 = P + iQ, \quad K^* = K^2 = P - iQ,$$

где $p = p(u, v), \quad q = q(u, v), \quad P = P(u, v),$
 $Q = Q(u, v)$ – вещественные функции вещественных переменных u и v .

Тогда в комплексной форме задача Коши (3), (4) запишется в виде

$$K|K|^2 K_t + K_x = 0, \quad K|_{t=t_0} = K_0(\tau). \quad (10)$$

Здесь $K_0(\tau) = P_0(\tau) + iQ_0(\tau)$ – известная функция.

Таким образом, неявное решение задачи (10) с учетом введенных обозначений примет вид

$$t(u, v) = t_0 - \frac{(p^2 + q^2)^2 (2v(p^2 + q^2) + pF^0 - G^0)}{4q^3}, \quad (11)$$

$$x(u, v) = u - \frac{pG^0 - (p^2 + q^2)F^0 - 2p(p^2 + 3q^2)}{4q^3},$$

где $p(u, v) = \text{Re } K_0^1(b), \quad q(u, v) = K_0^2(a)$, а через F^0 и G^0 обозначены мнимые части функций $F(u, v)$ и $G(u, v)$

$$F(u, v) = 2 \int_{u+iv}^{u-iv} P_0(\tau) d\tau, \quad G(u, v) = \int_{u+iv}^{u-iv} (P_0^2(\tau) + Q_0^2(\tau)) d\tau$$

соответственно.

Очевидно, что неявные решения (11) задачи (10) полностью определены начальными условиями.

На линиях уровня неявного решения при фиксированном значении $t = t_* = t(u_*, v_*) = \text{const}$ для восстановления явного решения задачи (10) относительно некоторого параметра ρ решаются задачи Коши

$$\frac{du}{d\rho} = -t_v(u, v) q^4(u, v), \quad u|_{\rho=0} = u_*,$$

$$\frac{dv}{d\rho} = t_u(u, v) q^4(u, v), \quad v|_{\rho=0} = v_*.$$

Определив значения $u(\rho)$ и $v(\rho)$ на изохроне $t = t(u_*, v_*)$, можно найти функции $p(u, v)$ и $q(u, v)$. После этого вычисляются концентрации компонент смеси по формулам

$$u^1 = \frac{\mu^2 (1 - 2\mu^1 p + \mu^1 \mu^1 (p^2 + q^2))}{\mu^1 - \mu^2}, \quad (12)$$

$$u^2 = \frac{\mu^1 (1 - 2\mu^2 p + \mu^2 \mu^2 (p^2 + q^2))}{\mu^2 - \mu^1}.$$

Результаты вычислительных экспериментов

Рассмотрим задачу Коши (10) с начальными условиями

$$K_0^1(\tau) = P_0(\tau) + iQ_0(\tau), \quad K_0^2(\tau) = P_0(\tau) - iQ_0(\tau), \quad \text{где}$$

$$P_0(\tau) = -\alpha \varepsilon (\sin \tau + \cos \tau),$$

$$Q_0(\tau) = 1 + \varepsilon \sin \tau + \beta \varepsilon \cos \tau. \quad (13)$$

Здесь ε – амплитуда пространственно-периодического возмущения состояния равновесия $P_0 = 0, \quad Q_0 = 1$; параметры α и β – некоторые положительные значения.

Заметим, что (13) соответствует контуру Γ , представляющему собой эллипс с полуосями α и β .

Согласно описанному ранее методу годографа, получаем неявные решения в виде

$$p(u, v) = -\alpha \varepsilon (\sin u \text{ch } v + \cos u \text{ch } v) - \beta \varepsilon \sin u \text{sh } v + \varepsilon \cos u \text{sh } v, \quad (14)$$

$$q(u, v) = 1 - \alpha \varepsilon (\sin u \text{sh } v - \cos u \text{sh } v) + \beta \varepsilon \cos u \text{ch } v + \varepsilon \sin u \text{ch } v.$$

На рис. 1 представлены неявные решения $p(x, t_*)$, $q(x, t_*)$ в различные моменты времени.

На рис. 2 представлены распределения изохрон и пространственных изолиний на плоскости (u, v) .

Результаты расчетов для концентраций компонент смеси $u^1(x, t), \quad u^2(x, t)$ изображены на рис. 3. Здесь видно, что с течением времени происходит качественное изменение решения.

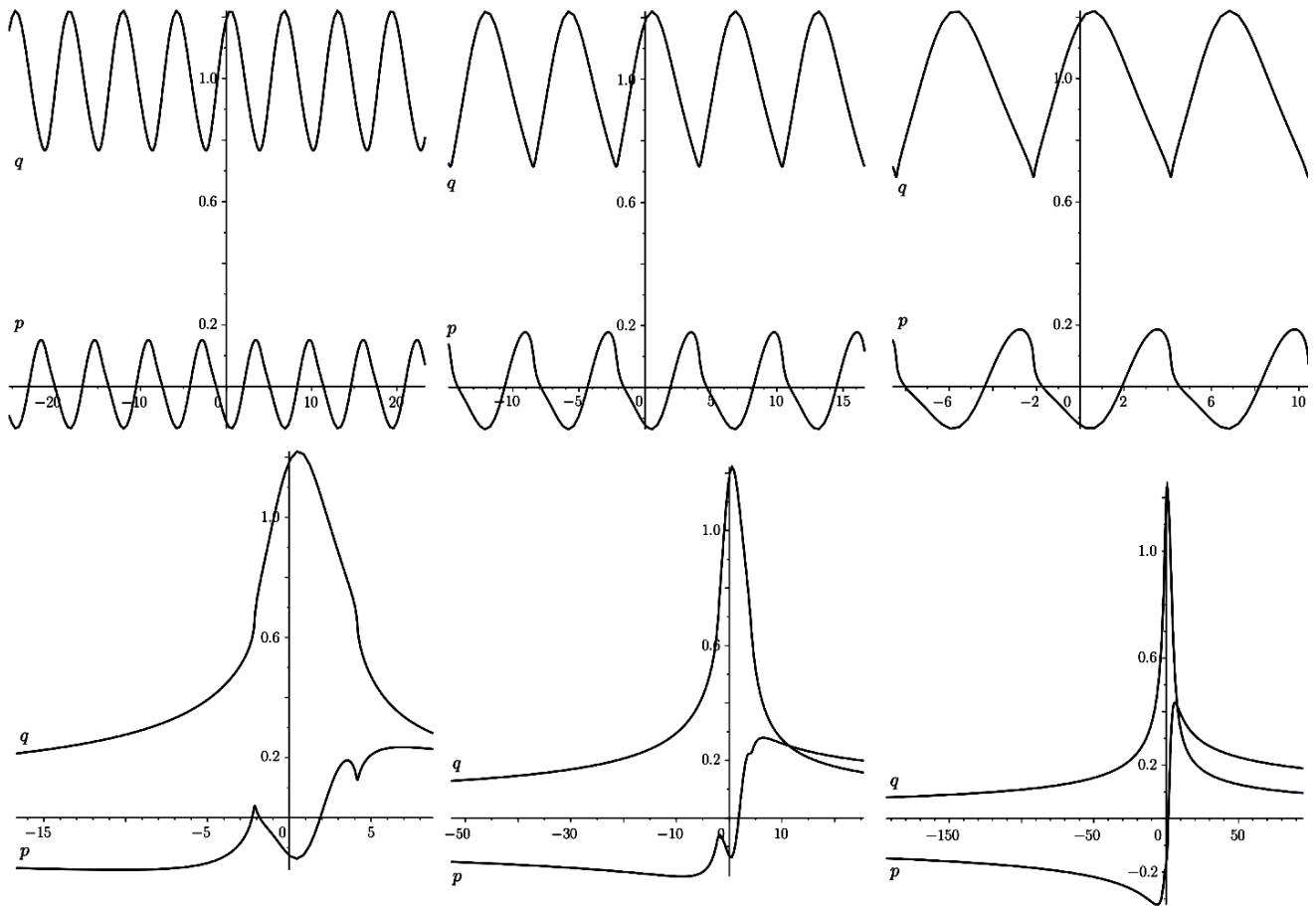


Рис. 1. Функции $p(x,t)$, $q(x,t)$ в моменты времени $t_1=0,2122$, $t_2=0,3293$, $t_3=0,3554$, $t_4=0,3704$, $t_5=0,4662$, $t_6=0,9753$ при $u_*=-1,50$, $v_*=-0,30, -0,50, -0,55, -0,58, -0,80, -1,80$ соответственно (масштабы различны); $\varepsilon=0,1$, $\alpha=1$, $\beta=2$
 / Fig. 1. The function $p(x,t)$, $q(x,t)$ at time $t_1=0.2122$, $t_2=0.3293$, $t_3=0.3554$, $t_4=0.3704$, $t_5=0.4662$, $t_6=0.9753$ at $u_*=-1.50$, $v_*=-0.30, -0.50, -0.55, -0.58, -0.80, -1.80$ respectively (different scale); $\varepsilon=0.1$, $\alpha=1$, $\beta=2$

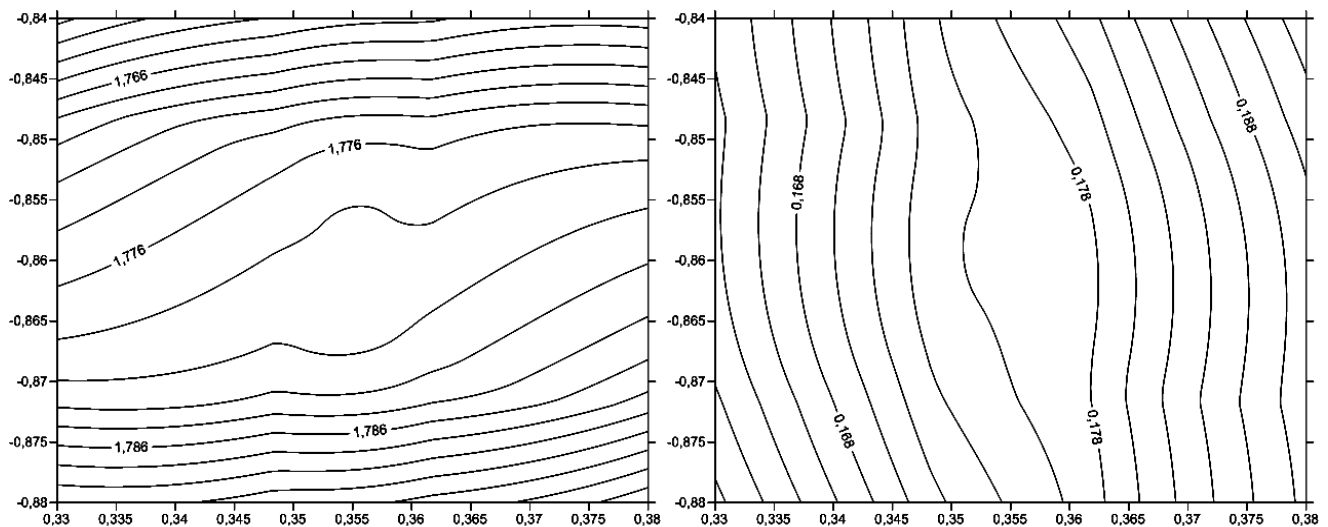


Рис. 2. Изохроны $t(u,v)=\text{const}$ (слева) и линии уровня $x(u,v)=\text{const}$ (справа) на плоскости (u,v) для начальных данных (13) при $\varepsilon=0,1$, $\alpha=1$, $\beta=2$ / Fig. 2. Isochrone $t(u,v)=\text{const}$ (left) and line-level $x(u,v)=\text{const}$ (right) in the plane (u,v) for initial data (13) at $\varepsilon=0.1$, $\alpha=1$, $\beta=2$

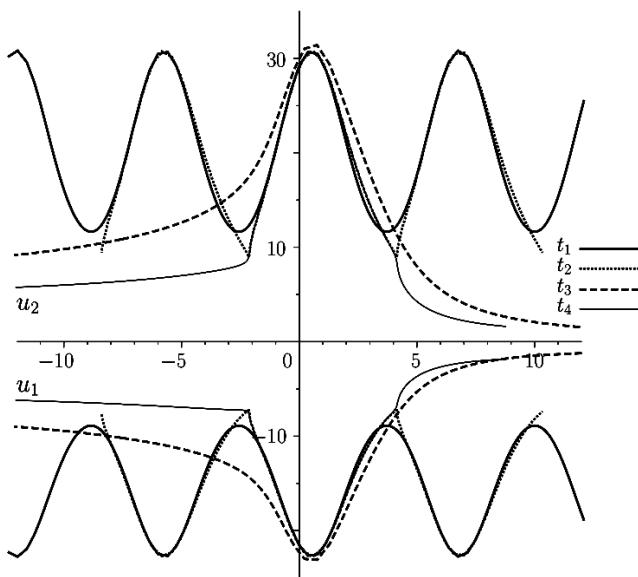


Рис. 3. Концентрации компонент смеси $u^1(x,t), u^2(x,t)$ в моменты времени $t_1=0,0756, t_2=0,3604, t_3=0,3704, t_4=0,9753, t_5=0,4662, t_6=0,9753$ при $u_* = -1,50, v_* = -0,10, -0,56, -0,58, -1,80$ соответственно; $\varepsilon=0,1, \alpha=1, \beta=2, \mu^1=2, \mu^2=3$ / Fig. 3. Concentrations of mixture components $u^1(x,t), u^2(x,t)$ at time $t_1=0.0756, t_2=0.3604, t_3=0.3704, t_4=0.9753, t_5=0.4662, t_6=0.9753$ at $u_* = -1.50, v_* = -0.10, -0.56, -0.58, -1.80$ respectively; $\varepsilon=0.1, \alpha=1, \beta=2, \mu^1=2, \mu^2=3$

Обратим внимание, что в отличие от [5, рис. 29.6 (с. 105), 29.7 (с. 106), 29.13 (с. 110) и 29.14 (с. 111)] графики функций, представленные, в частности, на рис. 1, не являются симметричными. Конечно, это связано с тем, что в случае [5] начальные данные обладали симметрией (Γ – окружность), а в случае (13) такая симметрия отсутствует (Γ – наклонный эллипс).

Изменение структуры решения связано с обращением в нуль якобиана преобразования годографа $J(u, v) = x_u t_v - x_v t_u$. На рис. 4 показана перестройка якобиана с течением времени.

Переход от одного семейства решения к другому с течением времени требует дополнительного анализа, например на основе поведения функций $t(u_*, v), t_u(u_*, v), t_v(u_*, v)$ (см., например, [5]). В случае начальных условий вида (13) функции $t_u(u_*, v)$ и $t_v(u_*, v)$ при $u_* = 1,5$ имеют корень $v_c = -2,4312$. При этом $t_c \equiv t(-1,5; -2,4312) = -271,1619630$. Наличие корня v_c у функции $t_v(u_*, v)$ означает, что на изохроне $t = t_c$ якобиан преобразования годографа $J(u, v)$ обращается в нуль в точке $(-1,5; -2,4312)$.

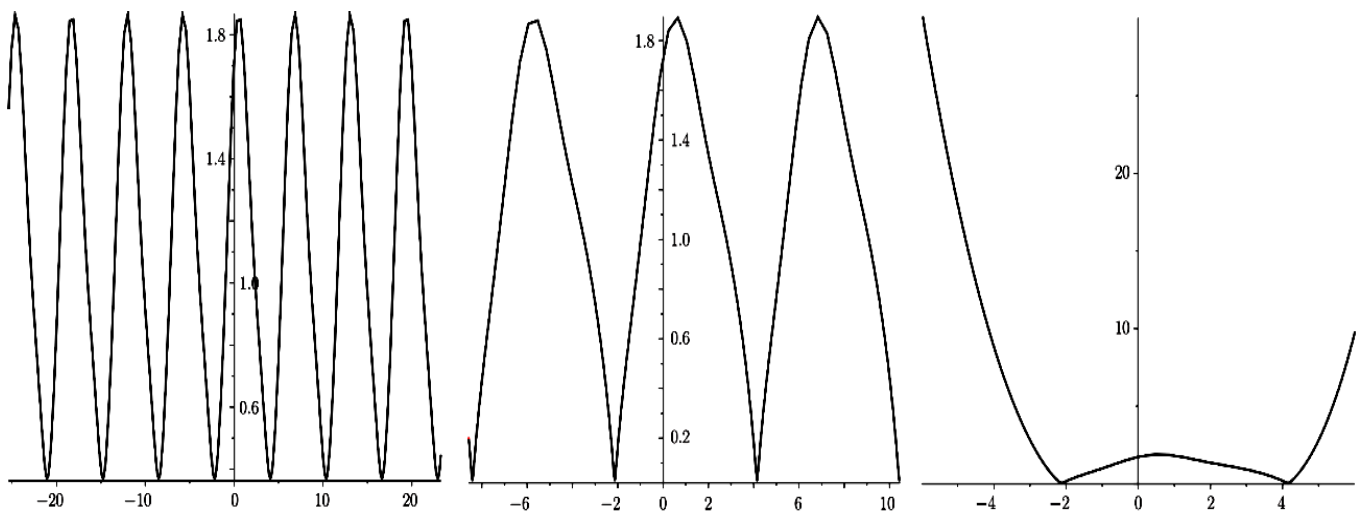


Рис. 4. Якобиан преобразования годографа $J(x,t)$ в моменты времени $t_1=0,2122, t_3=0,3554, t_4=0,3704$ при $u_* = -1,50, v_* = -0,30, -0,55, -0,58$ соответственно (масштабы различны); $\varepsilon = 0,1, \alpha = 1, \beta = 2$ / Fig. 4. The Jacobian of the transformation to the hodograph $J(x,t)$ at the time $t_1=0.2122, t_3=0.3554, t_4=0.3704$ at $u_* = -1.50, v_* = -0.30, -0.55, -0.58$ respectively (scale different); $\varepsilon = 0.1, \alpha = 1, \beta = 2$

Заключение

Рассмотренный пример начальных условий показывает, что в двухкомпонентной смеси в случае малых периодических возмущений начальных концентраций возможно возникновение пространственно-временных структур: солитоноподобные профили для функции $q(x,t)$ и кинкоподобные – для $p(x,t)$.

Это дает основание выдвинуть гипотезу о том, что с течением времени при решении задачи Коши для эллиптических квазилинейных уравнений (3) с пространственно-переодическими начальными данными (13) возникают структуры из кноидальных неподвижных волн. Такое поведение характерно для неустойчивых сплошных сред типа газа Чаплыгина.

Для процесса зонального электрофореза это означает, что в случае слабых периодических возмущений, возникающих, например, из-за неустойчивости напряженности внешнего электрического поля, в смеси с большими концентрациями возможно возникновение локальных неоднородностей концентраций, которые неограниченно растут с течением времени.

Литература

1. Бабский В.Г., Жуков М.Ю., Юдович В.И. Математическая теория электрофореза: Применение к методам фракционирования биополимеров. Киев : Наукова думка, 1983. 202 с.
2. Жуков М.Ю. Массоперенос электрическим полем. Ростов н/Д. : Изд-во РГУ, 2005. 216 с.
3. Zhukov M.Yu., Shiryayeva E.V. Hodograph Method and Numerical Solution of the Two Hyperbolic Quasilinear Equations System. Part II. Zonal Electrophoresis Equations. 2015. 23 p. URL: <http://arxiv.org/abs/1503.01762>. (дата обращения: 13.07.2016)
4. Елаева М.С. Исследование зонального электрофореза двухкомпонентной смеси веществ // Мат. моделирование. 2010. Т. 22, № 9. С. 146–160.
5. Жуков М.Ю., Ширяева Е.В., Долгих Т.Ф. Метод годографа для решения гиперболических и эллиптических квазилинейных уравнений. Ростов н/Д. : Изд-во ЮФУ, 2015. 126 с.
6. Долгих Т.Ф., Жуков М.Ю., Ширяева Е.В. Пространственно-периодические решения уравнений переноса массы // Современные методы и проблемы теории операторов и гармонического анализа и их приложения-V : тез. докл. Междунар. науч. конф. 26.04–01.05.2015. Ростов н/Д., 2015. С. 102–103.
7. Долгих Т.Ф., Жуков М.Ю., Ширяева Е.В. Исследование процесса массопереноса в случае уравнений эллиптического типа // Численное моделирование прибрежных, шельфовых и устьевых процессов : тез.

докл. Междунар. науч. конф. 05–09.10.2015. Ростов н/Д., 2015. С. 20.

8. Долгих Т.Ф., Жуков М.Ю., Ширяева Е.В. Решение квазилинейных уравнений эллиптического типа для зонального электрофореза // Современные методы и проблемы теории операторов и гармонического анализа и их приложения – VI : тез. докл. Междунар. науч. конф. 24.04–29.04.2016. Ростов н/Д., 2016. С. 102–103.

9. Долгих Т.Ф. Уравнения эллиптического типа для зонального электрофореза // Современные проблемы механики сплошной среды : тр. XVIII Междунар. конф. 7.11–10.11.2016. Ростов н/Д. : Изд-во ЮФУ, 2016. Т. 1. С. 179–183.

10. Рождественский Б.Л., Яненко Н.Н. Системы квазилинейных уравнений. М. : Наука, 1978. 688 с.

11. Жданов С.К., Трубников Б.А. Квазигазовые неустойчивые среды. М.: Наука, 1991. 176 с.

12. Елаева М.С., Жуков М.Ю., Ширяева Е.В. Взаимодействие слабых разрывов и метод годографа для задачи о фракционировании двухкомпонентной смеси электрическим полем // ЖВМ и МФ. 2016. Т. 56, № 8. С. 75–89.

13. Senashov S.I., Yakhno A. Conservation laws, hodograph transformation and boundary value problems of plane plasticity // International J. of Non-Linear Mechanics. 2016. Vol. 85. P. 1–5.

14. Senashov S.I., Yakhno A. Application of conservation laws to Dirichlet problem for elliptic quasilinear systems // SIGMA. 2012. Vol. 8, 071. 16 p.

15. Copson E.T. On the Riemann-Green Function // Arch. Ration. Mech. Anal. 1958. Vol. 1. P. 324–348.

References

1. Bab'skii V.G., Zhukov M.Yu., Yudovich V.I. *Matematicheskaya teoriya elektroforeza: Primenenie k metodam fraktsionirovaniya biopolimerov* [Mathematical theory of electrophoresis: Application to methods of fractionation of biopolymers]. Kiev : Naukova dumka, 1983, 202 p.
2. Zhukov M.Yu. *Massoperenos elektricheskim polem* [Mass transport with an electric field]. Rostov-on-Don: Izd-vo RGU, 2005, 216 p.
3. Zhukov M.Yu., Shiryayeva E.V. *Hodograph Method and Numerical Solution of the Two Hyperbolic Quasilinear Equations System. Part II. Zonal Electrophoresis Equations*. 2015. 23 p. Available at: <http://arxiv.org/abs/1503.01762> (accessed 13.07.2016).
4. Elaeva M.S. *Issledovanie zonal'nogo elektroforeza dvukhkomponentnoi smesi veshchestv* [Zonal electrophoresis study of a two-component mixture of substances]. *Mat. modelirovanie*. 2010, vol. 22, No. 9, pp. 146-160.
5. Zhukov M.Yu., Shiryayeva E.V., Dolgikh T.F. *Metod godografa dlya resheniya giperbolicheskikh i ellipticheskikh kvazilineinykh uravnenii* [The hodograph method for solving hyperbolic and elliptic quasilinear equations]. Rostov-on-Don: Izd-vo YuFU, 2015, 126 p.

6. Dolgikh T.F., Zhukov M.Yu., Shiryaeva E.V. [Spatially periodic solutions of the mass transfer equations]. *Sovremennyye metody i problemy teorii operatorov i garmonicheskogo analiza i ikh prilozheniya - V* [Modern methods and problems of the theory of operators and harmonic analysis and their applications - V]. Abstracts of the International Scientific Conference, 26.04-01.05.2015. Rostov-on-Don, 2015, pp. 102-103.

7. Dolgikh T.F., Zhukov M.Yu., Shiryaeva E.V. [Investigation of the process of mass transfer in the case of equations of elliptic type]. *Chislennoe modelirovanie pribrezhnykh, shel'fovykh i ust'evykh protsessov* [Numerical modeling of coastal, shelf and wellhead processes]. Abstracts of the International Scientific Conference, 05-09.10.2015. Rostov-on-Don, 2015, p. 20.

8. Dolgikh T.F., Zhukov M.Yu., Shiryaeva E.V. [Solution of quasilinear equations of elliptic type for zonal electrophoresis]. *Sovremennyye metody i problemy teorii operatorov i garmonicheskogo analiza i ikh prilozheniya - VI* [Modern methods and problems of the theory of operators and harmonic analysis and their applications - VI]. Abstracts of the International Scientific Conference, 24.04-29.04.2016. Rostov-on-Don, 2016, pp. 102-103.

9. Dolgikh T.F. [Equations of elliptic type for zonal electrophoresis]. *Sovremennyye problemy mekhaniki*

sploshnoi sredy [Current problems in continuum mechanics]. Works of the XVIII International Conference, 7.11-10.11.2016. Rostov-on-Don: Izd-vo YuFU, 2016, vol. 1, pp. 179-183.

10. Rozhdestvenskii B.L., Yanenko N.N. *Sistemy kvazilineinykh uravnenii* [Systems of quasilinear equations]. Moscow: Nauka, 1978, 688 p.

11. Zhdanov S.K., Trubnikov B.A. *Kvazigazovyye neustoychivyye sredy* [Quasigas unstable media]. Moscow: Nauka, 1991, 176 p.

12. Elaeva M.S., Zhukov M.Yu., Shiryaeva E.V. *Vzaimodeistvie slabyykh razryvov i metod godografa dlya zadachi o fraksionirovanii dvukhkomponentnoi smesi elektricheskim polem* [Interaction of weak discontinuities and the hodograph method for the problem of the fractionation of a two-component mixture by an electric field]. *ZhVM i MF*. 2016, vol. 56, No. 8, pp. 75-89.

13. Senashov S.I., Yakhno A. Conservation laws, hodograph transformation and boundary value problems of plane plasticity. *International J. of Non-Linear Mechanics*. 2016, vol. 85, pp. 1-5.

14. Senashov S.I., Yakhno A. Application of conservation laws to Dirichlet problem for elliptic quasilinear systems. *SIGMA*. 2012, vol. 8, 071, 16 p.

15. Copson E.T. On the Riemann-Green Function. *Arch. Ration. Mech. Anal.* 1958, vol. 1, pp. 324-348.

УДК 519.1

DOI 10.23683/0321-3005-2017-3-1-36-41

О ЗАДАЧЕ РАЗМЕЩЕНИЯ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ В СЕТЯХ С РАСПРЕДЕЛЕНИЕМ ПОТОКА. I. NP-ПОЛНОТА

© 2017 г. Д.О. Свиридкин¹, В.А. Скороходов¹

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

THE PROBLEMS OF CONSUMERS PLACEMENT IN NETWORKS WITH CONDITIONS OF FLOW DISTRIBUTION. I. NP-COMPLEXITY

D.O. Sviridkin¹, V.A. Skorokhodov¹

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

Свиридкин Дмитрий Олегович – студент, Институт математики, механики и компьютерных наук им. И. И. Воровича, Южный федеральный университет, ул. Мильчакова, 8а, г. Ростов-на-Дону, 344090, Россия, e-mail: sv.11@mail.ru

Dmitry O. Sviridkin - Student, Vorovich Institute of Mathematics, Mechanics and Computer Science, Southern Federal University, Milchakova St., 8a, Rostov-on-Don, 344090, Russia, e-mail: sv.11@mail.ru

Скороходов Владимир Александрович – кандидат физико-математических наук, доцент, Институт математики, механики и компьютерных наук им. И. И. Воровича, Южный федеральный университет, ул. Мильчакова, 8а, г. Ростов-на-Дону, 344090, Россия, e-mail: pdvaskor@yandex.ru

Vladimir A. Skorokhodov - Candidate of Physics and Mathematics, Associate Professor, Vorovich Institute of Mathematics, Mechanics and Computer Science, Southern Federal University, Milchakova St., 8a, Rostov-on-Don, 344090, Russia, e-mail: pdvaskor@yandex.ru

Рассмотрены ориентированные сети с потреблением потока. Особенностью таких сетей является то, что для некоторых вершин указана величина потребления потока, т.е. величина входящего потока в некоторую вершину может не совпадать с величиной выходящего. На таких сетях рассмотрены задачи размещения потребителей ресурса в узлах сети при различных условиях распределения потока. Задачи рассмотрены в вычислительной и оптимизационной формулировках. Условия распределения введены в случаях вещественного и целочисленного потоков. В качестве рассматриваемых условий распределения для вещественного потока предложены условия жесткого распределения, для целочисленного – условия распределения по приоритетам и нежесткого распределения с приоритетами. Выбранные условия распределения таковы, что поток фиксированной величины определяется единственным образом. Показано, что задачи размещения потребителей в предположении неравенства классов P и NP не могут быть решены за полиномиальное время. Доказано, что задача обеспечения заданной величины потребления является NP-полной независимо от выбранных условий распределения потока. Для задачи обеспечения максимальной величины потребления доказана ее NP-полнота в сильном смысле для случаев целочисленного потока и всех рассмотренных условий распределения потока.

Ключевые слова: сети с потреблением потока, распределение потока, максимальный поток в сети.

We consider the directed networks with flow consumption. The feature of these networks is that some vertex has the value of flow consumption, so value of incoming and outgoing flows for some vertex can be different. For these networks we consider the problems of placement resource consumers in vertex of network under a special conditions of flow distribution. The problems are considered in computing and optimization formulations. The conditions of flow distribution are imposed in integer and real cases. As these conditions of flow distribution we propose strict distribution for real case and distribution by priorities or non strict distribution with priorities for integer case. The chosen conditions of distribution provide the property: the flow of fixed value is determined uniquely. It is shown that the problems of placement of consumers may not be solved in polynomial time if $P \neq NP$. It is proved that the problem of ensuring a predetermined consumption value is NP-complete problem, regardless of the selected conditions of flow distribution. For the problem of ensuring a maximal consumption value we proved that last one is strongly NP-complete problem in integer case under all considering conditions.

Keywords: networks with flow consumption, flow distribution, maximum flow on a network.

Введение

В работе [1] изучены ориентированные сети с возможностью потери (утечек) потока в вершинах и разработан метод нахождения максимального потока в таких сетях. Рассмотренные сети таковы, что величина максимальной потери $\psi(x)$ указана

для каждой вершины x , и приходящий в вершину x поток обязательно уменьшается на величину $a(x)$, не превосходящую $\psi(x)$.

В настоящей работе рассмотрены сети, аналогичные сетям из [1]: для каждого узла указаны величины потребления $\psi(x)$ ресурса, т.е. приходящий ресурс уменьшается на величину $0 \leq a(x) \leq \psi(x)$.

Для таких сетей выделены задачи максимизации суммарной величины фактического потребления: задача о выборе подмножества вершин заданной мощности, на котором достигается максимальная величина потребления при заданной величине входящего потока сети. Приходящий поток в некоторую вершину уменьшается только в том случае, если вершина принадлежит выбранному подмножеству. Из-за неопределённости при насыщении дуг сети остатком потока введены определённые правила, по которым дуги сети насыщаются потоком. В качестве таких правил рассмотрены различные условия распределения потока в сети [2, 3].

В случае целочисленного потока в сети рассмотрены распределение потока по приоритетам и нежесткое распределение с приоритетами, а в вещественном случае – жесткое распределение [2, 3].

Для каждого случая доказана сильная NP-полнота соответствующей задачи выбора подмножества для размещения потребителей для любого способа распределения потока.

Основные понятия

Рассмотрим сеть $G(X, U, f)$ такую, что для каждой её дуги $u \in U$ заданы 2 величины: пропускная способность $c(u)$ и доля $p(u)$ прохождения по ней потока, приходящего в начальную вершину дуги u [4–6]. Обозначим через $F(u)$ величину потока F , проходящего по дуге u .

Ясно, что для величин $p(u)$, $c(u)$ и $F(u)$ справедливы следующие выражения [4, 7]:

$$\begin{cases} \sum_{u \in [x]^-} F(u) - \sum_{u \in [x]^+} F(u) = 0, & \forall x \neq s, t; \\ 0 \leq F(u) \leq c(u), & \forall u \in U. \end{cases} \quad (1)$$

$$\sum_{u \in [x]^+} p(u) = 1, \quad \forall x \neq t. \quad (2)$$

Здесь и далее через $[x]^+$ будем обозначать множество дуг, выходящих из вершины x , а через $[x]^-$ – входящих.

Определение 1. Поток F в сети G будем называть потоком с распределением, если для него выполняются соотношения (1) и для каждой дуги $u \in U$ и величины входящего в вершину $(p_1 \circ f)(u)$ потока определена функция $\alpha : U \times R_+ \rightarrow R_+$, удовлетворяющая следующим условиям:

$$F(u) = \alpha \left(u, \sum_{v \in (p_1 \circ f)(u)^-} F(v) \right) \quad \forall u \in U. \quad (3)$$

Такую функцию будем далее называть методом или алгоритмом распределения потока по дугам.

Определение 2. Поток F в сети G называется жёстко распределённым, если для него выполняются соотношения (1), (2), и величины пропускаемого по дугам потока удовлетворяют следующим соотношениям:

$$F(u_i) \cdot p(u_j) = F(u_j) \cdot p(u_i) \quad \forall u_i, u_j \in [x]^+, \quad (4)$$

$$\forall x \in X \setminus \{t\}.$$

Определение 3. Сети, в которых рассматриваются только потоки, удовлетворяющие условиям (1), (2) и (4), называются сетями с жёстким распределением потока.

Определение 4. Сети, в которых рассматриваются только потоки, удовлетворяющие условиям (1) и (3), будем называть сетями с нежёстким распределением потока.

Кроме этого, рассмотрим потоки с распределением по приоритетам и с нежестким распределением по приоритетам.

Определение 5. Будем говорить, что поток распределяется по приоритетам, если для каждой вершины x выходящие из нее дуги упорядочены $\{u_1, u_2, \dots, u_{\deg^+(x)}\}$ (по приоритету) и выполняется соотношение $F(u_i) > 0 \Rightarrow \forall j < i : F(u_j) = c(u_j)$.

Определение 6. Будем говорить, что целочисленный поток распределён нежёстко с приоритетами, если для каждой вершины x выходящие из нее дуги упорядочены $\{u_1, u_2, \dots, u_{\deg^+(x)}\}$ (по приоритету). И при величине выходящего из x потока $F_{out}(x)$ выполняется соотношение

$$F(u_i) > \lfloor F_{out}(x) \cdot p(u_i) \rfloor \Rightarrow \forall j < i : F(u_j) = c(u_j).$$

Пусть сеть $F(X, U, f)$ с условием распределения потока такова, что для каждой её вершины $x \in X$ указана функция $\psi(x)$ – величина максимально возможного потребления потока в вершине x [1]. Будем считать, что для источника s и стока t величина потребления равна нулю. В этой сети будем рассматривать потоки со следующими свойствами:

$$\begin{cases} \sum_{u \in [x]^-} F(u) = \sum_{u \in [x]^+} F(u) + a(x), & \forall x \in X; \\ 0 \leq F(u) \leq c(u), & \forall u \in U, \end{cases} \quad (5)$$

где $a(x) = \min \left\{ \psi(x), \sum_{u \in [x]^+} F(u) \right\}$ – величина фактического потребления потока в вершине x , при этом $0 \leq a(x) \leq \psi(x)$.

Определение 7. Сеть $G(X, U, f)$ будем называть сетью с потреблением, если в ней рассматриваются только такие потоки, которые удовлетворяют условию (5).

Отметим, что условие (3) для сети с потреблением будет иметь вид

$$F(u) = \alpha \left(u, \sum_{v \in [(p_1 \circ f)(u)]^-} F(v) - a((p_1 \circ f)(u)) \right), \quad (6)$$

$$\forall u \in U.$$

Будем полагать, что рассматриваемые далее сети являются сетями без петель, кратных дуг и контуров.

Определение 8. Задачей выбора подмножества вершин сети G с распределением потока для размещения потребителей [1] при заданной величине входного потока F_{start} (коротко: задачей размещения потребителей) будем называть задачу нахождения такого k -элементного подмножества вершин V , что при выполнении (5), (6) и условия, что $a(x) = 0$ для всех вершин $x \in X \setminus V$, разность $F_{start} - \sum_{u \in [t]^-} F(u)$ максимальна.

Иначе говоря, в заданной сети с распределенным потоком величины F_{start} по известным для каждой вершины величинам, на которые можно максимально уменьшить величины выходящего из вершины потока, и по заданному правилу пересчета потока по исходящим дугам требуется выбрать k вершин, после уменьшения выходящего потока из которых величина потока, приходящего в сток, была бы минимальна.

Пример 1. Продемонстрируем перечисленные способы распределения. Рассмотрим сеть G на рис. 1.

Числа 1 и 2 у дуг u_2 и u_3 соответственно – это нумерация в порядке убывания приоритетов. Рассмотрим следующий поток без потребления: $F(u_1) = 10$, $F(u_i) = 5$, $i = 2..5$. Величины потребления в вершинах зададим следующим образом: $\psi(1) = 7$, $\psi(2) = 5$, $\psi(3) = 5$.

Пропускные способности дуг будем полагать равными величинам проходящего по ним потока.

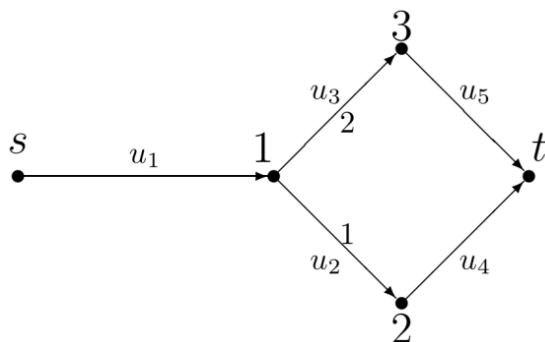


Рис. 1. Сеть G / Fig. 1. Network G

Рассмотрим несколько вариантов выбора вершин.

Вариант 1. Пусть выбирается одна вершина – вершина 1. Рассмотрим последующую конфигурацию для трех вышеописанных правил распределения потока.

Поскольку $a(1) = \min\{\psi(1), F(u_1)\} = \min\{7, 10\} = 7$, следовательно, из (5) получим $F(u_1) = F(u_2) + F(u_3) + a(1)$, т.е. $F(u_2) + F(u_3) = 3$.

Распределение по приоритетам. Сначала заполняется дуга u_2 . Ее пропускная способность $c(u_2) = 5$. Величина нераспределенного потока равна 3, поэтому $F(u_2) = 3$ и $F(u_3) = 0$. Таким образом, в сток приходят 3 единицы потока.

Нежесткое распределение с приоритетами. Будем считать распределение равномерным, т.е.

$$p(u) = \frac{1}{\deg_+(p_1 \circ f)(u)}$$

(для неравномерного распределения насыщение будет проходить аналогично).

Первый этап. Распределение согласно долям $p(u_2) = p(u_3) = 0,5$ при величине $F_{out} = 3$ имеет вид $F(u_2) = F(u_3) = \lfloor 3 \cdot 0,5 \rfloor = 1$.

Второй этап. Оставшийся нераспределенный поток единичной величины распределяется следующим образом. Поскольку приоритет дуги u_2 выше, значит, в итоге получаем $F(u_2) = 2$, $F(u_1) = 1$. Таким образом, в сток приходит поток величины 3.

Жесткое распределение. В этом случае также распределение будем считать равномерным. Поскольку $F(u_2) \cdot 0,5 = F(u_3) \cdot 0,5$ и $F(u_2) + F(u_3) = 3$, то $F(u_2) = F(u_3) = 1,5$. Таким образом, в сток приходит поток величины 3.

Вариант 2. Пусть теперь выбираются две вершины: 1 и 3.

Ранее мы определили величины потока на дугах, когда выбрана вершина 1. Пересчитаем их, добавив вершину 3: $F(u_3) = F(u_5) + a(3)$.

Распределение по приоритетам. Поскольку в этом случае $a(3) = \min\{\psi(3), F(u_3)\} = \min\{5, 0\} = 0$, то $F(u_5) = 0$ и в сток приходит поток величины 3.

Нежесткое распределение с приоритетами. Поскольку в этом случае $a(3) = \min\{\psi(3), F(u_3)\} = \min\{5, 1\} = 1$, значит, $F(u_5) = 0$ и в сток приходят 2 единицы потока.

Жесткое распределение. Поскольку в этом случае $a(3) = \min\{\psi(3), F(u_3)\} = \min\{5, 1,5\} = 1,5$, то $F(u_5) = 0$ и в сток приходит поток величины 1,5.

Конец примера 1.

Пример 1 показывает, что величина фактического потребления в вершине зависит от способа распределения, а также от величин фактического потребления в других вершинах.

Алгоритмическая сложность решений задачи размещения потребителей в сети

Рассмотрим решение поставленной задачи при помощи «жадного» подхода: на каждом этапе выбирается вершина, дающая в текущий момент наибольшую прибавку к суммарному потреблению. Обратимся к рассмотренному примеру 1 и покажем, что такой подход, вообще говоря, не дает оптимального решения.

Во всех рассмотренных случаях распределения сначала будет выбрана вершина 1, а затем вершина 2. Однако в случае распределения по приоритетам такой выбор даст суммарную величину потребления 10; в случае нежесткого распределения – 9, в случае жесткого – 8,5. Оптимальное решение – выбрать вершины 2 и 3 и во всех случаях получить сумму 10. «Жадный» подход дает оптимальное решение на этом примере только для распределения по приоритетам, но это не гарантировано для других конфигураций.

Ясно, что можно получить точное решение задачи путем перебора всех возможных подмножеств вершин величины k , но временная сложность такого решения, вообще говоря, растет экспоненциально с увеличением числа вершин и размера подмножеств. Поэтому возникает вопрос о существовании других алгоритмов, дающих оптимальное решение, но работающих за полиномиальное время. Далее мы покажем, что, вероятнее всего (если $P \neq NP$ [8, 9]), таких алгоритмов не существует.

Сформулируем две оптимизационные задачи размещения потребителей и докажем, что в обоих случаях они NP-полны [9] при любом рассмотренном способе распределения потока.

Задача 1 (об установлении фиксированного значения фактического потребления). Установить существование подмножества $\hat{V} \subset X$ такого, что $|\hat{V}| = k$ и суммарная величина фактического потребления после размещения потребителей равна a , где a задано заранее.

Задача 2 (об установлении величины фактического потребления не меньше заданного значения). Установить существование подмножества $\hat{V} \subset X$ такого, что $|\hat{V}| = k$ и суммарная величина фактического потребления после размещения потребителей не меньше a , где a задано заранее.

Отметим, что задача 2 соответствует оптимизационной задаче (найти множество вершин, обеспечивающих максимальное потребление), а задача 1 –

вычислительной (определить множество вершин, если известна величина утечек). Ясно, что многократным решением задачи 1 можно без выполнения дополнительных преобразований решить задачу 2, но не наоборот.

Теорема 1. Задача 1 является NP-полной независимо от способа распределения потока, если алгоритм распределения выполняется за полиномиальное от числа дуг время.

Доказательство. Задача 1 принадлежит классу NP, поскольку если представлен сертификат решения [8] – подмножество вершин \hat{V} , то можно расставить потребителей в выбранных вершинах и определить величину результирующего потока за полиномиальное время. Алгоритм размещения: провести топологическую сортировку сети (что возможно, так как в сети нет контуров), начиная с источника. Далее, двигаясь по полученному в результате списку, размещать потребителей, пересчитывая выходящий поток и применяя алгоритм распределения, по условию выполняющийся за полиномиальное от числа дуг время.

Сведем задачу о сумме подмножества (необходимо выбрать подмножество чисел с заданной суммой) к задаче 1.

Пусть $N = |S|$, где S – некоторое заданное мультимножество натуральных чисел. Под мультимножеством будем понимать множество, возможно, содержащее одинаковые элементы.

Построим сеть $G(X, U, f)$ следующим образом. Определим множество вершин $X = \{s, 1, 2, \dots, N, t\}$, где вершины s и t являются соответственно источником и стоком сети G . Дуги сети $\{u_1, \dots, u_N\}$ таковы, что $f(u_0) = (s, 1)$, $f(u_N) = (N, t)$ и $f(u_i) = (i, i + 1)$ для всех $i \in [1; N - 1]_Z$.

Зафиксируем некоторую нумерацию элементов во множестве S : $S = \{S_1, \dots, S_N\}$. Положим пропускные способности всех дуг сети G , а также величину стартового потока F_{start} равными сумме элементов S . Величины потребления в вершинах сети G зададим следующим образом: $\psi(i) = S_i$ для всех значений $i \in [1; N]_Z$.

Заметим, что построение сети G осуществляется за полиномиальное время.

Ясно, что если существует способ выбрать k чисел множества S так, чтобы их сумма была равной заданному числу A , то существует способ выбрать k вершин-потребителей в построенной сети G так, чтобы величина фактического потребления в сети была равна A . Обратное также верно.

Поскольку задача определения существования k -элементного подмножества с заданной суммой NP-полна [9], то и задача 1 тоже NP-полна.

Теорема 1 доказана.

Теорема 2. Задача 2 для случаев распределения с приоритетами и нежесткого распределения NP-полна в сильном смысле [9].

Доказательство. Аналогично задаче 1 можно показать, что задача 2 также принадлежит к классу NP.

Сведем задачу о вершинном покрытии [8, 9] к задаче 2 в следующей формулировке: существует ли для заданного неориентированного связного графа G вершинное покрытие величины k ?

Подмножество вершин $\hat{V} \in X$ называется вершинным покрытием, если для каждой дуги $u \in U$ или $(p_1 \circ f)(u) \in \hat{V}$, или $(p_2 \circ f)(u) \in \hat{V}$.

На основе графа G будем строить сеть G' и одновременно с построением сети распределять в ней поток. В конечном итоге будет построена сеть, в которой для каждой вершины x , отличной от источника и стока, будет справедливо утверждение: проходящий через x поток равен числу инцидентных ей дуг в графе G , а проходящий через всю сеть поток равен числу дуг графа G .

Построение сети и распределение потока будем проводить в несколько этапов.

1. Выберем любую вершину графа G или любой набор независимых вершин. Пометим эти вершины как использованные и поместим их в очередь Q .

2. Пока Q не пуста, выбираем некоторую вершину x из Q и полагаем $\psi(x) = \deg(x)$.

Если для вершины x остались инцидентные ей дуги, для которых не зафиксирована ориентация, то достраиваем дугу u такую, что $f(u) = (s, x)$, и пропускаем по ней поток, равный числу таких дуг.

Каждую еще не ориентированную дугу u ориентируем так, что вершина x является её началом, и пропускаем по ней поток, равный 1. Полагаем доли прохождения потока по этим дугам равными между собой. Если вершина на другом конце дуги u не помечена, помечаем её и добавляем в конец очереди Q .

Если величина полученного выходящего из вершины x потока меньше величины входящего, то достраиваем дугу v такую, что $f(v) = (x, t)$, и пропускаем по ней разницу входящего и выходящего потока. Этой дуге назначаем долю, равную нулю, и наименьший приоритет.

Заметим, что построение сети выполняется за полиномиальное время обходом исходного графа в ширину.

Докажем теперь, что в исходном графе G существует вершинное покрытие мощности k тогда и только тогда, когда в построенной сети G' существует способ выбора k вершин-потребителей такой, что $F_{start} - B = 0$, где B – суммарная величина фактического потребления в сети.

Необходимость. Пусть множество \hat{V} – вершинное покрытие мощности k . Покажем, что если выбраны вершины из \hat{V} , то в построенной сети выходящий поток равен нулю.

Поскольку \hat{V} – вершинное покрытие, то для каждой дуги u графа G одна из вершин $x = (p_1 \circ f)(u)$, $y = (p_2 \circ f)(u)$ принадлежит множеству \hat{V} .

Отметим, что вершина y гарантированно имеет дугу в сток, поскольку в нее входит поток величины $\deg_+(y)$ по входящим дугам, присутствующим в исходном графе, и величины $\deg_-(y)$ из источника, а по дугам, отличным от дуги в сток, проходит только поток величины $\deg_-(y)$, при этом величина $\deg_+(y)$ не меньше единицы.

В силу того, что дугам, ведущим в сток, присвоен наименьший приоритет, следовательно, если после размещения потребителей по дуге u проходит нулевой поток, то из вершины x в сток также проходит только нулевой поток.

Разместим потребителей в выбранных вершинах множества \hat{V} и рассмотрим каждую дугу u исходного графа.

1. Если по ней проходит нулевой поток, то, как было отмечено ранее, в сток попадает на единицу меньший поток, чем до размещения.

2. Если по ней проходит единичный поток, то поскольку \hat{V} – вершинное покрытие, значит, $x \notin \hat{V}$, $y \in \hat{V}$. Отсюда следует, что весь выходящий поток из y обнуляется и, значит, в сток попадает на единицу меньший поток, чем до размещения.

Поскольку за каждую дугу поток уменьшается на единицу, результирующий поток будет уменьшен на $|U|$. Так как через всю сеть проходил поток $|U|$, то результирующий поток равен нулю.

Достаточность. Пусть для размещения потребителей выбрано подмножество вершин \hat{V} мощности k , на котором достигается минимальное значение результирующего потока $F_{start} - B = 0$ (структура G' такова, что \hat{V} существует). Покажем, что \hat{V} является вершинным покрытием.

Предположим противное, что существует непокрытое ребро u .

Отметим, что в таком случае по нему протекает как минимум единица потока, поскольку к вершине $x = (p_1 \circ f)(u)$ подведена дуга из источника, через которую поступает столько единиц потока, сколько у вершины x исходящих дуг, не ведущих в сток.

Таким образом, в вершину $u = (p_2 \circ f)(u)$ поступает хотя бы единица потока по входящим дугам из вершин, отличных от источника. Весь поток по исходящей от источника дуге к вершине u распределяется по исходящим из u дугам, не ведущим в сток, заполняя их полностью. Отсюда следует, что приходящая по дуге u единица потока будет распределена из вершины u в сток напрямую. Значит, в сток попадает хотя бы единица потока. Получаем противоречие с тем, что величина результирующего потока равна нулю.

Таким образом, сильная NP-полнота задачи 2 следует из сильной NP-полноты задачи о вершинном покрытии.

Теорема 2 доказана.

Сведение, использованное в доказательстве теоремы 2, для жесткого случая не применимо, так как опирается именно на приоритеты.

Весьма примечательно, что задачу поиска вершинного покрытия для двудольного графа, имеющую полиномиальное решение, можно решить при помощи задачи 2 для жесткого случая.

Возьмем то же самое сведение, что и в теореме 2, но в качестве начальных вершин обозначим все вершины первой доли. Они, очевидно, независимы.

В построенной сети ни одна вершина первой доли не будет иметь дуги в сток, так как в процессе построения все инцидентные им дуги еще не будут ориентированы, а ни одна вершина второй доли не будет иметь дуги из источника, так как все инцидентные ей дуги уже будут ориентированы как входящие. В таком случае приоритеты не нужны.

Авторы признательны проф. Я.М. Ерусалимскому за ценное обсуждение содержания статьи и благожелательное отношение к их научной деятельности.

Литература

1. Скороходов В.А., Шевелев М.В. Задачи о потере потока в ориентированных сетях // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2015. № 2. С. 47–53.
2. Скороходов В.А., Чеботарева А.С. Задача о максимальном потоке в сети с особыми условиями распределения потока // Дискретный анализ и исследование операций. 2015. Т. 22, № 3. С. 55–74.
3. Ерзин А.И., Тахонов И.И. Задача поиска сбалансированного потока // Сиб. журн. индустр. математики. 2006. Т. IX, № 4. С. 50–63.
4. Ерусалимский Я.М., Скороходов В.А., Кузьмина М.В., Петросян А.Г. Графы с нестандартной до-

стижимостью: задачи, приложения. Ростов н/Д. : Изд-во ЮФУ, 2009.

5. Скороходов В.А. Потоки в обобщенных сетях со связанными дугами // Моделирование и анализ информационных систем. 2012. Т. 19, № 2. С. 41–52.

6. Скороходов В.А. Потоки в сетях с меняющейся длительностью прохождения // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2011. № 1. С. 21–26.

7. Ford L.R., Fulkerson D.R. Flows in networks. New Jersey : Princeton University Press, 1974.

8. Cormen T.H., Leiserson C.E., Rivest R.L., Stein C. Introduction to Algorithms. MIT Press, 2009.

9. Gary M., Johnson D. Computing Machines and Hard-to-Solve Problems. М. : Мир, 1982.

References

1. Skorokhodov V.A., Shevelev M.V. Zadachi o potere potoka v orientirovannykh setyakh [Problems on the loss of a flow in oriented networks]. *Izv. vuzov. Sev.-Kavk. region. Estestv. nauki.* 2015, No. 2, pp. 47-53.
2. Skorokhodov V.A., Chebotareva A.S. Zadacha o maksimal'nom potoke v seti s osobymi usloviyami raspredeleniya potoka [The problem of the maximum flow in a network with special flow distribution conditions]. *Diskretnyi analiz i issledovanie operatsii.* 2015, vol. 22, No. 3, pp. 55-74.
3. Erzin A.I., Takhonov I.I. Zadacha poiska sbalansirovannogo potoka [The problem of finding a balanced flow]. *Sib. zhurn. industr. matematiki.* 2006, vol. IX, No. 4, pp. 50-63.
4. Erusalimskii Ya.M., Skorokhodov V.A., Kuz'minova M.V., Petrosyan A.G. *Grafy s nestandardnoi dostizhimost'yu: zadachi, prilozheniya* [Graphs with non-standard attainability: tasks, applications]. Rostov-on-Don: Izd-vo YuFU, 2009.
5. Skorokhodov V.A. Potoki v obobshchennykh setyakh so svyazannymi dugami [Flows in generalized networks with coupled arcs]. *Modelirovanie i analiz informatsionnykh sistem.* 2012, vol. 19, No. 2, pp. 41-52.
6. Skorokhodov V.A. Potoki v setyakh s menyayushcheysya dlitel'nost'yu prokhozhdeniya [Flows in networks with varying transit times]. *Izv. vuzov. Sev.-Kavk. region. Estestv. nauki.* 2011, No. 1, pp. 21-26.
7. Ford L.R., Fulkerson D.R. *Flows in networks.* New Jersey: Princeton University Press, 1974.
8. Cormen T.H., Leiserson C.E., Rivest R.L., Stein C. *Introduction to Algorithms.* MIT Press, 2009.
9. Gary M., Johnson D. *Computing Machines and Hard-to-Solve Problems.* Moscow: Mir, 1982.

БИОЛОГИЧЕСКИЕ НАУКИ

BIOLOGICAL SCIENCES

УДК 581.9 (571.150)

DOI 10.23683/0321-3005-2017-3-1-42-48

НЕПРЯМАЯ ОРДИНАЦИЯ ТРАВЯНОЙ РАСТИТЕЛЬНОСТИ СКАЛИСТОГО ХРЕБТА (В ПРЕДЕЛАХ КАРАЧАЕВО-ЧЕРКЕССИИ)

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

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

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

INDIRECT ORDINATION OF THE GRASSY VEGETATION OF THE ROCKY RIDGE (WITHIN KARACHAY-CHERKESSIA)

*O.N. Demina*¹, *F.M. Borlakova*¹, *I.R. Uzdenov*¹, *P.A. Dmitriev*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 естествознания 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 Biological Science, 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 Магометовна – аспирант, кафедра естествознания 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 естествознания 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 Biological Science, Botanical Garden, Ivanovsky Academy of Biology and Biotechnology, Southern Federal University, Botanicheskii Spusk, 7, Rostov-on-Don, 344006, Russia, e-mail: pdmitroff@gmail.com

Результаты непрямо́й ординации 15 геоботанических описаний (методы DCA и NMDS) дополняют и подтверждают синтаксономические построения, раскрывая закономерности распределения сообществ травяной растительности куэсты Скалистого хребта в пространстве экологических факторов (в пределах Карачаево-Черкесской Республики).

Только первая ось вариации имеет экологически достоверную информацию, которую можно интерпретировать как ось увлажнения: наиболее влажные горные луговые сообщества с элементами субальпийки расположились на одном конце оси; на другом сгруппировались степные сообщества с участием нагорных ксерофитов. Распределение предварительно выделенных шести сообществ, или фитоценонов, рассмотрено по фактору увлажнения, и все описания разделяются на две части: первые три фитоценона с нагрузкой на первую ось вариации в ординационном про-

странстве представляют дуга, в том числе остепненные и переходные к степным сообществам; три последующих, расположившихся по другую сторону 2-й и 3-й осей ординации, представляют степи.

Интерпретировать остальные выделенные 2 оси ординации по составу конечных групп сообществ не удалось, так как их значения оказались ниже пороговых, в связи с чем необходимо проведение дальнейших исследований.

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

The results of indirect ordination of 15 geobotanical descriptions (DCA and NMDS methods) supplement and confirm the syntaxonomic constructions, revealing patterns of distribution of communities of grassland vegetation of the cusa of the Rocky Ridge in the space of environmental factors (within the Karachay-Cherkess Republic).

Only the first axis of the variation has ecologically reliable information, which can be interpreted as the axis of moisture: the wetter mountain meadow communities with subalpic elements are located at one end of the axis; on the other, steppe communities with participation of upland xerophytes were grouped. The distribution of the previously isolated six communities, or phytocenons, is considered according to the wetting factor and all descriptions are divided into two parts: the first three phytocenons with loads on the first axis of variation in the ordinal space represent meadows, including steppe and transitional to steppe communities; the next three, located on the other side of the second and third axes of ordination, represent the steppe.

It was not possible to interpret the remaining two ordinate axes for the composition of the end groups of communities, since their values were below the threshold values, which necessitated further research.

Keywords: Caucasus, Rocky Ridge, grassland vegetation, ordination, phytocenons, ecology.

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

Скалистый хребет расположен на северном склоне Кавказа и представляет среднегорное поднятие, или первую с юга гряду предгорий [1]. В пределах Карачаево-Черкесской Республики (КЧР) хребет сложен преимущественно верхнеюрскими известняковыми отложениями, которые представлены типично неритическими карбонатными и красноцветными сульфатно-галогенными осадками [2]. Он имеет форму куэсты с крутыми южными и пологими северными склонами, набирая высоту как с севера на юг, так и с запада на восток и достигая 2644 м (гора Мал. Бермамыт). Куэста Скалистого хребта к югу резко обрывается в Северо-Юрскую депрессию, часто почти вертикальными стенами до 300 м высотой и более. Крупные левобережные притоки Кубани разбивают его на несколько горных массивов, образуя скальные выступы – горы: Джангура, Баширка, Джиса, Баранаха и Громотуха; на правобережье, над плато, возвышаются Большой и Малый Бермамыты [2].

Особенности климата Скалистого хребта определяются его географическим положением, сложностью и разнообразием рельефа, близостью Черного моря. Благодаря этим факторам здесь появилась богатая травяная растительности на открытых склонах и плато [3]. Закономерности её распределения соответствуют сложившимся здесь природным условиям, связанным с высотой, широтой и долготой горной системы [4]. Главные климатические особенности заключаются в абсолютной высоте местности и снижении количества

осадков при движении с запада на восток, при удалении от Черного моря и возрастании континентальности климата [5]. В структуре высотной поясности Северного Кавказа все ландшафты Скалистого хребта КЧР отнесены к кубанскому варианту западно-северокавказского типа [6]. Распределение травяной растительности здесь связано с вертикальной зональностью или высотно-поясной приуроченностью экосистем по типу вертикальной поясности Западной части Северного Кавказа [7], когда большое значение имеет аридизация (континентализация) климата в направлении с запада на восток [8]. Это биоклиматическое секторное [9, 10] отражение природной обстановки в горах Кавказа [11], каждому из которых свойственен свой тип, или вариант поясности.

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

Южный, почти вертикальный 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 и здесь встречаются нетипичные для нее группы (например, бородачевые степи в нижних частях сухих склонов речных долин) [12].

На основании разработанной под руководством О.М. Урбанского геоботанической карты можно сделать вывод о том, что 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 субальпийки и сниженных субальпийских лугов, предгорных или среднегорных, часто 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 Сев. Кавказа» [8]. Изученные среднегорные сообщества отличаются по видовому составу и экологии от высокогорных западно-северокавказских [14, 15] и центрально-кавказских [16–18], однако выявление разнообразия и оценка их современного состояния с применением современных методов до сих пор не выполнялась.

Травяная растительность Скалистого хребта, равно как и природные экосистемы в целом, сильно пострадали 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 как в результате увеличения поголовья скота, так и неплановой деятельности горнодобывающей промышленности за последние 100 лет [12, 1].

Развитие рекреационного и познавательного туризма в Карачаево-Черкесии, а также возрождение огромного пласта национальной культуры, в том числе отгонного скотоводства (овцы, козы, лошади,

крупный рогатый скот), позволяет 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.

Материалы и методы

В пределах Карачаево-Черкесской Республики (КЧР) Скалистый хребет был исследован 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-Бердуковкий).

Всего в 2016 г. сделаны 15 геоботанических описаний травяной растительности, которые проводились на площадках 100 м² по общепринятым стандартным методикам [19]. Обработка валовой таблицы геоботанических описаний осуществлялась с помощью IBIS [20].

Для установления закономерностей отношения растений к условиям среды в пространстве применялись методы непрямой экологической ординации. Данные анализировались путём использования методов DCA (Detrended Correspondence Analysis – бестрендовый анализ соответствия [21], или метод взаимного усреднения), и NMS, или NMDS (Non-metrical Multidimensional Scaling – неметрическое многомерное шкалирование [22]), в программе Juice 7.0.42, с предварительной обработкой в TWINSPAN [23] и выделением фитоценозов. Учитывалось, что методы непрямой ординации особенно эффективны в том случае, когда удается однозначно интерпретировать выделенные оси по составу концевых групп видов или сообществ [24].

Результаты и их обсуждение

Нагрузка на ординационные оси (axis eigenvalue) была определена после проведения непрямой ординации. Каждая ординационная ось – это собственный вектор (eigenvectors), т.е. последовательность значений, определяющих точку в многомерном пространстве, имеющий соответствующую собственную величину. Эта величина равна рассеиванию засечек объектов (в данном случае описаний) на оси ординации, 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 и свыше 0,5 обычно означают хорошее рас-

сеяние вдоль оси и имеют экологически достоверную информацию [25].

По результатам ординации 15 геоботанических описаний травяной растительности куэсты Скалистого хребта по методу DCA (бестрендовый анализ соответствия), выполненной в пакете Juice 7.0.42 (рис. 1), мера значимости (eigenvalue) первой оси ординации (DCA 1) оказалась превышающей значение 0,5 и равняется 0,56; значимость второй 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 Р.Г.Г. Джонгман с соавторами [25], значимой является только первая ось ординации (DCA 1), отражающая экологически верную информацию, которую можно интерпретировать как ось увлажнения. Однако меры значимости второй (DCA 2) и третьей (DCA 3) осей имеют значения выше 0,25, хотя и ниже 0,5. Игнорируя последующие оси ординации, мы ожидаем, что первые три оси ординации все же будут иметь экологически верную информацию и наряду с выявлением главных факторов вариации, влияющих на распределение сообществ травяной растительности, возможно определить координату предварительно выделенных фитоценонов в пространстве экологических факторов.

Соответственно полученным результатам ординации (рисунок) и ранее проведенным ботаническим исследованиям на Скалистом хребте [1, 8, 12, 13], можно предположить, что описания первых трех фитоценонов, расположенных вдоль первой 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, то есть концевую группу сообществ на оси увлажнения [24].

Остальные геоботанические описания в 4, 5 и 6 фитоценонах (1 – 4, 8, 11 – 12), которые расположились по другую сторону второй (DCA 2) и третьей (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, то есть наиболее сухие условия относительно предыдущих, отмечены для последнего, шестого фитоценона и здесь должна располагаться другая противоположная концевая группа сообществ (рисунок). Второй и третий фитоценоны представляют настоящие и остепненные среднегорные луга соответственно; четвертый, пятый и шестой – луговые степи.

В первом фитоценоне отмечаются виды наиболее влажных горных луговых сообществ с элементами

субальпик: *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, шестом фитоценоне имеются виды т.н. 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*. Эти данные хорошо отражают нагрузку, с помощью которой интерпретируются оси нагрузок по составу концевых групп видов.

В экологическом пространстве геоботанические описания 2, 3 и 5 фитоценонов оказались расположенными ниже первой (DCA 1) и третьей (DCA 3) осей, то есть фитоценон 2 (описания 6, 7, 15), фитоценон 3 (описания 5, 9, 10) и фитоценон 5 (описания 1, 2, 8) распределились ниже относительно первой и третьей 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* (рисунок).

Остальные геоботанические описания (3, 4, 11 – 14) фитоценонов 1, 4 и 6, которые расположились выше первой и третьей осей, то есть с нагрузкой на вторую ось, и при этом по обе стороны от нее (DCA 2), ниже и выше третьей (DCA 3) подтверждают мысль о том, что вторая ось может рассматриваться как фактор вариации петрофитности сообществ: от среднегорных лугов с *Argyrolobium biebersteinii*, *Silene saxatilis*, с элементами субальпик (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 вторую и третью оси ординации полученные данные позволяют приблизительно, для чего необходимо проведение дальнейших исследований.

Заключение

Результаты ординации 15 геоботанических описаний травяной растительности куэсты Скалистого хребта показывают наличие шести фитоценонов, которые четко разделяются на две части, соответствующие различным типам растительности – лугам и степям. Первые три фитоценона с нагрузкой на первую ось вариации в ординационном пространстве представляют луга, в том числе

остепненные и переходные к степям сообщества (иногда луговые степи); три последующие, расположенные по другую сторону второй и третьей осей ординации, представляют степи.

Литература

1. *Танфильев В.Г.* Растительность Скалистого хребта между рр. Б. Лабой и М. Зеленчуком // Материалы по изучению Ставропольского края. Вып. 10. Ставрополь : Ставропольское книжное изд-во, 1960. С. 203–221.

2. *Потапенко Ю.Я.* Геология Карачаево-Черкесии : учеб. пособ. Карачаевск : Изд-во КЧГУ, 2004. 154 с.

3. *Ханаев С.А.* Карачаево-Балкарская топонимическая система и реконструкция природопользования. Карачаевск : Карачаево-Черкесский госпедуниверситет, 1997. 134 с.

4. *Станюкович К.В.* Растительность гор СССР. Душанбе : Дониш, 1973. 416 с.

5. *Лурье П.М., Панов В.Д., Ильичев Ю.Г., Салпагаров А.Д.* Снежный покров и ледники бассейна реки Кубань // Тр. Тебердинского гос. биосферного заповедника. Кисловодск : МИЛ, 2006. Вып. 41. С. 1–244.

6. *Темботов А.К.* География млекопитающих Северного Кавказа. Нальчик : Эльбрус, 1972. 242 с.

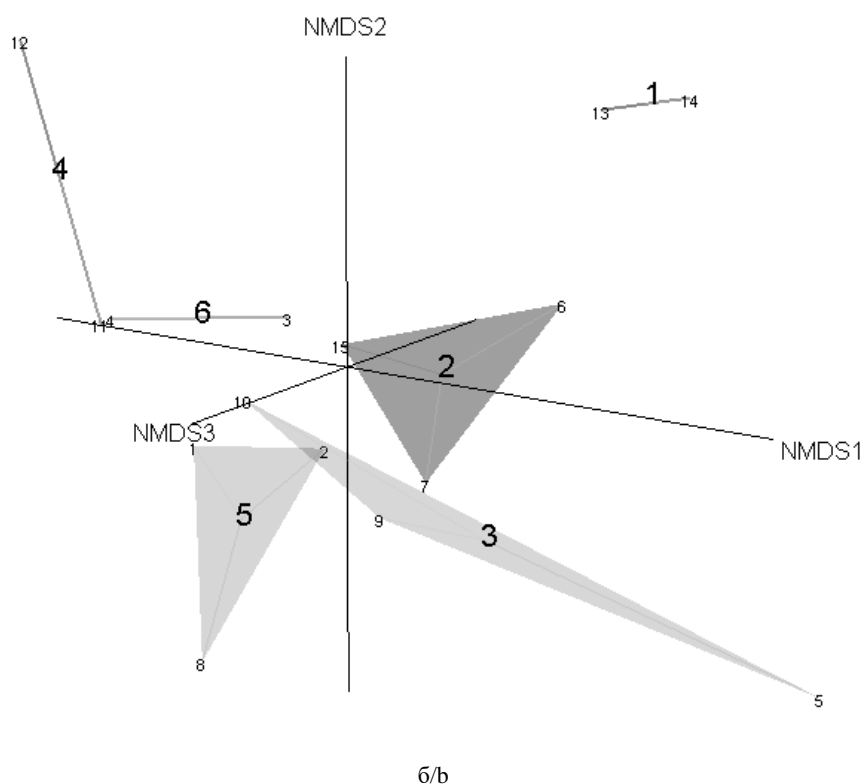
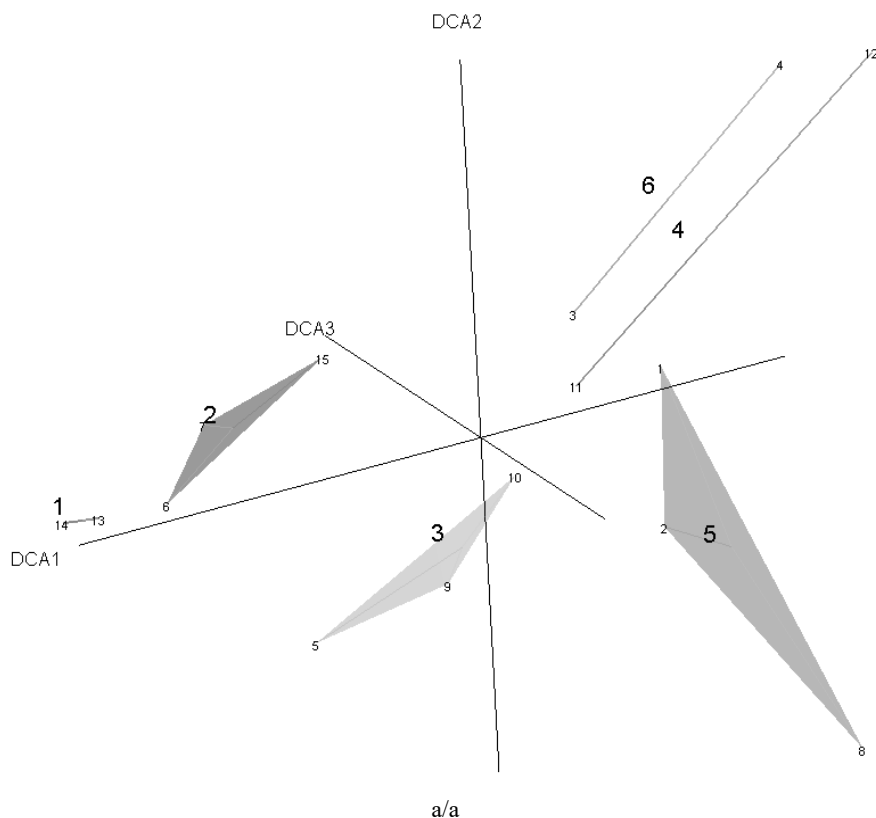
7. *Гулисаивили В.З., Махатадзе Л.Б., Прилипо Л.И.* Растительность Кавказа. М. : Наука, 1975. 233 с.

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 пояности растительности России и сопредельных территорий / отв. ред. Г.Н. Огуреева. М 1:8 000 000. Пояснительный текст. М. : Экор, 1999. 64 с.

10. *Макунина Н.И.* Растительность лесостепи Западно-Сибирской равнины и Алтае-Саянской горной области. Новосибирск : GEO, 2016. 183 с.

11. *Батхиев А.М.* Закономерности дифференциации природных условий Кавказа как основа для био-



Положение 15 описаний в 6 фитоценозах 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 phytocenons and in the three axes of ordination:

экологического анализа // Юг России: экология, развитие. 2008. № 4. С. 76–87.

12. Дзыбов Д.С. Флора и растительность Карачаево-Черкесии. Монография. Ставрополь : Астра-М, 2013. 424 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 North-Western Caucasus. Veröffentlichungendes Geobotanischen Institutes der ETH, Stiftung Rubel, Zurich, 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 хребтов // Науч. 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., Жабуев А.Ж., Пшегусов Р.Х. 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. Полевая геоботаника / под ред. Е.М. Лавренко, А.А. Корчагина. М.; Л. : Изд-во АН СССР, 1964. Т. III. 530 с.

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

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

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

23. 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.

24. 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.

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

26. Зернов А.С., Алексеев Ю.Е., Онипченко В.Г. Определитель сосудистых растений Карачаево-Черкесской Республики. М. : Товарищество научных изданий КМК, 2015. 459 с.

References

1. Tanfil'ev V.G. [Vegetation of the Rocky ridge between the r. B. Laba and M. Zelenchuk]. *Materialy po izucheniyu Stavropol'skogo kraya. Stavropol'skii kraevoi muzei* [Materials on the study of the Stavropol Territory. Stavropol Regional Museum]. Stavropol: Stavropol'skoe knizhnoe izd-vo, 1960, iss. 10, pp. 203-221.

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

3. Напаев С.А. Karachaevo-Bal-karskaya toponimicheskaya sistema i rekonstruktsiya prirodopolzovaniya. [Karachay-Balkar toponymic system and reconstruction of nature management]. *Karachaevsk: Karachaevo-Cherkesskiy Gospeduniversitet* [Karachay-Cherkess State University], 1997. 134 p.

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

5. Lur'e P.M., Panov V.D., Il'ichev Yu.G., Salpagarov A.D. [Snow cover and glaciers of the Kuban river basin]. *Tr. Teberdinskogo gos. biosfernogo zapovednika* [Proceedings of the Teberda State Biosphere Reserve]. Kislovodsk: MIL, 2006, iss. 41, pp. 1-244.

6. Tembotov A.K. *Geografiya mlekopitayushchikh Severnogo Kavkaza* [Geography of mammals of the North Caucasus]. Nalchik: El'brus, 1972, 242 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 poynosti rastitel'nosti Rossii i sopredel'nykh territorii* [Zones and types of zones of vegetation in Russia and adjacent territories]. Ed. G.N. Ogureeva. Scale 1:8 000 000. Explanatory text. 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 prirodnykh uslovii Kavkaza kak osnova dlya bioekologicheskogo analiza* [Regularities of differentiation of natural conditions of the Caucasus as a basis for bioecological analysis]. *Yug Rossii: ekologiya, razvitie*. 2008, No. 4, pp. 76-87.

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

13. Urbanskii O.M., Turkevich V.N., Karaev A.N., Naumenko N.A., Erizhev K.A. *Estestvennye kormovye ugod'ya Karachaevo-Cherkesskoi Respubliki* [Natural feeding grounds of Karachay-Cherkess Republic]. Cherkessk, 1995, 114 p.

14. Onipchenko V.G. *Alpine Vegetation of the Teberda Reserve, the North-Western Caucasus*. Veröffentlichungendes Geobotanischen Institutes der ETH, Stiftung Rubel, Zurich, 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 peredovogo i severozapadnoi chasti Glavnogo Kavkazskogo khrebtov [Variety of grass communities in the southern and north-western parts of the Main Caucasian Range]. *Nauch. vedomosti. Estestv. nauki*. 2016, No. 18 (239), iss. 36, pp. 15-25.

16. Tsepikova N.L. K sintaksonomii vysokogornyykh lugovykh stepei Tsentral'nogo Kavkaza [To the syntaxonomy of the 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 the 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., Pshegusov R.Kh. Otsenka rasprostraneniya travyanykh soobshchestv na osnove dannykh distantsionnogo zondirovaniya v monitoringe sostoyaniya gornyykh lugov Tsentral'nogo Kavkaza (Kabardino-Balkariya) [Evaluation of the distribution of grass 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. *Polevaya geobotanika* [Field geobotany]. Eds. E.M. Lavrenko, A.A. Korchagin. Moscow; Leningrad: Izd-vo AN SSSR, 1964, vol. III, 530 p.

20. 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.

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

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

23. 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.

24. 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.

25. 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.

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

УДК 616.5-006.81.04-089 : 612.017.1] – 076.5-073.537

DOI 10.23683/0321-3005-2017-3-1-49-55

РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ РАСЧЕТА ПРОГНОЗА ТЕЧЕНИЯ МЕЛАНОМЫ КОЖИ

© 2017 г. С.С. Кочуев¹, Е.Ю. Златник¹, А.А. Демидова², И.А. Новикова¹, Ю.В. Пржедецкий¹,
В.В. Позднякова¹, О.В. Хохлова¹, Г.И. Загора¹, В.Ю. Пржедецкая¹, Е.М. Непомнящая¹, Е.П. Лысенко¹

¹Ростовский научно-исследовательский онкологический институт, Ростов-на-Дону, Россия,

²Ростовский государственный медицинский университет, Ростов-на-Дону, Россия

DEVELOPMENT OF MATHEMATICAL MODEL FOR CALCULATION OF CUTANEOUS MELANOMA PROGNOSIS

S.S. Kochuev¹, E.Yu. Zlatnik¹, A.A. Demidova², I.A. Novikova¹, Yu.V. Przhedetsky¹, V.V. Pozdnyakova¹,
O.V. Khokhlova¹, G.I. Zakora¹, V.Yu. Pzhedetskaya¹, E.M. Nepomnyashchaya¹, E.P. Lysenko¹

¹Rostov Research Institute of Oncology, Rostov-on-Don, Russia,

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

Кочуев Сергей Сергеевич – аспирант, отделение опухолей кожи, мягких тканей и молочной железы, Ростовский научно-исследовательский онкологический институт, ул. 14-я линия, 63, г. Ростов-на-Дону, 344037, Россия, e-mail: kochuev7@gmail.com

Sergey S. Kochuev - Postgraduate, Department of Tumors of Skin, Soft Tissues and Breast, Rostov Research Institute of Oncology, 14-ya Liniya St., 63, Rostov-on-Don, 344037, Russia, e-mail: kochuev7@gmail.com

Златник Елена Юрьевна – доктор медицинских наук, профессор, главный научный сотрудник, лаборатория иммунофенотипирования опухолей, Ростовский научно-исследовательский онкологический институт, ул. 14-я линия, 63, г. Ростов-на-Дону, 344037, Россия, e-mail: rnioi@list.ru

Elena Yu. Zlatnik - Doctor of Medicine, Professor, Main Researcher, Laboratory of Immunophenotyping of Tumors, Rostov Research Institute of Oncology, 14-ya Liniya St., 63, Rostov-on-Don, 344037, Russia, e-mail: rnioi@list.ru

Демидова Александра Александровна – кандидат медицинских наук, доцент, кафедра медицинской и биологической физики, Ростовский государственный медицинский университет, пер. Нахичеванский, 29, г. Ростов-на-Дону, 344022, Россия, e-mail: alald@inbox.ru

Aleksandra A. Demidova - Candidate of Medicine, Associate Professor, Department of Medical and Biological Physics, Rostov State Medical University, Nakhichevanskii Lane, 29, Rostov-on-Don, 344022, Russia, e-mail: alald@inbox.ru

Новикова Инна Арнольдовна – кандидат медицинских наук, руководитель лаборатории иммунофенотипирования опухолей, Ростовский научно-исследовательский онкологический институт, ул. 14-я линия, 63, г. Ростов-на-Дону, 344037, Россия, e-mail: rnioi@list.ru

Inna A. Novikova - Candidate of Medicine, Head of Laboratory of Immunophenotyping of Tumors, Rostov Research Institute of Oncology, 14-ya Liniya St., 63, Rostov-on-Don, 344037, Russia, e-mail: rnioi@list.ru

Пржедецкий Юрий Валентинович – доктор медицинских наук, профессор, заведующий отделением опухолей кожи, мягких тканей и молочной железы, Ростовский научно-исследовательский онкологический институт, ул. 14-я линия, 63, г. Ростов-на-Дону, 344037, Россия, e-mail: yurypr@gmail.com

Yuri V. Przhedetsky - Doctor of Medicine, Professor, Head of Department of Tumors of Skin, Soft Tissues and Breast, Rostov Research Institute of Oncology, 14-ya Liniya St., 63, Rostov-on-Don, 344037, Russia, e-mail: yurypr@gmail.com

Позднякова Виктория Вадимовна – доктор медицинских наук, профессор, отделение опухолей кожи, мягких тканей и молочной железы, Ростовский научно-исследовательский онкологический институт, ул. 14-я линия, 63, г. Ростов-на-Дону, 344037, Россия, e-mail: vvpdoc@gmail.com

Victorija V. Pozdnyakova - Doctor of Medicine, Professor, Department of Tumors of Skin, Soft Tissues and Breast, Rostov Research Institute of Oncology, 14-ya Liniya St., 63, Rostov-on-Don, 344037, Russia, e-mail: vvpdoc@gmail.com

Хохлова Ольга Викторовна – кандидат медицинских наук, отделение опухолей кожи, мягких тканей и молочной железы, Ростовский научно-исследовательский онкологический институт, ул. 14-я линия, 63, г. Ростов-на-Дону, 344037, Россия, e-mail: ysol@yandex.ru.

Olga V. Khokhlova - Candidate of Medicine, Department of Tumors of Skin, Soft Tissues and Breast, Rostov Research Institute of Oncology, 14-ya Liniya St., 63, Rostov-on-Don, 344037, Russia, e-mail: ysol@yandex.ru.

Закора Галина Ивановна – научный сотрудник, лаборатория иммунофенотипирования опухолей, Ростовский научно-исследовательский онкологический институт, ул. 14-я линия, 63, г. Ростов-на-Дону, 344037, Россия, e-mail: rnioi@list.ru

Galina I. Zakora - Researcher, Laboratory of Immunophenotyping of Tumors, Rostov Research Institute of Oncology, 14-ya Liniya St., 63, Rostov-on-Don, 344037, Russia, e-mail: rnioi@list.ru

Пржедецкая Виктория Юрьевна – врач, отделение опухолей кожи, мягких тканей и молочной железы, Ростовский научно-исследовательский онкологический институт, ул. 14-я линия, 63, г. Ростов-на-Дону, 344037, Россия, e-mail: przhedetskaya_vi@mail.ru

Victoria Yu. Przhedetskaya – Doctor, Department of Tumors of Skin, Soft Tissues and Breast, Rostov Research Institute of Oncology, 14-ya Liniya St., 63, Rostov-on-Don, 344037, Russia, e-mail: przhedetskaya_vi@mail.ru

Непомнящая Евгения Марковна – доктор медицинских наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории иммунофенотипирования опухолей, Ростовский научно-исследовательский онкологический институт, ул. 14-я линия, 63, г. Ростов-на-Дону, 344037, Россия, e-mail: rnioi@list.ru

Evgeniya M. Nepomnyashchaya - Doctor of Medicine, Professor, Chief Researcher, Laboratory of Immunophenotyping of Tumors, Rostov Research Institute of Oncology, 14-ya Liniya St., 63, Rostov-on-Don, 344037, Russia, e-mail: rnioi@list.ru

Лысенко Екатерина Петровна – кандидат медицинских наук, отделение опухолей кожи, мягких тканей и молочной железы, Ростовский научно-исследовательский онкологический институт, ул. 14-я линия, 63, г. Ростов-на-Дону, 344037, Россия, e-mail: katrine2011@mail.ru

Ekaterina P. Lysenko - Candidate of Medicine, Department of Tumors of Skin, Soft Tissues and Breast, Rostov Research Institute of Oncology, 14-ya Liniya St., 63, Rostov-on-Don, 344037, Russia, e-mail: katrine2011@mail.ru

Изучены состав цитокинов в ткани опухоли и перитуморальной области, а также ДНК-цитометрические параметры у 56 больных меланомой кожи. Уровни цитокинов (TNF- α , IL-1 β , IL1-RA, IL-2, IL-6, IL-8, IL-10, IFN- α , IFN- γ) определяли методом иммуноферментного анализа, результаты выражали в пг/мг/г белка. Для анализа ДНК в ткани опухоли использовали проточный цитометр FACS CantoII. Полученные данные обрабатывали с помощью компьютерной программы ModFit LT, позволяющей анализировать плоидность и распределение клеток опухоли по фазам клеточного цикла. Результаты исследования подвергли статистическому анализу в программе STATISTICA 10.0. Математическая модель разработана при помощи метода логистической регрессии. Поиск предикторов прогрессирования онкологического заболевания осуществлен посредством ROC-анализа при оценке уровней провоспалительных и противовоспалительных цитокинов в ткани опухоли и перитуморальной зоне клинических данных больных, ДНК-цитометрических параметров опухоли у пациентов с учетом наличия и отсутствия прогрессирования заболевания. Для каждого предиктора была определена дифференциальная точка, позволяющая с максимальной диагностической чувствительностью и специфичностью сформировать заключение о риске (либо его отсутствии) в отношении изучаемого события. По величине площади под ROC-кривой (AUC) оценивали информативность каждого лабораторного теста и выявили прогностическую значимость содержания IL-6 в ткани опухоли, IL-1 β и IL-2 – в ткани перитуморальной зоны. В программе Microsoft Excel 2010 создано окно автоматического расчета риска прогрессирования меланомы кожи по этим, а также по номинальным показателям.

Ключевые слова: меланома кожи, микроокружение опухоли, цитокины, прогноз заболевания, ДНК-цитометрия, иммуноферментный анализ, ROC-анализ, логистическая регрессия, математическая модель.

Cytokines in tumor and peritumoral area, as well as DNA cytometry parameters, were studied in 56 patients with cutaneous melanoma. Levels of cytokines (TNF- α , IL-1 β , IL1-RA, IL-2, IL-6, IL-8, IL-10, IFN- α , IFN- γ) were determined by ELISA, results were presented in pg/mg/g of protein. DNAs in tumor tissue were analyzed using the FACS CantoII flow cytometer. The data were processed using the ModFit LT program allowing an analysis of ploidy and distribution of tumor cells in cell cycle phases. The results of the study were processed using the STATISTICA 10.0 program. A mathematical model was developed with the logistic regression method. The search for predictors of cancer progression was performed using the ROC analysis with an assessment of levels of proinflammatory and anti-inflammatory cytokines in tumor tissues and peritumoral area, clinical data of patients and DNA cytometry parameters of tumors with and without progression. The differential point was determined for each predictor that allowed conclusion about an event and its risk or its absence with the maximal diagnostic sensitivity and specificity. Informativity of each laboratory test was evaluated according to the area under the ROC curve (AUC), and prognostic significance of IL-6 content in tumor tissue and of IL-1 β and IL-2 in the peritumoral area was determined. A window in Microsoft Excel 2010 was created for automatic calculation of the risk of melanoma progression by these parameters and by nominal indices.

Keywords: cutaneous melanoma, tumor microenvironment, cytokines, disease prognosis, DNA cytometry, ELISA, ROC analysis, logistic regression, mathematical model.

Введение

Меланома кожи (МК) является одной из самых опасных злокачественных опухолей. Стремительное развитие заболевания и неудовлетворительные результаты консервативного лечения ставят меланому на первое место в структуре смертности больных с онкологической патологией кожи. Хотя основными факторами, которые используются для определения прогноза заболевания, являются гистологическое заключение с определением толщины опухоли и распространенность опухолевого процесса, клиницистам хорошо известно, что течение МК бывает непредсказуемым, в частности, толщина опухоли и глубина ее инвазии не гарантированно значимы при оценке прогноза заболевания. Известны различные клинические наблюдения, при которых пациенты с высокими критериями Бреслоу (толщина опухоли) и Кларка (глубина инвазии в слои кожи) после проведенного радикального лечения вступали в период стойкой ремиссии, и наоборот, у больных с тонкими опухолями наблюдалась их прогрессия в короткие сроки после лечения [1]. Кроме клинических характеристик, давно показано прогностическое значение некоторых особенностей опухоли, в частности наличия в ней анеуплоидных клеток [2, 3].

Ввиду доказанного наличия опухолевых антигенов в клетках МК она считается иммуногенной опухолью, о чем свидетельствуют многочисленные исследования [4–6]. Несмотря на системный характер иммунного ответа, важность локальных иммунных реакций, развивающихся в опухолевом микроокружении, не подлежит сомнению. Именно от их эффективности зависят развитие опухоли, результат лечения, в частности, иммунотерапии, а также прогноз заболевания. Поэтому изучение показателей факторов локального иммунитета в микроокружении опухоли может являться, по нашему мнению, важным критерием, позволяющим оценить прогноз заболевания. Среди этих факторов особую роль играют цитокины – посредники межклеточных взаимодействий и иммунных реакций [7–10]; их присутствие описано в [11, 12]; нарушение их продукции лежит в основе патогенеза ряда кожных заболеваний [13, 14]; отмечены высокие тканевые уровни некоторых из них в опухолях больных базальноклеточным раком кожи [15]; нарушения факторов локального клеточного иммунитета при МК также предполагают цитокиновый дисбаланс [16].

Цель исследования – разработка математической модели прогнозирования клинического течения МК на основе изучения локального тканевого цитокинового состава опухоли и ее микроокружения.

Материалы и методы

Объектом исследования послужили образцы тканей опухоли и перитуморальной зоны (ПЗ). Изучение факторов локального клеточного иммунитета проводили не позднее чем через час после хирургического лечения в свежем послеоперационном материале.

Больным проводилось хирургическое лечение МК в объеме широкого иссечения с пластикой местными тканями, свободным кожным лоскутом, встречными кожно-жировыми лоскутами, ротационным кожно-жировым лоскутом, серповидным кожно-жировым лоскутом, скользящим кожно-жировым лоскутом с соблюдением всех правил онкологической радикальности. Далее при помощи скальпеля или ножниц отделялся участок ткани опухоли и ПЗ (отступя 0,5 см от края опухоли) в объеме, необходимом для осуществления нашей работы и не препятствующем гистологическому исследованию с определением толщины опухоли по Бреслоу и глубины инвазии по Кларку. При поражении регионарного лимфатического коллектора проводилась лимфодиссекция, в зависимости от стадии заболевания – адьювантная иммуно-, химио- и лучевая терапия в различных комбинациях. Пациенты наблюдались по стандартному плану один раз в три месяца. Назначались ультразвуковое исследование органов брюшной полости, компьютерная томография органов грудной клетки и магнитно-резонансная томография головного мозга, а также объективный осмотр. Исходя из данных обследования, устанавливали наличие или отсутствие прогрессирования заболевания.

Уровни провоспалительных и противовоспалительных цитокинов (TNF- α , IL-1 β , IL-1-RA, IL-2, IL-6, IL-8, IL-10, IFN- α , IFN- γ) определяли в гомогенате опухоли и ПЗ методом ИФА («Вектор-Бест», Новосибирск). Результаты выражали в пг/мл, кроме того, в виде удельного содержания в пересчете на 1 г белка гомогената, определяемого биуретовым методом (пг/мг/г белка).

Для анализа ДНК в ткани опухоли использовали проточный цитометр FACS CantoII (Becton Dickinson, USA) и CycleTEST™PLUS DNA ReagentKit. Полученные данные обрабатывали с помощью компьютерной программы ModFit LT, позволяющей анализировать ploидность и распределение клеток опухоли по фазам клеточного цикла и детализировать число клеток в фазах S и G2 + M. Долю клеток с различным содержанием ДНК на гистограмме вычисляли как процент от общего числа исследованных клеток. Опухоль считали диплоидной, если выявлялся один пик, который соответствовал нормальному содержанию ДНК в ядрах клеток. При наличии

пиков, отличающихся от диплоидного, опухоль расценивалась как анеуплоидная.

Статистическая обработка полученных результатов была проведена с помощью программы STATISTICA 10.0 (StatSoft, США). Математическая модель расчета риска прогрессирования МК разработана посредством метода логистической регрессии при анализе полученных нами результатов обследования пациентов [17]. Поиск предикторов прогрессирования МК был осуществлен с помощью ROC-анализа при оценке уровней локальных тканевых провоспалительных и противовоспалительных цитокинов, клинических данных больных, ДНК-цитометрических параметров опухоли с учетом наличия и отсутствия у пациентов прогрессирования заболевания. Время наблюдения – от 3 до 24 мес. В течение этого времени оценивали длительность бессобытийного периода. С помощью ROC-анализа для каждого предиктора определяли дифференциальную точку разделения (cut-off), позволяющую с максимальной диагностической чувствительностью (ДЧ) и диагностической специфичностью (ДС) сформировать заключение о риске (либо его отсутствии) в отношении изучаемого события. На ROC-кривой выстраивали соотношение между ДЧ и ДС при различных уровнях показателя и находили точку с максимальной ДЧ и ДС, соответствующую cut-off. Величина площади под ROC-кривой (AUC) позволила оценить информативность лабораторного теста по стандартной шкале. Доверительная вероятность p по z -критерию служила основанием для заключения о статистической значимости прогностической ценности каждого предиктора.

Результаты исследования

При определении риска прогрессирования МК статистическая значимость ($p \leq 0,05$) прогностической ценности была установлена для следующих предикторов: количественные показатели – содержание IL-6 в ткани опухоли, IL-1 β и IL-2 в ткани ПЗ; номинальные – распространенность опухолевого процесса, наличие или отсутствие анеуплоидных клеток.

Методом логистической регрессии на основании анализа определенных для пациентов данных было получено уравнение расчета индивидуального риска прогрессирования МК по прогностическому коэффициенту K .

$$\text{Общий вид уравнения: } K = \frac{\exp(z)}{1 + \exp(z)}, \text{ где } K -$$

коэффициент прогноза; z – коэффициент линейной регрессии, рассчитываемый по формуле

$$z = (-4,06 + 0,065 \cdot X_1 + 0,037 \cdot X_2 + 1,06 \cdot X_3 + 3,81 \cdot P - 5,56 \cdot A);$$

X_1 – содержание IL-6 в ткани опухоли, пг/мг/г; X_2 – содержание IL-1 β в ткани ПЗ, пг/мг/г; X_3 – содержание IL-2 в ткани ПЗ, пг/мг/г.

Номинальные показатели ранжировали следующим образом: распространенность опухолевого процесса (P): 0 – местный; 1 – распространенный; 2 – генерализованный (Г). Наличие анеуплоидного или диплоидного клона клеток (A): 1 – анеуплоидный клон; 0 – диплоидный.

Разработанная модель статистически значима: $\chi^2 = 14,2$ при $p = 0,014$.

Методом ROC-анализа определяли критическое значение K , при превышении которого с максимальной ДЧ и ДС делали заключение о высоком риске прогрессирования МК. Если K более 0,64, делается заключение о высоком риске прогрессирования МК у больного.

В программе Microsoft Excel 2010 было создано окно автоматического расчета риска прогрессирования МК по вышеперечисленным критериям содержания цитокинов в ткани опухоли и ПЗ и номинальным показателям (рис. 1). После внесения индивидуальных показателей больного в маркированную область автоматически в соответствующей ячейке, отмеченной стрелкой, рассчитывался коэффициент K .

На следующем этапе для каждого количественного показателя модели была определена дифференциальная точка разделения, которая позволяла при сопоставлении с индивидуальным значением параметра у пациента сформировать вывод о риске прогрессирования МК.

Определение дифференциальной точки содержания IL-6 в ткани опухоли (выделено жирным шрифтом и обозначено *) и иллюстрация качества теста отражены в табл. 1 и на рис. 2.

При превышении содержания IL-6 в ткани опухоли более 4,45 пг/мг/г с диагностической чувствительностью 90 % и специфичностью 60,6 % (табл. 1) увеличивается риск прогрессирования МК ($p = 0,002$). Площадь под ROC-кривой – 0,742 \pm 0,079 (рис. 2), что свидетельствовало об удовлетворительном, но статистически значимом качестве теста.

Этапы расчета дифференциальной точки IL-1 β в ткани ПЗ меланомы кожи представлены в табл. 2 (выделено жирным шрифтом и обозначено *) и на рис. 3. При превышении содержания IL-1 β в ткани ПЗ более 11,03 пг/мг/г белка с ДЧ 81 % и ДС 60,6 % (табл. 2) можно судить о риске прогрессирования МК ($p = 0,005$). Площадь под ROC-кривой составляет 0,760 \pm 0,09 (рис. 3), что свидетельствует о статистически значимом качестве теста ($p = 0,005$).

Вносить данные пациента только в серую область						
Параметры	IL-6 Оп	IL-1β ПЗ	IL-2 ПЗ	P	A	
Коэффициенты	0,065	0,037	1,06	3,81	-5,56	
Данные больных	0,6	17,2	1,42	0	1	Σ
const	-4,1	0,039	0,636	1,505	0,000	-5,560
exp	0,0	0,001				-7,4

Расчетное значение коэффициента прогноза прогрессирования

Рис. 1. Окно для автоматического расчета коэффициента К по индивидуальным параметрам больного / Fig. 1. A window for automatic calculation of K coefficient by individual parameters of the patient

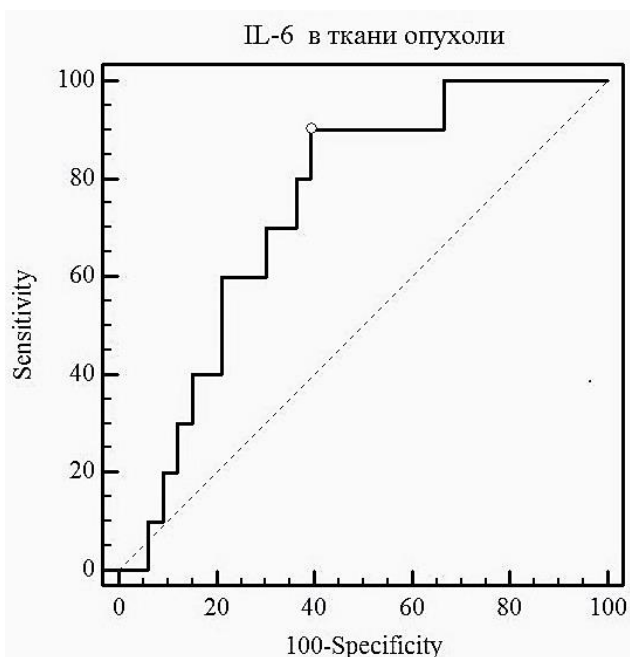


Рис. 2. ROC-кривая для расчета риска прогрессирования МК по результатам содержания IL-6 в ткани опухоли / Fig. 2. A ROC curve for calculation of the risk of melanoma progression by the results of IL-6 determination in tumor tissues

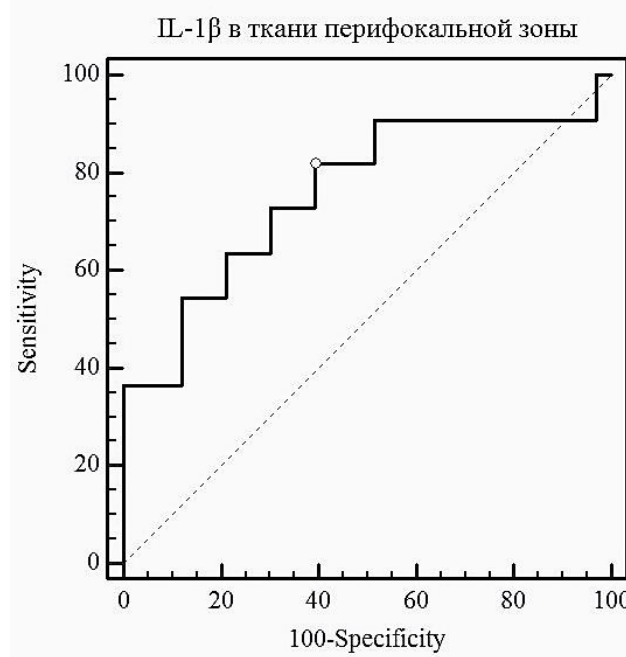


Рис. 3. ROC-кривая для расчета риска прогрессирования МК по результатам содержания IL-1β в ткани ПЗ / Fig. 3. A ROC curve for calculation of the risk of melanoma progression by the results of IL-1β determination in perifocal tissues

Таблица 1
Соотношение чувствительности и специфичности содержания IL-6 в ткани опухоли для определения риска прогрессирования МК / Sensitivity and specificity of IL-6 content in tumor tissues for determination of the risk of melanoma progression

Показатель	Доверительный интервал (ДИ) для 95%-й достоверности			
	ДЧ	ДС	ДИ ДЧ	ДИ ДС
IL-6, пг/мг/г				
>2,89	90,00	51,52	55,5–99,7	33,5–69,2
>4,05	90,00	54,55	55,5–99,7	36,4–71,9
>4,45 *	90,00	60,61	55,5–99,7	42,1–77,1
>5,27	80,00	60,61	44,4–97,5	42,1–77,1
>6,68	80,00	63,64	44,4–97,5	45,1–79,6

Определение дифференциальной точки для IL-2 в ткани ПЗ меланомы кожи представлено в табл. 3 (выделено жирным шрифтом и обозначено *) и на рис. 4.

При превышении содержания IL-2 в ткани ПЗ более 1,71 пг/мг/г белка с ДЧ 95 % и ДС 95 % (табл. 3) отмечен высокий риск прогрессирования МК (p=0,005). Площадь под ROC-кривой составляет 0,821±0,07 (рис. 4), что свидетельствует о статистически значимом качестве теста.

Остальные исследованные цитокины, включая интерфероны, не продемонстрировали прогностически значимой роли в отношении прогрессирования МК, несмотря на то что интерфероновые препараты широко применяются в ее лечении [18, 19].

Таблица 2

Соотношение чувствительности и специфичности содержания ИЛ-1β в ткани ПЗ для определения риска прогрессирования МК / Sensitivity and specificity of IL-1β content in perifocal tissues for determination of the risk of melanoma progression

Показатель			ДИ для 95%-й достоверности	
ИЛ-1β, пг/мг/г	ДЧ	ДС	ДИ ДЧ	ДИ ДС
>8,94	81,82	54,55	48,2–97,7	36,4–71,9
>8,95	81,82	57,58	48,2–97,7	39,2–74,5
>11,03 *	81,82	60,61	48,2–97,7	42,1–77,1
>11,15	72,73	60,61	39,0–94,0	42,1–77,1
>11,27	72,73	63,64	39,0–94,0	45,1–79,6

Таблица 3

Соотношение чувствительности и специфичности содержания ИЛ-2 в ткани ПЗ для определения риска прогрессирования МК / Sensitivity and specificity of IL-2 content in perifocal tissues for determination of the risk of melanoma progression

Показатель			ДИ для 95%-й достоверности	
ИЛ-2, пг/мг/г	ДЧ	ДС	ДИ ДЧ	ДИ ДС
>1,63	85,71	75,00	42,1–99,6	55,1–89,3
>1,69	85,71	78,57	42,1–99,6	59,0–91,7
>1,71 *	85,71	82,14	42,1–99,6	63,1–93,9
>1,74	71,43	82,14	29,0–96,3	63,1–93,9
>1,9	57,14	82,14	18,4–90,1	63,1–93,9

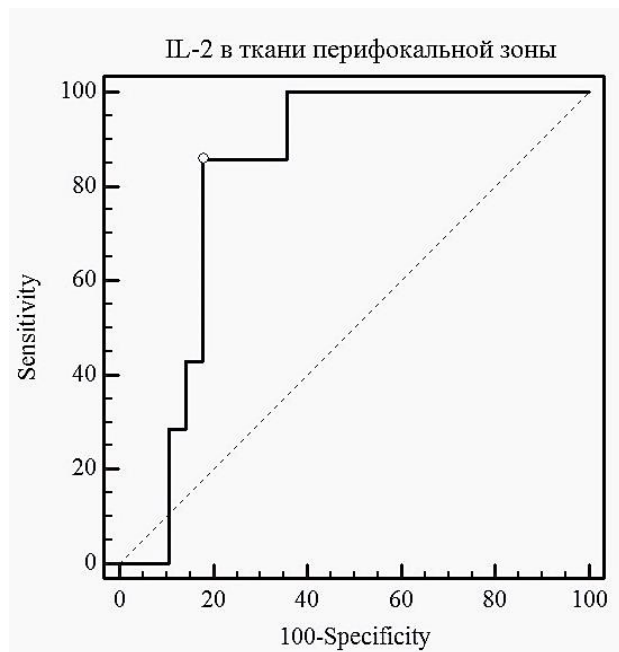


Рис. 4. ROC-кривая для расчета риска прогрессирования МК по результатам содержания ИЛ-2 в ткани ПЗ / Fig. 4. A ROC curve for calculation of the risk of melanoma progression by the results of IL-2 determination in perifocal tissues

Итак, на основании оценки локального уровня цитокинов в ткани МК и ее микроокружении удалось выявить иммунологические факторы, которые с высокой прогностической значимостью наряду с общепринятыми клиническими (распространенность опухолевого процесса, толщина опухоли) и биологической характеристикой опухолевой ткани (анеуплоидный, диплоидный клон) определяют прогноз течения МК. Разработана математическая модель, позволяющая рассчитать риск развития прогрессирования МК по статистически значимым критериям локального содержания ИЛ-6 в ткани опухоли, ИЛ-1β и ИЛ-2 в ткани ПЗ и использовать совокупность их значений для расчета коэффициента К, по уровню которого оценивается дальнейшее течение заболевания.

Литература

1. Марочко А.Ю. Особенности клинического течения невогенной меланомы кожи и возникшей de novo // Дальневосточный мед. журн. 2009. № 2. С. 39–41.
2. Renard N., Goldschmidt D., Decaestecker C. Characterization of the nuclear deoxyribonucleic acid content and nuclear morphometry in 71 primary cutaneous melanomas // Dermatology. 1997. Vol. 194. P. 318–324.
3. Talve L.A., Collan Y.U., Ekfors T.O. P90 exceed in grate as a prognostic factor in primary malignant melanoma of the skin. ADNA image cytometric study // Ann. Quant. Cytol. Histol. 1997. Vol. 19. P. 393–403.
4. Haass N.K., Smalley K.S. Melanoma biomarkers: current status and utility in diagnosis, prognosis, and response to therapy // Mol. Diagn. Ther. 2009. № 13. P. 283–296.
5. Veronesi U., Cascinelli N. Narrow excision (1 sm): A safe procedure for thin cutaneous melanoma // Arch. Surg. 1991. Vol. 126. P. 438.
6. Марочко А.Ю., Боровская Т.Ф., Соболева В.Ю. Клинические факторы прогноза при меланоме кожи // Тихоокеанский мед. журн. 2011. № 1. С. 86–89.
7. Бережная Н.М., Чехун В.Ф. Иммунология злокачественного роста. Киев : Наукова думка, 2005.
8. Кетлинский С.А., Симбирцев А.С. Цитокины. СПб : Фолиант, 2008. С. 552.
9. Хаитов Р.М. Физиология иммунной системы М. : ВИНТИ РАН, 2001. С. 222.
10. Ярилин А.А. Основы иммунологии. М. : Медицина, 1999. С. 456.
11. Белова О.В., Арион В.Я., Сергиенко В.И. Роль цитокинов в иммунологической функции кожи // Иммунопатология, аллергология, инфектология. 2008. № 1:41. С. 55.
12. Aguilar A. Skin associated lymphoid tissues (SALT). Its normal and pathological function // An. R. Acad. Nac. Med. 2006. Vol. 123 (2). P. 367–377.

Заключение

13. Боровик Т.Э., Макарова С.Г., Дарчия С.Н. Кожа как орган иммунной системы // Педиатрия. 2010. Т. 89, № 2. С. 132–136.

14. Ярилин А.А. Кожа и иммунная система // Косметика и медицина. 2001. № 2:5. С. 13.

15. Пржедецкий Ю.В., Златник Е.Ю., Новикова И.А. Иммунологическое микроокружение базальноклеточного рака кожи // Современные проблемы науки и образования. 2015. № 3. С. 181.

16. Златник Е.Ю., Бахтин А.В., Кочуев С.С. Факторы локального клеточного иммунитета при меланоме кожи // Современные проблемы науки и образования. 2015. № 5. С. 88.

17. Омельченко В.П., Демидова А.А. Автоматизированные медико-технологические системы клинико-лабораторных исследований // Медицинская информатика : учебник. М. : ГЭОТАР-Медиа, 2016. С. 395–427.

18. Trollo R.D., Simeone E., Lorenzo D.G. Update on PEG-interferon a-2b as adjuvant therapy in melanoma // *Anticancer Res.* 2012. № 32 (9).

19. Вихрова А.С., Орлова К.В., Самойленко И.В. Переносимость высокодозной иммунотерапии интерфероном альфа-2b у больных меланомой кожи // Саркомы костей, мягких тканей и опухоли кожи. 2016. № 1. С. 56–64.

References

1. Marochko A.Yu. Osobennosti klinicheskogo techeniya nevrogennoi melanomy kozhi i voznikshei de novo [Features of the clinical course of non-malignant skin melanoma and arisen de novo]. *Dal'nevostochnyi med. zhurn.* 2009, No. 2, pp. 39-41.

2. Renard N., Goldschmidt D., Decaestecker C. Characterization of the nuclear deoxyribonucleic acid content and nuclear morphometry in 71 primary cutaneous melanomas. *Dermatology.* 1997, vol. 194, pp. 318-324.

3. Talve L.A., Collan Y.U., Ekfors T.O. P90 exceed in grate as a prognostic factor in primary malignant melanoma of the skin. ADNA image cytometric study. *Ann. Quant. Cytol. Histol.* 1997, vol. 19, pp. 393-403.

4. Haass N.K., Smalley K.S. Melanoma biomarkers: current status and utility in diagnosis, prognosis, and response to therapy. *Mol. Diagn. Ther.* 2009, No. 13, pp. 283-296.

5. Veronesi U., Cascinelli N. Narrow excision (1 sm): A safe procedure for thin cutaneous melanoma. *Arch. Surg.* 1991, vol. 126, p. 438.

6. Marochko A.Yu., Borovskaya T.F., Soboleva V.Yu. Klinicheskie faktory prognoza pri melanome

kozhi [Clinical factors of prognosis for skin melanoma]. *Tikhookeanskii med. zhurn.* 2011, No. 1, pp. 86-89.

7. Berezhnaya N.M., Chekhun V.F. *Immunologiya zlokachestvennogo rosta* [Immunology of malignant growth]. Kiev: Naukova dumka, 2005.

8. Ketlinskii S.A., Simbirtsev A.S. *Tsitokiny* [Cytokines]. Saint Petersburg: Foliant, 2008, p. 552.

9. Khaitov R.M. *Fiziologiya immunnoi sistemy* [Physiology of the immune system]. Moscow: VINITI RAN, 2001, p. 222.

10. Yarilin A.A. *Osnovy immunologii* [Fundamentals of Immunology]. Moscow: Meditsina, 1999, p. 456.

11. Belova O.V., Arion V.Ya., Sergienko V.I. Rol' tsitokinov v immunologicheskoi funktsii kozhi [The role of cytokines in the immunological function of the skin]. *Immunopatologiya, allergologiya, infektologiya.* 2008, No. 1 (41), p. 55.

12. Aguilar A. Skin associated lymphoid tissues (SALT). Its normal and pathological function. *An. R. Acad. Nac. Med.* 2006, vol. 123 (2), pp. 367-377.

13. Borovik T.E., Makarova S.G., Darchiya S.N. Kozha kak organ immunnoi sistemy [Skin as an organ of the immune system]. *Pediatriya.* 2010, vol. 89, No. 2, pp. 132-136.

14. Yarilin A.A. Kozha i immunnaya sistema [Skin and immune system]. *Kosmetika i meditsina.* 2001, No. 2 (5), p. 13.

15. Przhedetskii Yu.V., Zlatnik E.Yu., Novikova I.A. Immunologicheskoe mikrookruzhenie bazal'nokletchnogo raka kozhi [Immunological microenvironment of basal cell skin cancer]. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya.* 2015, No. 3, p. 181.

16. Zlatnik E.Yu., Bakhtin A.V., Kochuev S.S. Faktory lokal'nogo kletchnogo immuniteta pri melanome kozhi [Factors of local cellular immunity in melanoma of the skin]. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya.* 2015, No. 5, p. 88.

17. Omel'chenko V.P., Demidova A.A. [Automated medical and technological systems of clinical and laboratory research]. *Meditsinskaya informatika* [Medical informatics]. Textbook. Moscow: GEOTAR-Media, 2016, pp. 395-427.

18. Trollo R.D., Simeone E., Lorenzo D.G. Update on PEG-interferon a-2b as adjuvant therapy in melanoma. *Anticancer Res.* 2012, No. 32 (9).

19. Vikhrova A.S., Orlova K.V., Samoilenko I.V. Perenosimost' vysokodoznoi immunoterapii interferonom al'fa-2b u bol'nykh melanomoi kozhi [Portability of high-dosage immunotherapy with interferon alpha-2b in patients with skin melanoma]. *Sarkomy kostei, myagkikh tkanei i opukholi kozhi.* 2016, No. 1, pp. 56-64.

УДК 504.054:635.92(577.11)

DOI 10.23683/0321-3005-2017-3-1-56-61

ОЦЕНКА УСТОЙЧИВОСТИ ТРАВЯНИСТЫХ МНОГОЛЕТНИКОВ ПО УРОВНЮ МАЛОНОВОГО ДИАЛЬДЕГИДА В УСЛОВИЯХ УРБАНИЗИРОВАННОЙ СРЕДЫ

© 2017 г. О.Л. Цандекова¹, Л.Л. Седельникова²

¹Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН,
Институт экологии человека СО РАН, г. Кемерово, Россия,

²Центральный сибирский ботанический сад СО РАН, Новосибирск, Россия

ESTIMATION OF THE STABILITY OF HERBACEOUS PERENNIAL PLANTS ON THE LEVEL OF MALONDIALDEHYDE UNDER THE CONDITIONS OF THE URBANIZED ENVIRONMENT

O.L. Tsandekova¹, L.L. Sedelnikova²

¹Federal Research Center of Coal and Coal Chemistry,

Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Institute of Human Ecology SB RAS, Kemerovo, Russia,

²Central Siberian Botanical Garden, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia

Цандекова Оксана Леонидовна – кандидат сельскохозяйственных наук, научный сотрудник, лаборатория экологического биомониторинга, Федеральный исследовательский центр угля и углехимии Сибирского отделения Российской академии наук «Институт экологии человека СО РАН», пр. Ленинградский, 10, г. Кемерово, 650065, Россия, e-mail: zandekova@bk.ru

Oksana L. Tsandekova - Candidate of Agricultural Science, Researcher, Laboratory of Ecological Biomonitoring, Federal Research Center of Coal and Coal Chemistry, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Institute of Human Ecology SB RAS, Leningradskii Ave, 10, Kemerovo, 650065, Russia, e-mail: zandekova@bk.ru

Седельникова Людмила Леонидовна – доктор биологических наук, старший научный сотрудник, лаборатория интродукции декоративных растений, Центральный сибирский ботанический сад СО РАН, ул. Золотодолинская, 101, г. Новосибирск, 630090, Россия, e-mail: lusedelnikova@yandex.ru

Lyudmila L. Sedelnikova - Doctor of Biology, Senior Researcher, Laboratory of Ornamental Plants Introduction, Central Siberian Botanical Garden, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Zolotodolinskaya St., 101, Novosibirsk, 630090, Russia, e-mail: lusedelnikova@yandex.ru

Представлены результаты анализа содержания малонового диальдегида (МДА) в листьях травянистых декоративных многолетников, произрастающих вблизи автодорог городской среды г. Бердска Новосибирской области. Использованы виды растений: *Iris hybrida hort.* (Iridaceae), *Hemerocallis hybrida hort.* (Hemerocallaceae), *Hosta decorate Bailey* (Hostaceae). Интенсивность перекисного окисления липидов в листьях растений оценивали спектрофотометрически, используя метод с применением тиобарбитуровой кислоты. Установлена видоспецифичность по накоплению МДА в листьях декоративных травянистых многолетников, произрастающих вблизи автомагистралей: *Iris hybrida* > *Hosta decorate* > *Hemerocallis hybrida*. Наибольшая интенсивность окислительного стресса отмечена в листьях исследуемых растений вблизи центральных городских автодорог – ул. Рогачева, ул. Ленина, ул. Лунная. В условиях городской среды в листьях *Iris hybrida* в течение вегетации выявлено увеличение на 13–22 % уровня МДА по сравнению с *Hosta decorate* и *Hemerocallis hybrida*. Полученные результаты могут быть использованы в экологическом биотестировании окружающей среды.

Ключевые слова: *Hemerocallis hybrida*, *Iris hybrida*, *Hosta decorate*, устойчивость растений, МДА, окислительный стресс, урбанизированная среда.

The article presents the results analysis of the malondialdehyde content in leaves of herbaceous ornamental perennials, growing near the roads of the city of Berdsk in the Novosibirsk Region. The following plant species are used: *Iris hybrida hort.* (Iridaceae), *Hemerocallis hybrida hort.* (Hemerocallaceae), *Hosta decorate Bailey* (Hostaceae). The intensity of lipid peroxidation in plant leaves was assessed spectrophotometric, using a method using thiobarbituric acid. Species specificity for the accumulation of malondialdehyde in leaves of ornamental herbaceous perennials growing near motorways is established: *Iris hybrida* > *Hosta decorate* > *Hemerocallis hybrida*. The highest intensity of oxidative processes in the leaves of the investigated plants was noted near the central urban highways - Rogacheva St., Lenina St., Lunnaya St. In an urban environment, the *Iris hybrida* leaves showed a 13-22 % increase in the level of malondialdehyde during vegetation, compared to *Hosta decorate* and *Hemerocallis hybrida*. The results obtained can be used in environmental biotesting of the environment.

Keywords: *Hemerocallis hybrida*, *Iris hybrida*, *Hosta decorate*, plant resistance, malondialdehyde, oxidative stress, urbanized environment.

В условиях урбанизированной среды растения, внешне сохраняя декоративное состояние, претерпевают значительные физиолого-биохимические изменения. При воздействии разнообразных экстремальных факторов среды у растений в первую очередь повреждаются мембранные структуры и, как следствие, происходит увеличение содержания малонового диальдегида (МДА) – продукта окисления липидов в растительных тканях, что связано с активацией свободнорадикальных реакций в клетках [1–4]. В последнее десятилетие появилось много публикаций, связанных с изучением содержания антиоксидантов в растениях, произрастающих в неблагоприятных условиях окружающей среды [5–12]. Некоторые авторы отмечают повышение МДА в ассимиляционных органах растений при окислительном стрессе [13–16]. Однако в литературе недостаточно сведений по содержанию МДА как показателя окислительного стресса в декоративных многолетниках, подвергающихся неблагоприятному воздействию факторов урбанизированной среды. Выявление межвидовых, онтогенетических и сезонных изменений этого компонента в растениях и соответствие функционирования систем антиоксидантной защиты декоративных травянистых многолетников в условиях техногенных факторов являются актуальными.

Цель работы – оценить устойчивость травянистых многолетников, произрастающих вблизи автотранспортных дорог г. Бердска Новосибирской области, по уровню МДА.

Объекты и методы исследований

Исследования проведены в 2014–2016 гг. Объектами исследований служили корневищные длительно вегетирующие, летне-осеннецветущие многолетники: *Iris hybrida* hort. (ирис гибридный) семейства Iridaceae, *Hemerocallis hybrida* hort. (лилейник гибридный) семейства Hemerocallidaceae, *Hosta decorate* Bailey (хоста декоративная) семейства Hostaceae. Для анализа взяты надземные органы (листья) хосты в периоды начала цветения (июль – 01.07–07.07), массового цветения (август – 04.08–06.08), плодоношения и осенней вегетации (сентябрь – 17.09–18.09); ириса гибридного (*I. hybrida*) – в периоды цветения (июль – 01.07), отцветания (август – 04.08–06.08), осенней вегетации (сентябрь – 10.09–18.09); лилейника гибридного (*H. hybrida*) – в период бутонизации (июль – 01.07–07.07), массового цветения (август – 04.08–06.08), отцветания (сентябрь – 18.09–19.09). Использованы варианты: 1 – контроль (ул. Золотодолинская, Центральный сибирский ботанический сад (ЦСБС) СО РАН); г. Бердск; растения вблизи автомагистрали: 2 – ул. Красная Сибирь, 3 – ул. Ленина, 4 – ул. Лунная,

5 – ул. Рогачева, 6 – ул. Микрорайон. Контролем служили образцы, выращенные на экспозиционном участке лаборатории интродукции декоративных растений ЦСБС СО РАН, г. Новосибирск. Участок расположен в районе п. Кирова, Приобский округ, лесостепная климатическая провинция, в 250–300 м от дороги второстепенного значения.

Лабораторные исследования проведены на базе ФИЦ УУХ СО РАН «Институт экологии человека СО РАН», г. Кемерово. Растительные образцы фиксировали в трихлоруксусной кислоте (ТХУК) и определяли интенсивность перекисного окисления липидов (ПОЛ) спектрофотометрическим методом [17] в модификации Г.Ф. Некрасовой, И.С. Киселевой [18] по накоплению продукта окисления – МДА, определяемого по цветной реакции с тиобарбитуровой кислотой (ТБК). Для этого навеску листьев (300 мг) растирали в ступке с небольшим количеством реакционной смеси, состоящей из 0,25%-го раствора ТБК в 10%-м растворе ТХУК. Гомогенат переносили в стеклянную пробирку небольшими порциями реакционной смеси, конечный объем каждой пробы составлял 4 мл. Пробы перемешивали и помещали в водяную баню (до 95 °С) на 30 мин. Затем охлаждали, помещая в сосуд с холодной водой (примерно +10 °С). Содержимое проб центрифугировали 10 мин при 10000 g. Оптическую плотность измеряли на спектрофотометре LEKI SS 1207 (Финляндия) при длине волны 532 и 600 нм. Концентрацию МДА рассчитывали по формуле, используя коэффициент молярной экстинкции: $A = (D_{532} - D_{600}) / (156 \cdot 0,3)$ и выражали в нмоль/г сырой массы. Статистическая обработка полученных данных и построение графиков выполнены с помощью стандартного пакета программ StatSoft STATISTICA 8.0. for Windows и Microsoft Office Excel 2007.

Результаты исследований и их обсуждение

Сравнительный анализ данных по накоплению МДА в листьях травянистых многолетников выявил индивидуальные различия у исследуемых видов в городской среде г. Бердска. Установлено, что наибольшее содержание МДА у контрольных и опытных образцов всех видов растений отмечено в фазы бутонизации и плодоношения (июль, сентябрь), наименьшее – в фазу цветения (август). В условиях городской среды в течение вегетации в листьях *Iris hybrida* значения МДА выше на 13–22 %, чем в листьях *Hemerocallis hybrida* и *Hosta decorate*.

У ириса гибридного уровень накопления МДА отличался специфичностью относительно вегетационного периода и фенофаз развития, а также зависимостью от места произрастания опытных образцов в цветниках городской среды (рис. 1). Так, по отноше-

нию к контролю содержание МДА в листьях сравнительно больше на 3–40 % у опытных растений. В период цветения *I. hybrida* значения исследуемого показателя превышали контроль в среднем на 13 %. Выявлена тенденция повышения ПОЛ в листьях *I. hybrida* в течение вегетации. Максимальное количество отмечено у исследуемых образцов в период осенней вегетации, особенно на ул. Рогачева (21,30 нмоль/г) и Ленина (18,22 нмоль/г), и превышали контрольные значения на 40 и 20 % соответственно.

В придорожных зонах исследуемых улиц г. Бердска в листьях хосты Декората в период

начала цветения показатели выше в среднем на 26 % в отличие от контроля (рис. 2). Наибольшее увеличение МДА в листьях *H. decorate* отмечено в периоды цветения и плодоношения на ул. Рогачева и Лунная. Так, на этих участках показатели превысили контроль на 14–54 %.

Вблизи исследуемых автодорог в листьях лилейника гибридного выявлено увеличение МДА в период бутонизации и к осени. Наибольшие отличия от контроля отмечены по ул. Ленина (30–31 %) и Рогачева (32–52 %). В период цветения *H. hybrida* содержание МДА снижалось до 11,15 нмоль/г (рис. 3).

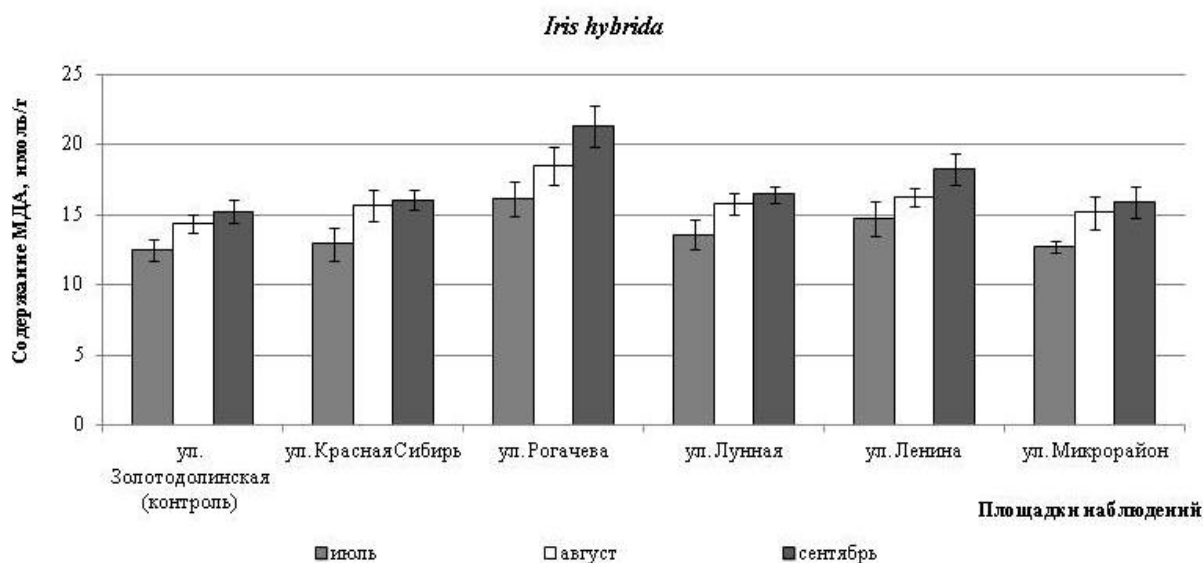


Рис. 1. Динамика накопления МДА в листьях *Iris hybrida*, произрастающих в условиях различных уровней загрязнения г. Бердска (данные представлены как среднее (X) ± SD за годы исследований (n=108, p<0,05))
 / Fig. 1. Dynamics of malondialdehyde accumulation in leaves *Iris hybrida*, growing in conditions of different levels of pollution in Berdsk (The data are presented as mean (X) ± SD for years of studies (n=108, p<0.05))

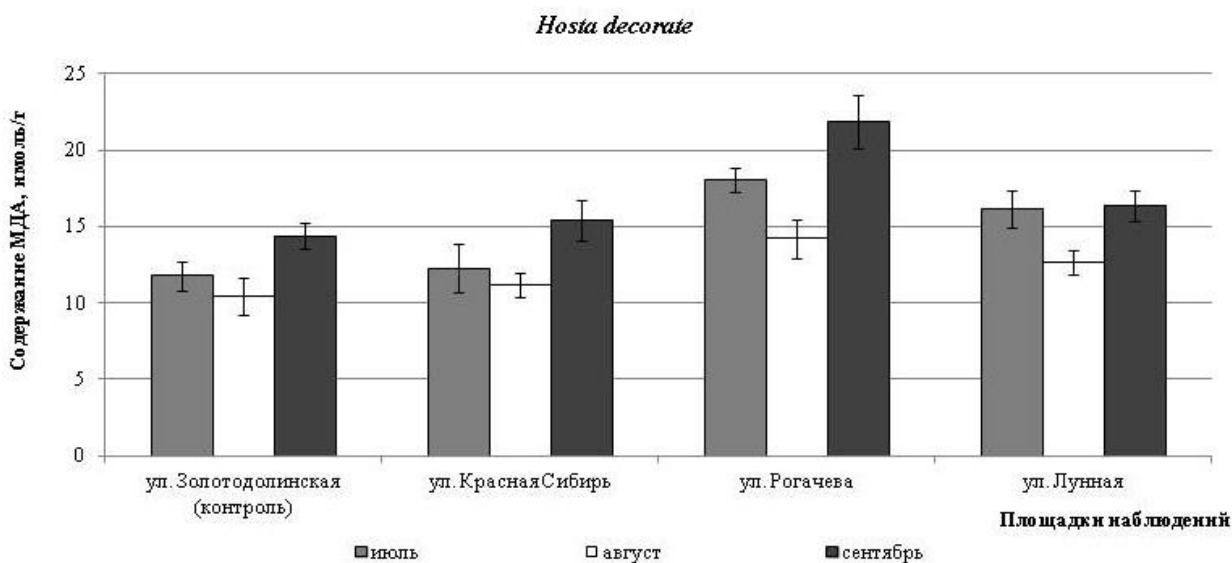


Рис. 2. Динамика накопления МДА в листьях *Hosta decorate*, произрастающих в условиях различных уровней загрязнения г. Бердска / Fig. 2. Dynamics of malondialdehyde accumulation in leaves *Hosta decorate*, growing in conditions of different levels of pollution in Berdsk

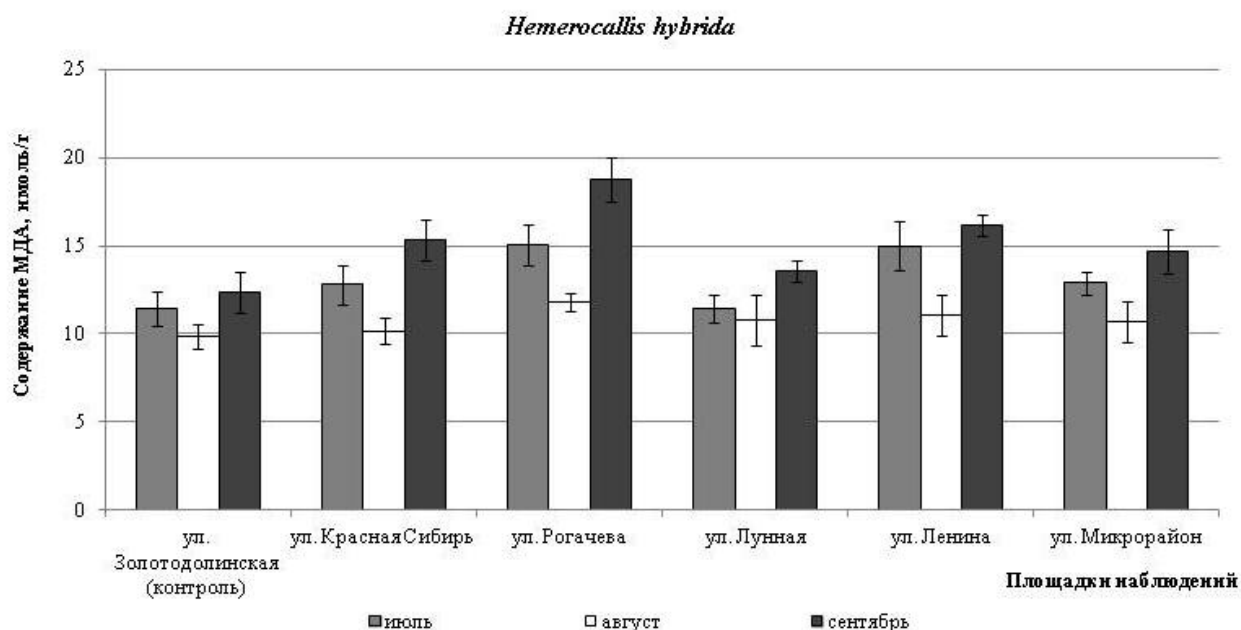


Рис. 3. Динамика накопления МДА в листьях *Heimerocallis hybrida*, произрастающих в условиях различных уровней загрязнения г. Бердска / Fig. 3. Dynamics of malondialdehyde accumulation in leaves *Heimerocallis hybrida*, growing in conditions of different levels of pollution in Berdsk

Анализ экспериментальных данных показал, что у лилейника гибридного, хосты Декората и ириса гибридного выявлено наибольшее накопление продуктов ПОЛ в зоне воздействия выбросов автотранспорта, особенно в районе центральных городских автодорог г. Бердска (ул. Рогачева, Ленина, Лунная). Вблизи второстепенных дорог тоже отмечено повышение МДА, но с изменчивостью по месяцам, в течение июля – сентября. Рост МДА приводит к повышенной выработке активных форм кислорода и повышению уровня окислительного стресса в растениях.

Растения в летний период в городской среде Бердска были устойчивы, но менее декоративны по внешнему габитусу. Общую устойчивость к неблагоприятным факторам (солнечным ожогам, пыли, болезням, вредителям) и декоративность определяли визуально по 5-балльной шкале [19, 20]. Согласно этой методике, растения оцениваются в 5 баллов с отличной декоративностью, в 4,5 – с высокой, в 4 – с декоративностью выше средней, в 3 – со средней, в 2 – с низкой, 1 – с очень низкой декоративностью. Учитываются общая приспособленность и устойчивость к местным условиям. Для хосты Декората она составляла 4,5 балла, лилейника гибридного – 4, ириса гибридного – 3, что свидетельствует о хорошей адаптационной способности данных видов к условиям городской среды и использовании их в озеленении для поддержания декоративного эффекта

в течение всего вегетационного периода, несмотря на повышенный уровень окислительного стресса.

Выводы

1. В городской среде г. Бердска установлена видоспецифичность по уровню накопления МДА в листьях декоративных травянистых многолетников, произрастающих вблизи автомагистральных дорог: *Iris hybrida* > *Hosta decorate* > *Heimerocallis hybrida*.

2. Наибольшая интенсивность окислительного стресса установлена в листьях исследуемых растений, произрастающих вблизи центральных городских автодорог – ул. Рогачева, Ленина, Лунная, вследствие увеличения содержания МДА.

3. В условиях городской среды в течение вегетации в листьях *Iris hybrida* уровень МДА выше на 13–22 %, чем в листьях *Hosta decorate* и *Heimerocallis hybrida*.

4. Количественное накопление МДА в листьях травянистых растений можно использовать в качестве информативного параметра для фитоиндикации и оценки их состояния в условиях загрязнения окружающей среды выбросами автотранспорта.

Литература

1. Жиров В.К., Голубева Е.И., Говорова А.Ф., Хаитбаев А.Х. Структурно-функциональные изменения растительности в условиях техногенного загряз-

нения на Крайнем Севере / отв. ред. Е.Е. Кислых. М. : Наука, 2007. С. 10–12.

2. Ясар Ф., Элиалтиглу С., Ильдис К. Действие засоления на антиокислительные защитные системы, перекисное окисление липидов и содержание хлорофилла в листьях фасоли // Физиология растений. 2008. Т. 55, № 6. С. 86–873.

3. Филимонихина Е.Г., Лихолат Ю.В. Устойчивость растений подтапливаемых территорий в условиях засухи в г. Кировоград // Вісн. Дніпропетровського ун-ту. Біологія. Екологія. 2011. Т. 2, № 19. С. 132–135.

4. Kaznacheeva M.S., Tsebrzhinsky I. Able of contents of malondialdehyde in sorts of plants different on level of stability to the diseases // Вісн. Одеського національного ун-ту. Біологія. 2011. Т. 16, № 6 (24). С. 12–17.

5. Лу Т.К., Лу Л.Л., Жу Е., Гунта Д.К., Ислам Е., Янг Х.Е. Антиоксидантная система в корнях двух контрастных экотипов *Sedum alfredii* при повышенных концентрациях цинка // Физиология растений. 2008. Т. 55, № 6. С. 886–894.

6. Ерофеева Е.А. Немонотонное изменение некоторых биохимических показателей одуванчика при действии автотранспортного загрязнения // Вестн. ННГУ им. Н.И. Лобачевского. 2011. № 2 (2). С. 7–81.

7. Маслова С.П., Табаленкова Г.Н., Мальшиев Р.В., Головок Т.К. Сезонные изменения роста и метаболической активности подземных побегов тысячелистника обыкновенного // Физиология растений. 2013. Т. 60, № 6. С. 86–87.

8. Белова И.В., Глумова Н.В. Об участии метаболитов основного обмена в формировании защитного ответа лаванды на действие низких температур // Таврический вестн. аграр. науки. 2015. № 2 (4). С. 16–21.

9. Фазлиева Э.Р., Киселева И.С., Жуйкова Т.В. Антиоксидантная активность листьев *Melilotus albus* и *Trifolium medium* из техногенно нарушенных местообитаний Среднего Урала при действии меди // Физиология растений. 2012. Т. 59, № 3. С. 369–375.

10. Hu Sh., Li Yu., Wang W., Jiao Ju., Kou M., Yin Q., Xu H. The antioxidation-related functional structure of plant communities: Understanding antioxidation at the plant community level // Ecological Indicators. 2017. Vol. 78. P. 98–107. URL: doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.03.007 (дата обращения: 10.04.2017).

11. Koyro H.-W., Hussain T., Huchzermeyer B., Khan M.A. Photosynthetic and growth responses of a perennial halophytic grass *Panicum turgidum* to increasing NaCl concentrations // Environmental and Experimental Botany. 2013. Vol. 91. P. 22–29. URL: doi.org/10.1016/j.envexpbot.2013.02.007 (дата обращения: 15.04.2017).

12. Su B., Zhou M., Xu H., Zhang X., Li Yo., Su H., Xiang B. Photosynthesis and biochemical responses to elevated O₃ in *Plantago major* and *Sonchus oleraceus* growing in a lowland habitat of northern China // J. of Environmental Sciences. 2017. Vol. 53. P. 113–121.

URL: doi.org/10.1016/j.jes.2016.05.011 (дата обращения: 10.04.2017).

13. Гончарова Н.В., Ковалев В.Ф., Сермакшева Е.В. Липидные компоненты фотосинтетических мембран растений как тест-система оксидного стресса и устойчивости агроценозов // Экол. вестн. 2014. № 1(27). С. 13–22.

14. Ерофеева Е.А., Шаповалова К.В. Многолетний сравнительный анализ устойчивости *Betula pendula* (Betulaceae, fagales) и *Tilia cordata* (Malvaceae, malvales) к автотранспортному загрязнению // Поволжский экол. журн. 2015. № 4. С. 390–399.

15. Krishnamurthy A., Rathinasabapathi B. Oxidative stress tolerance in plants // Plant Signal Behav. 2013. Vol. 8, Iss. 10: e25761. DOI: 10.4161/psb.25761.

16. Demidchik V. Mechanisms of oxidative stress in plants: From classical chemistry to cell biology // Environmental and Experimental Botany. 2015. Vol. 109. P. 212–228. URL: doi.org/10.1016/j.envexpbot.2014.06.021 (дата обращения: 15.10.2016).

17. Uchiyama M., Mihara M. Determination of malonaldehyde precursor in tissues by thiobarbituric acid test // Analytical Biochemistry. 1978. Vol. 86. P. 271–278.

18. Некрасова Г.Ф., Киселева И.С. Экологическая физиология растений: руководство к лабораторным и практическим занятиям. Екатеринбург : Уральский гос. ун-т, 2008. С. 28–29.

19. Карпиценова Р.А. Оценка успешности интродукции многолетников по данным визуальных наблюдений // Тез. докл. 6-го делегат. съезда ВРО. Л., 1978. С. 175–176.

20. Былов В.Н. Основы сравнительной сортооценки растений // Интродукция и селекция цветочно-декоративных растений. М., 1978. С. 7–32.

References

1. Zhiron V.K., Golubeva E.I., Govorova A.F., Khaibtaev A.Kh. *Strukturno-funktsional'nye izmeneniya rastitel'nosti v usloviyakh tekhnogenogo zagryazneniya na Krainem Severe* [Structural and functional changes in vegetation under conditions of technogenic pollution in the Far North]. Ed. E.E. Kislykh. Moscow: Nauka, 2007, pp. 10-12.

2. Yasar F., Elial'tiglu S., Il'dis K. Deistvie zasoleniya na antiokislitel'nye zashchitnye sistemy, perekisnoe okislenie lipidov i sodержanie khlorofilla v list'yakh fasoli [The effect of salinization on antioxidant protective systems, lipid peroxidation and chlorophyll content in bean leaves]. *Fiziologiya rastenii*. 2008, vol. 55, No. 6, pp. 869-873.

3. Filimonikhina E.G., Likhohat Yu.V. Ustoichivost' rastenii podtaplivaemykh territorii v usloviyakh zasukhi v g. Kirovograd [Stability of plants in flooded areas under conditions of drought in the city of Kirovograd]. *Visn. Dnipropetrovs'kogo un-tu. Biologiya. Ekologiya*. 2011, vol. 2, No. 19, pp. 132-135.

4. Kaznacheeva M.S., Tsebrzhinsky I. Able of contents of malondialdehyde in sorts of plants different on level of stability to the diseases. *Visn. Odes'kogo natsional'nogo un-tu. Biologiya*. 2011, vol. 16, No. 6 (24), pp. 12-17.

5. Li T.K., Lu L.L., Zhu E., Gupta D.K., Islam E., Yang Kh.E. Antioksidantnaya sistema v kornyakh dvukh kontrastnykh ekotipov *Sedum alfredii* pri povyshennykh kontsentratsiyakh tsinka [Antioxidant system in the roots of two contrasting ecotypes of *Sedum alfredii* at elevated zinc concentrations]. *Fiziologiya rastenii*. 2008, vol. 55, No. 6, pp. 886-894.

6. Erofeeva E.A. Nemonotonnoe izmenenie nekotorykh biokhimicheskikh pokazatelei oduvanchika pri deistvii avtotransportnogo zagryazneniya [Nonmonotonic change of some biochemical indices of a dandelion under the action of motor transport contamination]. *Vest. NNGU im. N.I. Lobachevskogo*. 2011, No. 2 (2), pp. 7-81.

7. Maslova S.P., Tabalenkova G.N., Malyshev R.V., Golovok T.K. Sezonnnye izmeneniya rosta i metabolicheskoi aktivnosti podzemnykh pobegov tsysyachelistnika obyknovennogo [Seasonal changes in the growth and metabolic activity of the underground shoots of the yarrow]. *Fiziologiya rastenii*. 2013, vol. 60, No. 6, pp. 86-87.

8. Belova I.V., Glumova N.V. Ob uchastii metabolitov osnovnogo obmena v formirovanii zashchitnogo otveta lavandy na deistvie nizkikh temperatur [On the participation of metabolites of the basic metabolism in the formation of the protective response of lavender to the action of low temperatures]. *Tavrisheskii vestn. agrar. nauki*. 2015, No. 2 (4), pp. 16-21.

9. Fazlieva E.R., Kiseleva I.S., Zhuikova T.V. Antioksidantnaya aktivnost' list'ev *Melilotus albus* i *Trifolium medium* iz tekhnogenno narushennykh mestoobitanii Srednego Urala pri deistvii medi [Antioxidant activity of the leaves of *Melilotus albus* and *Trifolium medium* from technologically disturbed habitats of the Middle Urals under the action of copper]. *Fiziologiya rastenii*. 2012, vol. 59, No. 3, pp. 369-375.

10. Hu Sh., Li Yu., Wang W., Jiao Ju., Kou M., Yin Q., Xu H. The antioxidation-related functional structure of plant communities: Understanding antioxidation at the plant community level. *Ecological Indicators*. 2017, vol. 78, pp. 98-107. Available at: doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.03.007 (accessed 10.04.2017).

11. Koyro H.-W., Hussain T., Huchzermeyer B., Khan M.A. Photosynthetic and growth responses of a perennial halophytic grass *Panicum turgidum* to increasing NaCl con-

centrations. *Environmental and Experimental Botany*. 2013, vol. 91, pp. 22-29. Available at: doi.org/10.1016/j.envexpbot.2013.02.007 (accessed 15.04.2017).

12. Su B., Zhou M., Xu H., Zhang X., Li Yo., Su H., Xiang B. Photosynthesis and biochemical responses to elevated O₃ in *Plantago major* and *Sonchus oleraceus* growing in a lowland habitat of northern China. *J. of Environmental Sciences*. 2017, vol. 53, pp. 113-121. Available at: doi.org/10.1016/j.jes.2016.05.011 (accessed 10.04.2017).

13. Goncharova N.V., Kovalev V.F., Sermaksheva E.V. Lipidnye komponenty fotosinteticheskikh membran rastenii kak test-sistema oksidnogo stressa i ustoichivosti agrotsenozov [Lipid components of plant photosynthetic membranes as a test system of oxide stress and agrocenosis stability]. *Ekol. vestn.* 2014, No. 1 (27), pp. 13-22.

14. Erofeeva E.A., Shapovalova K.V. Mnogoletnii sravnitel'nyi analiz ustoichivosti *Betula pendula* (Betulaceae, fagales) i *Tilia cordata* (Malvaceae, malvales) k avtotransportnomu zagryazneniyu [Long-term comparative analysis of the stability of *Betula pendula* (Betulaceae, fagales) and *Tilia cordata* (Malvaceae, malvales) to motor transport contamination]. *Povolzhskii ekol. zhurn.* 2015, No. 4, pp. 390-399.

15. Krishnamurthy A., Rathinasabapathi B. Oxidative stress tolerance in plants. *Plant Signal Behav.* 2013, vol. 8, iss. 10, e25761, DOI 10.4161/psb.25761.

16. Demidchik V. Mechanisms of oxidative stress in plants: From classical chemistry to cell biology. *Environmental and Experimental Botany*. 2015, vol. 109, pp. 212-228. Available at: doi.org/10.1016/j.envexpbot.2014.06.021 (accessed 15.04.2017).

17. Uchiyama M., Mihara M. Determination of malonaldehyde precursor in tissues by thiobarbituric acid test. *Analytical Biochemistry*. 1978, vol. 86, pp. 271-278.

18. Nekrasova G.F., Kiseleva I.S. *Ekologicheskaya fiziologiya rastenii: rukovodstvo k laboratornym i prakticheskim zanyatiyam* [Ecological physiology of plants: a guide to laboratory and practical exercises]. Ekaterinburg: Ural'skii gos. un-t, 2008, pp. 28-29.

19. Karpisonova R.A. [Assessment of the success of the introduction of perennials according to visual observations]. *Tez. dokl. 6-go delegat. s'ezda VRO* [Abstracts of the 6th Delegate Congress of the VRO]. Leningrad, 1978, pp. 175-176.

20. Bylov V.N. [Fundamentals of comparative plant assessment of plants]. *Introduktsiya i selektsiya tsvetochno-dekorativnykh rastenii* [Introduction and selection of flower-ornamental plants]. Moscow, 1978, pp. 7-32.

НАУКИ О ЗЕМЛЕ SCIENCE OF EARTH

УДК 550.42:911

DOI 10.23683/0321-3005-2017-3-1-62-68

ЭЛЕМЕНТНЫЙ СОСТАВ НЕКОТОРЫХ ГОРНЫХ И СТЕПНЫХ ПОЧВ ЮГА ЕВРОПЕЙСКОЙ ЧАСТИ РОССИИ

© 2017 г. С.Р. Аветисян¹, Е.А. Бураева¹, Н.М. Новиковский¹
¹Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, Россия

ELEMENTAL COMPOSITION OF SOME MOUNTAINOUS AND STEPPE SOILS OF THE SOUTH EUROPEAN PART OF RUSSIA

S.R. Avetisyan¹, E.A. Buraeva¹, N.M. Novikovskiy¹
¹Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia

Аветисян Самвел Рубенович – аспирант, физический факультет, Южный федеральный университет, ул. Зорге, 5, г. Ростов-на-Дону, 344090, Россия, e-mail: samvelavetisyan90@mail.ru

Samvel R. Avetisyan - Postgraduate, Faculty of Physics, Southern Federal University, Zorge St., 5, Rostov-on-Don, 344090, Russia, e-mail: samvelavetisyan90@mail.ru

Бураева Елена Анатольевна – кандидат химических наук, доцент, заведующая лабораторией радиоэкологических исследований, ведущий научный сотрудник, Научно-исследовательский институт физики, Южный федеральный университет, пр. Стачки, 194, г. Ростов-на-Дону, 344090, Россия, e-mail: buraeva@sfedu.ru

Elena A. Buraeva - Candidate of Chemistry, Associate Professor, Head of Radioecological Studies Laboratory, Leading Researcher, Research Institute of Physics, Southern Federal University, Stachki Ave., 194, Rostov-on-Don, Russia, 344090, e-mail: buraeva@sfedu.ru

Новиковский Николай Михайлович – кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией рентгеноспектрального анализа, Научно-исследовательский институт физики, Южный федеральный университет, пр. Стачки, 194, г. Ростов-на-Дону, 344090, Россия, e-mail: novnim@sfedu.ru

Nikolay M. Novikovskiy - Candidate of Physics and Mathematics, Head of X-ray Spectrum Analysis Laboratory, Research Institute of Physics, Southern Federal University, Stachki Ave., 194, Rostov-on-Don, Russia, 344090, e-mail: novnim@sfedu.ru

Представлены данные по содержанию и распределению K, Ca, Fe, Ti, Mn, Zn, Sr и Rb в горных почвах Республики Адыгеи и степных почвах Ростовской области. Определение содержания химических элементов в образцах почв проводили методом количественного рентгеновского флуоресцентного анализа на рентгеновском флуоресцентном спектрометре РФС-001. Среднее содержание K, Ca, и Sr в почвах степных территорий выше, чем в почвах горной Адыгеи. Концентрации Ti, Mn и Fe на 40–60 % выше в почвах горной Адыгеи, а средние значения концентраций Zn и Rb схожи в горных и степных почвах Юга России. На распределение химических элементов в почвах могут оказывать влияние такие факторы, как тип почвы, содержание гумуса и гранулометрический состав почвенных фракций, влажность почвы и тип почвенного режима, климатические условия региона, расположение почвенных разрезов и структура почвенных профилей. В целом изучение особенностей распределения элементов с учетом микрорельефа местности необходимо для организации мониторинговых исследований фоновых и загрязнённых территорий. Полученные данные могут быть использованы для оценки изменения содержания химических элементов в наземных экосистемах.

Ключевые слова: химические элементы, концентрация, почва, распределение, степные и горные территории, рельеф, ландшафт, рентгеновский флуоресцентный анализ.

The data on the content and distribution of K, Ca, Fe, Ti, Mn, Zn, Sr and Rb in mountainous soils of the Republic of Adygea and steppe soils of Rostov Region are presented in this work. The content of chemical elements in the soil samples was determined by the quantitative X-ray fluorescence analysis method on the X-ray fluorescence spectrometer RFS-001. The average

content of K, Ca, and Sr in the soils of the steppe territories is higher than in the soils of the mountainous Adygea. The concentration of Ti, Mn and Fe is 40-60 % higher in the soils of mountainous Adygea, and the average concentration of Zn and Rb is similar in the mountainous and steppe soils of the South of Russia.

The distribution of chemical elements in soils can be influenced by factors such as soil type, humus content and the granulometric composition of soil fractions, humidity of soil and soil regime type, climatic conditions of the region, location of soil sections and the structure of soil profiles. In general, the study of the characteristics of the distribution of elements, considering the micro-relief of the terrain are necessary for the organization of monitoring studies of background and contaminated areas. The obtained data can be used to assess the variations in the content of chemical elements in terrestrial ecosystems.

Keywords: chemical elements, concentration, soil, distribution, steppe and mountainous territories, relief, landscape, X-ray fluorescence analysis.

Введение

На распределение тяжелых металлов в почве влияет множество факторов (свойства почв, рельеф, климатические условия и др.). Особенности накопления и миграции химических элементов в почвах определяют разнообразие типов почвообразования, неоднородность почвообразующих материалов, гранулометрический состав почвы, ландшафтно-геохимические условия миграции химических элементов. На процессы закрепления в почве элементов положительное влияние оказывают повышение содержания стабильного органического вещества, содержание глинистой фракции и увеличение концентрации почвенного раствора, а отрицательное – вымывающие фильтрующие растворы, водная и ветровая эрозия и иллювиирование наиболее дисперсной и богатой элементами части почв [1–3].

Данная работа посвящена оценке содержания и распределения некоторых химических элементов (в том числе тяжелых металлов) в почвах территорий Юга России.

Объекты и методы исследования

Объектами исследования являются почвы степных и горных территорий Северного Кавказа – Мясниковский, Волгодонской и Дубовский районы, микрорайон Донской города Новочеркаска Ростовской области и Майкопский район Республики Адыгеи.

Почвы Ростовской области представлены в основном черноземами и каштановыми, почвы горной Адыгеи – ранкеры, бурые лесные, луговые и аллювиальные почвы. Отбор почвенных образцов проводился в экспедициях 2012–2016 гг. ежегодно. Для оценки вариации элементного состава почв, сформированных на различных ландшафтах, отбирались поверхностные почвенные образцы глубиной 0–5 см. Для изучения особенности распределения элементов по глубине образцы отбирались из разрезов глубиной до 150 см.

Содержание химических элементов в образцах почвы определялось методом рентгеновского флуоресцентного анализа (РФА) с использованием рент-

генофлуоресцентного спектрометра на основе полного внешнего отражения РФС-001. Полное внешнее отражение рентгеновского излучения в западной классификации: Total X-ray reflection fluorescence (TXRF). Диапазон определяемых на спектрометре РФС-001 элементов [Al; U]. Подробное описание устройства спектрометра и его рентгенооптическая схема изложены в работе [4].

Определение общего содержания химических элементов в пробах почв проводилось методом РФА по ОСТу 10-259-2000. В качестве внутреннего стандарта использовался ГСО 7257-96 состава раствора ионов хрома (Cr) 0,95–1,05 мг/см³.

Пробоподготовка

Для проведения РФА проба на подложке размещается в камере облучения образцов спектрометра РФС-001, после чего в течение 300 с осуществляется набор спектра рентгеновской флуоресценции. Регистрация и обработка спектров рентгеновской флуоресценции проводились в программе UniverRS (свидетельство государственной регистрации программы для ЭВМ № 2010615318 от 18.08.2010 г.), разработанной в НИИ физики ЮФУ. Для определения относительного стандартного отклонения результатов анализа последовательно анализировались 5 проб, приготовленных из каждого образца. Статистическая обработка результатов измерений проводилась в соответствии с традиционными методиками статистической обработки результатов, применяемых в аналитической химии [5].

Результаты и их обсуждение

В таблице представлены полученные данные по содержанию К, Са и Fe в почвах степных и горных территорий.

Содержание К в поверхностном горизонте почвы варьирует в достаточно широких пределах, максимальное содержание К наблюдается в бурых лесных примитивных и луговых почвах, минимальное – в бурых лесных ненасыщенных и аллювиально-дерновых почвах.

Содержание К, Са и Fe в почвах степных и горных территорий, % / Content of K, Ca and Fe in soils of steppe and mountainous areas, %

Параметры	Элемент					
	Горные почвы			Степные почвы		
	К	Са	Fe	К	Са	Fe
Среднее	1,27	0,41	5,53	1,44	0,74	3,86
Медиана	1,27	0,30	5,63	1,47	0,69	3,92
Мода	1,24	0,12	5,63	1,27	0,68	–
Минимум	0,68	0,04	2,83	0,66	0,39	1,80
Максимум	2,03	1,23	7,96	2,36	2,03	5,49
Количество проб, шт.	111	111	111	110	110	110

В степных почвах наиболее высокая концентрация калия в черноземах и в каштановых почвах. При этом в почвах степных регионов средняя концентрация калия соответствует содержанию данного элемента в почвах горных территорий (до 1,3–1,5 %). Минимальное содержание железа и кальция в горных почвах наблюдается в бурых лесных и аллювиально-дерновых ненасыщенных почвах, а максимальное – в лесных ранкерах. В поверхностном слое почвы степной зоны самое низкое значение железа (до 3,8 %) зафиксировано в черноземах обыкновенных карбонатных, а максимальное (до 5,5 %) – в лугово-черноземных почвах. На рис. 1 представлено распределение макроэлементов в горных и степных почвах регионов исследования.

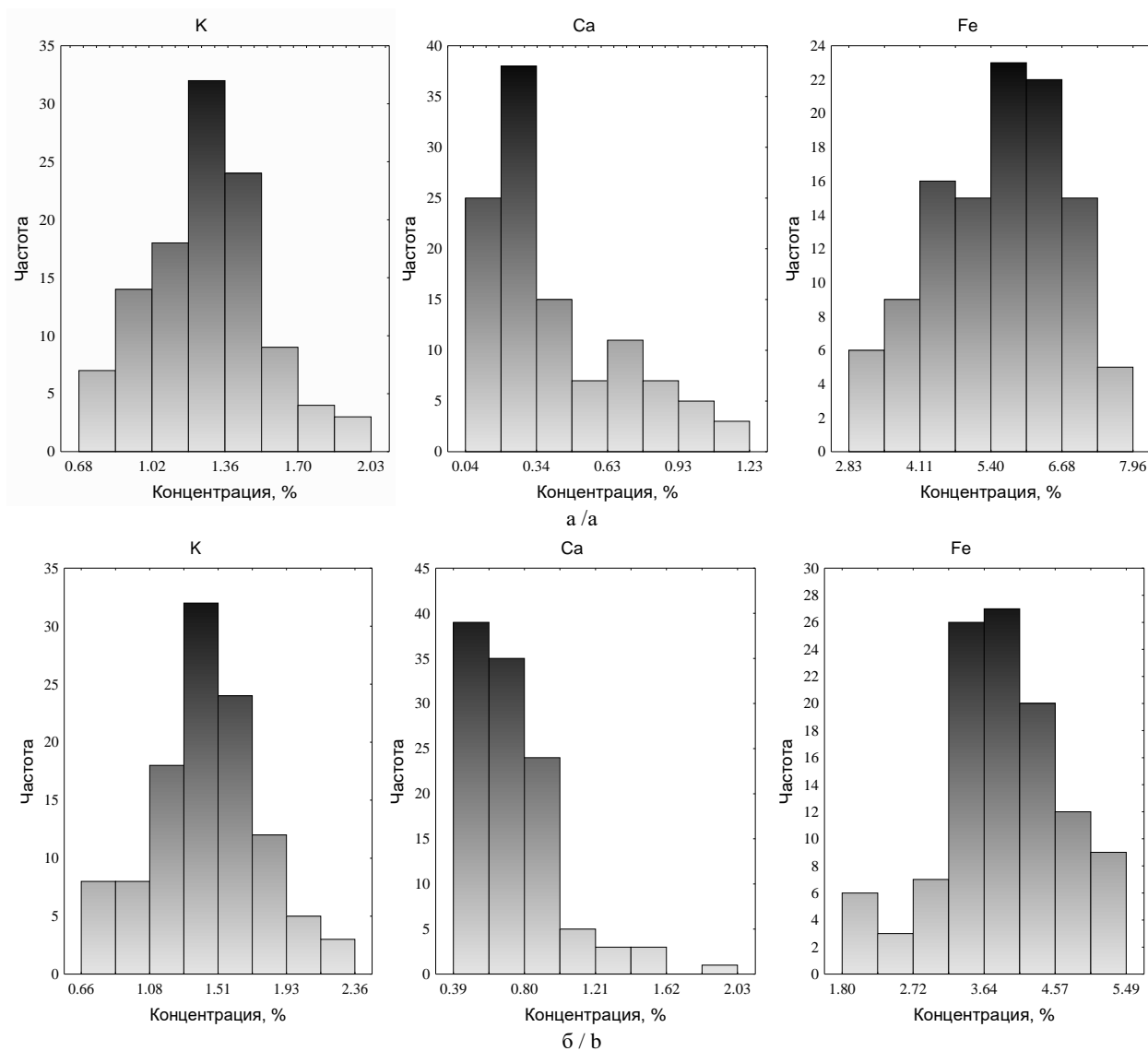


Рис. 1. Распределение концентраций К, Са и Fe в почвах горных (а) и степных (б) территорий / Fig. 1. The distribution of the number density of K, Ca, and Fe in soils of mountainous (a) and steppe (b) areas

Анализ частоты встречаемости концентраций калия, кальция и железа в почвах Северного Кавказа выявил близкие значения средней арифметической, медианы и моды, подтверждающие нормальное распределение калия в изучаемых почвах степных и горных территорий. Исходя из данных (рис. 1), можно сделать вывод о неравномерности распределения Са в исследуемых территориях. Физико-химические свойства кальция, поведение его в различных типах почв, а также свойства самих почв делают распределение элементного состава неоднородным.

Высокое содержание калия в луговых почвах степных территорий может быть обусловлено внесением калийных удобрений. В почвах горных ландшафтов определяющим фактором содержания калия являются тип почвообразующей породы и количество фитомассы [6].

Высокое содержание Са в почвах степных территорий объясняется тем, что в данных почвах преобладает повышенное содержание углекислой извести [7]. Карбонатизация степных почв проявляется в формировании особого почвенного горизонта, насыщенного карбонатами кальция (CaCO_3) [7]. Карбонаты могут либо залегать в виде крупных мучнистых прослоек, либо рассеиваться в виде так называемой белоглазки – небольших локальных включений округлой формы [7]. Подобная вариация содержания Са связана как с различием типов почв, так и с почвенным режимом. Низкое содержание кальция в почвах горных территорий обусловлено вымыванием его осадками [8].

Валовое содержание железа в почвах горных территорий больше, чем в почвах степных территорий. Это связано с тем, что ранкерам свойственно сравнительно высокое содержание свободного железа в гумусовом горизонте, вплоть до морфологического проявления ожелезненности [9]. Один из основных диагностических признаков бурых лесных почв – это преобладание аморфных соединений железа над окристаллизованными, доминирование среди соединений окристаллизованного железа слабокристаллизованных форм. На

рис. 2 приведены особенности распределения титана и марганца в некоторых почвах Ростовской области и Республики Адыгеи. Форма распределения титана близка к нормальному распределению Гаусса и позволяет утверждать, что титан распределен равномерно в почвах степных и горных территорий. В основном большинство значений валового содержания титана как в горных регионах, так и в степных находится на уровне 2600–5100 мг/кг, среднее содержание титана в горных и степных почвах составляет 4413 и 3792 мг/кг соответственно. При этом в почвах горных территорий максимальное и среднее содержание выше, чем в почвах степных регионов. Поскольку горные почвы в основном сформированы на ультраосновных магматических горных породах, концентрация титана здесь выше, чем в степных почвах [10].

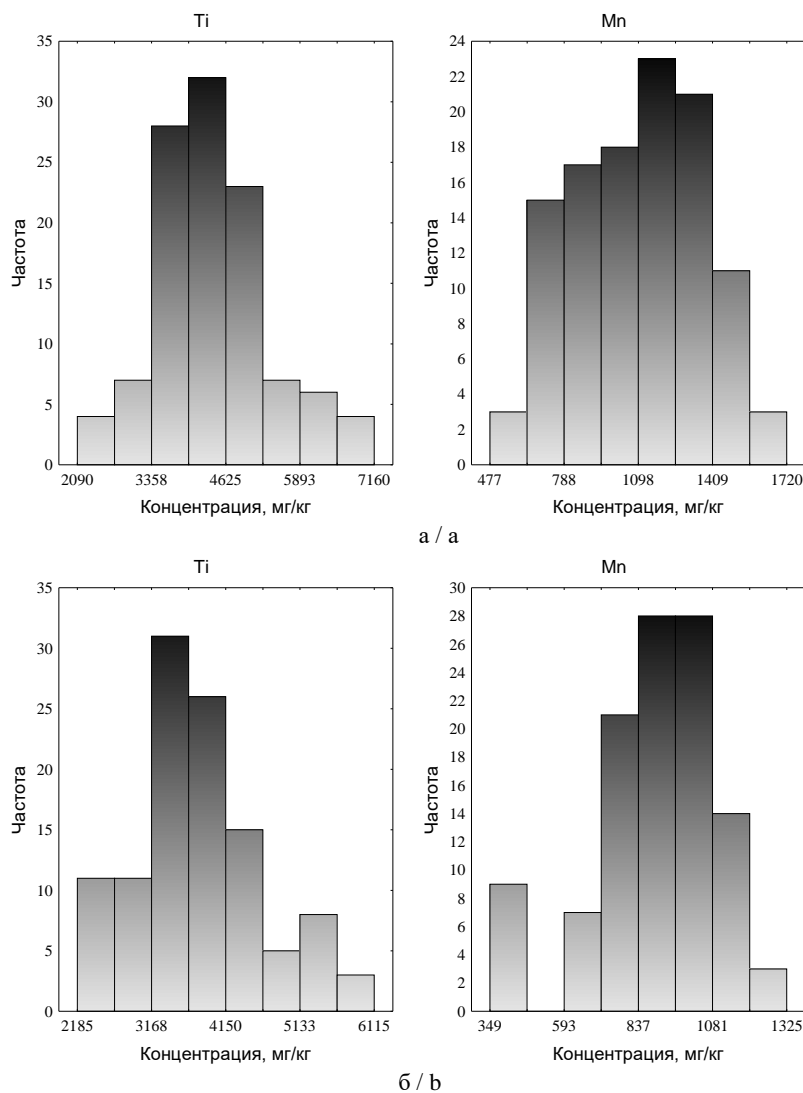


Рис. 2. Распределение концентраций Ti и Mn в почвах горных (а) и степных (б) территорий / Fig. 2. The distribution of the number density of Ti and Mn in soils of mountainous (a) and steppe (b) areas

Согласно полученным данным, в поверхностном слое почвы содержание марганца изменялось в довольно широком диапазоне. Наиболее высокое содержание марганца отмечалось в ранкерах, аллювиально-дерновых и горно-луговых почвах, так как эти виды почв богаты соединениями железа и марганца, кроме того, аллювиально-дерновые почвы расположены в пойме реки Белой, а в пойменных почвах часто образуются «барьеры» – фильтры, в которых накапливаются (сорбируются) химические элементы [2]. Валовое содержание марганца в верхнем горизонте данных почв достигает 1700 мг/кг и более.

Наименьшее содержание марганца в верхнем горизонте наблюдается в бурых лесных неполно развитых почвах горной территории, минимум – 477 мг/кг.

В почвах степной зоны содержание марганца изменяется в пределах 349–1325 мг/кг. Лугово-черноземные почвы степей не обладают таким высоким содержанием марганца, относительно высокое содержание марганца встречается в лугово-каштановых, каштаново-солонцеватых и темно-каштаново-солонцеватых почвах. На рис. 3 показаны особенности распределения Zn, Sr и Rb в почвах горных и степных территорий.

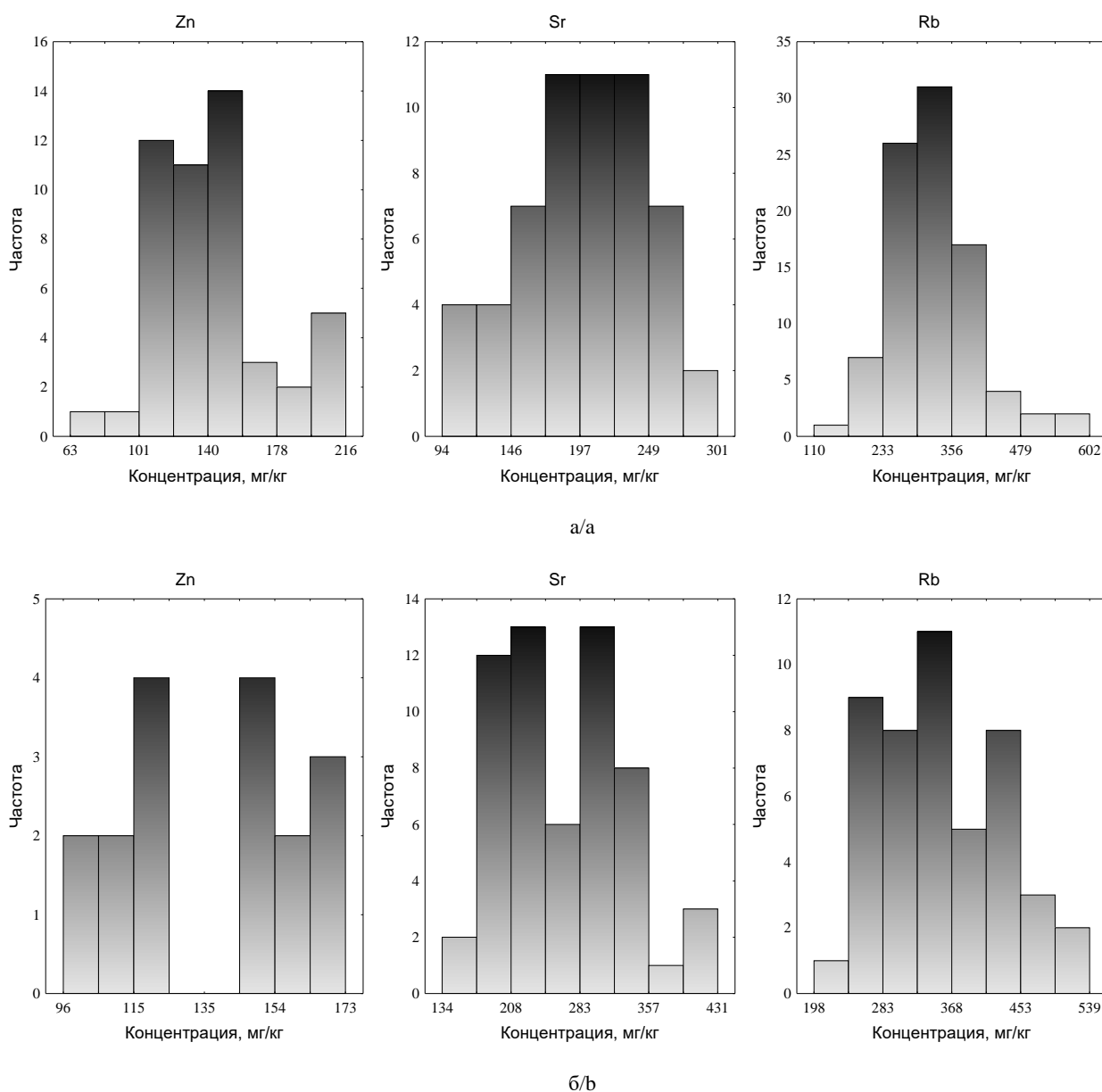


Рис. 3. Распределение концентраций Zn, Sr и Rb в почвах горных (а) и степных (б) территорий
 / Fig. 3. The distribution of the number density of Zn, Zr, and Rb in soils of mountainous (a) and steppe (b) areas

Распределение концентраций Zn, Sr и Rb в почвах Юга России имеет сложный характер. Следовательно, эти почвы не образуют единого однородного вариационного ряда по содержанию Zn, Sr и Rb в верхнем горизонте. Такие элементы, как Sr, Zn, Rb, могут быть привнесены в почву вследствие отдаленных последствий промышленных выбросов [11].

Концентрация цинка в верхнем слое почв горных территорий изменяется от 63 до 216 мг/кг, а в почвах степных территорий – от 96 до 173 мг/кг, вместе с этим средние значения концентрации цинка в горных и степных почвах составили 142 и 136 мг/кг. Высокое содержание цинка в степных черноземах другими исследователями объясняется значительным количеством гумуса [12]. В горных почвах больше всего содержание цинка в лесном ранкере и меньше всего – в бурых лесных почвах.

В верхнем слое почвы распределение Sr, как показал анализ, отличается большей сложностью. Данные подтверждают, что частота встречаемости концентрации Sr в горных и степных почвах неоднородна, более того, среднее содержание стронция в горных почвах меньше (201 мг/кг), чем в степных почвах (266 мг/кг).

Стронций концентрируется преимущественно в карбонатных осадках, геохимические и биохимические свойства стронция близки к свойствам кальция, поэтому в природных условиях суши стронций часто ассоциируется с кальцием [13]. В степных территориях наивысшие показатели концентрации стронция характерны для черноземов обыкновенных, а в горных – для аллювиально-дерновых почв, при значениях 431 и 301 мг/кг. В горах стронцием относительно обеднены бурые лесные почвы, а в степях – лугово-каштановые, при минимальных значениях 94 и 134 мг/кг соответственно.

Содержание Rb в поверхностном слое степной почвы изменяется от 198 до 539 мг/кг и в среднем составляет 356 мг/кг, а в горной – от 110 до 602 мг/кг при среднем значении 322 мг/кг. Таким образом, максимальное значение концентрации рубидия в горных почвах выше, чем в степных. В горах максимум отмечался в кислых луговых почвах, минимум – в бурых лесных, а в степях – максимум и минимум – в черноземах обыкновенных и в лугово-каштановых почвах соответственно.

Заключение

Проведенный рентгенофлуоресцентный анализ показал, что содержание Ca и Sr в почвах степных территорий Ростовской области в среднем до двух раз выше, чем в почвах горной Адыгеи. Это может быть обусловлено водным режимом почв. Черноземы (степные почвы) и каштановые почвы (почвы

сухих степей) формируются при непромывном типе водного режима, что обуславливает накопление химических элементов. Луговые почвы формируются при выпотном типе водного режима. Особенности водного режима луговых почв обуславливают дополнительное поступление элементов при процессах испарения высокостоящих грунтовых вод с высокой минерализацией. Также значимыми факторами в формировании химического (элементного) состава различных почв являются внесение на ряде территорий минеральных удобрений, химический состав почвообразующих пород (глины, лессовидные суглинки с высоким содержанием соединений Ca). Среднее содержание K, Zn и Rb почти одинаково в горных и степных почвах Северного Кавказа. Концентрации Ti, Mn и Fe на 40–60 % выше в почвах горной Адыгеи, что связано с особенностями химического состава почвообразующих пород и физико-химическими свойствами почв. В почвах, сформированных на кристаллических породах (граниты, кристаллические сланцы и др.), источниками данных элементов выступают темноцветные силикаты. Широко распространенные юрские аргиллиты (190–165 млн лет) часто имеют хлорит-каолинит-гидрослюдистый состав, что также указывает на повышенное содержание данных элементов.

Литература

1. Розанов Б.Г. Морфология почв. М. : Изд-во МГУ, 1983. 320 с.
2. Ковда В.А., Зырин М.Г. Микроэлементы в почвах Советского Союза. Вып. 1 : Микроэлементы в почвах европейской части СССР. М. : Изд-во МГУ, 1973. 282 с.
3. Рождественская Т.А. Микроэлементный состав зональных и интразональных почв западной части Алейской степи // Мир науки, культуры, образования. 2007. № 3 (6). С. 64–67.
4. Новиковский Н.М. Качественный, количественный и полуколичественный рентгеновский флуоресцентный анализ : метод. пособие. Ростов н/Д., 2012. 14 с.
5. Смагунова А.Н., Карпукова О.М. Методы математической статистики в аналитической химии : учеб. пособие. Ростов н/Д. : Феникс, 2012. 346 с.
6. Авакян Н.О. Калий почвенного раствора и питание растений калием // Агробиохимия. 1970. № 9. С. 57–61.
7. Овечкин С.В. О формах карбонатных новообразований в чернозёмах // Бюл. Почв. ин-та им. В. В. Докучаева. 1976. № 11. С. 77–84.
8. Schneider A., Mollier A. Modelling of K/Ca exchange in agricultural soils // Geoderma. 2016. Vol. 271. P. 216–224.
9. Ковда В.А. Почвоведение : учебник для вузов. М. : Высшая школа, 1988. 264 с.

10. Bech J., Reverter F., Tume P., Sanchez P., Longan L., Bech J., Oliver T. Pedogeochemical mapping of Al, Ba, Pb, Ti and V in surface soils of Barcelona Province (Catalonia, NE Spain): Relationships with soil physicochemical properties // *J. of Geochemical Exploration*. 2011. Vol. 109. P. 26 – 37.

11. Катальмов М.В. Микроэлементы и микроудобрения. М. : Химия, 1965. 332 с.

12. Колесников С.И., Казеев К.Ш., Вальков В.Ф. Экологические последствия загрязнения почв тяжелыми металлами. Ростов н/Д., : Изд-во СКНЦ ВШ, 2000. 232 с.

13. Greenwood N.N. Chemistry of the Elements. Oxford : Butterworth, 1997. 953 p.

References

1. Rozanov B.G. *Morfologiya pochv* [Morphology of soils]. Moscow: Izd-vo MGU, 1983, 320 p.

2. Kovda V.A., Zyryin M.G. *Mikroelementy v pochvakh Sovetskogo Soyuzha* [Microelements in the soils of the Soviet Union]. *Vyp. 1: Mikroelementy v pochvakh evropeiskoi chasti SSSR* [Iss. 1: Trace elements in the soils of the European part of the USSR]. Moscow: Izd-vo MGU, 1973, 282 p.

3. Rozhdestvenskaya T.A. Mikroelementnyi sostav zonal'nykh i intrazonal'nykh pochv zapadnoi chasti Aleiskoi stepi [Microelement composition of zonal and intrazonal soils in the western part of the Alei steppe]. *Mir nauki, kul'tury, obrazovaniya*. 2007, No. 3 (6), pp. 64-67.

4. Novikovskii N.M. *Kachestvennyi, kolichestvennyi i polukolichestvennyi rentgenovskii fluorestantsnyi analiz* [Qualitative, quantitative and semiquantitative X-ray fluorescence analysis]. Methodical manual. Rostov-on-Don, 2012, 14 p.

5. Smagunova A.N., Karpukova O.M. *Metody matematicheskoi statistiki v analiticheskoi khimii* [Methods of mathematical statistics in analytical chemistry]. Textbook. Rostov-on-Don: Feniks, 2012, 346 p.

6. Avakyan N.O. Kalii pochvennogo rastvora i pitaniye rastenii kaliem [Potassium of soil solution and nutrition of potassium plants]. *Agrokimiya*. 1970, No. 9, pp. 57-61.

7. Ovechkin S.V. O formakh karbonatnykh novoobrazovaniy v chernozemakh [On the forms of carbonate neoplasms in chernozems]. *Byul. Pochv. in-ta im. V.V. Dokuchaeva*. 1976, No. 11, pp. 77-84.

8. Schneider A., Mollier A. Modelling of K/Ca exchange in agricultural soils. *Geoderma*. 2016, vol. 271, pp. 216-224.

9. Kovda V.A. *Pochvovedeniye* [Soil science]. Textbook for universities. Moscow: Vysshaya shkola, 1988, 264 p.

10. Bech J., Reverter F., Tume P., Sanchez P., Longan L., Bech J., Oliver T. Pedogeochemical mapping of Al, Ba, Pb, Ti and V in surface soils of Barcelona Province (Catalonia, NE Spain): Relationships with soil physicochemical properties. *J. of Geochemical Exploration*. 2011, vol. 109, pp. 26-37.

11. Katalymov M.V. *Mikroelementy i mikroudobreniya* [Microelements and microfertilizers]. Moscow: Khimiya, 1965, 332 p.

12. Kolesnikov S.I., Kazeev K.Sh., Val'kov V.F. *Ekologicheskie posledstviya zagryazneniya pochv tyazhelyimi metallami* [Ecological consequences of soil contamination with heavy metals]. Rostov-on-Don: Izd-vo SKNTs VSh, 2000, 232 p.

13. Greenwood N.N. *Chemistry of the Elements*. Oxford: Butterworth, 1997, 953 p.

УДК 504.433:622(470.61)

DOI 10.23683/0321-3005-2017-3-1-69-75

ТЕРРИКОНЫ УГЛЕПРОМЫШЛЕННЫХ РАЙОНОВ ДОНБАССА КАК ИСТОЧНИК ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ

© 2017 г. В.Е. Закруткин¹, Л.Г. Зубова², Е.В. Гибков¹, А.Р. Зубов², С.Г. Воробьев²

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

²Луганский национальный университет им. В. Даля, Луганск, Украина

WASTE DUMP OF THE COAL-MINING AREAS OF DONBASS AS SOURCE OF IMPACT ON THE ENVIRONMENT

V.E. Zakrutkin¹, L.G. Zubova², E.V. Gibkov¹, A.R. Zubov², S.G. Vorobiev²

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

²Dahl Luhansk National University, Luhansk, Ukraine

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

Зубова Лилия Григорьевна – доктор технических наук, профессор, кафедра гидрометеорологии, Луганский национальный университет им. В. Даля, ул. Ватутина, 1а, г. Луганск, 91034, Украина, e-mail: kaf_gidrometeor@mail.ru

Lilia G. Zubova - Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Hydrometeorology, Dahl Luhansk National University, Vatutina St., 1a, Luhansk, 91034, Ukraine, e-mail: kaf_gidrometeor@mail.ru

Гибков Евгений Викторович – кандидат географических наук, старший преподаватель, кафедра геоэкологии и прикладной геохимии, Институт наук о Земле, Южный федеральный университет, ул. Зорге, 40, г. Ростов-на-Дону, 344090, Россия, e-mail: irvict@mail.ru

Eugeniy V. Gibkov - Candidate of Geography, Senior Lecturer, Department of Geoecology and Applied Geochemistry, Institute of Earth Sciences, Southern Federal University, Zorge St., 40, Rostov-on-Don, 344090, Russia, e-mail: irvict@mail.ru

Зубов Алексей Рэмович – доктор сельскохозяйственных наук, заведующий кафедрой гидрометеорологии, Луганский национальный университет им. В. Даля, ул. Ватутина, 1а, г. Луганск, 91034, Украина, e-mail: zubov-home@mail.ru

Alexey R. Zubov - Doctor of Agricultural Sciences, Head of the Department of Hydrometeorology, Dahl Luhansk National University, Vatutina St., 1a, Luhansk, 91034, Ukraine, e-mail: zubov-home@mail.ru

Воробьев Сергей Германович – кандидат технических наук, доцент, кафедра прикладной физики, Луганский национальный университет им. В. Даля, ул. Ватутина, 1а, г. Луганск, 91034, Украина, e-mail: delfin_lg@i.ua

Sergey G. Vorobiev - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Applied Physics, Dahl Luhansk National University, Vatutina St., 1a, Luhansk, 91034, Ukraine, e-mail: delfin_lg@i.ua

Рассмотрены терриконы Донецкого угольного бассейна как источник воздействия на окружающую среду. С использованием авторской методики дистанционного измерения геометрических параметров промоин по космическим снимкам был оценен вынос вещества с породного отвала вследствие делювиальных процессов. Это позволило установить масштабы поступления широкого перечня микроэлементов, главным образом тяжелых металлов (Cu, Pb, Mn, Ni, Sr, Zn, Li, Be, Co), в результате водной и ветровой эрозии, а также их водорастворимых соединений в составе стока с поверхности терриконов. Для последних определена решающая роль сернокислого гидролиза в масштабах миграции микроэлементов, что позволяет считать относительно молодые по возрасту формирования породных отвалов наиболее опасными с точки зрения влияния на почвенный покров и поверхностные водные объекты.

Ключевые слова: углепромышленные территории, породные отвалы, техногенный делювий, Донбасс, тяжелые металлы.

Results of a research dump breeds of the Donetsk coal basin as a source of impact on the environment are considered. With use of an author's technique of remote measurement of geometrical parameters of gullies on satellite images the carrying out of substance from a dump breeds owing to diluvial processes has been estimated. It has allowed to establish scales of receipt of the wide list of minerals, mainly heavy metals (Cu, Pb, Mn, Ni, Sr, Zn, Li, Be, Co) as a result of water and wind erosion, and also their water-soluble connections as a part of a drain from a surface of dump breeds. For the last the crucial role of sulfate hydrolysis on level of migration of heavy metals is defined that allows to consider dump breeds, rather young on age of formation, the most dangerous from the point of view of influence on a soils and surface waters.

Keywords: coal-mining territories, coal dumps, technogenic slide-rocks, Donbass, heavy metals.

Каменноугольные разработки в России были начаты 14 ноября 1795 г., когда был издан указ Екатерины II об их начале. Виднейший русский горный инженер П.Н. Горлов предложил считать эту дату днём начала развития каменноугольной промышленности Донбасса. Это предложение П.Н. Горлова было принято Русским техническим обществом. Таким образом, Лисичий Буерак (Лисичанск) был официально признан местом рождения угольного Донбасса [1]. Лисичанск стал средоточием промышленных начинаний, местом, куда съезжались горные инженеры и профессора русские, французские, английские и немецкие. Разведки, поиски, эксперименты, удачи и неудачи – все это свершается в Лисичанске в конце XVIII и XIX в.

На рис. 1 показана геологическая карта Лисичанского угленосного района. Район является северо-западной частью Донецкого бассейна. Угленосные отложения в пределах указанной площади протягиваются с северо-запада на юго-восток в виде полосы длиной 37 км и шириной 8 км.

В геологическом строении Лисичанского угленосного района принимают участие осадки каменноугольной системы, относящиеся к свитам $C_2^3 - C_3^2$. Каменноугольные отложения представлены толщей чередующихся между собой песчаников, алевролитов, аргиллитов, известняков и углей. Углесодержащими являются свиты среднего отдела, отложения свит верхнего карбона практически безугольные. Литологический состав свит приведен в табл. 1.

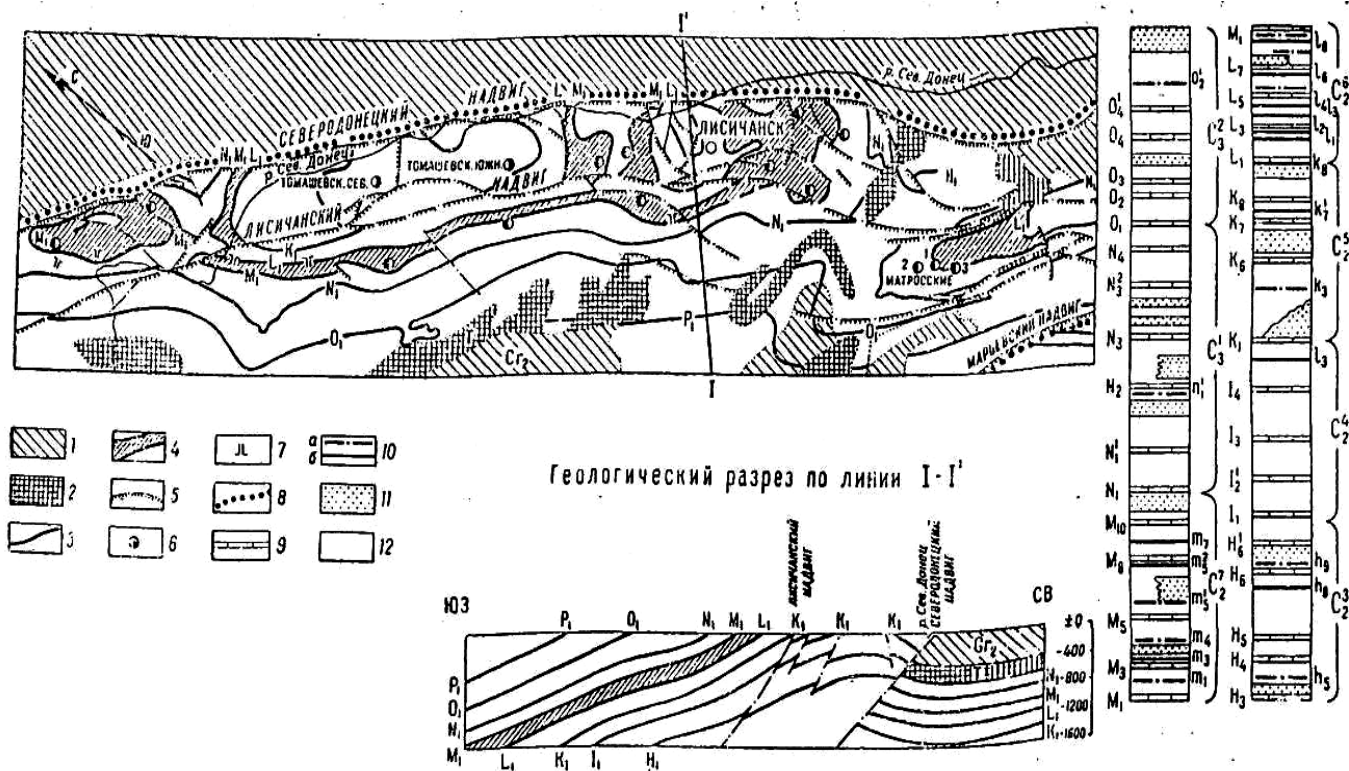


Рис. 1. Геологическая карта Лисичанского угленосного района: 1 – верхний мел; 2 – триас; 3 – граничные известняки свит карбона; 4 – выходы свиты C_2^6 ; 5 – разрывные нарушения; 6 – шахты вертикальные; 7 – шахты наклонные; 8 – граница угленосного района; 9 – известняки; 10 – угольные пласты (а – нерабочие; б – рабочие); 11 – песчаники; 12 – аргиллиты и алевролиты / Fig. 1. Geological map of Lisichansk coal area: 1 - lower Cretaceous deposits; 2 - Trias deposits; 3 - boundary limestones of carbon series ; 4 - C_2^6 series outlet; 5- faults; 6 - upraise coal mines; 7 - incline coal mines; 8 - coal area border; 9 - limestones; 10 - coal seams (a - exhausted; b - coal producing); 11 - sandstones; 12 - claystones and aleurolites

Таблица 1

**Характеристика свит карбона Лисичанского угленосного района
 / Characteristic of carbon series of the Lisichansk coal area**

Свита	Литологический состав, %				
	Песчаники	Алевриты	Аргиллиты	Известняки	Угли
C ₃ ² (O ₁ -O ₄)	24	27	45,6	3,2	0,2
C ₃ ¹	20	28	47,3	4,5	0,2
C ₂ ⁷	21,2	33,4	35,6	9	1,7
C ₂ ⁶	20,7	40,9	29,7	4,8	3,9
C ₂ ⁵	33,2	32,3	29	4	1,5
C ₂ ⁴	23,8	30,4	41,6	3,5	0,7
C ₂ ³ (H ₃ -1 ₁)	30,6	35,3	29	4,3	0,8

Угли Лисичанского района по степени метаморфизма относятся к марке Д, и только в пределах Матросского купола имеются газовые угли в пластах свиты C₂⁵ и нижней части свиты C₂⁶. Добыча угля в районе производится шахтами с вертикальными и наклонными стволами. Глубина вертикальных стволов колеблется от 37 до 290 м [2].

При разработке угольных месторождений подземным способом наряду с добычей угля на поверхность из шахт выдается порода, получаемая при проведении подготовительных, а также очистных выработок. Периодически в отвалы направляются шлам и ил от очистки капитальных выработок и водосборников, а также порода от работ по восстановлению аварийных выработок. В отвалы шахт направляются также отходы обогащения. Количество выдаваемой из шахт породы зависит от горно-геологических условий залегания угольных пластов (мощности, угла падения, наличия геологических нарушений, сближенности пластов), способов их разработки (взрывным способом, отбойными молотками или комбайнами) и систем разработки. Количество породы, извлекаемой углеобогательными фабриками, колеблется в широких пределах и зависит от зольности угля, а также от глубины обогащения. При обогащении малозольных коксовых углей отходы составляют 5–15 %.

Отходы угледобычи и углеобогащения, складываемые в отвалы, являются основными промышленными отходами. Сейчас их в Центральном Донбассе 1185, с объемом породы 1050 млн м³. Занимаемая ими площадь – 7190 га [2, 3].

В настоящее время 74,3 % шахтных отвалов Донбасса представлены рельсовыми террикониками с отсыпкой породы в форме конуса высотой до 50–100 и более метров, и каждый из них занимает площадь от 2 до 10 га, чаще всего ценных городских земель, поскольку 80 % всех терриконов региона расположены в городах и поселках. В каждом из них содержится в среднем 1144 тыс. м³ отвальной массы.

Одним из таких типичных конических отвалов является

95-метровый террикон шахты им. Д.Ф. Мельникова ОАО «Лисичанскуголь» (рис. 2).

Ниже представлены результаты изучения вредного воздействия данного отвала на окружающую среду. На рис. 3 и в табл. 2 представлены результаты спектрометрических исследований гамма-излучения отвальной породы, выполненные с помощью спектрометра-дозиметра «РИТМ-С».

Углепромышленные территории традиционно относятся к наиболее проблемным в экологическом отношении регионам. Природные комплексы в их пределах на протяжении длительного времени подвергаются интенсивному техногенному воздействию, следствием которого является широкомасштабное загрязнение компонентов окружающей среды [4]. Причем основную роль в этих негативных процессах, как показывают исследования, играют техногенные геохимические потоки, формирующиеся на стадии эксплуатации угольных месторождений.

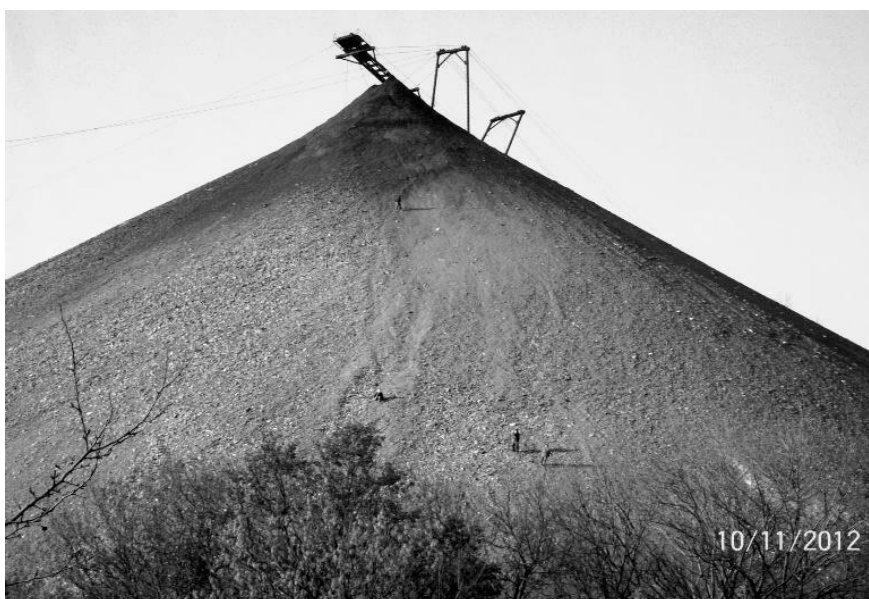


Рис. 2. Террикон шахты им. Д.Ф. Мельникова ПАО «Лисичанскуголь»
 / Fig. 2. Waste dump of Melnikov coal mine of PJSC «Lisichanskugol»

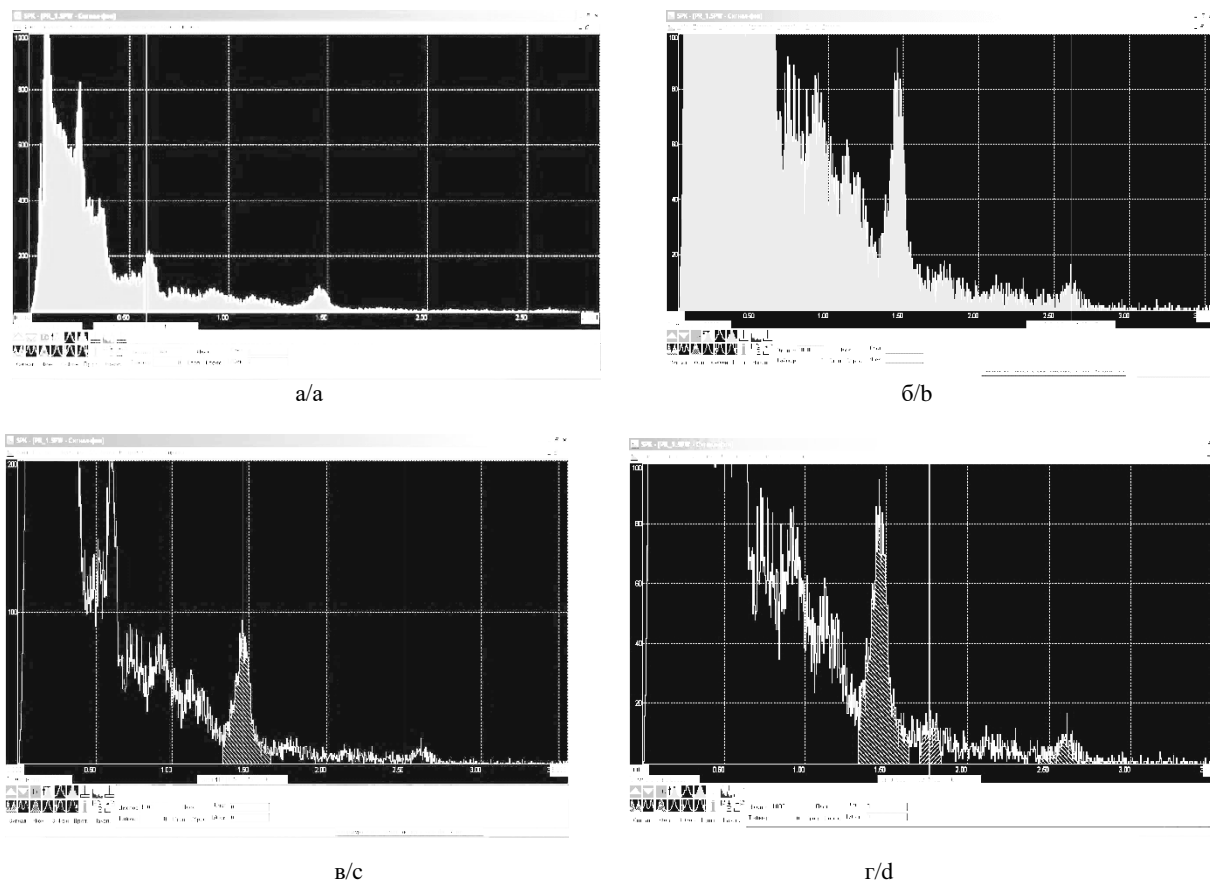


Рис. 3. Результаты спектрометрических исследований: а – внешний вид спектра; б – пик ²³²Th на спектре; в – пик ⁴⁰K на спектре; г – локализация всех пиков на спектре в виде заштрихованной области / Fig. 3. Results of spectrometer researches: a - general view of a spectrum; b - peak ²³²Th on a spectrum; c - peak ⁴⁰K on a spectrum; d - localization of all peaks on spectrum in the form of the shaded area

Таблица 2

Протокол обработки спектра гамма-излучений проб отвала шахты им Д.Ф. Мельникова / Protocol processing the spectrum of gamma radiation from samples of the Melnikov coal mine

№ п/п	Нуклид	Активность		Удельная активность		Погрешность определения активности, %
		Бк	мкКи	Бк/кг	мкКи/кг	
1	²³² Th	63,8	0,0017	58	0,0016	15,2
2	²²⁶ Ra	177,8	0,0048	161,6	0,0044	18,1
3	⁴⁰ K	–	–	–	–	
4	¹³⁷ Cs	–	–	–	–	
Объем пробы, см ³		Масса пробы, кг		Удельная эффективная активность, Бк/кг		Время измерения (экспозиция), с
1000		1,1		237,6		1200

Для оценки многолетнего выноса породы с отвала вследствие эрозионных процессов была использована авторская методика дистанционного измерения ширины промоин по космическим снимкам с сервера Google Earth, защищенная патентом на полезную модель № 36884. Шаги осуществления алгоритма пока-

заны на рис. 4. В табл. 3 представлены результаты расчета площади поперечного сечения промоин. Ширина учетной площадки поперек склона 40 м, высота от основания 39 м. Площадь сечения промоин рассчитана по эмпирической формуле $F = 0,222 \cdot b^{1,69}$, где b – ширина промоины поверху.

Таблица 3

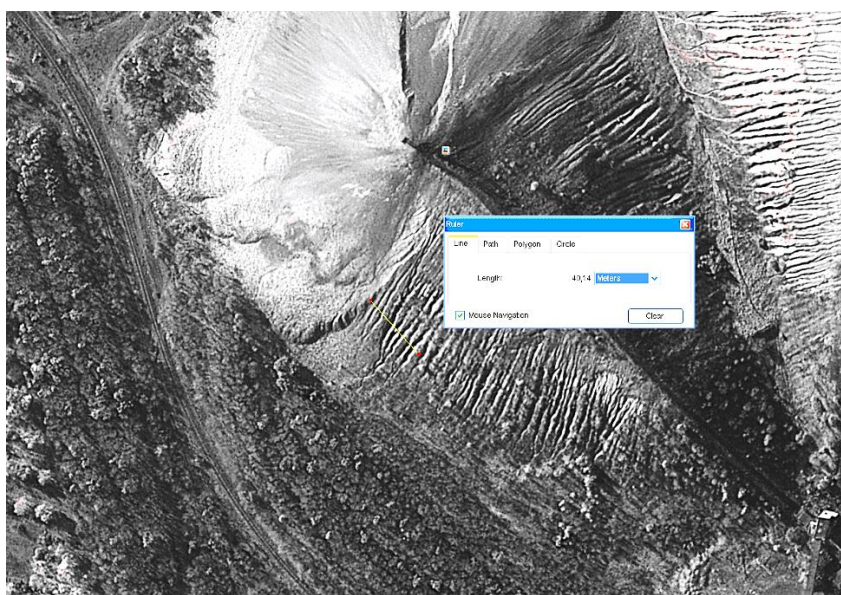
Результаты дистанционного измерения параметров промоин на терриконе № 3 шахты им. Д.Ф. Мельникова / Results of remote measurement of parameters of flood gullies on waste dump No. 3 of Melnikov coal mine

№ промоины	Ширина, м	Площадь поперечного сечения, м ²
1	0,88	0,1773
2	1,4	0,3885
3	4,9	3,2274
4	3,91	2,2039
5	3,02	1,4244
6	4,19	2,4772
7	2,47	1,0141
Всего	20,77	10,91

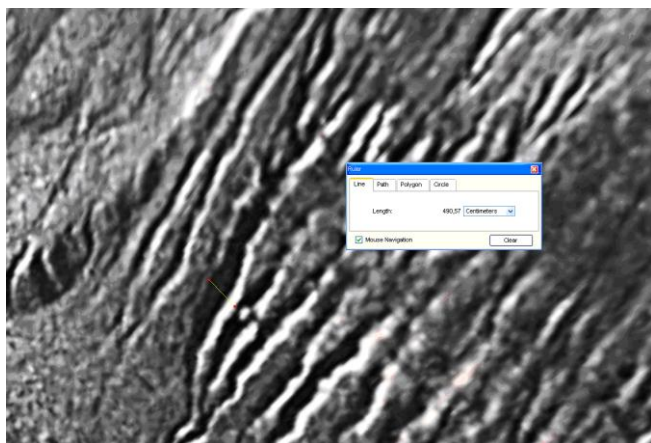
Суммарная площадь сечения промоин составляет 10,91 м²; модуль смыва по расчету – 2727 м³/га. С учетом объемной массы породы (d = 1,29 т/м³) модуль смыва с учетной площадью принимает значение 3518 т/га. По расчету переходной коэффициент К для условий террикона равен 0,9. Соответственно, значения модуля смыва с отвала следующие: M=3518·0,9 = 3166,2 т/га.

Смыв породы со всего отвала определен по формуле $m_{см} = M \cdot S_{б.пов}$, где $m_{см}$ – масса смытой породы; $S_{б.пов}$ – площадь боковой поверхности отвала.

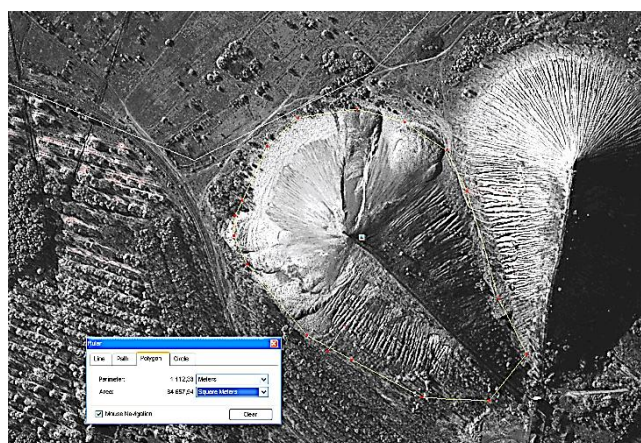
В результате измерений на плане отвала было установлено следующее значение площади боковой поверхности отвала: $S_{б.пов}=44\ 480\ м^2 = 4,45\ га$.



а/а



б/б



в/с

Рис. 4. Размещение учетной площадки на склоне отвала: а – положение учетной площадки; б – измерение ширины отдельной промоины; в – измерение площади поверхности отвала / Fig. 4. Placement of the registration site on a waste dump slope: a - placement of the registration site; б - measurement of width of the separate flood gully; в - measurement of surface area of the waste dump

Таблица 4

Вынос тяжелых металлов с техногенным делювием террикона и дефляционными процессами, кг/год / Carrying out of heavy metals with technogenic slide-rocks of a coal-mining waste dump and deflationary processes, kg per year

Источник	Cu	Pb	Mn	Ni	Sr	Zn	Li	Be	Co
Техногенный делювий	18,8	9,4	940	28,2	9,4	28,2	28,2	1,9	9,4
Дефляционный вынос	2,4	1,2	120	3,6	1,2	3,6	3,6	0,24	1,2

Таким образом, многолетний смыв породы со всего отвала достиг таких значений:

$$m_{см} = 3166,2 \cdot 4,45 = 14\ 089,5 \text{ т.}$$

Полученный объем смывтой породы и данные о ее средневзвешенном химическом составе [3] позволяют дать предварительную оценку количества тяжелых металлов, ежегодно выносимых с техногенным делювием (табл. 4).

Газовые выделения из горящих угольных отвалов являются контрастными по своему химическому составу, что связано с длительностью процессов горения. У длительно горящих (высокотемпературных) терриконов типоморфными элементами выбросов в атмосферу являются S, Ti, Ag, Cd, Al, P, у «молодых» (низкотемпературных) – K, Cr, Co, As [5].

Что же касается собственно газообразных соединений, то интенсивно горящий отвал является источником выделения в атмосферный воздух от 5 до 25 т в год опасных для здоровья населения загрязняющих веществ – главным образом оксида углерода, диоксида серы, сероводорода и оксидов азота.

В процессе посттехногенной трансформации пород отвалов в результате окисления и сернокислого гидролиза образуются вторичные гидрохимические потоки, содержащие большое количество геохимически активных соединений. Состав водорастворимых солей, мигрирующих с этими потоками, – преимущественно сульфатный. Причем абсолютное количество SO₄ напрямую связано с состоянием терриконов: максимальное содержание

анионов данного типа наблюдается в негорящих отвалах, минимальное – в уже перегоревших. Данные табл. 5 показывают, что активность сернокислого гидролиза является определяющим фактором растворения и дальнейшей миграции микроэлементов в компоненты окружающей среды. Из чего можно сделать вывод о том, что наибольшую эколого-геохимическую опасность представляют относительно недавно образованные терриконы, в то время как прошедшие глубокую посттехногенную трансформацию отвалы оказывают существенно меньшее воздействие на почвенный покров и поверхностные воды. В дальнейшем сернокислые миграционные потоки с породных отвалов при контакте с зональным типом почв, представленным черноземами обыкновенными, с нейтральной или слабощелочной реакцией среды формируют щелочные геохимические барьеры [3]. При этом часть элементов, мигрирующая в виде простых катионов (Zn, Cu, Pb, Cd, Li, Sr), осаждается в форме слабо-растворимых гидроокислов. Группа элементов, находящаяся в сернокислом потоке в гидролизованых соединениях (Al, W, Be, Mo, Zr), осаждается в почвах в виде простых ионов.

В дальнейшем большая часть химических элементов поглощается почвой и сосредотачивается в гумусовом горизонте, формируя локальные зоны загрязнения, и только некоторая часть (Ag, Bi, Mo, Nb, W) рассеивается вниз по почвенному профилю.

Таблица 5

Поступление тяжелых металлов с поверхностным стоком породных отвалов различной стадии посттехногенной трансформации, кг/год / Carrying out of heavy metals with a surface flow of coal-mining waste dumps of various stage of post-technogenic transformation, kg per year

Стадия трансформации	Cu	Pb	Mn	Ni	Sr	Zn	Li	Be	Co
Негорящий (сток с породного отвала в п. Сидорово-Кадамовский)	6,0	14,1	1403	33,6	2,7	44,5	7,9	0,88	13,5
Горящий (выход воды из-под породного отвала № 5)	0,04	1,7	275	8,7	1,7	0,08	5,1	0,31	3,3
Перегоревший (сток воды с породного отвала шх. № 143)	0,05	0,02	7,25	0,21	1,5	0,35	0,2	0,013	0,2

Таким образом, проведя эколого-геохимическую оценку воздействия породных отвалов на окружающую среду Донецкого угольного бассейна, можно сделать вывод о том, что мощность геохимических потоков, связанных с делювиальными процессами, существенно выше, чем дефляционных. При этом дальность перемещения ветрового переноса значительна и покрывает большие площади. При рассмотрении выноса растворенных веществ с поверхности терриконов следует обратить внимание на определяющую роль сернокислого гидролиза в миграции веществ, которая в наибольшей степени проявляется в относительно молодых породных отвалах, что следует учитывать при разработке стратегий развития углепромышленных регионов.

Литература

1. Лопатин Н.В. У колыбели Донбасса. Луганск : Областное изд-во, 1960. 279 с.
2. Геология месторождений угля и горючих сланцев СССР. М. : Гос. науч.-техн. изд-во литературы по геологии и охране недр, 1963. Т. 1. 1210 с.
3. Зубова Л.Г., Зубов А.Р., Харламова А.В., Воробьев С.Г., Макаришина Ю.И., Буныченко В.В. Терриконы. Луганск : Ноулидж, 2015. 712 с.
4. Закруткин В.Е., Гибков Е.В. Техногенные геохимические потоки угледобывающих районов и их влияние на окружающую среду (на примере Донецкого бас-

сейна) // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2016. № 3 (190). С. 66–71.

5. Девятова А.Ю. Газофазные выбросы в атмосферу при горении угля // Изв. вузов. Горн. журн. 2013. № 5. С. 29–34.

References

1. Lopatin N.V. *U kolybeli Donbassa* [At the cradle of the Donbass]. Lugansk: Oblastnoe izd-vo, 1960, 279 p.
2. *Geologiya mestorozhdenii uglya i goryuchikh slantsev SSSR* [Geology of coal deposits and combustible shales of the USSR]. Moscow: Gos. nauch.-tekhn. izd-vo literatury po geologii i okhrane neдр, 1963, vol. 1, 1210 p.
3. Zubova L.G., Zubov A.R., Kharlamova A.V., Vorob'ev S.G., Makarishina Yu.I., Bunyachenko V.V. *Terrikony* [Terrics]. Lugansk: Noulidzh, 2015, 712 p.
4. Zakrutkin V.E., Gibkov E.V. *Tekhnogennye geokhimicheskie potoki ugledobyvayushchikh raionov i ikh vliyanie na okruzhayushchuyu sredu (na primere Donetskogo basseina)* [Technogenic geochemical flows of coal-mining regions and their impact on the environment (on the example of the Donetsk basin)]. *Izv. vuzov. Sev.-Kavk. region. Estestv. nauki*. 2016, No. 3 (190), pp. 66-71.
5. Devyatova A.Yu. *Gazofaznye vybrosy v atmosferu pri gorenii uglya* [Gas-phase emissions into the atmosphere during coal combustion]. *Izv. vuzov. Gorn. zhurn.* 2013, No. 5, pp. 29-34.

УДК 551.464.3(262.54)

DOI 10.23683/0321-3005-2017-3-1-76-82

ДИНАМИКА ГИДРОХИМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК АЗОВСКОГО МОРЯ В СОВРЕМЕННЫЙ ПЕРИОД ОСОЛОНЕНИЯ

© 2017 г. Ю.В. Косенко¹, Т.О. Барабашин¹, Т.Е. Баскакова¹

¹Азовский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства, Ростов-на-Дону, Россия

DYNAMICS OF HYDROCHEMICAL CHARACTERISTICS OF THE SEA OF AZOV IN MODERN PERIOD OF SALINIZATION

J.V. Kosenko¹, T.O. Barabashin¹, T.E. Baskakova¹

¹Azov Sea Research Fisheries Institute, Rostov-on-Don, Russia

Косенко Юлия Владимировна – кандидат биологических наук, заведующая лабораторией гидрохимии, Азовский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства, ул. Береговая, 21в, г. Ростов-на-Дону, 344002, Россия, e-mail: kosenko-i@yandex.ru

Julia V. Kosenko - Candidate of Biology, Head of Laboratory of Hydrochemistry, Azov Sea Research Fisheries Institute, Beregovaya St., 21v, Rostov-on-Don, 344002, Russia, e-mail: kosenko-i@yandex.ru

Барабашин Тимофей Олегович – кандидат биологических наук, доцент, заведующий отделом океанографии и природоохранных исследований, Азовский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства, ул. Береговая, 21в, г. Ростов-на-Дону, 344002, Россия, e-mail: timbar@bk.ru

Timofey O. Barabashin - Candidate of Biology, Associate Professor, Head of the Department of Oceanography and Environmental Studies, Azov Sea Research Fisheries Institute, Beregovaya St., 21v, Rostov-on-Don, 344002, Russia, e-mail: timbar@bk.ru

Баскакова Татьяна Евгеньевна – старший научный сотрудник, лаборатория гидрохимии, Азовский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства, ул. Береговая, 21в, г. Ростов-на-Дону, 344002, Россия, e-mail: bask-45@mail.ru

Tatyana E. Baskakova - Senior Researcher, Laboratory of Hydrochemistry, Azov Sea Research Fisheries Institute, Beregovaya St., 21v, Rostov-on-Don, 344002, Russia, e-mail: bask-45@mail.ru

Приводятся результаты исследования динамики основных гидрохимических характеристик Азовского моря в условиях осолонения. Сбор материалов проводился в комплексных экспедициях АзНИИРХ по Азовскому морю в весенний, летний и осенний периоды года. Пробы отбирались с поверхностного и придонного горизонтов. Выявлено, что в современный период осолонения Азовского моря на всей акватории отмечено формирование стратификации водных масс по содержанию кислорода во все сезоны года, особенно четко выраженное в Таганрогском заливе. В период роста солености и снижения среднегодового стока реки Дон в Таганрогском заливе отмечено снижение концентрации биогенных элементов при сохранении высокой интенсивности биологической продуктивности фитопланктона. Концентрации биогенных элементов в современный период осолонения в собственно море остаются на уровне среднегодичных значений, однако увеличение солености, приводящее к смене таксономических групп фитопланктона, снижает уровень первичного продуцирования органического вещества. Увеличение доли органической формы азота и фосфора в период осолонения в Таганрогском заливе связано с развитием первичной продукции фитопланктона, а в собственно море – с поступлением аллохтонного органического вещества с материковым стоком.

Ключевые слова: Азовское море, растворенный кислород, минеральный и общий азот, минеральный и общий фосфор, первичная продукция, фитопланктон, соленость, речной сток.

The results of the study of the dynamics of the main hydrochemical characteristics of the Sea of Azov in conditions of salinization. The collection of materials was carried out in a comprehensive expeditions by AzNIIRKh Sea of Azov in spring, summer and autumn periods of the year. Samples were taken from surface and near-bottom horizons. It is revealed that in the modern period of salinization the Azov Sea water area marked by the formation of the stratification of water masses in the oxygen content in all seasons of the year, especially explicit in the Taganrog Bay. In the growth period of salinity and reduce the average annual flow of the Don river in Taganrog Bay marked decrease in the concentration of biogenic elements while maintaining a high intensity of biological productivity of phytoplankton. The concentrations of nutrients in the modern period of salinization in the sea remain at the level of mean annual values, however, the increase in salinity leading to a change in taxonomic groups of phytoplankton, reduces the level of primary production of organic matter. Increasing the share of organic forms of nitrogen and phosphorus in the period of salinization in the Taganrog Bay associated with an increase in the primary production of phytoplankton, and in the actual sea – receipt of allochthonous organic matter from continental runoff.

Keywords: *Sea of Azov, dissolved oxygen, mineral and total nitrogen, mineral and total phosphorus, primary production, phytoplankton, salinity, river runoff.*

Введение

В начале XX в. на основании физико-химической характеристики водной массы и ряда биологических особенностей Н.М. Книпович (1932, 1938) определял Азовское море как занимающее промежуточное положение между морскими и пресными водоемами [1, 2]. Солевой баланс Азовского моря складывается под влиянием поступления вод с речным стоком и притока из Черного моря. Однако в последние годы облик Азовского моря в целом и Таганрогского залива в частности характеризуется значительным увеличением солености. А.М. Бронфман с коллегами (1979) писал: «Можно утверждать, что речной сток, в значительной мере регулирующий соотношение расходов азовского и черноморского течений, будет одновременно являться и регулятором солевого баланса Азовского моря» [3]. Согласно современным исследованиям, выявлено, что в период осолонения Азовского моря – 2007–2016 гг., отмечено достоверное снижение среднегодового объема стока р. Дон на 35,6 % ($p < 0,001$) по сравнению с 1998–2006 гг. [4, 5].

Известно, что изменение солености также вызывает быстрые и глубокие деформации самых различных абиотических и биотических компонентов моря [6], а снижение речного стока напрямую влияет на концентрацию и баланс биогенных соединений [7]. Запас биогенных солей в Азовском море, в свою очередь, определяет его биологическую продуктивность. Кроме того, рядом авторов показано отрицательное воздействие солености на первичную продукцию органического вещества в Азовском море [3, 6, 7]. В связи с вышесказанным целью нашего исследования явилось изучение особенностей гидрохимических характеристик Азовского моря в современных условиях осолонения.

Методы исследования

В данной работе использованы материалы ФГБНУ «АзНИИРХ» за период 1998–2016 гг. Сбор материалов осуществлялся в комплексных экспедициях по Азовскому морю в весенний, летний и осенний периоды года. Отбор проб проводился с поверхностного и придонного горизонтов согласно многолетней сетке станций, охватывающей всю акваторию моря.

При определении гидрохимических показателей использовали общепринятые методы, представленные в руководящих документах, принятых и утвержденных в Аналитическом испытательном центре, аккредитованном Федеральной службой по аккредитации (аттестат аккредитации № RA.RU.510217).

Величину первичной продукции традиционно определяли по методу С.В. Бруевича (1936) в модификации В.Г. Дацко (1959). Для оценки величины первичного продуцирования органического вещества за вегетационный период использовали данные, полученные в летние месяцы.

Статистическую обработку результатов исследования и построение графиков проводили с использованием пакета программ STATISTICA 6.0 и Excel 2013. Достоверность различий между выборками определяли с использованием t-критерия Стьюдента, различия считались достоверными при $p < 0,05$.

Результаты и их обсуждение

В формировании солености Азовского моря важная роль принадлежит двустороннему водообмену через Керченский пролив, а также материковому стоку, прежде всего рек Дон и Кубань, которые составляют в море более 95 % суммарного стока. Следует отметить, что снижение речного стока является решающим фактором осолонения моря. Усиление притока черноморских вод обуславливает, как правило, случайные нарушения общей закономерности солености и в основном связано с аномалиями ветров над проливом и прилегающими к нему акваториями Черного и Азовского морей [6]. При анализе динамики солености собственно моря было установлено, что период 1998–2006 гг. характеризовался средним значением солености $10,4 \pm 0,4$ ‰, а период 2007–2016 гг. – средним значением солености $12,0 \pm 1,2$ ‰. В Таганрогском заливе в данные периоды средний уровень солености увеличивался с $6,1 \pm 0,7$ до $8,3 \pm 1,4$ ‰. В связи с вышесказанным мы охарактеризовали период с 2007 г. по настоящее время как современный период осолонения Азовского моря [4, 5].

При рассмотрении динамики гидрохимических характеристик Азовского моря особое внимание следует уделить содержанию растворенного кислорода как основного абиотического фактора, влияющего на жизнедеятельность водной биоты. Содержание кислорода в воде зависит от ряда факторов, одним из которых является соленость, поскольку при увеличении солености растворимость кислорода в воде снижается [8]. Кроме того, солевая стратификация вод Азовского моря вызывает стратификацию по кислороду, характеризующуюся высокой степенью насыщения кислородом поверхностного слоя и дефицитом кислорода в придонном горизонте [9]. Вследствие вышесказанного важно рассмотреть содержание кислорода в поверхностном и придонном горизонтах Азовского моря за исследуемый период.

Стратификация водных масс по содержанию кислорода в собственно море и Таганрогском заливе была выявлена в летний период 1998–2006 и 2007–2016 гг., что, согласно литературным данным, характерно для гидродинамического и гидрохимического режимов Азовского моря [9]. Однако в современный период осолонения в Таганрогском заливе и собственно море

были установлены статистически достоверные различия ($p < 0,05$) насыщения воды кислородом в поверхностном и придонном горизонтах не только в летний, а также в весенний и осенний периоды года. Особенно заметны и выражены эти изменения в Таганрогском заливе, где даже в весенний период ΔO_2 достигает в среднем 9 % насыщения (рис. 1).

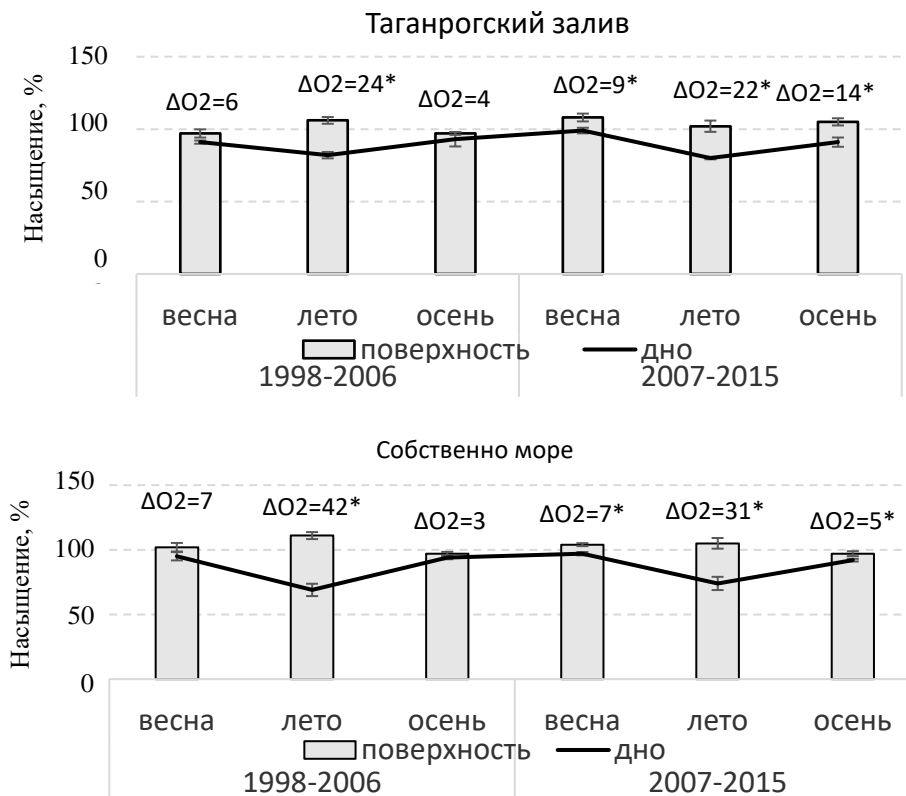


Рис. 1. Содержание растворенного кислорода, % насыщения, в собственно море и Таганрогском заливе в разные сезоны года в период 1998–2015 гг.: ΔO_2 – разница содержания в воде растворенного кислорода между поверхностным и придонным горизонтами; * – различия достоверны между поверхностным и придонным горизонтами / Fig. 1. Dissolved oxygen, % saturation, in the actual sea and the Taganrog Bay in different seasons of the year in the period 1998-2015: ΔO_2 - the difference is the concentration of dissolved oxygen between surface and bottom horizons; * - the difference is significant between the surface and bottom horizons

Анализ литературных данных свидетельствует, что при естественном режиме моря и в начальные фазы его антропогенного преобразования развитие придонного дефицита кислорода было явлением эпизодическим. В дальнейшем, с начала 1960-х гг., возникновение значительных зон недостаточного насыщения воды кислородом у дна стало практически ежегодным явлением на акватории моря [6]. Анализ гидрометеорологической информации, проведенный рядом авторов [10–12], показал, что после 1961 г. в районе Восточного Приазовья отмечено значительное снижение скорости ветра на 21–44 % относительно периода наблюдений с 1910–1960 гг. Помимо снижения скорости ветровой составляющей, увели-

чение солености в современный период обуславливает дополнительное увеличение вертикальной устойчивости водных масс и, соответственно, существенно влияет на кислородный режим Азовского моря [13].

Азовское море до середины XX в. занимало одно из первых мест по биологической продуктивности среди морских водоемов мира, поэтому крайне важно рассмотреть влияние динамики солености на биологическую продуктивность моря в целом и содержание биогенных веществ в частности. По данным литературы, известно, что минеральные соединения азота и фосфора являются незаменимой материальной основой продукционных процессов, и изменение

их концентрации может иметь самые многочисленные и существенные проявления в жизни моря [3]. Минеральные формы азота и фосфора, являясь материальной базой фотосинтеза, обеспечивают биологическую продуктивность и рыбохозяйственную значимость водоема.

Анализ среднегодовой динамики биогенных веществ в водной толще Азовского моря позволил сделать вывод о том, что в период 2007–2016 гг. отмечено достоверное снижение в Таганрогском заливе минеральных форм азота относительно периода 1998–2006 гг. (рис. 2). Снижение концентраций аммонийного, нитритного и нитратного азота в период 2007–2016 гг. составляло 35,8 ($p < 0,05$), 44,9 ($p < 0,001$) и 69,2 % ($p < 0,01$) соответственно относительно периода 1998–2006 гг.

Известно, что режим биогенных веществ в Таганрогском заливе тесно взаимосвязан с объемом стока р. Дон, следовательно, снижение минеральных форм азота в современный период осолонения является закономерным следствием данного явления [14]. В Таганрогском заливе отмечена достоверная корреляционная взаимосвязь между объемом стока р. Дон и среднегодовым содержанием в водной толще нитратного азота ($R=0,65$, $p < 0,01$), нитритного азота ($R=0,73$, $p < 0,001$) и азота аммонийного ($R=0,48$, $p < 0,05$). На акватории собственно моря достоверных изменений концентрации минеральных форм азота не отмечено.

Из представленного графика видно, что в периоды высокого среднегодового объема речного стока (1998, 2004–2006 гг.) отмечено доминирование азота нитратного в воде Таганрогского залива (рис. 2). Данный факт объясняется поступлением нитратов со стоком р. Дон, поскольку преобладающей формой азота в низовьях Дона является азот нитратный [15]. В условиях сниженного объема речного стока в формировании динамики биогенных элементов в Таганрогском заливе на первое место выходят внутриводоемные процессы, связанные с усилением деструкции первичного органического вещества в условиях более высоких температур воды и обуславливающие высокие концентрации аммонийного азота в весенний период года (апрель). Анализ фоновых данных ФГБНУ «АзНИИРХ» среднесезонных значений температуры воды с 1960 по 2016 г. показал

четкий тренд ее увеличения в Таганрогском заливе в весенний период года.

В современный период осолонения наблюдается также достоверное увеличение органической компоненты азота в собственно море и Таганрогском заливе на 33,4 ($p < 0,05$) и 26,4 % ($p < 0,05$) соответственно относительно периода 1998–2006 гг. При этом в собственно море и Таганрогском заливе в период осолонения отмечено увеличение концентрации общего азота (за счет увеличения органического азотсодержащего вещества) на 29,8 ($p < 0,05$) и 16,9 % ($p < 0,05$) соответственно относительно 1998–2006 гг. (рис. 3).

Согласно фоновым данным ФГБНУ «АзНИИРХ», в многолетней динамике азота (1958–1998 гг.) содержание минеральной фракции в собственно море составляло 11,6 %, а в Таганрогском заливе – 20,3. В период 1998–2006 гг. доля минеральной фракции азота в собственно море и заливе составляла 8,9 и 11,5 % соответственно. При этом в период 2007–2016 гг. содержание минерального азотсодержащего вещества в собственно море соответствовало 5,9 %, в заливе –

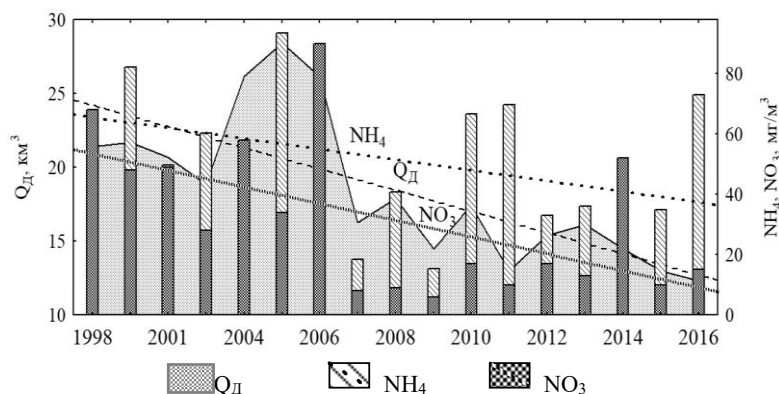


Рис. 2. Динамика концентрации нитратного, аммонийного азота и среднегодового объема стока р. Дон (Qд) в Таганрогском заливе в период 1998–2016 гг.
 / Fig. 2. The dynamics of the concentration of nitrate, ammonium nitrogen, and annual runoff in the Don river (Qд) in the Taganrog Bay in the period 1998–2016

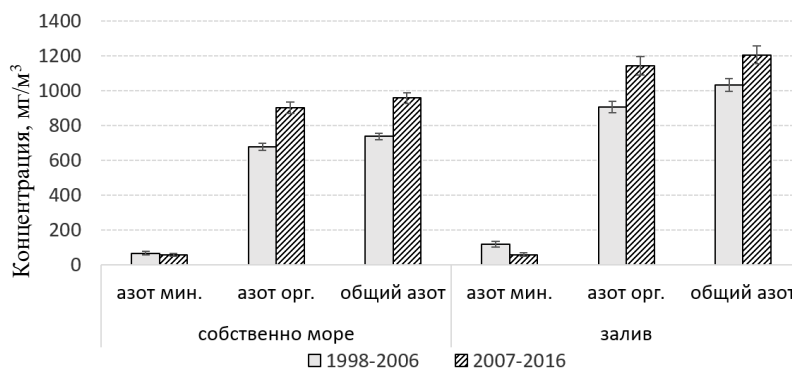


Рис. 3. Концентрация минерального, органического и общего азота, мг/м³, в собственно море и Таганрогском заливе в период 1998–2016 гг.
 / Fig. 3. Concentration of mineral, organic and total nitrogen, mg/m³, in the sea and the Taganrog Bay in the period 1998–2016

4,8. Известно, что соотношение органической и минеральной форм биогенных элементов отражает направленность и интенсивность продукционных процессов. Значительное снижение доли минеральных форм азота при увеличении его органической составляющей, наблюдаемое в современный период осолонения, свидетельствует о высокой интенсивности процессов синтеза органического вещества и поступления алохтонного органического вещества с материковым стоком.

В период 2007–2016 гг. в собственно море по содержанию минерального, органического и общего фосфора относительно 1998–2006 гг. достоверных различий не установлено. В Таганрогском заливе отмечено снижение концентрации минерального фосфора на 46,4 % ($p < 0,05$). Содержание минерального фосфора в Таганрогском заливе в 1998–2006 гг. составляло 36,2 %, в 2007–2016 гг. – 19,5. Показано, что на фоне снижения минерального фосфора доля его органической составляющей в период осолонения увеличивалась.

При рассмотрении сезонной динамики растворимых форм минерального фосфора в период 2007–2016 гг. следует отметить его снижение в Таганрогском заливе весной, летом и осенью на 60,1 ($p < 0,01$), 36,4 ($p < 0,05$) и 59,1 % ($p < 0,01$) относительно 1998–2006 гг. В собственно море в период осолонения отмечено увеличение концентрации минерального фосфора в летний период года на 46,7 % ($p < 0,05$) относительно 1998–2006 гг. ($p < 0,05$) (рис. 4).

Поскольку в весенний и осенний периоды года в Азовском море главную роль в содержании минерального фосфора выполняет речной сток, следовательно, значительное снижение концентрации минерального фосфора в Таганрогском заливе в современный период осолонения обусловлено снижением объема стока р. Дон. При этом в летний период на уровень фосфатов в Азовском море значительно влияют внутриводоемные процессы. Увеличение минерального фосфора летом в собственно море обусловлено переходом минерального фосфора из донных отложений в водную толщу при возникновении гипоксических условий в придонных горизонтах, а также поступлением фосфатов с черноморскими водами через Керченский пролив [9].

Следует отметить, что в период 1998–2006 гг. содержание фосфатов в Таганрогском заливе во все сезоны года было выше, чем в собственно море. В современный период осолонения содержание фосфатов в Таганрогском заливе значительно снизилось относительно периода 1998–2006 гг. и достоверно не отличалось от уровня минерального фосфора в собственно море (рис. 5).

Литературные данные середины XX в. [5, 16] свидетельствовали о том, что материковый сток вносит в Азовское море более половины всех биогенных элементов, имеющих важное значение для продуктивности экосистемы моря. Однако, согласно современным исследованиям [17], речному стоку принадлежит важная, но не решающая роль в круговороте биогенных элементов в экосистеме Азовского моря. Это море уникально тем, что представляет собой эвтрофный водоем с высоким базовым уровнем биогенных элементов. «Критическая» роль

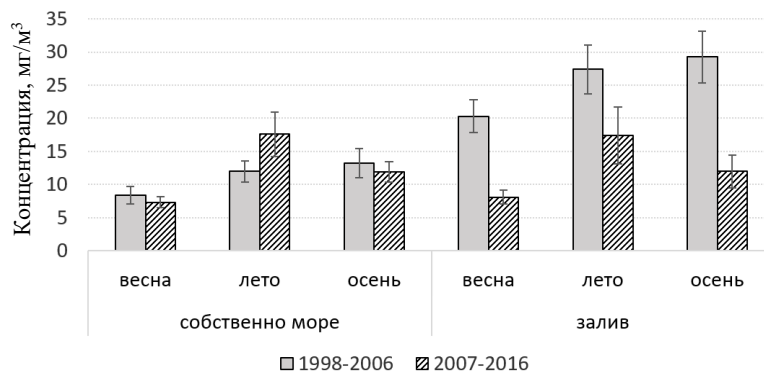


Рис. 4. Концентрация минерального фосфора, мг/м³, в собственно море и Таганрогском заливе в период 1998–2016 гг. / Fig. 4. Concentration of mineral phosphorus, mg/m³, in the sea and the Taganrog Bay in the period 1998-2016

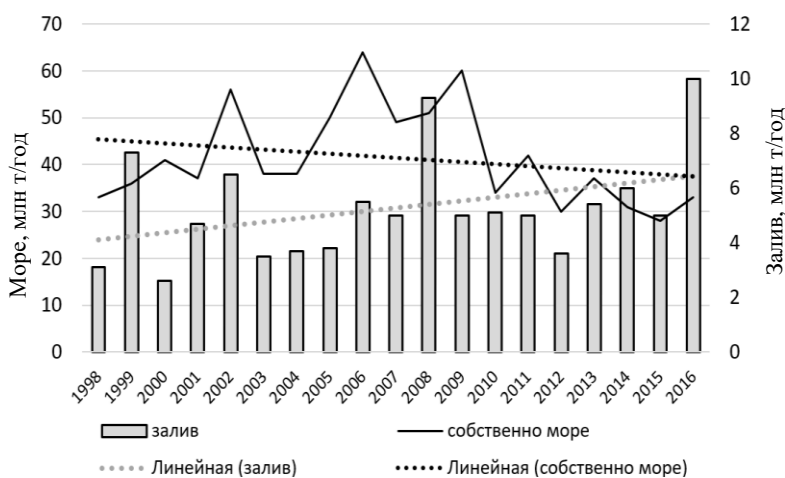


Рис. 5. Величина годовой валовой продукции Азовского моря в период 1998–2015 гг., млн т/год / Fig. 5. The value of annual gross output of the Sea of Azov in the period 1998-2015, million t/year

речного стока в снабжении моря биогенными веществами может возникнуть лишь при многолетней устойчивой тенденции снижения поступления биогенных солей в условиях резкого снижения объема притока речных вод. Поскольку в Таганрогском заливе в период осолонения и снижения объема стока р. Дон отмечено снижение концентрации минерального азота и фосфора, важно рассмотреть влияние данных изменений на уровень первичного продуцирования органического вещества.

Величина годовой валовой продукции Азовского моря в 1998–2006 гг. составляла в собственно море в среднем $43,7 \pm 10,6$ млн т сухого органического вещества в год, а в Таганрогском заливе – $4,5 \pm 1,6$. В период 2007–2016 гг. среднегодовой уровень первичного продуцирования органического вещества в собственно море снизился на 10 % ($p < 0,05$), в Таганрогском заливе – увеличился на 31,4 % ($p < 0,05$) относительно периода 1998–2006 гг. (рис. 5). Снижение первичной продукции в собственно море обусловлено сменой таксономических групп фитопланктона, и в первую очередь снижением биомассы сине-зеленых водорослей [18].

В силу вышесказанного можно отметить, что в Таганрогском заливе увеличение солености в среднем до 8,3 ‰ не является лимитирующим фактором, влияющим на фотосинтетическую активность фитопланктонного сообщества. Формирование пика солености в Таганрогском заливе в 2016 г. привело к увеличению уровня первичного продуцирования органического вещества. При этом увеличение солености в среднем до 12,0 ‰ в собственно море вызывает снижение продуцирования органического вещества вследствие смены таксономической группы фитопланктона. Увеличение доли органической формы азота и фосфора в период осолонения в Таганрогском заливе связано с ростом уровня первичной продукции фитопланктона, а в собственно море – с поступлением аллохтонного органического вещества с материковым стоком.

Выводы

1. Увеличение солености Азовского моря приводит к формированию стратификации водных масс по содержанию кислорода во все сезоны года, особенно выраженной в Таганрогском заливе, что увеличивает риск возникновения заморозов в весенний и осенний периоды.

2. Уменьшение концентрации биогенных элементов в современный период осолонения в Таганрогском заливе не привело к снижению скорости первичного продуцирования органического вещества фитопланктоном.

3. Концентрация биогенных элементов в современный период осолонения в собственно море остается на уровне среднепогодных значений, однако

увеличение солености, приводящее к смене таксономических групп фитопланктона, снижает уровень первичного продуцирования органического вещества.

Литература

1. Книпович Н.М. Гидрологические исследования в Азовском море // Тр. Азово-Черномор. науч.-промысл. экспед. 1932. Вып. 5. С. 3–97.
2. Книпович Н.М. Гидрология морей и солоноватых вод СССР. М. : Пищепромиздат, 1938. С. 150.
3. Бронфман А.М., Дубинина В.Г., Макарова Г.Д. Гидрологические и гидрохимические основы продуктивности Азовского моря. М. : Пищевая промышленность, 1979. 288 с.
4. Куропаткин А.П., Шишкин В.М., Бурлачко Д.С., Карманов В.Г., Жукова С.В., Подмарева Т.И., Фоменко И.Ф., Лутынская Л.А. Современные и перспективные изменения солености Азовского моря // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. 2015. № 11. С. 7–16.
5. Дубинина В.Г., Жукова С.В. Оценка возможных последствий строительства Багаевского гидроузла для экосистемы Нижнего Дона // Рыбное хозяйство. 2016. № 4. С. 20–30.
6. Бронфман А.М., Хлебников Е.П. Азовское море. Основы реконструкции. Л. : Гидрометеиздат, 1985. 270 с.
7. Матишов Г.Г., Гаргона Ю.М., Бердников С.В., Дженьюк С.Л. Закономерности экосистемных процессов в Азовском море. М. : Наука, 2006. 304 с.
8. Фомин Г.С. Вода. Контроль химической, бактериальной и радиационной безопасности по международным стандартам : энцикл. справочник. М. : Протектор, 1995. 624 с.
9. Александрова З.В. Многолетняя изменчивость кислородного режима и содержания биогенных веществ в Азовском море // Основные проблемы рыбного хозяйства и охраны рыбохозяйственных водоемов Азово-Черноморского бассейна : сб. науч. тр. АЗНИИРХ, Ростов н/Д. : АЗНИИРХ, 2012. С. 18–35.
10. Юго-восток европейской части СССР. М. : Наука, 1971. 455 с.
11. Климат Ростова-на-Дону / под ред. Ц.В. Швер, Т.Е. Иванченко. Л. : Гидрометеиздат, 1987. 224 с.
12. Луц Н.В. Многолетняя изменчивость скорости ветра в Восточном Приазовье // Метеорология и гидрология. 2001. № 2. С. 98–102.
13. Александрова З.В., Баскакова Т.Е. Основные закономерности формирования кислородного и биогенного режимов юго-восточного участка на акватории Азовского моря в районах проектируемого разведочного бурения «НК «Приазовнефть» // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. 2010. № 9. С. 30–37.
14. Гаргона Ю.М. Крупномасштабные изменения гидрометеорологических условий формирования биопродуктивности Азовского моря : автореф. дис. ... д-ра геогр. наук. Мурманск, 2003. 47 с.
15. Никаноров А.М. Региональная гидрохимия. Ростов н/Д. : НОК, 2011. 388 с.

16. Каревич А.Ф. Влияние изменяющегося стока рек и режима Азовского моря на его промысловую и кормовую фауну // Тр. Азовского науч.-исслед. ин-та рыбн. хоз-ва. 1960. Т. 1, вып. 1. С. 3–114.

17. Воловик С.П., Корпакова И.Г., Лавренова Е.А., Темердашев З.А. Экосистема Азовского моря: режим, продуктивность, проблемы управления. Краснодар: Кубанский гос. ун-т, 2008. 347 с.

18. Воловик С.П., Корпакова И.Г., Налетова Л.Ю., Барабашин Т.О. Фитопланктон и его изменения в юго-восточном районе Азовского моря летом 2007–2014 годов // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. 2015. № 11. С. 21–27.

References

1. Knipovich N.M. *Gidrologicheskie issledovaniya v Azovskom more* [Hydrological studies in the Azov Sea]. *Tr. Azovo-Chernomor. nauch.-promysl. eksped.* 1932, iss. 5, pp. 3-97.

2. Knipovich N.M. *Gidrologiya morei i solonovatykh vod SSSR* [Hydrology of the seas and brackish waters of the USSR]. Moscow: Pishchepromizdat, 1938, p. 150.

3. Bronfman A.M., Dubinina V.G., Makarova G.D. *Gidrologicheskie i gidrokhimicheskie osnovy produktivnosti Azovskogo morya* [Hydrological and hydrochemical basis of productivity of the Azov Sea]. Moscow: Pishchevaya promyshlennost', 1979, 288 p.

4. Kuropatkin A.P., Shishkin V.M., Burlachko D.S., Karmanov V.G., Zhukova S.V., Podmareva T.I., Fomenko I.F., Lutynskaya L.A. *Sovremennye i perspektivnye izmeneniya solenosti Azovskogo morya* [Modern and perspective changes in the salinity of the Azov Sea]. *Zashchita okruzhayushchei sredy v neftegazovom komplekse.* 2015, No. 11, pp. 7-16.

5. Dubinina V.G., Zhukova S.V. *Otsenka vozmozhnykh posledstviy stroitel'stva Bagaevskogo gidrouzla dlya ekosistemy Nizhnego Dona* [Assessment of the possible consequences of the construction of the Bagaevsky hydroelectric complex for the ecosystem of the Lower Don]. *Rybnoe khozyaistvo.* 2016, No. 4, pp. 20-30.

6. Bronfman A.M., Khlebnikov E.P. *Azovskoe more. Osnovy rekonstruktsii* [Sea of Azov. Fundamentals of reconstruction]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1985, 270 p.

7. Matishov G.G., Gargopa Yu.M., Berdnikov S.V., Dzhenyuk S.L. *Zakonomernosti ekosistemnykh protsessov v Azovskom more* [Regularities of ecosystem processes in the Azov Sea]. Moscow: Nauka, 2006, 304 p.

8. Fomin G.S. *Voda. Kontrol' khimicheskoi, bakterial'noi i radiatsionnoi bezopasnosti po mezhdunarodnym standartam* [Water. Control of chemical, bacterial and radiation safety according to international standards]. En cycl. directory. Moscow: Protektor, 1995, 624 p.

9. Aleksandrova Z.V. [Long-term variability of the oxygen regime and the content of nutrients in the Sea of Azov]. *Osnovnye problemy rybnogo khozyaistva i okhrany rybokhozyaistvennykh vodoemov Azovo-Chernomorskogo basseina* [The main problems of fisheries and the protection of fisheries water bodies of the Azov-Black Sea basin]. Collection of scientific papers AzNIIIRKh. Rostov-on-Don: AzNIIIRKh, 2012, pp. 18-35.

10. *Yugo-vostok evropeiskoi chasti SSSR* [South-east of the European part of the USSR]. Moscow: Nauka, 1971, 455 p.

11. *Klimat Rostova-na-Donu* [The climate of Rostov-on-Don]. Ed. Ts.V. Shver, T.E. Ivanchenko. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1987, 224 p.

12. Luts N.V. *Mnogoletnyaya izmenchivost' skorosti vetra v Vostochnom Priazov'e* [Long-term variability of wind speed in the Eastern Azov Region]. *Meteorologiya i gidrologiya.* 2001, No. 2, pp. 98-102.

13. Aleksandrova Z.V., Baskakova T.E. *Osnovnye zakonomernosti formirovaniya kislorodnogo i biogenno go rezhimov yugo-vostochnogo uchastka na akvatorii Azovskogo morya v raionakh proektiruemogo razvedochnogo bureniya "NK "Priazovneft"'* [The main regularities of the formation of oxygen and biogenic regimes of the south-eastern section in the Azov Sea water area in the areas of planned exploratory drilling "NC "Priazovneft"']. *Zashchita okruzhayushchei sredy v neftegazovom komplekse.* 2010, No. 9, pp. 30-37.

14. Gargopa Yu.M. *Krupnomasshtabnye izmeneniya gidrometeorologicheskikh uslovii formirovaniya bioproduktivnosti Azovskogo morya* : avtoref. dis. ... d-ra geogr. nauk [Large-scale changes in the hydrometeorological conditions for the formation of the biological productivity of the Azov Sea]. Murmansk, 2003, 47 p.

15. Nikanorov A.M. *Regional'naya gidrokhi miya* [Regional hydrochemistry]. Rostov-on-Don: NOK, 2011, 388 p.

16. Karpevich A.F. *Vliyanie izmenyayushchegosya stoka rek i rezhima Azovskogo morya na ego promyslovuyu i kormovuyu faunu* [Influence of the changing flow of rivers and the regime of the Sea of Azov on its commercial and fodder fauna]. *Tr. Azovskogo nauch.-issled. in-ta rybn. khoz-va.* 1960, vol. 1, iss. 1, pp. 3-114.

17. Volovik S.P., Korpakova I.G., Lavrenova E.A., Temerdashev Z.A. *Ekosistema Azovskogo morya: rezhim, produktivnost', problemy upravleniya* [Ecosystem of the Azov Sea: regime, productivity, management problems]. Krasnodar: Kubanskii gos. un-t, 2008, 347 p.

18. Volovik S.P., Korpakova I.G., Naletova L.Yu., Barabashin T.O. *Fitoplankton i ego izmeneniya v yugo-vostochnom raione Azovskogo morya letom 2007-2014 godov* [Phytoplankton and its changes in the south-eastern region of the Azov Sea in the summer of 2007-2014]. *Zashchita okruzhayushchei sredy v neftegazovom komplekse.* 2015, No. 11, pp. 21-27.

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ДЕПРЕССИИ ПРИ ОСВОЕНИИ СКВАЖИН НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ГЕОЛОГО-ПРОМЫСЛОВОЙ ИНФОРМАЦИИ

© 2017 г. Е.В. Мельникова¹

¹ООО «Газпром ВНИИГАЗ», пос. Развилка, Россия

WELL CLEAN-UP DEPRESSION FORECAST BASED ON THE FIELD-GEOLOGICAL INFORMATION ANALYSIS

E. V. Melnikova¹

¹Gazprom VNIIGAZ LLC, vil. Razvilka, Russia

Мельникова Елена Викторовна – научный сотрудник, лаборатория проектирования и анализа разработки газоконденсатных и нефтегазовых месторождений, Центр разработки месторождений, ООО «Газпром ВНИИГАЗ», пос. Развилка, Московская обл., 142717, Россия, e-mail: E_Melnikova@vniigaz.gazprom.ru

Elena V. Melnikova – Researcher, Laboratory of the Gas-Condensate and Oil-Gas Fields Development Design and Production Analysis, The Oil and Gas Fields Development Center, Gazprom VNIIGAZ LLC, vil. Razvilka, Moscow Region, 142717, Russia, e-mail: E_Melnikova@vniigaz.gazprom.ru

Не все скважины после освоения имеют проектные дебиты и продуктивность. Предотвратить отрицательное влияние буровых растворов и других жидкостей на фильтрационно-емкостные свойства (ФЕС) призабойной зоны (ПЗП) горных пород пласта-коллектора не всегда удаётся. Скважины длительно обрабатывают на повышенных депрессиях с целью получения стабильного притока и максимально допустимой производительности. Если скважина не достигает проектных режимов, её интенсифицируют различными методами.

Установлено, что большие депрессии приводят к увеличению напряженного состояния в породах ПЗП, снижают ФЕС и продуктивность скважин. Для оценки изменения напряженного состояния горных пород продуктивных пластов как в процессе длительной разработки, так и при освоении скважин предлагается использовать безразмерный параметр, равный отношению разности горного и пластового давлений к текущему пластовому давлению или к разности пластового давления и депрессии на ПЗП.

В результате анализа и обобщения геолого-промысловой информации по эксплуатации ряда месторождений и подземных хранилищ газа (ПХГ) России в терригенных и карбонатных коллекторах установлены гиперболические зависимости роста удельного напряженного состояния с уменьшением коэффициента пластового давления. На примере Чаяндинского (ботубинский горизонт) и Пеляткнского месторождений установлены границы оптимального изменения относительной депрессии на ПЗП (отношение депрессии к текущему пластовому давлению). Предлагается по мере снижения пластового давления в залежи ограничивать депрессию на ПЗП. Для обеспечения проектных отборов углеводородов из залежи необходимо проводить интенсификацию притока, в том числе проводку боковых наклонных стволов в низкодебитных скважинах.

Ключевые слова: удельная продуктивность пласта, призабойная зона продуктивного пласта, напряженное состояние горных пород продуктивного пласта.

Not all of the wells have planned production rates after their cleaning-up and testing. It is not easy to prevent negative impact of the drilling and other technological fluids on the reservoir properties in the near-wellbore zone. The well is cleaned-up on the high depressions for a long time to achieve the stable inflow and maximum performance. Not reaching the planned regimes, the well is stimulated with different methods.

It is determined that huge depression leads to the stress increase inside near-wellbore rocks, the reservoir properties and productivity degradation. The dimensionless parameter helps estimate the reservoir rocks stress regime as during the well clean-up/testing as during production. It is equal to the difference of the overburden and pore pressure divided on the current pore pressure or on the difference between pore pressure and depression on the near-wellbore zone.

The development of some fields and underground gas storages performance in Russian Federation helped to discover the hyperbolic dependencies of the specific stress regime increase with the pore pressure index declining for the terrigenous and carbonate rocks. Those investigation results are based on the field-geological information analysis of Chayanda (boutobinsky horizon) and Pelyatka fields. They shows the boundaries of the optimal specific depression variation through the near-wellbore zone (depression-pore pressure relationship). The near-wellbore depression should be limited during the reservoir pressure decreasing. A well can be stimulated (for instance, the side-tracking in the low productivity index wells) to reach the planned production.

Keywords: field productivity index, near-wellbore formation area, stressed formation regime of the main pay zone.

С целью повышения эффективности разведочного и эксплуатационного бурения необходимо для каждого конкретного случая устанавливать оптимальный диапазон изменения депрессии, при которой обеспечивался проектный дебит скважины при ее освоении без разрушения пласта-коллектора и других осложнений.

Вместе с тем опыт разработки месторождений Крайнего Севера (МКС), Прикаспийской впадины и других нефтегазовых провинций РФ показал, что в 75 % скважин степень вовлечения в разработку вскрытой продуктивной толщи не превышает 50 %, а в скважинах, вскрывших валанжинские отложения МКС, средняя степень освоения не превышает 33 %. Треть скважин имеет степень освоения менее 20 %. Для обеспечения проектного дебита углеводородов (УВ) эксплуатация таких скважин происходит при повышенных депрессиях, что приводит к их преждевременному обводнению, разрушению коллектора в призабойной зоне пласта (ПЗП), дополнительным затратам на капитальный ремонт и выводу в бездействующий фонд [1–7 и др.].

Эффективность освоения скважин определяется как качеством вскрытия пластов и заканчивания скважин в горно-геологических условиях их эксплуатации, так и петрофизическими характеристиками горных пород в ПЗП, а также физико-химическими свойствами насыщающих их пластовых флюидов.

Для достижения высокой эффективности работ по вызову и интенсификации притока УВ необходимо учитывать изменение свойств горных пород в ПЗП и пластовых флюидов на разных этапах разработки месторождений и эксплуатации скважин. Величина депрессии при освоении скважин должна определяться с учетом постоянно изменяемых напряженного состояния ПЗП и фильтрационно-емкостных свойств (ФЕС) горных пород пласта-коллектора, которые существенно отличаются от их первоначальных значений.

В опубликованной литературе [7–11 и др.] величину депрессии при опробовании, испытании и освоении скважин рекомендуется выбирать с учетом величины репрессии бурового раствора на пласт, глубины его проникновения в

ПЗП, в размере до 50 % от величины пластового давления, а также по критерию устойчивости горных пород, который определяется на основе проведения газогидродинамических исследований (ГГДИ). Создавая повышенные депрессии, увеличивается сжимаемость пород в ПЗП, что затрудняет приток УВ в скважину. В процессе эксплуатации месторождения уменьшается пластовое давление, что также приводит к увеличению напряженного состояния ПЗП, снижению продуктивности и дебитов скважин.

Автором была обобщена геолого-промысловая информация по эксплуатации ряда месторождений и подземных хранилищ газа (ПХГ) России в терригенных и карбонатных коллекторах и построены зависимости безразмерного параметра напряженного состояния горных пород продуктивных пластов (Π_{nc}):

$$\Pi_{nc} = (P_{гор} - P_{пл}) / P_{пл} \quad (1)$$

от коэффициента аномальности пластового давления $K_a = P_{пл} / P_{гст}$, где $P_{гор}$ – горное давление вышележащих пород, МПа; $P_{пл}$ – пластовое давление, МПа; $P_{гст}$ – гидростатическое давление столба воды, Мпа, плотностью 1000 кг/м³.

Обобщенные результаты расчетов приведены на рис. 1, 2, на которых показаны зависимости $\Pi_{nc} = f(K_a)$ для терригенных и карбонатных коллекторов месторождений и ПХГ России.

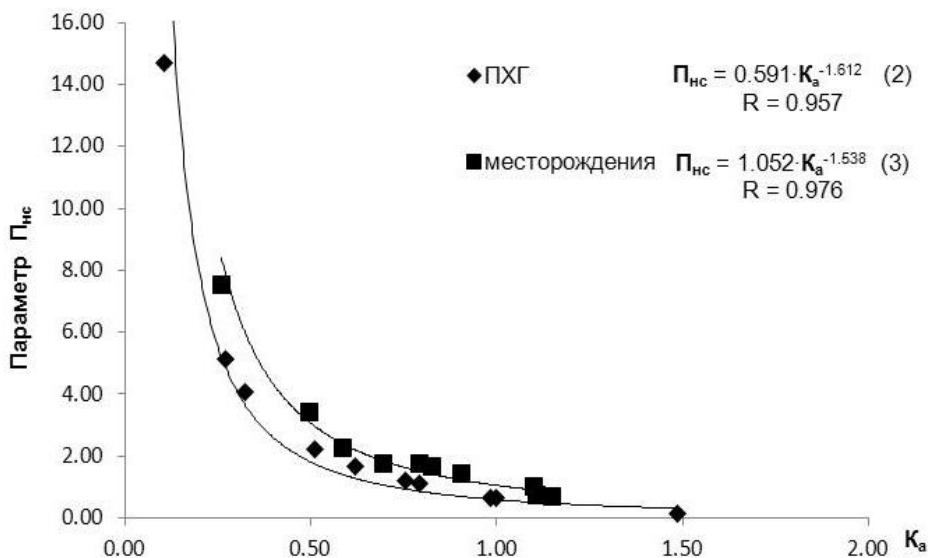


Рис. 1. Зависимость параметра напряженного состояния Π_{nc} от коэффициента аномальности пластового давления K_a для терригенных коллекторов месторождений и ПХГ России / Fig. 1. The dependence of the parameter of the stress state from the ratio of the anomalous reservoir pressure for clastic reservoirs and underground gas storage facilities of Russia

Анализ результатов расчетов параметра Π_{nc} для различной аномальности пластового давления позволяет установить следующее:

- напряженное состояние возрастает с уменьшением величины K_a от (1,15÷1,63) до (0,10÷0,26) в пределах (0,67÷0,49) ÷ (14,70÷7,51);

- напряженное состояние терригенных и карбонатных горных пород увеличивается по гиперболической зависимости при снижении коэффициента аномальности пластового давления по формулам (2)–(5) (рис. 1, 2);

- для терригенных коллекторов месторождений значения Π_{nc} выше, чем для ПХГ, для карбонатных пород ха-

актер кривых несколько иной – до величин $K_a \geq 0,9$ кривые совпадают с кривыми для терригенных коллекторов, а при $K_a < 0,9$ значения параметров Π_{nc} для ПХГ и месторождений незначительно отличаются друг от друга;

- интенсивность роста величины Π_{nc} для терригенных коллекторов значительно увеличивается при $K_a < 0,6$, а для карбонатных коллекторов происходит плавный рост этого параметра.

Выбранный безразмерный параметр напряженного состояния горных пород Π_{nc} учитывает его изменение для различных значений коэффициента аномальности пластового давления K_a , т.е. в различных горно-геологических условиях залегания УВ и на различных стадиях эксплуатации скважин. С уменьшением пластового давления по мере разработки месторождения возрастает величина скелетных напряжений, коллектор сжимается и дебит уменьшается. Одновременно растет водонасыщенность пористой среды пласта-коллектора. Однако это происходит не только по причине падения пластового давления, но и из-за дополнительного воздействия депрессии на пласт, при котором поровые каналы и трещины в ПЗП (в непосредственной

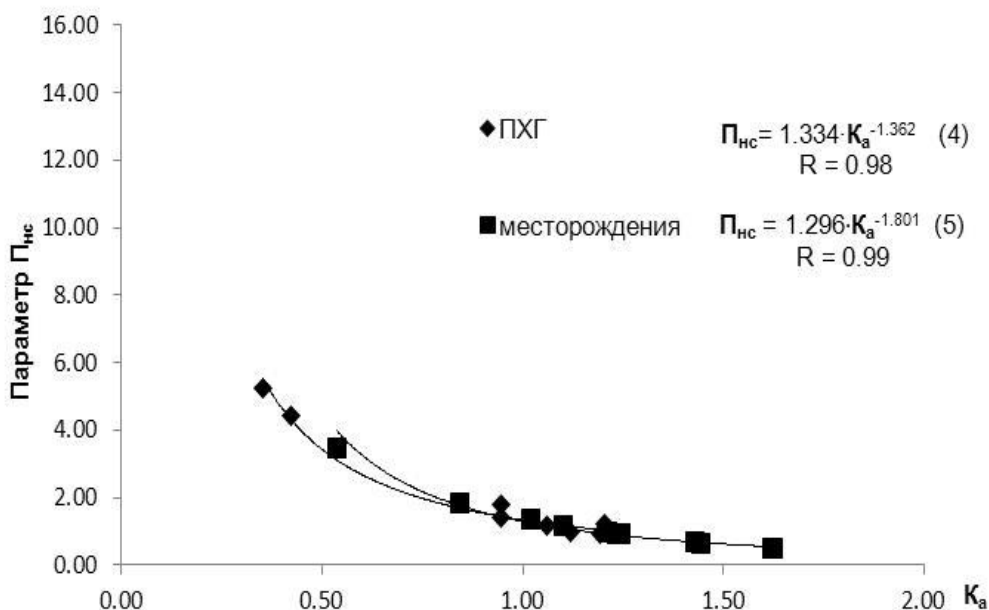


Рис. 2. Зависимость параметра напряженного состояния Π_{nc} от коэффициента аномальности пластового давления K_a для карбонатных коллекторов месторождений и ПХГ России / Fig. 2. The dependence of the parameter of the stress state from the ratio of the anomalous pore pressure in carbonate reservoirs and underground gas storage facilities of Russia

близости от стенки скважины) подвергаются более интенсивному сжатию, что увеличивает остаточную водонасыщенность и снижает фазовую проницаемость для УВ.

При освоении скважины и снижении $P_{пл}$ в ПЗП за счет понижения забойного давления (создание депрессии на пласт) напряженное состояние горных пород также будет увеличиваться в соответствии с формулой

$$\Pi_{nc}^{пзп} = (P_{гор} - P_{пл}) / (P_{пл} - \Delta P_{деп}), \quad (6)$$

где $\Delta P_{деп}$ – величина депрессии на ПЗП, при которой начинается приток газа или нефти в скважину.

Величина $\Delta P_{деп}$ может быть оценена на основе результатов комплексных исследований скважин. В табл. 1, 2 приведены результаты этих исследований, взятые из работ [1, 4, 11–15], и определены величины параметра Π_{nc} для соответствующих значений $P_{пл}$ и $\Delta P_{деп}$.

На Пеляткинском газоконденсатном месторождении (ГКМ) основными продуктивными пластами являются три эксплуатационных объекта [1, 12]: пласт СД-IV (2383–2424 м); пласт СД-VIII (2574–2618 м); пласт СД-IXа (2625–2631 м).

Таблица 1

**Обобщенные результаты освоения скважин Пеляткинского ГКМ
/ Generalized results of the exploration wells of the Pelyatka gas condensate field**

Пласт, глубина залегания, м	Количество скважин (замеров)	Пластовое давление (P _{пл}), МПа	Эффективная толщина пласта (h _{эф}), м	ФЕС (диапазон измерения / среднее значение)		Удельная продуктивность K _{уд.прод.} , тыс. м ³ /(МПа·сут·м), (диапазон измерения / среднее значение)	Дебит газа Q _г , тыс. м ³ /сут (диапазон измерения / среднее значение)	Депрессия на пласт ΔP _{деп} , МПа (диапазон измерения / среднее значение)
				K _{пр} , мД	m, %			
СД-IV, 2383–2424	4 (20)	22,71÷23,40	13,3÷20,0	<u>2,3÷57,2</u> 18,4	<u>14,7÷16,2</u> 15,7	<u>3,58÷92,7</u> 27,1	<u>168,0÷559,0</u> 328,8	<u>0,73÷13,96</u> 5,72
СД-VIII, 2574–2618	3 (23)	24,04÷25,07	15,0÷38,0	<u>2,0÷9,5</u> 6,7	<u>14,5÷17,0</u> 15,94	<u>1,05÷5,0</u> 2,72	<u>181,2÷500,7</u> 298,1	<u>2,11÷12,01</u> 4,96
СД-IXa, 2625–2631	2 (10)	24,8÷25,12	4,0÷7,2	<u>16÷18,3</u> 17,15	<u>14,6–15,0</u> 14,8	<u>2,03÷9,8</u> 5,92	<u>88,9÷367,0</u> 215,24	<u>2,56÷14,6</u> 7,72

Таблица 2

Обобщенные результаты по разведочным скважинам, пробуренным в газовой зоне Чаяндинского НГКМ (ботуобинский горизонт) / The generalized results of exploration wells drilled in the gas area of the Chayanda oil gas condensate field (the botuobinskiy horizon)

Группа скважин	Количество скважин	Пластовое давление P _{пл} , МПа	Эффективная газонасыщенная толщина пласта h _{эф} , м	ФЕС по данным (диапазон измерения / среднее значение)			Удельная продуктивность K _{уд.прод.} , тыс. м ³ /(МПа·сут·м), (диапазон измерения / среднее значение)	Дебит газа Q _г , тыс. м ³ /сут, (диапазон измерения / среднее значение)	Депрессия на пласт ΔP _{деп} , МПа (диапазон измерения / среднее значение)
				ГИС		керна			
				K _{пр} , мД	m, %				
I	6	13 ÷ 13,4	6,6÷14,7	<u>1,75÷897,3</u> 64,7	<u>12,4÷18,2</u> 15,6	<u>0,2÷1658</u> 292,3	<u>33,6÷209,9</u> 74,5	<u>232,5÷507,0</u> 363,6	<u>0,2÷1,1</u> 0,8
II	10	13,1÷13,4	7,6÷19,9	<u>0,2÷784,3</u> 210,3	<u>12,3÷19,8</u> 15,2	<u>0,1÷2025</u> 263,7	<u>10,8÷22,3</u> 15,7	<u>181,0÷447,0</u> 306,6	<u>1,1÷2,4</u> 1,8
III	7	12,8÷13,6	4,6÷12,7	<u>1,24÷692</u> 53,9	<u>10,2–20,2</u> 13,3	<u>0,1÷1015</u> 191,2	<u>5,5÷9,1</u> 7,5	<u>41,6÷291,0</u> 166,7	<u>0,94÷3,5</u> 2,5
IV	7	12,9÷13,4	1,6÷21,5	<u>0,52÷1127</u> 65,7	<u>6,9–18,5</u> 12,3	<u>2,4÷2238,6</u> 240,8	<u>0,03÷3,7</u> 1,1	<u>2,2÷186,0</u> 46,1	<u>2,7÷11,4</u> 5,8

Терригенные породы суходудинской свиты представлены переслаиванием песчаников, глин и алевролитов. Значения ФЕС горных пород продуктивных объектов и величины вскрытой перфорацией эффективной газонасыщенной толщины пластов отражены в табл. 1, где также приводятся изменение дебитов и удельных коэффициентов продуктивности. Анализ приведенных результатов ГИС и ГГДИ позволил установить следующее:

– максимальные удельную продуктивность и дебит имеют скважины, вскрывшие пласт СД-IV, что можно объяснить более высокими значениями (по ГИС и керну) проницаемости ПЗП при незначительных притоках пластовой воды;

– в пределах изменения депрессии от 0,59 до 1,28 МПа для скв. 826 (СД-IV) дебит линейно увеличивался от 294,4 до 634,2 тыс. м³/сут, при сравнительно незначительном изменении удельного коэффициента продуктивности от 26,32 до 29,57 тыс. м³/(МПа·сут·м), проницаемость горных пород в ПЗП была значительно выше, чем в других

скважинах (K_{пр} = 57,2 мД при m = 16,2 %);

– по скважинам 822, 823, 833 (СД-IV и других пластов) дебит возрастал с увеличением депрессии нелинейно (с уменьшением темпа роста), а удельный коэффициент продуктивности по всем анализируемым скважинам существенно не менялся (по восьми скважинам удельный коэффициент продуктивности незначительно уменьшался с ростом ΔP_{деп}, а по трем скважинам оставался практически неизменным);

– пять скважин (50 %) из десяти имеют пониженную удельную продуктивность (K_{уд.прод.} ≤ 3,5 тыс. м³/(МПа·сут·м)), в которых максимальный дебит не превышал 187–357,1 тыс. м³/сут при повышенных депрессиях 6,58–14,6 МПа;

– в скважинах с пониженной удельной продуктивностью не следует увеличивать депрессию на ПЗП, а необходимо проводить работы по интенсификации притока УВ, в том числе бурить дополнительные боковые стволы, проводить гидроразрыв пласта, различные физико-химические обработки.

Для прогнозирования величины оптимальной (граничной) депрессии были построены графики зависимости $\Pi_{нс}$ и коэффициента снижения давления в ПЗП во время создания депрессии при осво-

ении и эксплуатации скважины, равного отношению забойного давления к гидростатическому ($K_p^{пзп}$) от относительной депрессии на пласт $\Delta P'_{деп} = \Delta P_{деп} / P_{пл}$, которые приведены на рис. 3.

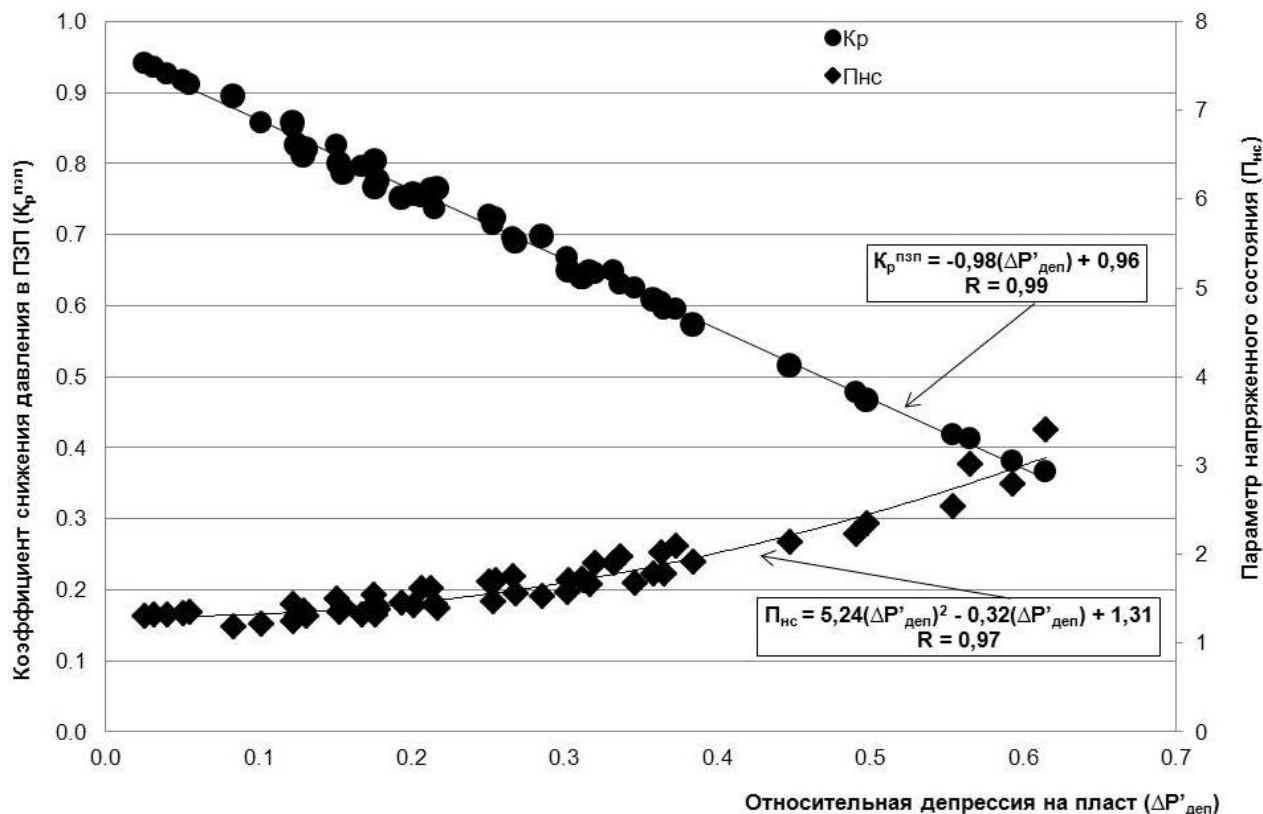


Рис. 3. Изменение в ПЗП напряженного состояния и коэффициента снижения давления от относительной депрессии при освоении скважин Пеляткинского ГКМ / Fig. 3. The change in the near-wellbore zone of the stress state and coefficient of pressure reduction from the relative depression during the development of the wells of the Pelyatka gas condensate field

Согласно проекту опытно-промышленной эксплуатации (ОПЭ) оптимальные значения $\Delta P_{деп}$ для скважин Пеляткинского ГКМ были приняты неодинаковые:

– для пласта СД-IV в скв. 826 (1,4 МПа), в скв. 822 (4,1 МПа), в скв. 823 (4,7 МПа); в скв. 833 (7,5 МПа);

– для пласта СД-VIII в скв. 831 (4,0 МПа), в скв. 832 (4,6 МПа), в скв. 401 (7,0 МПа), в скв. 827 (7,6 МПа), в скв. 824 (8,8 МПа);

– для пласта СД-IXa в скв. 825 (4,2 МПа), в скв. 829 (14,6 МПа).

То есть выбранные значения $\Delta P_{деп}^{опт}$ изменялись в зависимости от продуктивности скважин (см. табл. 1 и рис. 3). Значения $\Delta P'_{деп}$ вычислялись для $\Delta P_{деп}^{опт}$ (по проекту) и для максимальных $\Delta P_{деп}^{max}$, полученных на основе ГГДИ. Из рис. 3 следует, что данные по скважинам всех трех пластов (СД-IV, СД-

VIII, СД-IXa) ложатся на линии $K_p^{пзп}$ и $\Pi_{нс}$ в пределах $0,02 \leq \Delta P'_{деп} \leq 0,6$.

В интервале $0,02 \leq \Delta P'_{деп} \leq 0,28$ параметр $\Pi_{нс}$ изменяется в пределах 1,3–1,5, а в интервале $0,28 \leq \Delta P'_{деп} \leq 0,6$ происходит более интенсивный рост параметра напряженного состояния $\Pi_{нс}$ в пределах 1,5–3,25. Поэтому значения $\Pi_{нс} = 1,3$ при $\Delta P'_{деп} = 0,28$ и $0,68$ следует считать граничными, с изменением которых начинается более интенсивный рост напряженного состояния ПЗП. Повышение депрессии более 6,5 МПа (28 % от пластового давления) для низкопродуктивных скважин неэффективно. Приведенные результаты могут быть основанием для прогноза оптимальной депрессии на различных этапах освоения скважин при разведке и разработке месторождений.

Подобные результаты были получены при освоении и пробной эксплуатации газовых разведочных

скважин ботубинского горизонта Чаяндинского НГКМ.

Продуктивные терригенные отложения ботубинского горизонта Чаяндинского НГКМ характеризуются неравномерной фациальной изменчивостью, которая связана с неоднородностью литологического состава, неравномерным засолением пород, большим диапазоном изменения ФЕС по площади и разрезу. Сложность геологического строения Чаяндинского НГКМ вызвана также наличием тектонических нарушений и блоковым делением продуктивных горизонтов. Также необходимо отметить, что во всех газоконденсатных залежах ботубинского горизонта разведочными скважинами не вскрыт газоводяной контакт. Пластовая вода данного горизонта опробована в девяти скважинах, расположенных в районе нефтяных оторочек, и двух скважинах, находящихся за контуром продуктивности. Обобщенные характеристики по группам скважин в газовой зоне ботубинского горизонта приведены в табл. 2.

Исходя из коэффициента удельной продуктивности, скважины объединены условно в четыре группы (по результатам опробования и испытания скважин) [1]:

– I группа – 6 скважин: 180-05, 321-01, 321-06, 321-3, 321-41, 321-43

$$(209,9 \geq K_{уд.прод.} \geq 33,6 \text{ тыс. м}^3/(\text{МПа} \cdot \text{сут} \cdot \text{м});$$

$$K_{уд.прод.}^{cp} = 74,5 \text{ тыс. м}^3/(\text{МПа} \cdot \text{сут} \cdot \text{м});$$

– II группа – 10 скважин: 765, 180-01, 321-03, 321-08, 321-09, 321-10, 321-15, 321-16, 321-20, 321-30

$$(22,3 \geq K_{уд.прод.} \geq 10,8 \text{ тыс. м}^3/(\text{МПа} \cdot \text{сут} \cdot \text{м});$$

$$K_{уд.прод.}^{cp} = 15,7 \text{ тыс. м}^3/(\text{МПа} \cdot \text{сут} \cdot \text{м});$$

– III группа – 7 скважин: 180-06, 321-05, 321-1, 321-11, 321-19, 321-47, 321-47

$$(9,1 \geq K_{уд.прод.} \geq 5,5 \text{ тыс. м}^3/(\text{МПа} \cdot \text{сут} \cdot \text{м});$$

$$K_{уд.прод.}^{cp} = 7,5 \text{ тыс. м}^3/(\text{МПа} \cdot \text{сут} \cdot \text{м});$$

– IV группа – 7 скважин: 180-02, 213-01, 321-25, 321-45, 321-5, 321-50, 321-52

$$(3,7 \geq K_{уд.прод.} \geq 0,03 \text{ тыс. м}^3/(\text{МПа} \cdot \text{сут} \cdot \text{м});$$

$$K_{уд.прод.}^{cp} = 1,1 \text{ тыс. м}^3/(\text{МПа} \cdot \text{сут} \cdot \text{м}).$$

Из табл. 2 видно, что для скважин I–III групп при относительно одинаковой вскрытой эффективной толщины пласта и меньшей депрессии дебит выше, чем для скважин IV группы.

Установлена положительная тенденция влияния проницаемости на продуктивность. Так, проницаемость по керну ПЗП самой низкопродуктивной скважины 321-45 ($K_{уд.прод.}^{min} = 0,03 \text{ тыс. м}^3/(\text{МПа} \cdot \text{сут} \cdot \text{м})$) составляет $K_{пр} = 49 \text{ мД}$ (по керну), а проницаемость ПЗП высокопродуктивной скважины 321-30 ($K_{уд.прод.}^{max} = 209,9 \text{ тыс. м}^3/(\text{МПа} \cdot \text{сут} \cdot \text{м})$) равна $673,4 \text{ мД}$ (по керну).

В скважинах I и II групп нет острой необходимости в интенсификации, так как увеличение депрес-

сии приводит к росту их дебита и продуктивности (за исключением скв. 321-5). Например, с увеличением депрессии в скв. 321-01 с 0,79 до 1,34 МПа дебит увеличился с 410,9 до 550 тыс. м³/сут.

В скважинах с коэффициентом удельной продуктивности менее 10 тыс. м³/(МПа·сут·м) необходимо проводить интенсификацию как после их заканчивания бурением, так и в процессе эксплуатации (после длительного и сложного капитального ремонта скважин (КРС) или после вывода их из консервации, когда скважины не выходят на режимные (проектные) параметры эксплуатации). Из рассмотренных разведочных скважин Чаяндинского НГКМ, условно отнесенных к III и IV группам по удельной продуктивности, одиннадцать скважин находятся в консервации.

Таким образом, опыт освоения скважин, пробуренных на газовую часть залежей в ботубинском горизонте Чаяндинского НГКМ, показал, что в более чем 30 % скважин, вскрывших низкопродуктивные коллекторы, требуется интенсификации притока и доведение их дебитов до 250–300 тыс. м³/сут при депрессии на пласт 2,0–3,0 МПа [1].

Графики изменения напряженного состояния горных пород ботубинского горизонта в ПЗП Чаяндинского НГКМ и коэффициента $K_p^{пзп}$ от изменения относительной депрессии, возникающей в процессе освоения и последующей отработки, при вызове притока УВ приведены на рис. 4.

Из рис. 4 видно, что так же, как и в случае освоения скважин на Пеляткинском ГКМ, имеет место рост интенсивности $P_{нс}$ в точках с координатами $\Delta P'_{деп} = 0,25$, $P_{нс} = 2,23$ и $K_p^{пзп} = 0,57$. Поэтому при выборе оптимальной депрессии необходимо учитывать приведенные характеристики изменения напряженного состояния в зависимости от литотипа пород-коллекторов, ФЕС и условий осложнений в ПЗП.

На основе анализа геолого-промысловой информации по освоению и эксплуатации скважин Пеляткинского и Чаяндинского месторождений следует:

1. При освоении скважин и создании различной депрессии для вызова притока УВ, последующей их отработки и эксплуатации в ПЗП возрастают дополнительные напряжения, которые ухудшают ФЕС пористой среды ПЗП и уменьшают удельную продуктивность.

2. С ростом относительной депрессии на ПЗП параметр напряженного состояния вначале незначительно линейно увеличивается, а затем интенсивность его роста возрастает. Для терригенных коллекторов Пеляткинского и Чаяндинского (ботубинский горизонт) месторождений интенсивность роста параметра $P_{нс}$ возрастает при значениях $\Delta P'_{деп}$ более 0,28 и 0,25 соответственно. Значения безразмерного параметра $P_{нс}$ также близки друг к другу:

1,5 и 2,23 соответственно, что обеспечивает оптимальный режим эксплуатации скважин. Кроме того, резкое увеличение депрессии может вызвать гидратообразование в ПЗП и стволе скважины.

3. По мере разработки месторождения пластовое давление снижается и напряженное состояние в залежи интенсивно возрастает. Поэтому при эксплуатации скважин следует по возможности (на ос-

новании комплексных исследований) ограничивать депрессию на ПЗП. Для обеспечения проектных отборов УВ из залежи необходимо осуществлять работы по интенсификации притока, в том числе ГРП, физико-химическую обработку ПЗП, а также проводку боковых горизонтальных стволов в низкодебитных скважинах и изоляцию обводнившихся интервалов пласта.

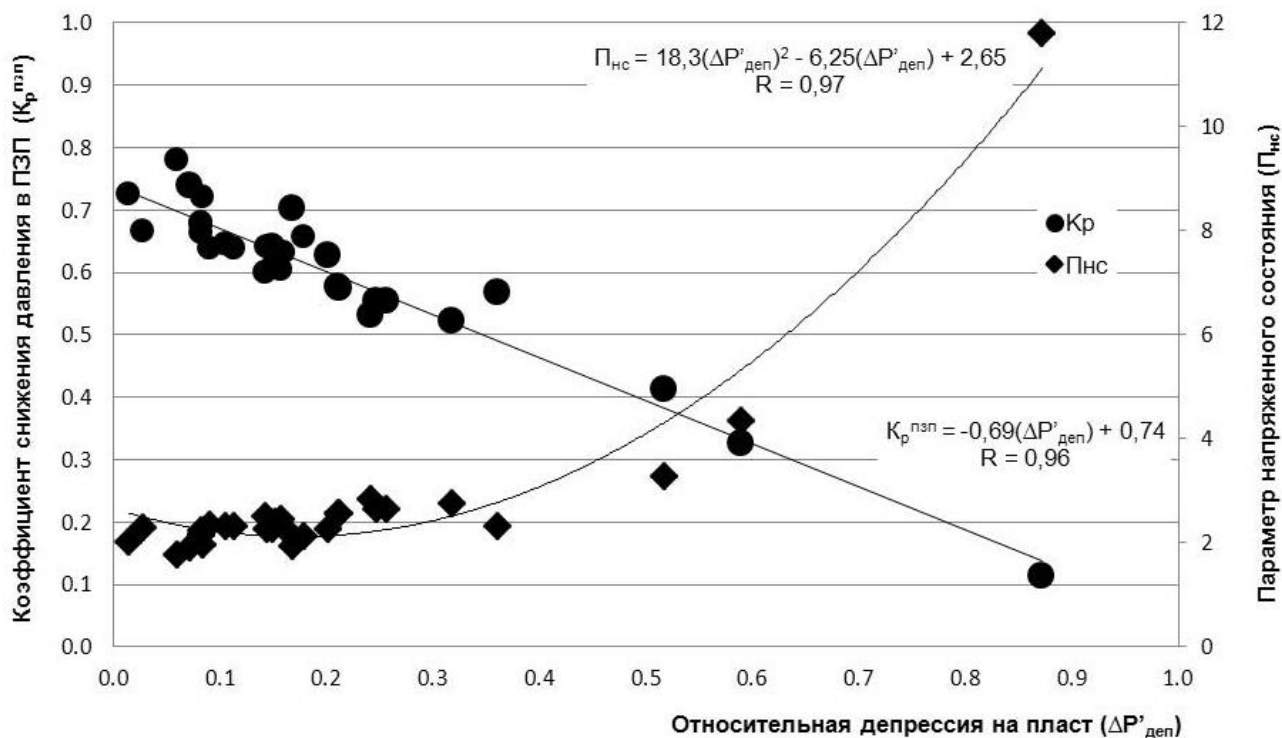


Рис. 4. Изменение в ПЗП напряженного состояния и коэффициента снижения давления от относительной депрессии при освоении и пробной эксплуатации скважин Чайяндинского НГКМ (ботубинский горизонт) / Fig. 4. The change in the near-wellbore zone of the stress state and coefficient of pressure reduction from the relative depression in the development and trial operation of wells of the Chayanda oil gas condensate field (botuobinskiy horizon)

Литература

1. Нифантов В.И., Мельникова Е.В., Мельников С.А. Повышение продуктивности скважин: опыт, проблемы, перспективы. М.: Газпром ВНИИГАЗ, 2014. 242 с.
2. ПР51-31323949-2000. Методика оценки степени освоения газовых скважин и состояния их призабойной зоны. Гейхман М.Г., Кузнецов В.В., Тер-Саркисов Р.М. М.: Газпром, ВНИИГАЗ. 2000. 31 с.
3. Гриценко А.И., Тер-Саркисов Р.М., Шандрыгин А.Н., Подюк В.Г. Методы повышения продуктивности газоконденсатных скважин. М.: Недра, 1997. 364 с.
4. Нифантов В.И., Мельникова Е.В., Мельников С.А. Особенности освоения нефтяных и газовых скважин в различных горно-геологических условиях. М.: Газпром ВНИИГАЗ, 2012. 38 с.

5. Вяхирев Р.И., Гриценко А.И., Тер-Саркисов Р.М. Разработка и эксплуатация газовых месторождений. М.: Недра-Бизнесцентр, 2002. 880 с.
6. Кутырев Е.Ф., Газизова Р.Р., Каримов А.А. О процессах в призабойной зоне при освоении и эксплуатации нефтяных скважин // Нефтепромысловое дело. 2008. № 5. С. 55–58.
7. Карнаухов М.Л. Справочник по испытанию скважин. М.: Центр ЛитНефтегаз, 2008. 376 с.
8. Ставкин Г.П., Гасумов Р.А., Андреев О.П. Вскрытие продуктивных пластов перфорацией в пенной среде. М.: ИРЦ Газпром, 2003. 78 с.
9. Плотников А.А. Дифференциация запасов газа в неоднородных коллекторах. М.: ВНИИГАЗ, 2003. 290 с.
10. Николаевский В.Н. Геомеханика и флюидодинамика. М.: Недра, 1996. 447 с.

11. Ельцов И.Н., Назарова Л.А., Назаров Г.В., Нестерова Г.В., Соболев А.Ю., Этов М.И. Скважинная геоэлектрика нефтегазовых пластов, разбуриваемых на репрессии давления в неравнокомпонентном поле напряжений // Геология и геофизика. 2014. Т. 55, № 5–6. С. 978–990.

12. Перепеличенко В.Ф., Нифантов В.И., Пищухин В.М., Нифантов А.В., Мельникова Е.В., Денчик Е.Ф., Скилов В.И., Рязанцев Г.А. Предварительные результаты опытно-промышленной эксплуатации Пеляткинского ГКМ // Разработка месторождений углеводородов. М. : ВНИИГАЗ, 2008. С. 409–418.

13. Рыжов А.Е. Типы и свойства терригенных коллекторов венда Чаяндинского месторождения // Вести газовой науки. Актуальные вопросы исследования пластовых систем месторождений углеводородов. 2013. № 1 (12). С. 145–160.

14. Рыжов А.Е., Крутиков А.И., Рыжова Л.А., Канунникова Н.Ю., Саприна О.А. Уточнение положения границы между нижнебукской и верхнебукской подсвитами Чаяндинского НГКМ с привлечением литологических, промыслово-геофизических и сейсмических критериев // Вести газовой науки. Актуальные вопросы исследования пластовых систем месторождений углеводородов. 2013. № 1 (12). С. 163–173.

15. Лукина Т.Ю., Семенов Е.О., Фоменко В.Г., Кравченко Г.Ф. Определение пористости и минерального состава пород-коллекторов по результатам комплексных петрофизических исследований в пластах сложного строения // Газовая промышленность. 2015. № 6. С. 12–16.

References

1. Nifantov V.I., Mel'nikova E.V., Mel'nikov S.A. *Povyshenie produktivnosti skvazhin: opyt, problemy, perspektivy* [Increase the productivity of wells: experience, problems, prospects]. Moscow: Gazprom VNIIGAZ, 2014, 242 p.

2. PR51-31323949-2000. *Metodika otsenki stepeni osvoeniya gazovykh skvazhin i sostoyaniya ikh prizaboinoi zony* [Methodology for assessing the degree of development of gas wells and the state of their bottomhole zone]. M.G. Geikhman, V.V. Kuznetsov, R.M. Ter-Sarkisov. Moscow: Gazprom VNIIGAZ, 2000, 31 p.

3. Gritsenko A.I., Ter-Sarkisov R.M., Shandrygin A.N., Podyuk V.G. *Metody povysheniya produktivnosti gazokondensatnykh skvazhin* [Methods of increasing the productivity of gas condensate wells]. Moscow: Nedra, 1997, 364 p.

4. Nifantov V.I., Mel'nikova E.V., Mel'nikov S.A. *Osobennosti osvoeniya neftyanykh i gazovykh skvazhin v razlichnykh gorno-geologicheskikh usloviyakh* [Features of development of oil and gas wells in various mining and geological conditions]. Moscow: Gazprom VNIIGAZ, 2012, 38 p.

5. Vyakhirev R.I., Gritsenko A.I., Ter-Sarkisov R.M. *Razrabotka i ekspluatatsiya gazovykh mestorozhdenii* [Development and operation of gas fields]. Moscow: Nedra-Biznestsentr, 2002, 880 p.

6. Kutyrev E.F., Gazizova R.R., Karimov A.A. O

protsekh v prizaboinoi zone pri osvoenii i ekspluatatsii neftyanykh skvazhin [On the processes in the bottomhole zone in the development and operation of oil wells]. *Neftepromyslovoe delo*. 2008, No. 5, pp. 55-58.

7. Karnaukhov M.L. *Spravochnik po ispytaniyu skvazhin* [Reference book for testing wells]. Moscow: Tsentr LitNeftegaz, 2008, 376 p.

8. Stavkin G.P., Gasumov R.A., Andreev O.P. *Vskrytie produktivnykh plastov perforatsiei v pennoi srede* [Opening of productive layers by perforation in foamy medium]. Moscow: IRTs Gazprom, 2003, 78 p.

9. Plotnikov A.A. *Differentsiatsiya zapasov gaza v neodnorodnykh kollektorakh* [Differentiation of gas reserves in heterogeneous reservoirs]. Moscow: VNIIGAZ, 2003, 290 p.

10. Nikolaevskii V.N. *Geomekhanika i flyuidodinamika* [Geomechanics and fluid dynamics]. Moscow: Nedra, 1996, 447 p.

11. El'tsov I.N., Nazarova L.A., Nazarov G.V., Nesterova G.V., Sobolev A.Yu., Epov M.I. *Skvazhinnaya geoel'ektrika neftegazovykh plastov, razburivaemykh na repressii davleniya v neravnokomponentnom pole napryazhenii* [Downhole geoelectrics of oil and gas strata drilled by pressure repression in a non-uniform component stress field]. *Geologiya i geofizika*. 2014, vol. 55, No. 5-6, pp. 978-990.

12. Perepelichenko V.F., Nifantov V.I., Pishchukhin V.M., Nifantov A.V., Mel'nikova E.V., Denchik E.F., Skilov V.I., Ryazantsev G.A. [Preliminary results of pilot operation of the Pelyatka gas condensate field]. *Razrabotka mestorozhdenii uglevodorodov* [Development of hydrocarbon deposits]. Moscow: VNIIGAZ, 2008, pp. 409-418.

13. Ryzhov A.E. Tipy i svoistva terrigennykh kollektorov venda Chayandinskogo mestorozhdeniya [Types and properties of terrigenous reservoirs of the Vendian of the Chayandinsky deposit]. *Vesti gazovoi nauki. Aktual'nye voprosy issledovaniya plastovykh sistem mestorozhdenii uglevodorodov*. 2013, No. 1 (12), pp. 145-160.

14. Ryzhov A.E., Krutikov A.I., Ryzhova L.A., Kanunnikova N.Yu., Saprina O.A. Utochnenie polozheniya granitsy mezhdu nizhnebyukskoi i verkhnebyukskoi podsvitami Chayandinskogo NGKM s privlecheniem litologicheskikh, promyslovo-geofizicheskikh i seismicheskikh kriteriev [Refinement of the position of the boundary between the Lower Buck and Upper Buck subspecies of the Chayanda OGKM with the involvement of lithological, geophysical and seismic criteria]. *Vesti gazovoi nauki. Aktual'nye voprosy issledovaniya plastovykh sistem mestorozhdenii uglevodorodov*. 2013, No. 1 (12), pp. 163-173.

15. Lukina T.Yu., Semenov E.O., Fomenko V.G., Kravchenko G.F. Opredelenie poristosti i mineral'nogo sostava porod-kollektorov po rezul'tatam kompleksnykh petrofizicheskikh issledovaniy v plastakh slozhnogo stroeniya [Determination of porosity and mineral composition of reservoir rocks based on the results of complex petrophysical studies in strata of complex structure]. *Gazovaya promyshlennost'*. 2015, No. 6, pp. 12-16.

УДК 504.5:665.8(282)

DOI 10.23683/0321-3005-2017-3-1-91-99

ЗАГРЯЗНЕНИЕ ЭКОСИСТЕМЫ НИЖНЕГО ДОНА НЕФТЯНЫМИ КОМПОНЕНТАМИ И ПОЛИАРОМАТИЧЕСКИМИ УГЛЕВОДОРОДАМИ

© 2017 г. Л.Ф. Павленко¹, Т.Л. Клименко¹, Н.С. Анохина¹, Г.В. Скряпник¹,
В.С. Экилик¹, Т.В. Волинова¹, М.В. Севостьянова¹

¹Азовский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства, Ростов-на-Дону, Россия

POLLUTION OF THE ECOSYSTEM OF THE LOWER DON BY OIL COMPONENTS AND POLYAROMATIC HYDROCARBONS

L.F. Pavlenko¹, T.L. Klimenko¹, N.S. Anokhina¹, G.V. Skrypnik¹,
V.S. Ekilik¹, T.V. Votina¹, M.V. Sevostyanova¹

¹Azov Sea Research Fisheries Institute, Rostov-on-Don, Russia

Павленко Лилия Фёдоровна – кандидат химических наук, ведущий научный сотрудник, лаборатория аналитического контроля водных экосистем, Азовский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства, ул. Береговая, 21в, г. Ростов-на-Дону, 344002, Россия, e-mail: riasfp@aanet.ru

Liliya F. Pavlenko - Candidate of Chemistry, Leading Researcher, Laboratory of Analytical Control of Water Ecosystems, Azov Sea Research Fisheries Institute, Beregovaya St., 21v, Rostov-on-Don, 344002, Russia, e-mail: riasfp@aanet.ru

Клименко Татьяна Леонидовна – старший научный сотрудник, лаборатория аналитического контроля водных экосистем, Азовский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства, ул. Береговая, 21в, г. Ростов-на-Дону, 344002, Россия, e-mail: riasfp@aanet.ru

Tatyana L. Klimenko - Senior Researcher, Laboratory of Analytical Control of Water Ecosystems, Azov Sea Research Fisheries Institute, Beregovaya St., 21v, Rostov-on-Don, 344002, Russia, e-mail: riasfp@aanet.ru

Анохина Наталья Сергеевна – старший научный сотрудник, лаборатория аналитического контроля водных экосистем, Азовский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства, ул. Береговая, 21в, г. Ростов-на-Дону, 344002, Россия, e-mail: riasfp@aanet.ru

Natalya S. Anokhina - Senior Researcher, Laboratory of Analytical Control of Water Ecosystems, Azov Sea Research Fisheries Institute, Beregovaya St., 21v, Rostov-on-Don, 344002, Russia, e-mail: riasfp@aanet.ru

Скряпник Галина Васильевна – кандидат химических наук, старший научный сотрудник, лаборатория аналитического контроля водных экосистем, Азовский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства, ул. Береговая, 21в, г. Ростов-на-Дону, 344002, Россия, e-mail: riasfp@aanet.ru

Galina V. Skrypnik - Candidate of Chemistry, Senior Researcher, Laboratory of Analytical Control of Water Ecosystems, Azov Sea Research Fisheries Institute, Beregovaya St., 21v, Rostov-on-Don, 344002, Russia, e-mail: riasfp@aanet.ru

Экилик Виктория Сергеевна – младший научный сотрудник, лаборатория аналитического контроля водных экосистем, Азовский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства, ул. Береговая, 21в, г. Ростов-на-Дону, 344002, Россия, e-mail: riasfp@aanet.ru

Viktoria S. Ekilik - Junior Researcher, Laboratory of Analytical Control of Water Ecosystems, Azov Sea Research Fisheries Institute, Beregovaya St., 21v, Rostov-on-Don, 344002, Russia, e-mail: riasfp@aanet.ru

Волинова Татьяна Владимировна – младший научный сотрудник, лаборатория аналитического контроля водных экосистем, Азовский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства, ул. Береговая, 21в, г. Ростов-на-Дону, 344002, Россия, e-mail: vtv1507@mail.ru

Tatyana V. Votina - Junior Researcher, Laboratory of Analytical Control of Water Ecosystems, Azov Sea Research Fisheries Institute, Beregovaya St., 21v, Rostov-on-Don, 344002, Russia, e-mail: vtv1507@mail.ru

Севостьянова Марина Викторовна – кандидат биологических наук, заведующая лабораторией аналитического контроля водных экосистем, Азовский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства, ул. Береговая, 21в, г. Ростов-на-Дону, 344002, Россия, e-mail: sevmar@yandex.ru

Marina V. Sevostyanova - Candidate of Biological Sciences, Head of Laboratory of Analytical Control of Water Ecosystems, Azov Sea Research Fisheries Institute, Beregovaya St., 21v, Rostov-on-Don, 344002, Russia, e-mail: sevmar@yandex.ru

По результатам многолетних наблюдений наиболее загрязненными участками р. Дон в нижнем его течении (от устья р. Сал до впадения в Таганрогский залив) являются устье протоки Аксай, ниже устья р. Темерник, ниже рукава Каланча, гирла Мокрая Каланча и Большая Кутерьма. В 2015–2016 гг. концентрации нефтепродуктов на этих участках менялись в воде от 0,02 до 0,34 мг/л, в донных отложениях – от 0,12 до аномально высокого значения – 15,23 г/кг сухой массы. На долю смолистых веществ в отдельных пробах воды приходилось 15–25 %, донных отложений – 26–80 % от суммы нефтяных компонентов. Нефтяное загрязнение воды и донных отложений Нижнего Дона носит хронический характер, о чем свидетельствуют «горбы» неразделенных нафтенно-ароматических соединений на хроматограммах углеводородов. В донных отложениях присутствуют также остатки высших водных растений, для которых характерны довольно интенсивные пики нечетных высокомолекулярных *n*-алканов C₂₅, C₂₇, C₂₉. По результатам исследований 2015–2016 гг. суммарные концентрации идентифицированных полиароматических углеводородов (ПАУ) в воде наиболее загрязненных участков Нижнего Дона варьировали в пределах 7,9–228 нг/л, в донных отложениях – 223–2500 мкг/кг сухой массы. В воде и донных отложениях р. Дон максимальное загрязнение полиаренами обнаружено ниже устья р. Темерник. Основную массовую долю в составе обнаруженных ПАУ в воде составляли 2-метилнафталин и нафталин, в донных отложениях – хризен, флуорантен и бенз(б)флуорантен.

Ключевые слова: Нижний Дон, загрязнение, вода, донные отложения, углеводороды, генезис, смолы, асфальтены, полиарены.

*The observations conducted over many years in the lower part of the Don river, namely, from the mouth of the river Sal to its inflow into the Taganrog Bay, have shown that the most contaminated sites are the following: the mouth of the Aksay stream, below the mouth of the river Temernik, below the Kalancha arm, and the delta arms Mokraya Kalancha and Bolshaya Kuterna. In 2015-2016, the concentration of oil products on these sites varied in water from 0.02 to 0.34 mg/l, and in sediments from 0.12 to abnormally high values as 15.23 g/kg dry weight. The share of resinous substances of the whole amount of the oil components constituted 15-25% in water samples and 26-80 % in sediments. Oil pollution of water and bottom sediments of the Lower Don is chronic, as evidenced by the "humps" of unresolved naphthene-aromatic compounds in the chromatograms of hydrocarbons. In the sediments there are also found remains of higher aquatic plants, which are characterized by fairly intense peaks of odd high molecular weight *n*-alkanes (C₂₅, C₂₇ and C₂₉). According to the results of studies conducted in 2015-2016 the total concentration of polyaromatic hydrocarbons (PAHs) identified in water of the most polluted sites of the Lower Don ranged from 7.9 to 228 ng/l, and from 223 to 2500 µg/kg dry weight in bottom sediments. Maximum pollution of water and sediments by polyarenes was discovered below the mouth of the river Temernik. The main mass fraction in the PAHs was presented in water by 2-methylnaphthalene and naphthalene, and in sediments by chrysene, fluoranthene and benzo(b)fluoranthene.*

Keywords: Lower Don, pollution, water, sediment, hydrocarbons, genesis, resins, asphaltenes, polyarenes.

В связи с глобальным загрязнением нефтью и нефтепродуктами (НП) всех без исключения пресных и морских водных объектов и отрицательным влиянием многих компонентов нефтяного загрязнения на водные биологические ресурсы нефть и НП являются обязательными показателями состояния водных экосистем, подлежащих систематическому наблюдению и контролю в рамках различных национальных и международных программ по защите окружающей среды. Мониторинг уровня нефтяного загрязнения элементов экосистемы р. Дон на участке от выше устья р. Сал до дельты Дона проводится ежегодно с 1990 г. в различные вегетационные периоды (весной, летом и осенью). За весь период наблюдений среднегодовые концентрации НП варьировали в широком диапазоне: в воде – от 0,03 до 0,30 мг/л, в донных отложениях – от 0,49 до 1,85 г/кг сухой массы.

Основным источником поступления нефтяных компонентов в экосистему Нижнего Дона является судоходство. По итогам навигации 2014 г. объем перевозок в границах ответственности Азово-Донской

бассейновой администрации составил 14 млн 276 тыс. т, в 2015 г. – 8 млн 705 тыс. т грузов. В общем грузопотоке доля НП, в основном мазута и дизельного топлива, составляет 62,6 % [1]. Существенную долю в загрязнение р. Дон вносят сбросы сточных вод и ливневые стоки [2].

Материалы и методы исследований

Для оценки загрязнения Нижнего Дона нефтяными компонентами (углеводородами, в том числе полициклическими ароматическими и смолистыми веществами) использованы результаты анализа проб воды и донных отложений, отобранных выше, ниже и в устьях р. Сал и Маныч, впадающих в р. Дон, в местах выпуска сточных вод г. Ростов-на-Дону и Азов, в устье р. Дон, рукаве Каланча, гирлах Мокрая Каланча и Большая Кутерьма весной, летом и осенью 2015 и 2016 гг. (рис. 1).

Пробы воды отбирались по фарватеру с поверхностного горизонта (глубина 0,5 м), донных отложений – с верхнего двухсантиметрового слоя.



Рис. 1. Стандартная сетка станций регулярного мониторинга загрязнения р. Дон в нижнем течении (● – станции отбора проб воды и донных отложений) / Fig. 1. The standard grid stations of regular monitoring of pollution of the Don river in its lower reaches (● - stations sampling of water and bottom sediments)

Концентрации НП в воде и донных отложениях оценивали по сумме основных нефтяных компонентов (углеводородов и смолистых веществ) в соответствии с методиками, зарегистрированными в Федеральном реестре методик выполнения измерений, применяемых в сферах распространения государственного метрологического контроля и надзора, под шифрами ФР.1.31.2005.01511 и ФР.1.29. 2012.12493. Методики основаны на экстракции НП из воды четыреххлористым углеродом, из донных отложений – ацетоном и хлороформом, концентрировании экстракта, хроматографическом разделении на отдельные нефтяные компоненты (углеводороды и смолистые вещества) в тонком слое оксида алюминия и их количественном определении. Определение количества углеводородов в воде проводили комбинированным спектрофотометрическим методом, основанным на измерении поглощения элюатов углеводородов одновременно в инфракрасной и ультрафиолетовой областях спектра, что позволяет учитывать как ароматическую, так и парафино-нафтеновую фракции независимо от их соотношения в исследуемой пробе. Определение смолистых веществ и углеводородов в донных отложениях проводили методом люминесцентной спектроскопии. Содержание нефтяных компонентов определяли с использованием ИК-спектрофотометра IR-270-50 (фирма Hitachi, Япония), УФ-спектрофотометра UV-2450 (фирма Shimadzu, Япония) и спектрофлуорофотометра RF-5301 PC (фирма Shimadzu, Япония).

Определение н-парафинов (C₁₄–C₃₄) в воде проводили в соответствии с ФР.1.29.2006.02245, в донных отложениях – ФР.1.31.2010.08907. Методики основаны на извлечении н-парафинов из воды экстракцией н-гексаном, из донных отложений – последовательной

3-кратной экстракцией ацетоном и гексаном и отделении водно-ацетонового слоя, очистке экстракта от мешающих анализу природных органических соединений, концентрировании экстракта с последующим газохроматографическим определением. Содержание н-парафинов определяли на газовом хроматографе «Кристалл 2000М» (фирма «Хроматэк», Россия) с капиллярной колонкой длиной 25 м и пламенно-ионизационным детектором.

Определение полициклических ароматических углеводородов (ПАУ) (нафталин, бифенил, 2-метилнафталин, флуорен, аценафтен, фенантрен, антрацен, флуорантен, пирен, трифенилен, хризен, бенз(b)флуорантен, бенз(k)флуорантен, бенз(a)пирен, дибенз(a,h)антрацен, бенз(g,h,i)перилен) в воде проводили согласно ФР.1.31.2007.03947, в донных отложениях – ФР.1.31.2007.03548. Методики основаны на экстракции ПАУ из воды и донных отложений гексаном, очистке экстрактов в тонком слое оксида алюминия и определении количества индивидуальных ПАУ методом обращенно-фазной высокоэффективной жидкостной хроматографии. В работе использовали жидкостный хроматограф Beta-10 PLUS (фирма ЕСОМ, Чехия), снабженный колонкой с обращенной фазой C₁₈ и люминесцентным детектором RF-5301 PC (фирма Shimadzu, Япония).

Результаты исследований

Динамика нефтяного загрязнения воды Нижнего Дона характеризуется более высоким уровнем в 90-е и начале 2000-х гг., когда среднегодовые концентрации НП превышали ПДК (0,05 мг/л) в 1,2–6,0 раза. За последние 5 лет наблюдений среднегодовые концентрации НП в воде исследуемого участка р. Дон

не превышали ПДК (0,05 мг/л), варьируя в пределах 0,03–0,04 мг/л. Низкое нефтяное загрязнение воды р. Дон зафиксировано также сотрудниками Южного научного центра в 2012 г. [3].

Частота встречаемости проб воды, в которых концентрации НП превышали ПДК, менялась в различные годы от 10 до 28 % от общего числа исследованных проб. В 2014 г. частота встречаемости проб с превышением ПДК была максимальной за последние 5 лет наблюдений. Согласно методике комплексной оценки по классификации воды водных объектов с использованием значений повторяемости случаев загрязненности и кратности превышения ПДК [4], загрязненность воды р. Дон в 2012–2014 и 2016 гг. можно классифицировать как неустойчивую низкого уровня, в 2015 г. – как единичную низкого уровня (табл. 1).

По результатам многолетних наблюдений наиболее загрязненными участками р. Дон являются устье протоки Аксай, ниже устья р. Темерник, ниже рукава Каланча, гирла Мокрая Каланча и Большая Кутерьма. В 2015–2016 гг. концентрации НП на этих участках менялись в широком диапазоне – от 0,02 до 0,34 мг/л (табл. 2). На долю смолистых веществ в отдельных пробах воды приходилось от 15 до 25 % от суммы нефтяных компонентов.

В 2015 г. высокая концентрация НП, превысившая ПДК в 6,8 раза, обнаружена летом ниже устья р. Темерник. В 2016 г. максимальная концентрация НП в воде, превысившая ПДК в 2 раза, была зафиксирована летом в гирле Мокрая Каланча и осенью – ниже рукава Каланча. На рис. 2 представлена типичная хроматограмма н-алканов, выделенных из воды Нижнего Дона. Такой тип хроматограммы характерен для хронического нефтяного загрязнения, о чем свидетельствует «горб» неразделенных нафтено-ароматических соединений, устойчивых к процессам деградации. На фоне «горба» отмечен гомологический ряд

Таблица 1

Характеристика нефтяного загрязнения воды Нижнего Дона в период 2012–2016 гг.
/ Characteristic of oil water pollution of the Lower Don in 2012-2016

Год	Средняя концентрация, мг/л	Диапазон концентраций, мг/л	% случаев превышения ПДК	Кратность превышения ПДК	Характеристика загрязнения
2012	0,04	0,015–0,07	17	0,8	Неустойчивая низкого уровня
2013	0,04	0,015–0,14	22	0,8	Неустойчивая низкого уровня
2014	0,04	<0,015–0,12	28	0,8	Неустойчивая низкого уровня
2015	0,03	<0,015–0,34	10	0,6	Единичная низкого уровня
2016	0,04	0,02–0,10	18	0,8	Неустойчивая низкого уровня

Таблица 2

Диапазоны и среднегодовые концентрации НП в воде наиболее загрязненных участков Нижнего Дона в различные сезоны 2015–2016 гг., мг/л
/ Ranges and average concentrations of oil products in water of the most polluted sites of the Lower Don in different seasons of 2015-2016, mg/l

Место отбора проб воды	Диапазоны		Средние	
	2015	2016	2015	2016
Дон, устье протоки Аксай	0,03–0,08	0,02–0,05	0,05	0,03
Дон, ниже устья р. Темерник	0,02–0,34	0,02–0,05	0,14	0,03
Дон, выше г. Азова	0,02–0,06	0,04–0,10	0,04	0,07
Гирло Мокрая Каланча	0,02–0,05	0,03–0,10	0,04	0,06
Гирло Большая Кутерьма	0,02–0,07	0,03–0,06	0,04	0,04

н-алканов от C₁₆ до C₃₁ в незначительных концентрациях, что подтверждает хронический характер нефтяного загрязнения [5].

За весь период наблюдений четкой среднегодовой динамики увеличения или снижения нефтяного загрязнения донных отложений исследуемого участка р. Дон не отмечено. В 2012–2016 гг. в донных отложениях Нижнего Дона среднегодовые концентрации НП менялись в пределах 0,55–0,97 г/кг, в индивидуальных пробах – от ниже предела обнаружения <0,015 г/кг до аномально высокого значения – 15,23 г/кг сухой массы (табл. 3). Относительная доля смолистых веществ в отдельных пробах донных отложений составляла 26–80 % от суммы нефтяных компонентов. В работе [6] высокая доля смолистых веществ зафиксирована в донных отложениях Нижнего Дона на акваториях, прилегающих к промышленным центрам и судходным каналам.

В 2012 г. мониторинг нефтяного загрязнения на Нижнем Дону проводился только осенью, и наиболее высокое загрязнение НП отмечено в донных отложениях устья пр. Аксай.

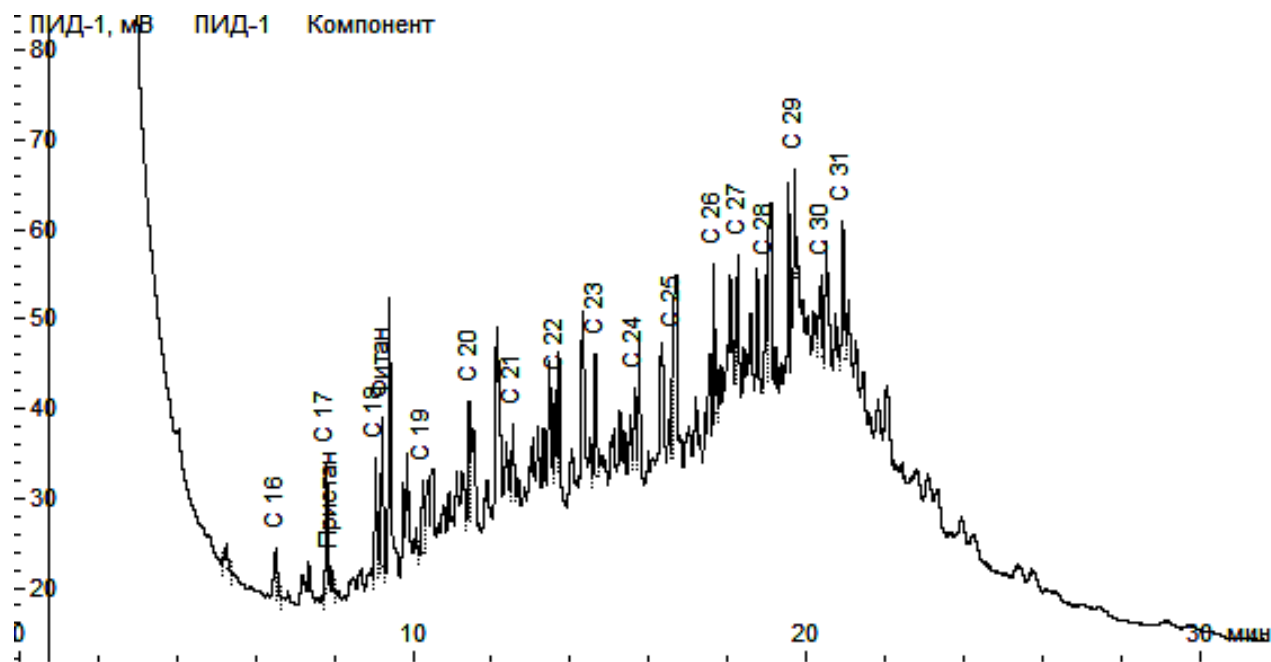


Рис. 2. Хроматограмма n-алканов, выделенных из воды Нижнего Дона, сентябрь 2016 г.
 / Fig. 2. Chromatogram of n-alkanes isolated from water of the Lower Don, September 2016

В 2013–2016 гг. максимальные концентрации НП были обнаружены в донных отложениях, отобранных в летние и осенние сезоны наблюдений ниже устья р. Темерник.

По данным многолетних наблюдений, наиболее высокие концентрации НП в донных отложениях Нижнего Дона отмечаются на тех же участках, что и для воды (табл. 4). Концентрации НП в донных отложениях наиболее загрязненных участков Нижнего Дона практически постоянно превышают величину 1 г/кг, при которой возможно проявление сублетальных эффектов для донных биоценозов [7].

Интерпретация результатов анализа донных отложений затруднена, с одной стороны, отсутствием утвержденных нормативов содержания контролируемых веществ (аналогичных ПДК для воды), а с другой – зависимостью степени их накопления от гранулометрического состава донных осадков. По классификации, предложенной специалистами Гидрохимического института для пресноводных экосистем [8], донные отложения Нижнего Дона на участке от устья р. Сал до устья протоки Аксай можно отнести к чистым (<0,1 г/кг) или слабозагрязненным (0,1–0,2 г/кг), на участке от устья протоки

Аксай до устья р. Дон – от среднезагрязненных (0,2–0,6 г/кг) до очень грязных (>1,0 г/кг). Все концентрации даны в пересчете на сухую массу.

Состав n-алканов, выделенных из донных отложений Нижнего Дона, так же как и в воде, свидетельствует о хроническом характере загрязнения осадков нефтяными компонентами (рис. 3). Помимо накопившихся стойких нафтено-ароматических соединений, выраженных на хроматограмме в виде «горба», в осадках присутствуют остатки высших водных растений, для которых характерны довольно интенсивные пики нечетных высокомолекулярных n-алканов C₂₅, C₂₇, C₂₉ [5].

Таблица 3

Динамика нефтяного загрязнения донных отложений Нижнего Дона в период 2012–2016 гг., г/кг сухой массы / Dynamics of oil pollution of bottom sediments of the Lower Don in the period 2012-2016, g/kg dry weight

Год	Средние концентрации НП	Диапазоны концентраций НП	Участок р. Дон с максимальным загрязнением донных отложений
2012	0,56	0,02–2,41	Устье протоки Аксай, осень
2013	0,94	0,02–15,23	Ниже устья р. Темерник, осень
2014	0,55	0,02–7,63	Ниже устья р. Темерник, лето
2015	0,91	<0,015–10,14	Ниже устья р. Темерник, осень
2016	0,97	0,02–5,76	Ниже устья р. Темерник, лето

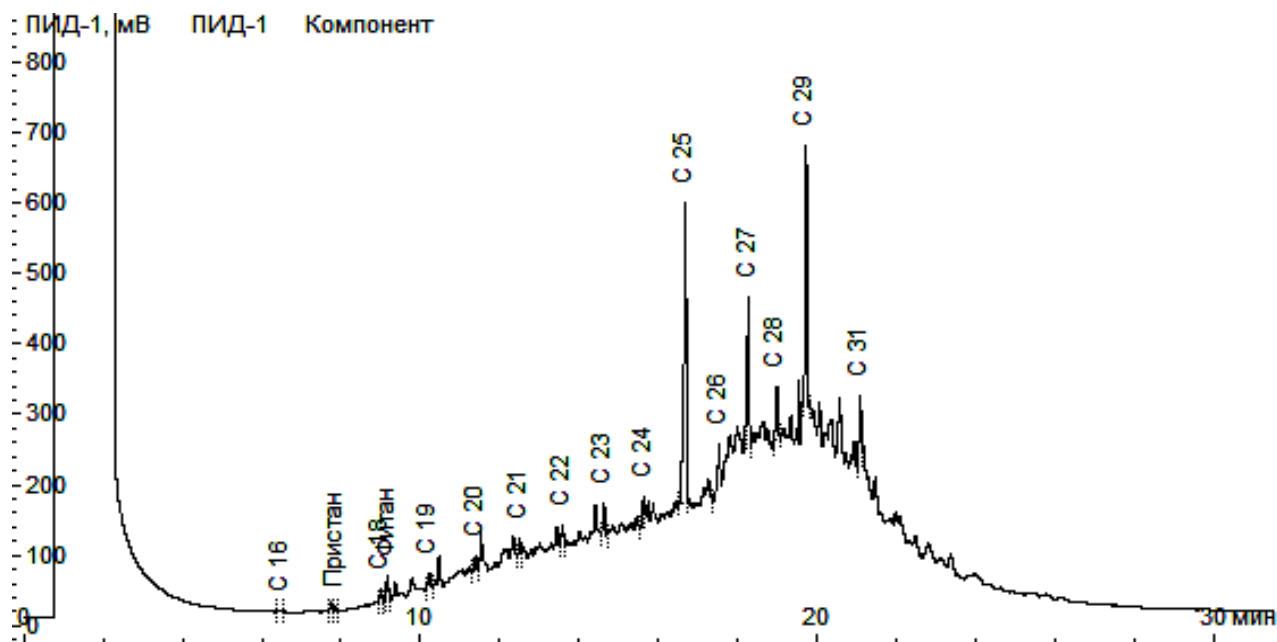


Рис. 3. Хроматограмма n-алканов, выделенных из донных отложений Нижнего Дона, сентябрь 2015 г.
 / Fig. 3. Chromatogram of n-alkanes isolated from bottom sediments of the Lower Don, September 2015

Известно, что степень накопления НП в значительной степени зависит от гранулометрического состава донных осадков. Донные осадки исследуемого участка р. Дон в зависимости от гранулометрического состава можно разделить на 4 типа: песок; песок с примесью ила; ил с примесью песка; ил [9]. Для каждого из этих типов, по результатам многолетних наблюдений АзНИИРХ, рассчитаны средние характерные концентрации (СХК) НП (табл. 5).

Таблица 4
Диапазоны и среднегодовые концентрации НП в донных осадках Нижнего Дона в различные сезоны 2015–2016 гг., г/кг сухой массы
/ Ranges and average concentrations of oil products in bottom sediments of the Lower Don in different seasons of 2015-2016, g/kg dry weight

Место отбора проб	Диапазоны концентраций НП		Среднегодовые концентрации НП	
	2015	2016	2015	2016
Дон, устье протоки Аксай	0,26–0,80	1,68–2,85	0,60	2,15
Дон, ниже устья р. Темерник	1,86–10,14	0,84–5,76	4,73	3,11
Дон, выше г. Азова	0,79–2,43	0,12–1,62	1,45	0,84
Гирло Мокрая Каланча	1,71–4,48	3,41–4,55	2,99	3,92
Гирло Большая Кутерьма	2,39–3,43	1,26–2,81	2,87	1,87

Таблица 5
Средние характерные концентрации НП для различных типов донных отложений Нижнего Дона
/ The average typical concentrations of petroleum products for various types of bottom sediments of the Lower Don

Тип донных осадков	Описание внешнего вида донных отложений	Средние характерные концентрации НП, г/кг сухой массы
1	Ракуша, ракушечная крошка. То же с примесью песка	0,09
2	Ракуша, ракушечная крошка, песок с примесью ила	0,30
3	Илистый мелкодисперсный песок светло-серый, с примесью ракуши	0,40
4	Ил светло-серый	0,90

Отношение абсолютных концентраций к средним характерным концентрациям для соответствующего типа грунта (кратность СХК) позволяет проводить сравнительную характеристику загрязненности донных отложений различных участков реки, нивелируя тип грунта, от которого в значительной степени зависит уровень накопления загрязняющих

веществ, в том числе НП [10]. На рис. 4 представлены результаты расчетов кратностей СХК для донных отложений, отобранных в различные сезоны 2015 и 2016 гг. Максимальные значения кратностей СХК независимо от сезона и года наблюдений получены для донных отложений, отобранных ниже устья р. Темерник.

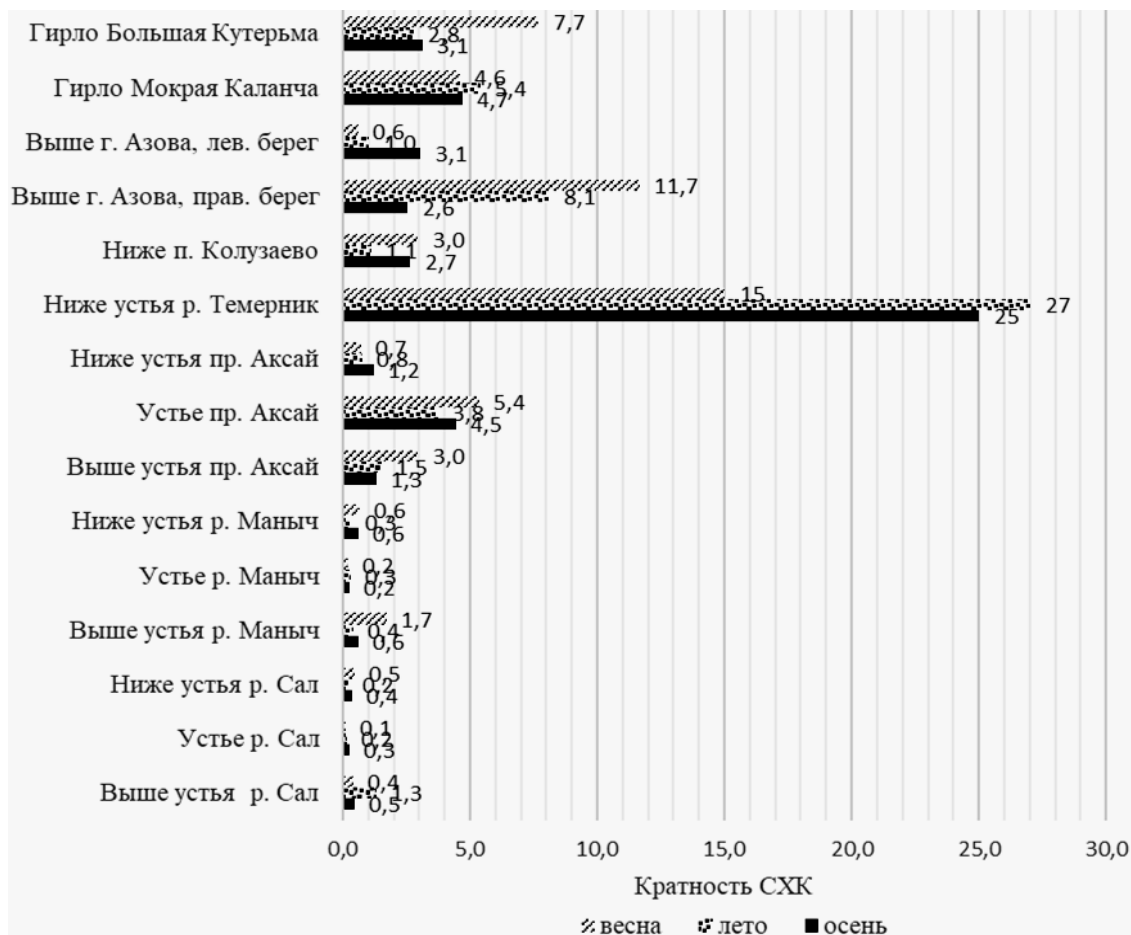


Рис. 4. Значения кратностей СХК для донных отложений р. Дон в различные сезоны 2015–2016 гг. / Fig. 4. The values of multiplicities of average concentrations for bottom sediments of the Don river in different seasons of 2015-2016

В настоящее время в объектах окружающей среды идентифицировано более 200 ПАУ. Однако определение ПАУ часто ограничивается только наиболее канцерогенным и широко распространенным из них – бенз(а)пиреном (БП), принятым в качестве индикатора на эту группу соединений. Но из-за невысокой стабильности, плохой растворимости в воде и относительно низкого содержания в источниках эмиссии БП не может служить универсальным индикатором группы ПАУ. Его обнаружение свидетельствует лишь о факте присутствия ПАУ в пробе. Ограничение определения ПАУ только БП связано с тем, что наблюдение и контроль за всей группой соединений – чрезвычайно сложная, дорогостоящая и не всегда обоснованная задача. Например, только для ПАУ с 4–6 циклами возможно наличие около 70 изомеров, и число их возрастает с включением в кольцо различных заместителей.

Поэтому большинство программ контроля состояния окружающей среды и глобального мониторинга предусматривает определение 16 приоритетных ПАУ, обладающих заметной канцерогенной ак-

тивностью и наиболее широко распространенных в различных объектах окружающей среды. В России установлены ПДК только для нафталина – 4 мкг/л (рыбохозяйственная норма) и БП – 0,005 мкг/л (санитарно-гигиеническая норма) [11]. Системы нормативов для донных отложений вообще отсутствуют, поэтому для оценки степени их загрязнения БП используют санитарно-гигиеническую ПДК для почв, равную 20 мкг/кг [12].

По результатам исследований 2015–2016 гг. в воде и донных отложениях Нижнего Дона идентифицированы нафталин, 2-метилнафталин, флуорен, фенантрен, флуорантен, пирен, трифенилен, хризен, бенз(б)флуорантен, бенз(к)флуорантен, БП, дибенз(а,һ)антрацен, бенз(ɡ,һ,і)перилен. Суммарные концентрации идентифицированных ПАУ в воде наиболее загрязненных участков Нижнего Дона менялись в широком диапазоне от 7,9 до 228 нг/л, в донных отложениях – от 223 до 2500 мкг/кг сухой массы.

В среднем в воде и донных отложениях р. Дон максимальное загрязнение полиаренами обнаружено ниже устья р. Темерник (табл. 6).

Основную массовую долю в составе обнаруженных ПАУ в воде составляли 2-метилнафталин и нафталин, в донных отложениях – хризен, флуорантен и бенз(б)флуорантен, соответственно 77 и 70 % (рис. 5). Доля канцерогенного БП в воде не превышала 0,15 %, в донных отложениях варьиро-

вала от 0,48 до 1,52 % от суммы идентифицированных ПАУ.

Превышение ПДК нафталина и БП в воде Нижнего Дона ни в одной из исследованных проб не зафиксировано. В донных отложениях концентрация БП также не превышала ПДК, принятую для почв.

Таблица 6

Концентрации суммы идентифицированных ПАУ в воде и донных отложениях наиболее загрязненных участков Нижнего Дона, 2015–2016 гг. / Concentrations of total PAHs identified in water and sediments of the most contaminated areas of the Lower Don, 2015-2016

Место отбора проб	Вода, нг/л		Донные отложения, мкг/кг сухой массы	
	Диапазоны	Средние	Диапазоны	Средние
Устье пр. Аксай	18,4–102	38,5	86,7–610	337
Ниже устья р. Темерник	13,8–228	66,7	122–2500	762
Ниже сброса сточных вод г. Ростова-на-Дону	11,5–114	34,5	22–380	195
Ниже сброса сточных вод г. Азова	11,9–117	37,8	26,3–405	284
Дон, створ нулевого километра	12,2–71,3	31,7	33,1–415	232
Гирло Мокрая Каланча	8,5–93,4	31,4	190–890	485
Гирло Большая Кутерьма	7,9–88,1	28,3	20,8–807	428

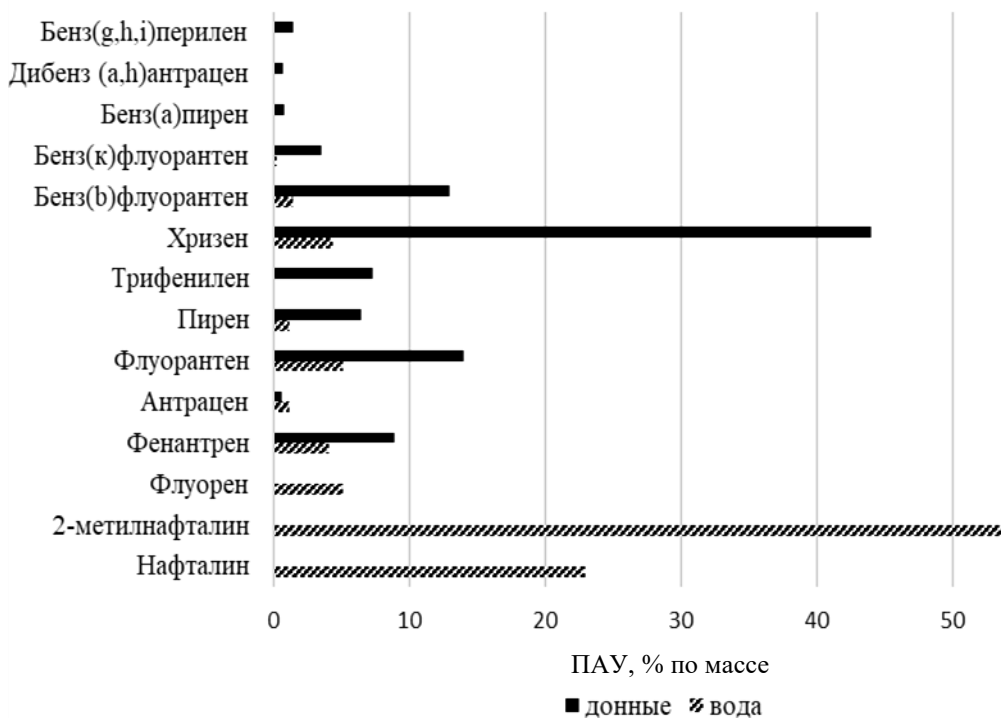


Рис. 5. Средние массовые доли индивидуальных ПАУ в воде и донных отложениях Нижнего Дона, 2015–2016 гг.
 / Fig. 5. Average mass fractions of individual PAHs in water and sediments of the Lower Don, 2015-2016

Литература

1. Об итогах навигации на Дону. URL: http://rus-shipping.ru/ru/dialog/interview/?parent_id=254 (дата обращения: 14.10.2016).

2. Никаноров А.М., Хоружая Т.А., Минина Л.И., Миронова Т.В. Влияние мегаполиса на качество воды большой реки (на примере г. Ростов-на-Дону) // Вестн. Южного научного центра РАН. 2009. Т. 5, № 4. С. 62–70.

3. Матишов Г.Г., Степаньян О.В., Харьковский В.М., Старцев А.В., Бульшиева Н.И., Сёмин В.В., Соьер В.Г., Кренёва К.В., Глущенко Г.Ю., Свистунова Л.Д. Особенности водной экосистемы Нижнего Дона в позднесенний период // Водные ресурсы. 2016. Т. 43, № 6. С. 620–632.

4. РД 52.24.643-2002. Метод комплексной оценки степени загрязненности поверхностных вод по гидрохимическим показателям / Росгидромет. СПб. : Гидрометеоиздат, 2003 г. 55 с.

5. Немировская И.А. Углеводороды в океане (снег – лед – вода – взвесь – донные осадки). М. : Научный мир, 2004. 328 с.

6. Кузнецов А.Н., Федоров Ю.А. Нефтяные компоненты в устьевой области р. Дон и в Азовском море (результаты многолетних исследований) // Водные ресурсы. 2014. Т. 41, № 1. С. 49–59.

7. Патин С.А. Экологические проблемы освоения нефтегазовых ресурсов морского шельфа. М. : Изд-во ВНИРО, 1997. 349 с.

8. Никаноров А.М., Страдомская А.Г. Проблемы нефтяного загрязнения пресноводных экосистем. Ростов н/Д. : НОК, 2008. 222 с.

9. Кораблина И.В., Каталевский Н.И., Геворкян Ж.В., Кленкин А.А. Современная оценка содержания тяжелых металлов в донных осадках устьевого участка р. Темерник и прилегающей акватории р. Дон // Основные проблемы рыбного хозяйства и охраны рыбохозяйственных водоемов Азово-Черноморского бассейна : сб. науч. тр. (2010–2011 гг.). Ростов н/Д. : АзНИИРХ, 2011. С. 237–241.

10. Кленкин А.А., Корпакова И.Г., Павленко Л.Ф., Темердашев З.А. Экосистема Азовского моря: антропогенное загрязнение. Ростов н/Д.; Краснодар : АзНИИРХ, 2007. 324 с.

11. Нормативы качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативы предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения. М. : Изд-во ВНИРО, 2011. 257 с.

12. ГН 2.1.7.2041-06. Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в почве. М., 2006.

References

1. *Ob itogakh navigatsii na Donu* [On the results of navigation on the Don]. Available at: http://rus-shipping.ru/ru/dialog/interview/?parent_id=254 (accessed 14.10.2016).

2. Nikanorov A.M., Khoruzhaya T.A., Minina L.I., Mironova T.V. Vliyanie megapolisa na kachestvo vody bol'shoi reki (na primere g. Rostov-na-Donu) [Influence of a metropolis on the water quality of a large river (on the example of Rostov-on-Don)]. *Vestn. Yuzhnogo nauchnogo tsentra RAN*. 2009, vol. 5, No. 4, pp. 62-70.

3. Matishov G.G., Stepan'yan O.V., Khar'kovskii V.M., Startsev A.V., Bulysheva N.I., Semin V.V., Soier V.G.,

Krenea K.V., Glushchenko G.Yu., Svistunova L.D. Osobennosti vodnoi ekosistemy Nizhnego Dona v pozdneosennoi period [Features of the water ecosystem of the Lower Don in the late autumn period]. *Vodnye resursy*. 2016, vol. 43, No. 6, pp. 620-632.

4. RD 52.24.643-2002. *Metod kompleksnoi otsenki stepeni zagryaznennosti poverkhnostnykh vod po gidrokhimicheskim pokazatelyam* [Method for the integrated assessment of the degree of contamination of surface waters by hydrochemical indicators]. Rosgidromet. Saint Petersburg: Gidrometeoizdat, 2003, 55 p.

5. Nemirovskaya I.A. *Uglevodorody v okeane (sneg - led - voda - vzves' - donnye osadki)* [Hydrocarbons in the ocean (snow - ice - water - suspended matter - bottom sediments)]. Moscow: Nauchnyi mir, 2004, 328 p.

6. Kuznetsov A.N., Fedorov Yu.A. Neftyanye komponenty v ust'voi oblasti r. Don i v Azovskom more (rezultaty mnogoletnikh issledovaniy) [Oil components in the estuary region of the river Don and in the Sea of Azov (the results of many years of research)]. *Vodnye resursy*. 2014, vol. 41, No. 1, pp. 49-59.

7. Patin S.A. *Ekologicheskie problemy osvoeniya neftegazovykh resursov morskogo shel'fa* [Ecological problems of development of oil and gas resources of the sea shelf]. Moscow: Izd-vo VNIRO, 1997, 349 p.

8. Nikanorov A.M., Stradomskaya A.G. *Problemy neftyanogo zagryazneniya presnovodnykh ekosistem* [Problems of oil pollution of freshwater ecosystems]. Rostov-on-Don: NOK, 2008, 222 p.

9. Korablina I.V., Katalevskii N.I., Gevorkyan Zh.V., Klenkin A.A. [A modern estimate of the content of heavy metals in the bottom sediments of the estuary of the river Temernik and adjoining water area of the river Don]. *Osnovnye problemy rybnogo khozyaistva i okhrany rybokhozyaistvennykh vodoemov Azovo-Chernomorskogo basseina* [The main problems of fisheries and protection of fishery water bodies of the Azov-Black Sea basin]. Collection of scientific papers (2010-2011 gg.). Rostov-on-Don: AzNIIRKh, 2011, pp. 237-241.

10. Klenkin A.A., Korpakova I.G., Pavlenko L.F., Temerdashev Z.A. *Ekosistema Azovskogo morya: antropogennoe zagryaznenie* [Ecosystem of the Azov Sea: anthropogenic pollution]. Rostov-on-Don; Krasnodar: AzNIIRKh, 2007, 324 p.

11. *Normativy kachestva vody vodnykh ob'ektov rybokhozyaistvennogo znacheniya, v tom chisle normativy predel'no dopustimykh kontsentratsii vrednykh veshchestv v vodakh vodnykh ob'ektov rybokhozyaistvennogo znacheniya* [Water quality standards for water bodies of fishery importance, including standards for maximum permissible concentrations of harmful substances in the waters of water bodies of fishery importance]. Moscow: Izd-vo VNIRO, 2011, 257 p.

12. GN 2.1.7.2041-06. *Predel'no dopustimye kontsentratsii (PDK) khimicheskikh veshchestv v pochve* [Maximum permissible concentration (MPC) of chemical substances in the soil]. Moscow, 2006.

УДК 504.433:622(470.61)

DOI 10.23683/0321-3005-2017-3-1-100-107

ВЛИЯНИЕ УГЛЕДОБЫЧИ В ДОНБАССЕ НА ПОДЗЕМНЫЕ И ПОВЕРХНОСТНЫЕ ВОДЫ

© 2017 г. Г.Ю. Склярёнок¹, В.Е. Закруткин¹, А.Р. Зубов², Л.Г. Зубова², О.С. Решетняк¹

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

²Луганский национальный университет им. В. Даля, Луганск, Украина

INFLUENCE OF THE COAL MINING IN THE DONBASS ON UNDERGROUND AND SURFACE WATER

G.Yu. Sklyarenko¹, V.E. Zakrutkin¹, A.R. Zubov², L.G. Zubova², O.S. Reshetnyak¹

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

²Dahl Luhansk National University, Luhansk, Ukraine

Склярёнок Григорий Юрьевич – кандидат геолого-минералогических 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: gysklyarenko@sfedu.ru

Grigory Yu. Sklyarenko - Candidate of Geology and Mineralogy, 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: gysklyarenko@sfedu.ru

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

Зубов Алексей Рэмович – доктор сельскохозяйственных наук, заведующий кафедрой гидрометеорологии, Луганский национальный университет им. В. Даля, ул. Ватутина, 1а, г. Луганск, 91034, Украина, e-mail: zubov-home@mail.ru

Alexey R. Zubov - Doctor of Agricultural Sciences, Head of the Department of Hydrometeorology, Dahl Luhansk National University, Vatutina St., 1a, Luhansk, 91034, Ukraine, e-mail: zubov-home@mail.ru

Зубова Лилия Григорьевна – доктор технических наук, профессор, кафедра гидрометеорологии, Луганский национальный университет им. В. Даля, ул. Ватутина, 1а, г. Луганск, 91034, Украина, e-mail: kaf_gidrometeor@mail.ru

Lilia G. Zubova - Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Hydrometeorology, Dahl Luhansk National University, Vatutina St., 1a, Luhansk, 91034, Ukraine, e-mail: kaf_gidrometeor@mail.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

Донецкий бассейн – одна из старейших углепромышленных территорий, разрабатываемая на протяжении более двухсот лет. Длительная угледобыча привела к серьезным нарушениям природной среды этого региона. Особенно сильно негативные последствия сказались на состоянии природных вод. В настоящей статье показано, что главными источниками загрязнения подземной и поверхностной гидросферы Донбасса являются сильноминерализованные техногенные шахтные воды, гидравлически и химически связанные с природными водами, и стоки с породных отвалов – террикоников. Произведено изучение пространственного распределения террикоников в пределах бассейнов рек Донбасса. На основе химического анализа состава отвальной породы и поверхностных стоков с них, а также параметров этого стока рассчитаны объемы загрязняющих веществ, поступающих в бассейны рек. Установлены основные поллютанты, главным образом тяжелые металлы, и рассчитаны показатели качества природных вод. Масштабы воздействия шахтных вод и поверхностных стоков на них чрезвычайно высоки: подземные и речные воды региона характеризуются очень плохим качеством. Оно колеблется от категории «очень загрязненная» до «грязная и очень грязная». Всё это требует разработки действенных мер улучшения экологической ситуации.

Ключевые слова: Донбасс, угледобыча, терриконики, поверхностный сток, поллютанты, речные бассейны, шахтные воды, загрязнение воды.

Donbass is one of the oldest coal mining areas, developed over more than two hundred years. Long-term coal mining has led to serious disruptions of the natural environment of this region. Especially severely negative consequences have affected the state of natural waters. It is shown that the main pollutants of the Donbass underground and surface hydrosphere are highly mineralized technogenic mine waters hydraulically and chemically related to natural waters, and effluents from waste heaps - terricones. A study was made of the spatial distribution of terricones within the basins of the Donbass river. Based on the chemical analysis of the composition of the waste rock and surface runoff from them, as well as the parameters of this runoff, the volumes of pollutants entering the river basins were calculated. The main pollutants, mainly heavy metals, have been established, and indicators of the quality of natural waters have been calculated. The scale of the impact of mine waters and surface runoff on them is extremely high: the underground and river waters of the region are characterized by very poor quality. It ranges from "very polluted" to "dirty and very dirty". All this requires the development of effective measures to improve the environmental situation.

Keywords: Donbass, coal mining, terricones, surface runoff, pollutants, river basins, mine waters, water pollution.

Подземная добыча угля на территории Донбасса производится уже более 200 лет. Шахтные комплексы изменяют до неузнаваемости естественные ландшафты [1]. На месте естественных, пусть и не очень богатых растительностью, степных ландшафтов образуются техногенные, избилующие прудами-отстойниками, производственными зданиями, террикониками. Исторически сложилось так, что объекты угольной промышленности в Донецком бассейне являются градообразующими, а практически весь регион превратился в перенасыщенную антропогенную зону. Любое проявление природной или техногенной опасности может стать катастрофическим [2]. Именно поэтому защита и восстановление окружающей среды в регионе, обеспечение экологической безопасности являются чрезвычайно актуальными.

Особое внимание как с экологической, так и с социальной и экономической точек зрения привлекает состояние поверхностных и подземных вод на углепромышленных территориях. Природные воды подвержены существенному влиянию угледобычи:

– при шахтной добыче из-за откачки подземных вод из шахт существенно меняются режим и баланс подземных вод;

– в горных выработках формируются техногенные высокоминерализованные шахтные воды;

– откачанные шахтные воды после недостаточной очистки попадают в поверхностные водотоки, неся большое количество растворенных веществ, главным образом тяжелых металлов;

– на земной поверхности после обогащения угля формируются отвалы пустой породы, которая легко окисляется при взаимодействии с атмосферным воздухом и выпадающими осадками. А высокотоксичные продукты окисления смываются в реки, попадают в почвы, просачиваются в грунтовые воды.

В условиях засушливого климата региона население испытывает дефицит чистой питьевой воды, поэтому вышеперечисленные проблемы требуют глубокого изучения и решения.

Природные подземные воды Донбасса характеризуются следующими особенностями химического

состава: в зоне свободного водообмена (до глубины 200–700 м) преобладают гидрокарбонатные маломинерализованные воды, в зоне затрудненного водообмена (до глубины 1500–2000 м) – гидрокарбонатно-сульфатные и сульфатные, в зоне застойных вод (до глубины более 2000–2500 м) – хлоридно-сульфатные и хлоридные высокоминерализованные воды и рассолы. По катионному составу самыми распространенными являются воды натриево-кальциево-магниевые и натриево-кальциевые, в меньшей степени – кальциево-магниевые, натриевые, кальциевые, натриево-магниевые, и чрезвычайно редко встречаются воды чисто магниевые типа [3].

При взаимодействии с рудничной атмосферой, горными породами, угольным шламом и пылью подземные воды сильно обогащаются взвешенными частицами, из слабощелочных становятся кислыми (рН достигает 2–3 на 15 % шахт), из пресных и солоноватых с минерализацией от 0,2 до 3 г/л превращаются в соленые с минерализацией 5–30 г/л и очень жесткие. Шахтные воды неглубоких шахт почти все без исключения агрессивны по содержанию сульфат-иона, а в глубоких горизонтах агрессивны по временной жесткости [3]. Таким образом, подземные воды, превращаясь в шахтные, могут менять класс, семейство, род, вид, подвид, кислотно-щелочные условия, минерализацию, содержание растворенного органического вещества, ионный состав и т.д., что переводит их в разряд вод, резко противоречащих естественным условиям [4].

В качестве примера в табл. 1 приведена оценка загрязнения тяжелыми металлами вод одной из типичных шахт Центрального Донбасса – шахты им. Я.Ф. Мельникова ОАО «Лисичанскуголь».

Содержание тяжелых металлов в шахтной воде определено с помощью приближенно-количественного эмиссионного спектрального анализа по методике ИМП (Симферополь) спектрографом СТЭ-1 с приставкой УСА-6. Категории качества воды определяли по системе экологической оценки качества поверхностных вод суши и эстуариев [5].

Таблица 1

**Оценка загрязнения тяжелыми металлами вод шахты им. Я.Ф. Мельникова
 / Assessment of heavy metal contamination of the mine waters Melnikov coal mine**

Химический элемент	Фактическое содержание, мкг/дм ³	Категория качества воды	Экологическая оценка	Степень загрязнения
Pb	3,73	III	Достаточно хорошая	Достаточно чистая
Cu	74,6	VII	Очень плохая	Сильно загрязнена
Ni	7,46	III	Достаточно хорошая	Достаточно чистая
Cr	37,3	VI	Плохая	Загрязнена

Восстановительные мероприятия заключаются в очистке, которая является малоэффективной, так как используемые в угольной отрасли вертикальные и горизонтальные отстойники способствуют лишь частичному восстановлению качества вод. И такие почти неочищенные воды далее сбрасываются в поверхностные водотоки. Все реки края равнинные, степные. Пополняют свои запасы за счет зимних осадков и тающего снега (на 65–75 %), а также летне-осенних дождей (25 %). За счет подземных вод пополнение рек незначительное, в пределах 5–10 % [6]. Реки Донбасса относятся к сульфатному классу и характеризуются повышенной минерализацией (от 500 до 1000 мг/л). Из катионов главную роль играет кальций [7].

Установлено, что на долю угольной промышленности приходится 55–70 % всех веществ, загрязняющих водоемы региона. Значительное загрязнение дают шахтные воды. За последние 50 лет их сброс в речную сеть Донбасса увеличился с 1,5 до 25,5 м³/с, а солевой нос – с 260 до 6900 т/сут, т.е. в 27 раз [8].

Такое влияние испытали, в частности, малые реки Восточного Донбасса, относящиеся к бассей-

нам рек Тузлов и Северский Донец [9, 10]. Минерализация речных вод варьирует в широких пределах – от 876 до 6094 мг/дм³. В анионном составе вод доминируют сульфат-ионы, в катионном – натрий и калий. Важно отметить, что речные воды бассейна Тузлова заметно (в 1,4–2,0 раза) превосходят водотоки бассейна Северского Донца по содержанию практически всех макрокомпонентов (табл. 2). Это может свидетельствовать о неодинаковой техногенной нагрузке, которую испытывают речные экосистемы этих двух бассейнов.

В микроэлементном составе речных вод (табл. 3) явно доминируют Sr, Fe, Al, Mn, в меньшей степени Li. При этом максимальное содержание Sr составляет 8,33 мг/дм³ (р. Аюта), а обычное лежит в пределах 2–4 мг/дм³. Концентрации Fe, Al, Mn и Li заметно ниже (в среднем для рек соответственно 0,09–1,49; 0,10–0,71; 0,11–1,01; 0,02–0,31 мг/дм³), а остальных элементов (Zn, Cu, Be) – минимальны (соответственно сотые, тысячные и десятитысячные доли мг/дм³). Как и следовало ожидать, реки бассейна Тузлова превосходят реки бассейна Северского Донца по содержанию большинства микроэлементов.

Таблица 2

**Характеристика поверхностных вод Восточного Донбасса по содержанию макрокомпонентов [10]
 / Characteristics of the Eastern Donbass surface waters according to the macrocomponents content [10]**

Na ⁺ +K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	M*
Бассейн Тузлова					
624 (3,1)	276 (1,5)	126 (2,5)	341 (0,9)	2148 (4,3)	4110 (4,11)
Бассейн Северского Донца					
293 (1,5)	144 (0,8)	59 (1,2)	243 (0,7)	851 (1,7)	2060 (2,06)

Примечание. * – минерализация воды, мг/дм³; приведены средние значения концентраций, мг/дм³, в скобках – кратность превышения ПДК.

Таблица 3

**Характеристика поверхностных вод Восточного Донбасса по содержанию микрокомпонентов [10]
 / Characteristics of the Eastern Donbass surface waters according of the microcomponents content [10]**

Fe	Al	Be	Li	Mn	Cu	Sr	Zn
Бассейн Тузлова							
0,51 (1,7)	0,49 (2,5)	0,0006 (3,0)	0,17 (5,8)	0,35 (3,5)	0,004 (4,0)	4,64 (0,7)	0,05 (0,05)
Бассейн Северского Донца							
0,54 (1,8)	0,38 (1,9)	0,0006 (3,0)	0,10 (3,5)	0,23 (2,3)	0,004 (4,0)	2,87 (0,4)	0,04 (0,04)

Примечание. Приведены средние значения, мг/дм³, в скобках – кратность превышения ПДК.

Вместе с тем выявлено, что состав компонентов – загрязнителей шахтных вод в значительной степени соответствует набору типоморфных элементов в подземных и речных водах региона. Дополнитель-

ным аргументом в пользу такого вывода служат геохимические спектры подземных, речных и шахтных вод на рис. 1. Как видно, эти спектры имеют очень схожий ход изменения.

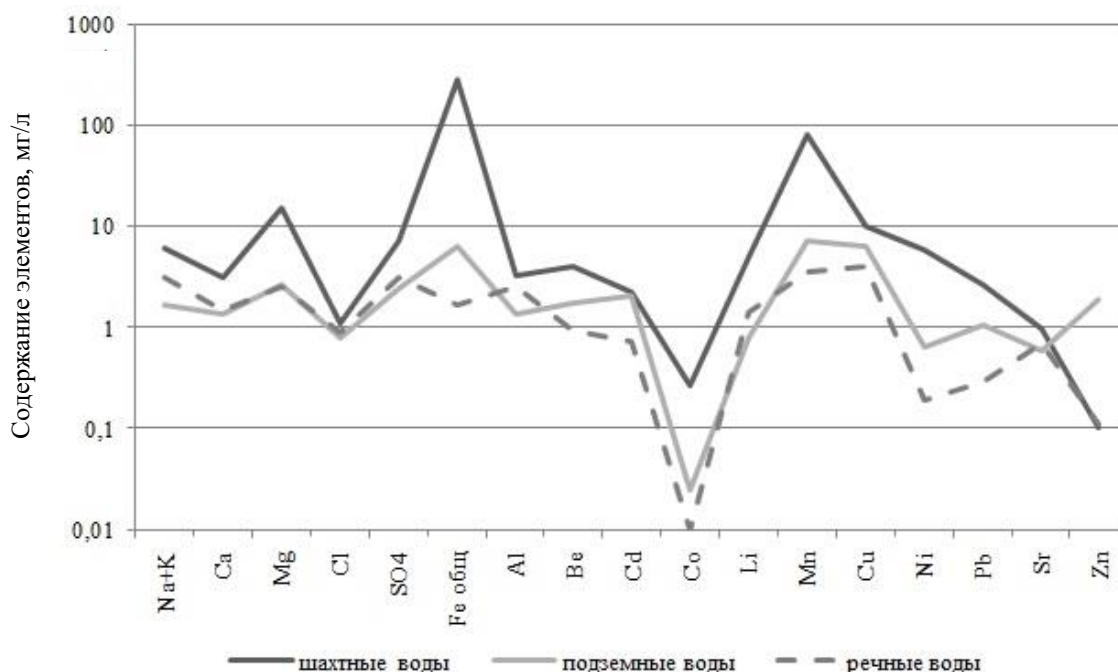


Рис. 1. Геохимические спектры шахтных, подземных и речных вод Восточного Донбасса (шкала логарифмическая) / Fig. 1. Geochemical spectra of mine, underground and river waters of the Eastern Donbass (logarithmic scale)

Изменение химического состава речных вод не могло не отразиться на их качестве, которое остается достаточно плохим. В табл. 4 приведены обобщенные за период 2010–2015 гг. характеристики качества поверхностных вод (критические показатели загрязненности воды (КПЗ) и класс качества) Восточного Донбасса в пределах бассейнов Тузлова и Северского Донца.

Как видно из данных табл. 4, для большинства рек в бассейне Тузлова (Атюхта и Кадамовка, Тузлов, нижние участки рек Большой и Малый Несветай, Аюта) качество воды остается стабильно низким, соответствуя 5-му классу. Из широкого перечня загрязняющих веществ чаще всего в разряд КПЗ в бассейне Тузлова попадали такие ингредиенты, как Na^+ , SO_4^{2-} , Fe, Al, Mn, Cu, Sr, реже ионы магния, минерализация воды и в единичных случаях – Zn и Be.

В бассейне Северского Донца для половины исследуемых рек (Большая Гнилуша, нижние участки рек Кундрючья и Лихая) качество воды также остается стабильно низким (5-й класс качества). Здесь в перечне КПЗ чаще всего оказывались такие ингредиенты, как SO_4^{2-} , Fe, Al, Mn, Cu, Sr, в половине случаев – Be и в единичных случаях ионы Na^+ и Mg^{2+} .

Еще одним следствием длительной добычи каменного угля является большое количество отвалов пустой породы – терриконов, которых на всей территории Донбасса насчитывается более 1500 (рис. 2).



Рис. 2. Отвалы пустой породы, Донбасс / Fig. 2. Dumps of waste rock, Donbass

Таблица 4

**Характеристика качества поверхностных вод Восточного Донбасса (2010–2015 гг.)
/ Characteristics of the surface water quality of the Eastern Donbass (2010-2015)**

Река	КПЗ воды	Класс качества	Степень загрязненности воды
Бассейн Тузлова			
Тузлов	Na ⁺ , Mg ²⁺ , SO ₄ ²⁻ , Fe, Al, Mn, Cu, Sr	5-й	Стабильно экстремально грязная
Большой Неветай	Na ⁺ , Mg ²⁺ , SO ₄ ²⁻ , Fe, Σ _и , Al, Be, Mn, Cu, Sr	5-й	Стабильно экстремально грязная
Малый Неветай	Na ⁺ , Mg ²⁺ , SO ₄ ²⁻ , Σ _и , Fe, Al, Mn, Cu, Sr	5-й	Стабильно экстремально грязная
Грушевка	Na ⁺ , Mg ²⁺ , SO ₄ ²⁻ , Fe, Al, Mn, Cu, Sr	5-й	Стабильно экстремально грязная
Аюта	Na ⁺ , Mg ²⁺ , SO ₄ ²⁻ , Fe, Σ _и , Al, Be, Mn, Cu, Sr	5-й	Стабильно экстремально грязная
Атюхта	Na ⁺ , Mg ²⁺ , SO ₄ ²⁻ , Fe, Σ _и , Al, Be, Mn, Cu, Sr, Zn	5-й	Стабильно экстремально грязная
Кадамовка	Na ⁺ , Mg ²⁺ , SO ₄ ²⁻ , Σ _и , Fe, Al, Mn, Cu, Sr	5-й	Стабильно экстремально грязная
Бассейн Северского Донца			
Северский Донец	SO ₄ ²⁻ , Fe, Al, Be, Mn, Cu, Sr	4 «в, г»	Стабильно очень грязная
Большая Каменка	SO ₄ ²⁻ , Fe, Al, Be, Mn, Cu, Sr	5-й – 4 «б, в»	Переходящая от экстремально грязной к грязной и очень грязной
Малая Каменка	SO ₄ ²⁻ , Fe, Mn, Cu, Be, Sr	4 «б» – 5-й	Переходящая от грязной к экстремально грязной
Калитва	SO ₄ ²⁻ , Fe, Al, Be, Mn, Cu, Sr	4 «в» – 4 «а, б»	Переходящая от очень грязной к грязной
Лихая	Mg ²⁺ , SO ₄ ²⁻ , Fe, Al, Be, Mn, Cu, Zn	4 «в» – 5-й	Переходящая от очень грязной к экстремально грязной
Быстрая	SO ₄ ²⁻ , Al, Fe, Be, Mn, Cu, Sr	4 «а, б»	Стабильно грязная и очень грязная
Кундрючья	Na ⁺ , SO ₄ ²⁻ , Fe, Al, Be, Mn, Cu, Sr	5-й	Стабильно экстремально грязная
Большая Гнилуша	Na ⁺ , Mg ²⁺ , SO ₄ ²⁻ , Fe, Al, Be, Mn, Cu, Sr	5-й	Стабильно экстремально грязная

Каждый из них занимает площадь от 20 000 до 100 000 м², имеет высоту 50–100 м и более, угол откоса около 37°. Такая большая крутизна склонов способствует их подверженности катастрофической водной эрозии. Смыв породы варьирует от 720 до 4830 т в год с отвала.

Физико-химическая миграция характеризуется интенсивным выносом сернокислыми водными

потоками водорастворимых простых катионов (Sr, Li, Zn, Cu, Pb, Cd, Ba, Hg, Ag, Y, La, Ca) и комплексных анионов (P, V, Mn, Cr). В табл. 5 представлены результаты спектрального анализа проб отвальной породы и стоков. В табл. 6 приведена характеристика размещения породных отвалов угольных шахт в Луганской области в разрезе бассейнов рек.

Таблица 5

Особенности взаимосвязи химического состава отвальной породы и поверхностного водного стока по результатам спектральных анализов / Peculiarities of the relationship between the chemical composition of the waste rock and surface runoff from the results of spectral analyzes

Элемент	Кларк, %	Содержание, %	
		Отвальная порода	Поверхностный сток
Pb	2·10 ⁻³	0,0015	0,0002
Cu	0,01	0,003	0,003
Ti	0,58	0,3	0,03
V	0,016	0,01	0,015
Mn	0,08	0,05	0,150
Ni	0,018	0,005	0,015
Cr	0,033	0,007	0,005
Co	0,01	0,001	0,015
Sn	N·10 ⁻⁴	0,0007	0,0002
Li	0,004	0,007	0,005
Zn	0,004	0,007	0,03

Таблица 6

Характеристика размещения породных отвалов / Characteristics of the placement of waste heaps

Река	Длина в пределах области, км	Площадь водосбора, км ²	Кол-во отвалов	Площадь, га		Кол-во пород в отвалах, млн м ³	Кол-во породы на водосборе, тыс. м ³ /км ²
				под отвалами	поверхности отвалов		
Лугань	196	3245	73	703,0	880,2	127,3	39,2
Б. Каменка	110	1425	78	436,1	546,0	85,80	60,2
Нагольная	55	948	59	228,3	285,8	48,63	51,3
Должик	35	768	57	326,8	409,2	64,65	84,2
Камышная	70	1041	37	188,8	236,4	38,45	36,9
С. Донец	265	306	36	176,1	220,5	64,28	210,1
Лозовая	63	1097	12	94,8	118,7	35,60	32,5
Всего	794	8830	352	2153,9	2696,7	464,7	
В среднем				6,12	7,66	1,32	52,6

Ниже представлены результаты эрозионно-гидрологических расчетов, выполненных для отвалов. В формулах использованы следующие обозначения: $h_{P\%}^*$ – максимальный суточный слой талого стока с вероятностью превышения $P\%$, мм; $a_{P\%}$ – максимальная часовая интенсивность водоотдачи снега, мм/ч; ϕ' – коэффициент редуции, учитывающий снижение максимального модуля стока с увеличением площади водосбора; $h_{P\%}$ – слой стока, мм, за период весеннего снеготаяния или выпадения жидких осадков с обеспеченностью (вероятностью превышения) $P\%$; $W_{P\%}$ – объем стока; ϕ – коэффициент стока; $H_1\%$ – суточный слой осадков с вероятностью превышения $P=1\%$, мм; $\lambda_{P\%}$ – коэффициент перехода от вероятности превышения 1 или 50 % к расчетным вероятностям превышения $P\%$; $q_{P\%}$ – максимальный модуль стока с вероятностью превышения $P\%$ м³/(с·км²); $M_{s,P\%}$ – модуль стока наносов за период весеннего снеготаяния или за дождевой паводок с обеспеченностью $P\%$, т/га; M_s – средний модуль годового стока наносов, т/га; h_s – слой смывтой породы за расчетный период, мм; W_s – ее объем, м³.

Тип ручейковой сети определяли по данным натурных обследований. Расчет смыва породы с откосов отвалов в виде модуля стока наносов за период весеннего снеготаяния рассчитывали по формуле [11] $M_{s,P\%} = h_{P\%} a b k_1$, где $h_{P\%}$ – слой стока заданной обеспеченности, мм; $M_{s,P\%}$ – модуль стока наносов той же обеспеченности, т/га; a, n – параметры, зависящие от типа ручейковой сети на склоне; b – коэффициент, учитывающий состояние поверхности; k_1 – коэффициент, учитывающий крутизну склона $I_{ск}$, при $I_{ск} > 100\%$ $k_1 = 0,01 I_{ск}$; при $I_{ск} < 100\%$ k_1 принимается равным единице.

Объем смывтой породы вычисляется по формуле [11] $W_s, P\% = M_s F$, где M_s – модуль смыва за период таяния снега (модуль стока наносов за дождь); F – площадь склона.

Модуль ливневого стока наносов рассчитывали по формуле [11] $M_{s,P\%} = h_{P\%} a_1 b k_1$, где $h_{P\%}$ – слой дождевого стока заданной обеспеченности $P\%$, мм; $M_{s,P\%}$ – модуль стока наносов той же обеспеченности, т/га; a_1 – параметр, зависящий от типа ручейковой сети на склоне и от растительного покрова.

Обеспеченность дождевого стока принималась равной 10 %; параметр a_1 принят равным (для II типа ручейковой сети) 4,9; $b = 1,0$.

Значения модуля стока наносов за периоды талого и дождевого стока раздельно и в сумме представлены в табл. 7.

Таблица 7

Модули стока наносов заданной обеспеченности / Modules of sediment discharge of a given security

$P\%$	$M_{s,P\%л}$, т/га	$M_{s,P\%в.п.}$, т/га	$\sum M_s$, т/га
5	3654	2,3	3656,3
25	1323	0,6	1323,6

На основании полученных значений в табл. 7 произведены расчеты поступления загрязняющих веществ в окружающую среду и в бассейны рек со смывтой с отвалов угольных шахт породой в Луганской области (табл. 8, 9).

Таким образом, основной вклад в осложнение экологической ситуации в Донбассе вносят предприятия угольной промышленности. При этом особенно высокую техногенную нагрузку испытывают поверхностные и подземные воды региона. Наиболее уязвимыми оказались малые реки, многие из которых утратили свои естественные природные функции, произошла массовая гибель фито- и зоопланктона, стало невозможным использование поверхностных вод не только для питьевых нужд населения, но и для хозяйственных целей. Всё это требует разработки и реализации действенных мер, направленных на предотвращение (или минимизацию) негативного антропогенного воздействия на поверхностную и подземную гидросферы данного региона, оздоровление здесь в целом экологической обстановки.

Таблица 8

Поступление загрязнителей с отвалов в окружающую среду / Release of pollutants from dumps into the environment

Элемент	Содержание в отвальной породе, %	Поступление в окружающую среду, т		
		с 1 га поверхности отвала	с одного отвала	со всех отвалов
Ti	0,3	8,58	65,72	23134
P	0,07	2,00	15,32	5393
Mn	0,05	1,43	10,95	3856
Ba	0,03	0,86	6,59	2319
Zr	0,02	0,57	4,37	1537
V	0,01	0,29	2,22	782
Cr	0,007	0,20	1,53	539
Li	0,007	0,20	1,53	539
Zn	0,007	0,20	1,53	539
Ni	0,005	0,14	1,07	378
Cu	0,003	0,086	0,659	232
Pb	0,0015	0,043	0,329	116
Y	0,0015	0,043	0,329	116
Ga	0,001	0,029	0,222	78,2
Co	0,001	0,029	0,222	78,2
La	0,001	0,029	0,222	78,2
Sc	0,001	0,029	0,222	78,2
Sn	0,0007	0,020	0,153	53,9
W	0,0003	0,008	0,061	21,6
Ge	0,0002	0,006	0,046	16,2
Bi	0,0002	0,006	0,046	16,2
Be	0,0002	0,006	0,046	16,2
Nb	0,0002	0,006	0,046	16,2
Mo	0,0002	0,006	0,046	16,2
Hg	0,00001	0,0003	0,002	0,8
Сумма	0,518	14,81	113,5	39952

Таблица 9

Поступление загрязнителей с отвалов в бассейны рек, кг/км² / Release of pollutants from dumps into river basins, kg / km²

Элемент	Реки						
	Лугань	Б. Каменка	Нагольная	Должик	Камышная	С. Донец	Лозовая
Ti	1479	3595	4088	4876	2333	7729	719
P	345	838	953	1137	544	1802	168
Mn	246	599	681	813	389	1288	120
Ba	148	360	410	489	234	775	72,1
Zr	98,3	239	272	324	155	514	47,8
V	50,0	121	138	165	78,8	261	24,3
Cr	34,4	83,7	95,2	114	54,3	180	16,7
Li	34,4	83,7	95,2	114	54,3	180	16,7
Zn	34,4	83,7	95,2	114	54,3	180	16,7
Ni	24,1	58,5	66,6	79,4	38,0	126	11,7
Cu	14,8	36,0	41,0	48,9	23,4	77,5	7,2
Pb	7,40	18,0	20,5	24,4	11,7	38,7	3,6
Y	7,40	18,0	20,5	24,4	11,7	38,7	3,6
Ga	5,00	12,1	13,8	16,5	7,9	26,1	2,4
Co	5,00	12,1	13,8	16,5	7,9	26,1	2,4
La	5,00	12,1	13,8	16,5	7,9	26,1	2,4
Sc	5,00	12,1	13,8	16,5	7,9	26,1	2,4
Sn	3,44	8,4	9,5	11,4	5,4	18,0	1,7
W	1,37	3,3	3,8	4,5	2,2	7,2	0,7
Ge	1,04	2,5	2,9	3,4	1,6	5,4	0,5
Bi	1,04	2,5	2,9	3,4	1,6	5,4	0,5
Be	1,04	2,5	2,9	3,4	1,6	5,4	0,5
Nb	1,04	2,5	2,9	3,4	1,6	5,4	0,5
Mo	1,04	2,5	2,9	3,4	1,6	5,4	0,5
Hg	0,05	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,0
Всего	2553	6207	7059	8420	4029	13345	1242

Литература

1. Закруткин В.Е., Иваник В.М., Гибков Е.В. Эколого-географический анализ рисков реструктуризации угольной промышленности в Восточном Донбассе // Изв. РАН. Сер. географическая. 2010. № 5. С. 94–102.

2. Zakrutkin V.E., Sklyarenko G.Yu., Reshetnyak O.S., Gibkov E.V., Rodina A.O. Environmental problems of coal mining territories (water pollution) // 16th International multidisciplinary scientific geoconference SGEM 2016. Vienna, Austria, 2016. P. 87–95.

3. Геология месторождений угля и горючих сланцев СССР. М. : Гос. науч.-техн. изд-во литературы по геологии и охране недр, 1963. Т.1. 1210 с.

4. Закруткин В.Е., Склярченко Г.Ю., Гибков Е.В. Особенности химического состава и степень загрязненности подземных вод углепромышленных районов Восточного Донбасса // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2014. № 4. С. 73–77.

5. Клименко М.О., Прищепка А.М., Вознюк Н.М. Мониторинг довкілля. Киев : Академія, 2006. 359 с.

6. Слюсарев А.А. Природа Донбасса. Донецк : Донбасс, 1988. 176 с.

7. Никаноров А.М. Гидрохимия. Л. : Гидрометеоздат, 1985. 232 с.

8. Региональные технические изменения геологической среды Донбасса под влиянием горных работ. Киев : Знання, 1997. 216 с.

9. Nazarenko O.V. Evaluation of surface water quality in the zone of influence of coal industry (East Donbass) // 16th International multidisciplinary scientific geoconference SGEM 2016. Hydrology and Water Resources: Forest ecosystems. Vienna, Austria, 2016. P. 113–119.

10. Закруткин В.Е., Гибков Е.В., Склярченко 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.

11. Сазонов И.Н., Штофель М.А., Пилипенко А.И. Система мероприятий против эрозии почв. Киев : Вища школа, 1984. 248 с.

References

1. Zakrutkin V.E., Ivanik V.M., Gibkov E.V. Ekologo-geograficheskii analiz riskov restrukturyzatsii ugol'noi promyshlennosti v Vostochnom Donbasse [Ecological and

geographical analysis of the risks of restructuring the coal industry in the Eastern Donbass]. *Izv. RAN. Ser. geograficheskaya*. 2010, No. 5, pp. 94-102.

2. Zakrutkin V.E., Sklyarenko G.Yu., Reshetnyak O.S., Gibkov E.V., Rodina A.O. Environmental problems of coal mining territories (water pollution). *16th International Multidisciplinary Scientific Geoconference SGEM 2016*. Vienna, Austria, 2016, pp. 87-95.

3. *Geologiya mestorozhdenii uglya i goryuchikh slantsev SSSR* [Geology of coal deposits and combustible shales of the USSR]. Moscow: Gos. nauch.-tekhn. izd-vo literatury po geologii i okhrane neдр, 1963, vol. 1, 1210 p.

4. Zakrutkin V.E., Sklyarenko G.Yu., Gibkov E.V. Osobennosti khimicheskogo sostava i stepen' zagryaznenosti podzemnykh vod uglepromyshlennykh raionov Vostochnogo Donbassa [Peculiarities of the chemical composition and the degree of contamination of groundwater in the coal mining regions of the Eastern Donbass]. *Izv. vuzov. Sev.-Kavk. region. Estestv. nauki*. 2014, No. 4, pp. 73-77.

5. Klimenko M.O., Prishchepa A.M., Voznyuk N.M. *Monitoring dovkillya* [Monitoring of the environment]. Kiev: Akademiya, 2006, 359 p.

6. Slyusarev A.A. *Priroda Donbassa* [The nature of Donbass]. Donetsk: Donbass, 1988, 176 p.

7. Nikanorov A.M. *Gidrokimiya* [Hydrochemistry]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1985, 232 p.

8. *Regional'nye tekhnicheskie izmeneniya geologicheskoi sredy Donbassa pod vliyaniem gornykh robot* [Regional technical changes in the geological environment of Donbass under the influence of mining operations]. Kiev: Znanie, 1997, 216 p.

9. Nazarenko O.V. Evaluation of surface water quality in the zone of influence of coal industry (East Donbass). *16th International Multidisciplinary Scientific Geoconference SGEM 2016. Hydrology and Water Resources: Forest ecosystems*. Vienna, Austria, 2016, pp. 113-119.

10. Zakrutkin V.E., Gibkov E.V., Sklyarenko G.Yu., Reshetnyak O.S. Sravnitel'naya otsenka kachestva poverkhnostnykh i podzemnykh vod Vostochnogo Donbassa po gidrokhimicheskim pokazatelyam [Comparative assessment of the quality of surface and groundwater in the Eastern Donbass in hydrochemical indicators]. *Izv. vuzov. Sev.-Kavk. region. Estestv. nauki*. 2016, No. 2, pp. 91-99.

11. Sazonov I.N., Shtofel' M.A., Pilipenko A.I. *Sistema meropriyatii protiv erozii pochv* [System of measures against soil erosion]. Kiev: Vishcha shkola, 1984, 248 p.

УДК 550.424.6

DOI 10.23683/0321-3005-2017-3-1-108-113

ЕСТЕСТВЕННЫЕ И ТЕХНОГЕННЫЕ РАДИОНУКЛИДЫ В ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ (НА ПРИМЕРЕ р. ДОН, ст. МАНЫЧСКАЯ)*

© 2017 г. Ю.А. Федоров¹, В.М. Ярославцев¹, И.В. Доценко¹

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

NATURAL AND TECHNOGENIC RADIONUCLIDES IN SEDIMENT CORES (THE CASE OF THE DON RIVER, MANYCHSKAYA VILLAGE)

Yu.A. Fedorov¹, V.M. Yaroslavtsev¹, I.V. Dotsenko¹

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

Федоров Юрий Александрович – доктор географических наук, профессор, главный научный сотрудник, заведующий кафедрой физической географии, экологии и охраны природы, Институт наук о Земле, Южный федеральный университет, ул. Зорге, 40, г. Ростов-на-Дону, 344090, Россия, e-mail: fedorov@sfedu.ru

Yuri A. Fedorov - Doctor of Geography, Professor, Main Researcher, Head of the Department of Physical Geography, Ecology and Environment, Institute of Earth Sciences, Southern Federal University, Zorge St., 40, Rostov-on-Don, 344090, Russia, e-mail: fedorov@sfedu.ru

Ярославцев Владислав Михайлович – магистрант, Институт наук о Земле, Южный федеральный университет, ул. Зорге, 40, г. Ростов-на-Дону, 344090, Россия, e-mail: yaroslavtsev.vlad@gmail.com

Vladislav M. Yaroslavtsev – Master Student, Institute of Earth Sciences, Southern Federal University, Zorge St., 40, Rostov-on-Don, 344090, Russia, e-mail: yaroslavtsev.vlad@gmail.com

Доценко Ирина Владимировна – кандидат географических наук, доцент, кафедра физической географии, экологии и охраны природы, Институт наук о Земле, Южный федеральный университет, ул. Зорге, 40, г. Ростов-на-Дону, 344090, Россия, e-mail: irinageo@mail.ru

Irina V. Dotsenko - Candidate of Geography, Associate Professor, Department of Physical Geography, Ecology and Environment Protection, Institute of Earth Sciences, Southern Federal University, Zorge St., 40, Rostov-on-Don, 344090, Russia, e-mail: irinageo@mail.ru

Изучены уровни концентраций и распределение удельной активности естественных (^{238}U , ^{232}Th , ^{40}K , ^{226}Ra , ^{234}Th) и техногенных (^{137}Cs и ^{241}Am) радионуклидов, ^{210}Pb , а также валового содержания свинца в донных отложениях излучины реки Дон в районе станицы Манычской. Расчет уравнений регрессии показал, что для удельной активности изотопов ^{234}Th и ^{232}Th наблюдался слабый тренд к снижению с глубиной, в то время как для ^{238}U он отсутствовал. Удельная активность ^{226}Ra проявила тенденцию к возрастанию с глубиной. Более тесная прямая связь с глубиной выявлена для удельной активности ^{40}K . Поведение ^{226}Ra и ^{40}K может быть объяснено повышением содержания глинистого материала в донных осадках с глубиной, которое имеет место при приближении к коренным отложениям ложа водотока. Показано, что депонированный в донных отложениях ^{210}Pb имеет как природное, так и техногенное происхождение, обусловленное его поступлением из атмосферы, а также в результате смыва почв и эмиссии из коренных пород ложа при радиоактивном распаде ^{222}Rn . Полигенный источник изотопа подтверждается тесной прямой связью между значением удельной активности $^{210}\text{Pb}_{\text{изб}}$ и валовым содержанием свинца. Анализ зависимости удельной активности ^{137}Cs и ^{241}Am от глубины показал отсутствие между ними значимой связи. ^{241}Am , как и ^{137}Cs , присутствует по всему разрезу донных отложений, что свидетельствует о поступлении ^{137}Cs и дочернего плутония-241 в реку Дон на протяжении длительного периода вплоть до настоящего времени. Значения удельной активности техногенных (искусственных) изотопов ^{137}Cs и ^{241}Am распределены по всему метровому разрезу донных осадков неравномерно. Присутствуют два пика удельной активности этих элементов, что связано с поступлением радионуклидов в результате черновыльской аварии, а также других событий регионального и глобального масштабов. Причем всплеск уровня удельной активности ^{241}Am расположен несколько ниже такового ^{137}Cs .

Ключевые слова: радионуклиды, естественные радионуклиды, техногенные (искусственные) радионуклиды, донные отложения, ^{238}U , ^{232}Th , ^{40}K , ^{226}Ra , ^{210}Pb , ^{234}Th , ^{137}Cs , ^{241}Am .

* Работа выполнена при поддержке проектов РФФИ № 15-05-04977 и «Ведущие исследователи на постоянной основе» № 5.5791.2017/6.7.

Authors have studied the levels of concentration and the specific activity distributions of natural (^{238}U , ^{232}Th , ^{40}K , ^{226}Ra , ^{234}Th) and technogenic (^{137}Cs and ^{241}Am) radionuclides, as well as total content of lead ^{210}Pb in sediment cores of the Don river bend. It was shown by the computing of regression equations that the specific activities of isotopes ^{234}Th and ^{232}Th demonstrated slow decreasing trend with depth, whereas ^{238}U did not. The specific activity of ^{226}Ra tended to grow with depth. The specific activity of ^{40}K had more straight close relation to the depth. The behaviour of ^{226}Ra and ^{40}K can be explained by increasing of the clay in sediment core with depth, which takes place at reaching core deposits in stream bed. It is indicated that the deposited in core sediments ^{210}Pb has both natural and technogenic origin caused by either income from atmosphere or soil erosion and emission from the bed rocks at radioactive decay of ^{222}Rn . Polygenetic isotope source is proven by straight close relationship between the value of specific activity of ^{210}Pb and the total content of lead. Analysis of relationship between specific activity of ^{137}Cs and ^{241}Am and the depth showed no any significant correlation. The presence of ^{241}Am as well as ^{137}Cs along whole cut points to permanent income of ^{137}Cs and daughter plutonium-241 into the Don river till the present time. The values of specific activity of technogenic (artificial) isotopes ^{137}Cs and ^{241}Am were distributed along the meter cut of sediment core inhomogeneously. There are two peaks of these elements specific activity corresponding to radionuclide income as a result of Chernobyl accident and also other regional and global events. Besides, the burst of ^{241}Am specific activity lies lower than that of ^{137}Cs .

Keywords: radionuclides, natural radionuclides, technogenic (artificial) radionuclides, bottom sediments, ^{238}U , ^{232}Th , ^{40}K , ^{226}Ra , ^{210}Pb , ^{234}Th , ^{137}Cs , ^{241}Am .

Актуальность исследований удельной активности естественных (ЕРН) и особенно техногенных радионуклидов (ТРН) заключается в их негативном воздействии на животные и растительные организмы. Особенно это относится к таким ТРН, имеющим исключительно искусственное происхождение, как цезий-137 (^{137}Cs) и америций-241 (^{241}Am), которые могут поступать в результате как локального, так и глобального массопереноса. Ростовская область находится в зоне так называемого ветрового коридора, через который осуществляется транспорт воздушных масс северо-восточных и восточных румбов. Так, по сведениям [1], в 2011 г. в приземном слое атмосферы РФ, в том числе Ростовской области (РО), произошло резкое увеличение объемной активности ^{137}Cs . Как установлено, это возрастание вызвано влиянием выбросов, связанных с катастрофой на АЭС «Фукусима-1». И хотя оно не превысило существующей допустимой нормы объемной активности ^{137}Cs , тем не менее представляется тревожным сам факт обнаружения фукусимского следа на территории РО. Донные осадки служат главным образом депонирующей средой и, следовательно, могут сохранять длительное время информацию об относительно недавних и прошлых событиях радиоактивного загрязнения [2–9].

Определение уровней удельной активности ^{137}Cs в почвах, а ^{210}Pb в атмосферном воздухе РО представлено в работах [10–14] для исследования проблемы загрязнения радионуклидами этих сред. Изучение распределения ЕРН и ТРН (^{210}Pb , ^{137}Cs и ^{241}Am) в донных осадках рек и водоемов Азово-Черноморского бассейна проводилось ранее [2, 3, 6, 9] главным образом с целью определения скоростей осад-

конакопления. Однако определение удельной активности ЕРН и ТРН в донных осадках представляет важное значение не только для достижения этой цели, но и для выявления современного уровня радиоактивного загрязнения водных объектов, его генезиса, хронологии антропогенного воздействия и установления природного фона в региональных масштабах [2–5, 13]. Оригинальность настоящего исследования состоит в изучении удельной активности широкого спектра ЕРН и ТРН и валового содержания свинца по разрезу донных отложений р. Дон до глубины 1,0 м. При этом особый интерес представляет анализ данных по удельной активности ^{137}Cs и ^{241}Am и их связи с ЕРН.

^{241}Am образуется в результате деятельности человека, связанной с работой атомных энергетических и силовых установок, испытанием ядерного оружия, техногенных катастроф, производством и использованием ионизационных детекторов дыма (рис. 1).



Рис. 1. Источники поступления ^{241}Am в окружающую среду / Fig. 1. Sources of ^{241}Am in the environment

Объект, материалы и методы

Настоящая работа посвящена изучению распределения удельной активности широкого спектра радионуклидов в колонке донных отложений относительно глубокой скважины на станции отбора проб

(Ц1), расположенной в излучине р. Дон, в окрестностях станции Маньчской (рис. 2). Отбор проб донных отложений осуществлялся в затоне вблизи насосной станции, предназначенной для регулиро-

вания обводнения рисовых чеков. При помощи грунтовой трубки конструкции ГОИН отобрана колонка донных отложений мощностью 95 см. Она была разделена на 20 проб (табл. 1).

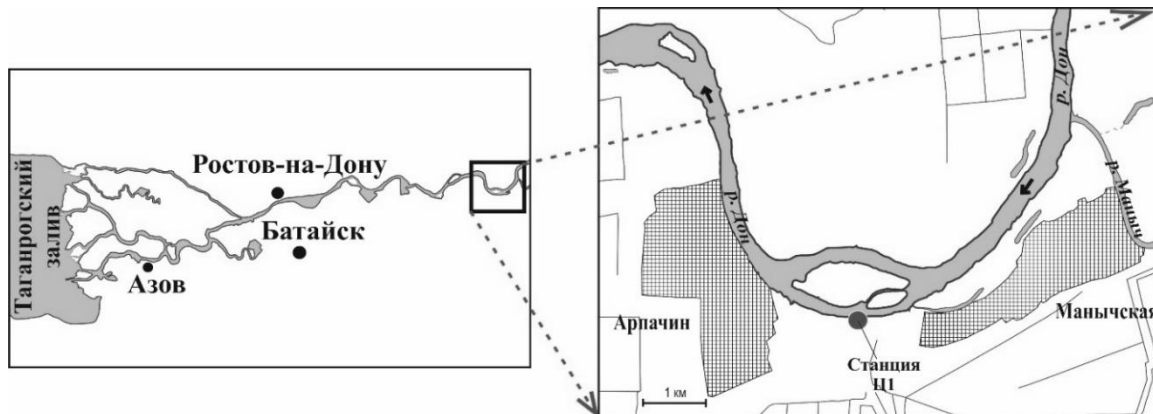


Рис. 2. Расположение станции Ц1 / Fig. 2. C1 station location

Таблица 1

Значения удельной активности ЕРН и ТРН в колонке донных отложений
 / The values of the specific activity of natural and artificial radionuclides in the column of bottom sediments

Глубина, см	Удельная активность, Бк/кг									Содержание, мг/г Pb
	²³⁸ U	²³⁴ Th	²³² Th	²²⁶ Ra	⁴⁰ K	²¹⁰ Pb	²¹⁰ Pb _{изб}	²⁴¹ Am	¹³⁷ Cs	
0,0–2,0	1,0	329,7	34,2	34,2	48,4	352,3	318,1	0,5	6,0	21,0
2,0–5,0	1,0	340,2	63,3	22,9	43,2	422,2	399,3	0,5	4,2	23,0
5,0–10,0	1,0	387,2	35,0	25,2	118,6	390,2	365,0	1,3	9,7	21,0
10,0–15,0	1,0	372,3	30,3	41,1	387,7	301,0	259,9	0,5	12,6	23,0
15,0–20,0	1,0	333,4	52,0	35,4	462,2	323,1	287,7	2,8	7,4	18,0
20,0–25,0	1,0	376,3	41,8	38,3	294,6	264,3	226,0	0,9	11,5	17,0
25,0–30,0	1,0	319,6	36,0	38,5	209,6	285,5	247,0	1,0	9,8	18,0
30,0–35,0	1,0	317,6	37,9	38,9	224,6	268,8	229,9	2,0	10,7	16,0
35,0–40,0	16,5	244,3	34,3	28,4	100,8	249,1	220,7	3,5	11,1	15,0
40,0–45,0	1,0	295,3	46,8	35,9	179,3	271,6	235,7	0,5	8,6	14,0
45,0–50,0	1,0	296,7	35,6	34,7	181,7	201,7	167,0	1,0	10,8	15,0
50,0–55,0	1,0	347,4	27,9	28,3	276,4	215,1	186,8	0,5	5,7	10,0
55,0–60,0	1,0	363,1	33,3	25,0	281,3	239,1	214,1	0,5	2,3	12,0
60,0–65,0	1,0	339,5	38,0	40,6	173,5	240,2	199,6	0,5	16,5	13,0
65,0–70,0	1,0	257,4	43,9	34,3	507,2	252,0	217,7	0,5	8,9	12,0
70,0–75,0	1,0	288,4	27,1	40,6	193,5	233,0	192,4	0,9	6,3	11,0
75,0–80,0	1,0	297,5	26,0	40,6	114,5	156,7	116,1	0,5	12,6	14,0
80,0–85,0	1,0	292,5	32,6	54,5	325,9	264,0	209,5	1,4	14,5	15,0
85,0–90,0	8,5	341,9	37,6	31,1	373,5	267,8	236,7	1,9	5,6	12,0
90,0–95,0	1,0	356,6	36,4	28,2	420,5	255,9	227,7	1,5	1,0	14,0

С помощью гамма-спектрометрического метода в лаборатории Ростовского государственного университета (ныне ЮФУ) применено послойное определение удельной активности следующих радионуклидов ²³⁸U, ²³²Th, ⁴⁰K, ²²⁶Ra, ²¹⁰Pb, ²³⁴Th, ¹³⁷Cs и ²⁴¹Am по методике, описанной в работах [2, 3, 13]. Погрешность определения радионуклидов составила не более 10–20%. Анализ проводился под руководством проф. М.Г. Давыдова аналитиком Е.А. Бураевой, которым авторы выражают благодарность. Расчет ²¹⁰Pb_{изб} («избыточного») производился путем вычитания из об-

щего ²¹⁰Pb, образовавшегося в результате распада ²²⁶Ra → ²²²Rn → ... → ²¹⁰Pb. Определение валового содержания свинца выполнено методом атомной абсорбции с погрешностью не более 5–10%. Донные отложения были представлены по всему разрезу глинистым илом от светло-серого до темно-серого цвета, с зеленоватым оттенком, небольшим содержанием растительных остатков и гнилостным запахом.

Расчет уравнений регрессии показал, что для удельной активности изотопов ²³⁴Th и ²³²Th наблюдался слабый тренд к снижению с глубиной (R=0,46

и 0,37), в то время как для ^{238}U он отсутствовал. Удельная активность ^{226}Ra показывала слабую тенденцию к возрастанию с глубиной. Более тесную прямую связь с глубиной ($R=0,61$) проявляла удельная активность ^{40}K . Поведение ^{226}Ra и ^{40}K может быть объяснено повышением содержания глинистого материала в донных осадках с глубиной при приближении к коренным отложениям ложа водотока. Была также рассчитана удельная активность $^{210}\text{Pb}_{\text{изб.}}$, поступающего в донные отложения исключительно через атмосферный канал. Полученные модели аппроксимации свидетельствуют о закономерной тенденции снижения удельной активности ^{210}Pb и $^{210}\text{Pb}_{\text{изб.}}$ с глубиной, что обусловлено его постоянным поступлением из атмосферы и последующим радиоактивным распадом. Особый интерес представляет изучение распределения по длине колонки донных отложений удельных активностей искусственных изотопов ^{137}Cs и ^{241}Am . ^{137}Cs образуется при ядерных реакциях, имеет относительно короткий период полураспада и хорошо связывается глинистыми частицами. ^{241}Am , как и ^{137}Cs , является ТРН. В донных осадках основная часть ^{241}Am образуется *in situ* из плутония-241, а другая поступает из атмосферы, выделяясь во время ядерного технологического цикла и при использовании в бытовых приборах. Поэтому концентрация ^{241}Am в донных отложениях, например Азовского моря, со временем возрастала, в то время как ^{137}Cs снижалась [3]. Анализ зависимости удельной активности ^{137}Cs и ^{241}Am от глубины показал отсутствие между ними значимой связи. ^{241}Am , как и ^{137}Cs , присутствует по всему разрезу, что свидетельствует о поступлении ^{137}Cs и плутония-241 в реку Дон на протяжении длительного периода вплоть до настоящего времени. Распределение удельной активности ^{241}Am по профилю отличалось еще большей изменчивостью.

Рассмотрим тесноту связей между удельными активностями ЕНР и ТНР (табл. 2). Искусственные изотопы ^{241}Am и ^{137}Cs характеризовались слабой корреляционной зависимостью ($R=0,2$), что было обусловлено асинхронностью образования и различной степенью их связи с песчано-глинистым материалом. ^{241}Am проявил значимую связь с удельной активностью природных радионуклидов ^{234}Th и ^{226}Ra ($R=0,429$ и $0,331$). Наибольшей теснотой характеризовалась связь удельной активности ^{241}Am с

Таблица 2

Значения коэффициентов корреляции (R) между содержанием радионуклидов / The values of correlation coefficients (R) between the content of radionuclides

	^{238}U	^{234}Th	^{232}Th	^{226}Ra	^{40}K	^{210}Pb	$^{210}\text{Pb}_{\text{изб}}$	^{241}Am	^{137}Cs
^{238}U	1,0								
^{234}Th	0,497	1,0							
^{232}Th	0,079	0,062	1,0						
^{226}Ra	0,263	0,268	0,340	1,0					
^{40}K	0,344	0,248	0,502	0,374	1,0				
^{210}Pb	0,095	0,428	0,614	0,474	0,572	1,0			
$^{210}\text{Pb}_{\text{изб.}}$	0,062	0,445	0,616	0,543	0,535	0,995	1,0		
^{241}Am	0,814	0,429	0,132	0,331	0,248	0,122	0,123	1,0	
^{137}Cs	0,264	0,316	0,246	0,684	0,136	0,292	0,362	0,2	1,0

таковой ^{238}U ($R=0,814$). Оба радионуклида могли поступать в водные объекты как через атмосферный канал в составе аэрозолей (микро- и наночастиц угольной пыли, золы), так и при разрушении берегов и смыве с почв при их синхронной эмиссии в процессе ядерного топливного цикла. В работе [15] доказано существование «горячих» (реакторных) америциевых микрочастиц, носителем которых являлся оксид урана. Выделяемый бытовыми и измерительными приборами ^{241}Am мог также сорбироваться на содержащих уран-238 частицах в атмосфере и воде с последующим осаждением в донные отложения. Не исключена также возможность его сорбции на частицах оксида урана *in situ* в процессе распада ^{241}Pu во время диагенеза донных осадков.

В табл. 2 приведены рассчитанные значения коэффициентов корреляции между удельной активностью ЕНР и ТНР в донных отложениях ст. Ц1.

Тесная связь установлена для пар $^{238}\text{U} - ^{234}\text{Th}$ ($R=0,497$), $^{40}\text{K} - ^{232}\text{Th}$ ($R=0,502$), ^{210}Pb ($R=0,572$), $^{210}\text{Pb}_{\text{изб.}}$ - ^{232}Th ($R=0,445$), $^{226}\text{Ra} - ^{40}\text{K}$ ($R=0,374$), ^{226}Ra и ^{232}Th ($R=0,340$). Удельная активность ^{137}Cs имела значимую связь с ^{234}Th , ^{226}Ra и ^{210}Pb , $^{210}\text{Pb}_{\text{изб.}}$ ($R=0,316$, $0,684$ и $0,292$, $0,362$). Зависимость между удельной активностью ^{238}U и ^{234}Th объясняется радиоактивным распадом материнского урана с образованием дочернего короткоживущего радионуклида. Природные изотопы ^{40}K , ^{226}Ra и ^{232}Th характеризуются склонностью к симбатному накоплению в глинистых минералах и живом и отмершем органическом веществе. Удельная активность ^{210}Pb , $^{210}\text{Pb}_{\text{изб.}}$ проявляет значимую связь с таковой ^{232}Th , ^{226}Ra , ^{40}K , ^{226}Ra и ^{232}Th .

Отметим, что ^{210}Pb попадает в донные осадки при поступлении из атмосферы свинца естественного и природно-антропогенного происхождения (продукты сгорания горючих полезных ископаемых, сажа, угольные частицы), а также ^{210}Pb как дочернего продукта распада радия-226. Полигенный источник изотопа подтверждается тесной прямой кор-

реляционной связью ($R=0,76$) между значением удельной активности $^{210}\text{Pb}_{\text{изб}}$ и валовым содержанием свинца (рис. 3), а также значимой регрессионной зависимостью от удельной активности ЕРН ^{232}Th , ^{226}Ra , ^{40}K , ^{226}Ra и ^{232}Th .

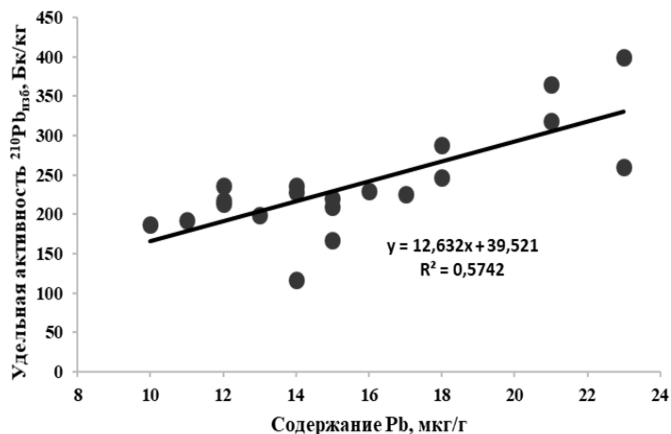


Рис. 3. Зависимость между удельной активностью $^{210}\text{Pb}_{\text{изб}}$ и валовым содержанием свинца / Fig. 3. The dependence between the specific activity $^{210}\text{Pb}_{\text{excess}}$ and total lead content

Очевидно, что эта связь с ЕРН обусловлена синхронным поступлением угольного вещества и продуктов его сгорания в окружающую среду. Как показано [13, 14], в углях Восточного Донбасса содержатся повышенные концентрации ^{232}Th , ^{226}Ra , ^{226}Ra и ^{232}Th , а ^{40}K в глинистых прослоях.

В результате выполненных исследований впервые выявлены закономерности распределения ЕРН (^{238}U , ^{232}Th , ^{40}K , ^{226}Ra , ^{234}Th) и ТРН (^{137}Cs и ^{241}Am), ^{210}Pb , а также валового содержания свинца в донных отложениях излучины реки Дон в районе ст. Манычской. Установлены источники и пути поступления в донные отложения реки Дон ЕРН и ТРН, а также причинно-следственные связи их распределения по метровому разрезу донных осадков. Значения удельной активности техногенных (искусственных) изотопов ^{137}Cs и ^{241}Am распределены по всему метровому разрезу донных осадков неравномерно. Присутствуют два пика удельной активности этих элементов, что обусловлено поступлением радионуклидов в результате чернобыльской аварии, а также других событий регионального и глобального масштабов. Отмечено, что всплеск уровня удельной активности ^{241}Am расположен несколько ниже такового ^{137}Cs . Полученные модели аппроксимации свидетельствуют о синхронной тенденции снижения удельной активности изотопов свинца ^{210}Pb и $^{210}\text{Pb}_{\text{изб}}$ с глубиной, что обусловлено его перманентным поступлением из атмосферы и последующим радиоактивным распадом. В этом же направлении наблюдается уменьшение валового содержания свинца.

Литература

1. Радиационная обстановка на территории России и сопредельных стран : ежегодник / под. ред. В.М. Шершакова, В.Г. Булгакова, И.И. Крышева, С.М. Вакуловского и др. М.; Обнинск : Тайфун, Росгидромет, 2015. 350 с.
2. Кузнецов А.Н., Федоров Ю.А. Изучение хронологии аккумуляции нефтяных компонентов в донных отложениях Азовского моря и Нижнего Дона с использованием радиоизотопов как трассеров // Геология морей и океанов : материалы XIX Междунар. науч. конф. (школы) по морской геологии. Т. 4. М. : Геос, 2011. С. 250–254.
3. Fedorov Yu.A., Kuznetsov A.N., Trofimov M.E. Sedimentation Rates in the Sea of Azov Inferred from Cs-137 and Am-241 Specific Activity // Doklady Earth Sciences, Russia-USA. 2008. Vol. 423, № 8. P. 1333–1334.
4. Fedorov Yu., Kuznetsov A. Regularities of U-238, Th-234 and Th-232 distribution in water and bottom sediments of waterbodies and watercourses of the Sea of Azov drainage basin // Conference Proceedings of 16th International Multidisciplinary Scientific GeoConference, SGEM 2016. Bulgaria, 2016. В. 5, vol. I. P. 569–575. DOI 10.5593/SGEM2016/B51/S20.076.
5. Kuznetsov A., Fedorov Yu., Fattal P. Chronology of Contemporary Sedimentation and Pollutants Accumulation in the Bottom Sediments of the Sea of Azov // EMECS'11 SeaCoasts XXVI. Joint conference. Managing Risks to Coastal Regions and Communities in a Changing World. S-Pb, 2016. P. 70. URL: http://emecs-sc2016.com/files/abstract_book.pdf (дата обращения: 11.02.2017).
6. Федоров Ю.А., Трофимов М.Е. Современные скорости седиментации в Азовском море в свете изучения распределения искусственных радионуклидов по разрезу донных отложений // Изв. вузов. Сев.-Кав. регион. Естеств. науки. 2008. № 5. С. 108–115.
7. Федоров Ю.А., Кузнецов А.Н., Давыдов А.Г. Цезий-137 в воде и донных отложениях (по результатам экспедиции «Азовское море – 2006») // Изв. вузов. Сев.-Кав. регион. Естеств. науки. Науки о Земле. 2007. С. 26–31.
8. Ярославцев В.М., Федоров Ю.А. ^{238}U , ^{234}Th и ^{232}Th в донных отложениях рек Дон и Маныч // Актуальные проблемы наук о Земле : сб. тр. II науч. конф. студентов и молодых ученых с междунар. участием. Ростов н/Д. : Изд-во ЮФУ, 2016. С. 239–242.
9. Матишов Г.Г., Ковалева Г.В., Польшин В.В. Новые данные о скорости седиментации в Азовском море в позднем голоцене // Докл. Академии Наук. 2009. Т. 428, № 6. С. 820–823.
10. Давыдов М.Г., Бураева Е.А., Зорина Л.В., Малышевский В.С., Стасов В.В. Радиоэкология : учебник для вузов. Ростов н/Д. : Феникс, 2013. 635 с.
11. Кандашова Е.В., Пронин А.Н., Крыщенко В.С., Бирюкова О.А., Абрамова Т.И. Содержание радионуклидов в почвах и растениях 30-километровой зоны влияния Волгодонской АЭС // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2007. № 6. С. 95–99.

12. Буряева Е.А., Мальшевский В.С., Вардуни Т.В., Шиманская Е.И., Триболина А.Н., Гончаренко А.А., Гончарова Л.Ю., Тоцкая В.С., Нефедов В.С. Содержание и распределение естественных радионуклидов в различных типах почв Ростовской области // Современные проблемы науки и образования. 2013. № 4. URL: <http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=9652> (дата обращения: 14.07.2017).

13. Давыдов М.Г., Тимонина Ю.А. Радиационная обстановка в районе расположения ГРЭС Ростовской области // Теплоэнергетика. 2003. № 12. С. 8–13.

14. Кизильштейн Л.Я. Экогеохимия элементов – примесей в углях. Ростов /Д. : СКНЦ ВШ, 2002. 296 с.

15. Сухорукوف Ф.В., Маликова И.Н., Гавшин В.М. Техногенные радионуклиды в окружающей среде Западной Сибири (источники и уровни загрязнения) // Сибирский экол. журн. 2000. Т. 7, № 1. С. 31–38.

References

1. Radiatsionnaya obstanovka na territorii Rossii i so-predel'nykh stran [Radiation situation on the territory of Russia and neighboring countries]. Yearbook. Eds. V.M. Shershakov, V.G. Bulgakov, I.I. Kryshev, S.M. Vakulovskii i dr. Moscow; Obninsk: Taifun, Rosgidromet, 2015, 350 p.

2. Kuznetsov A.N., Fedorov Yu.A. [A study of the chronology of the accumulation of oil components in the bottom sediments of the Azov Sea and the Lower Don using radioisotopes as tracers]. *Geologiya morei i okeanov* [Geology of the seas and oceans]. Materials of the XIX International Scientific Conference (School) in Marine Geology. Moscow: Geos, 2011, vol. 4, pp. 250-254.

3. Fedorov Yu.A., Kuznetsov A.N., Trofimov M.E. Sedimentation Rates in the Sea of Azov Inferred from Cs-137 and Am-241 Specific Activity. *Doklady Earth Sciences, Russia-USA*. 2008, vol. 423, No. 8, pp. 1333-1334.

4. Fedorov Yu., Kuznetsov A. Regularities of U-238, Th-234 and Th-232 distribution in water and bottom sediments of waterbodies and watercourses of the Sea of Azov drainage basin. *Conference Proceedings of 16th International Multidisciplinary Scientific GeoConference, SGEM 2016*. Bulgaria, 2016, book 5, vol. I, pp. 569-575. DOI 10.5593/SGEM2016/B51/S20.076.

5. Kuznetsov A., Fedorov Yu., Fattal P. Chronology of Contemporary Sedimentation and Pollutants Accumulation in the Bottom Sediments of the Sea of Azov. *EMECs'11 SeaCoasts XXVI. Joint conference. Managing Risks to Coastal Regions and Communities in a Changing World*. Saint Petersburg, 2016, p. 70. Available at: http://emecs-sc2016.com/files/abstract_book.pdf (accessed 11.02.2017).

6. Fedorov Yu.A., Trofimov M.E. Sovremennye skorosti sedimentatsii v Azovskom more v svete izucheniya raspredeleniya iskusstvennykh radionuklidov po razrezu donnykh otlozhenii [Current sedimentation

rates in the Sea of Azov in the light of the study of the distribution of artificial radionuclides from the bottom sediments section]. *Izv. vuzov. Sev.-Kav. region. Estestv. nauki*. 2008, No. 5, pp. 108-115.

7. Fedorov Yu.A., Kuznetsov A.N., Davydov A.G. Tsezii-137 v vode i donnykh otlozheniyakh (po rezul'tatam ekspeditsii "Azovskoe more - 2006") [Cesium-137 in water and bottom sediments (based on the results of the "Azov Sea - 2006" expedition)]. *Izv. vuzov. Sev.-Kav. region. Estestv. nauki. Nauki o Zemle*. 2007, pp. 26-31.

8. Yaroslavtsev V.M., Fedorov Yu.A. [238U, 234Th and 232Th in the bottom sediments of the rivers Don and Manych]. *Aktual'nye problemy nauk o Zemle* [Actual problems of the Earth sciences]. Collection of proceedings of the II Scientific Conference of students and young scientists with international participation. Rostov-on-Don: Izd-vo YuFU, 2016, pp. 239-242.

9. Matishov G.G., Kovaleva G.V., Pol'shin V.V. Novye dannye o skorosti sedimentatsii v Azovskom more v pozdnem golotsene [New data on the rate of sedimentation in the Azov Sea in the late holocene]. *Dokl. Akademii nauk*. 2009, vol. 428, No. 6, pp. 820-823.

10. Davydov M.G., Buraeva E.A., Zorina L.V., Malyshevskii V.S., Stasov V.V. *Radioekologiya* [Radioecology]. Textbook for universities. Rostov-on-Don: Feniks, 2013, 635 p.

11. Kandashova E.V., Pronin A.N., Kryshchenko V.S., Biryukova O.A., Abramova T.I. Soderzhanie radionuklidov v pochvakh i rasteniyakh 30-kilometrovoy zony vliyaniya Volgodonskoi AES [The content of radionuclides in soils and plants of the 30 km zone of influence of the Volgodonsk NPP]. *Izv. vuzov. Sev.-Kavk. region. Estestv. nauki*. 2007, No. 6, pp. 95-99.

12. Buraeva E.A., Malyshevskii V.S., Varduni T.V., Shimanskaya E.I., Tribolina A.N., Goncharenko A.A., Goncharova L.Yu., Totskaya V.S., Nefedov V.S. Soderzhanie i raspredelenie estestvennykh radionuklidov v razlichnykh tipakh pochv Rostovskoi oblasti [The content and distribution of natural radionuclides in different types of soils in the Rostov Region]. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya*. 2013, No. 4. Available at: <http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=9652> (accessed 14.07.2017).

13. Davydov M.G., Timonina Yu.A. Radiatsionnaya obstanovka v raione raspolozheniya GRES Rostovskoi oblasti [Radiation situation in the area of the GRES location of the Rostov Region]. *Teploenergetika*. 2003, No. 12, pp. 8-13.

14. Kizil'shtein L.Ya. *Ekogeokhimiya elementov - primesei v uglyakh* [Ecogeochemistry of elements - impurities in coals]. Rostov-on-Don: SKNTs VSh, 2002, 296 p.

15. Sukhorukov F.V., Malikova I.N., Gavshin V.M. Tekhnogennye radionuklidy v okruzhayushchei srede Zapadnoi Sibiri (istochniki i urovni zagryazneniya) [Technogenic radionuclides in the environment of Western Siberia (sources and levels of pollution)]. *Sibirskii ekol. zhurn*. 2000, vol. 7, No. 1, pp. 31-38.

УДК 553.241/242:553.411(571.65)

DOI 10.23683/0321-3005-2017-3-1-114-121

ИЗУЧЕНИЕ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОГО МЕТАМОРФИЗМА ЗОЛОТОВМЕЩАЮЩИХ ТОЛЩ ВЕРХОЯНО-КОЛЫМСКОЙ СКЛАДЧАТОЙ ОБЛАСТИ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ПОИСКОВО-ОЦЕНОЧНЫХ РАБОТ

© 2017 г. А.Э. Харди́ков¹, А.А. Аста́хова²

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

²ООО «НОВАТЭК-НТЦ», Тюмень, Россия

RESEARCH OF LOW TEMPERATURE METAMORPHISM OF GOLD CONTAINING COMPLEXES OF VERKHOYANSK-KOLYMA FOLDER AREA DURING PROSPECTING AND EVALUATION OF GOLD DEPOSITS

A.E. Khardikov¹, A.A. Astakhova²

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

²«NOVATEK-NTC» Ltd, Tyumen, Russia

Харди́ков Александр Эдуардович – доктор геолого-минералогических наук, профессор, кафедра минералогии и петрографии, Южный федеральный университет, ул. Зорге, 40, г. Ростов-на-Дону, 344090, e-mail: khardikov@sfedu.ru

Aleksandr E. Khardikov - Doctor of Geology and Mineralogy, Professor, Mineralogy and Petrography Department, Southern Federal University, Zorge St., 40, Rostov-on-Don, 344090, Russia, e-mail: khardikov@sfedu.ru

Аста́хова Анна Александровна – эксперт, управление геолого-разведочных работ, ООО «НОВАТЭК-НТЦ», ул. 50 лет ВЛКСМ, 53, г. Тюмень, 625026, Россия

Anna A. Astakhova - Expert, Exploration Department, «NOVATEK-NTC» Ltd, 50 let VLKSM St., 53, Tyumen, 625026, Russia.

Разработана новая методика поисково-оценочных работ на золотое оруденение, основанная на минералого-генетическом анализе процессов термального метазенеза и гидротермального метасоматоза золотовмещающих пород на примере Верхояно-Колымской складчатой области. Выделены четыре морфогенетических типа эпигенетически измененных пород. Дана минералого-петрографическая характеристика. Изучена зональность и построена схема метаморфических и гидротермально-метасоматических образований перспективной на коренное золото площади, расположенной в пределах Аян-Юряхского антиклинория Верхояно-Колымской складчатой области. Это позволило выполнить надежное прогнозное районирование и оценить перспективы рудоносности территории на стадии проведения прогнозно-поисковых работ масштаба 1:50000. Установлена связь между существованием неодинаковых уровней современного эрозионного среза территории и стадиями метасоматоза. Золотоносный эрозионный срез, соответствующий залеганию комплекса отложений омчакской свиты, проявлен на междуречье Хугланнах–Межевой и в бассейне ручья Стожильного. Он соответствует уровню распределения среднетемпературных метасоматических минеральных ассоциаций, возникающих на кислотной стадии и на стадии понижающейся кислотности гидротермальных растворов. Наиболее благоприятная минеральная ассоциация – кварц + серицит + анкерит + пирит + арсенопирит. На примере Азильской перспективной площади показана эффективность использования карт метаморфических и гидротермально-метасоматических образований для оценки перспектив рудоносности территории.

Ключевые слова: Аян-Юряхский антиклинорий, верхняя пермь, прогнозно-поисковые работы, метаморфизм, метасоматоз.

Developed a new method of research and evaluation works for gold mineralization is given. It is based on mineralogical and genetic analysis processes metagenesis thermal and hydrothermal metasomatism of the gold-containing rocks on the example of Verkhoyansk-Kolyma folded area. Four morphogenetic types epigeneticist altered rocks are allocated. Given the mineralogical and petrographic characteristics of the territory. Sketch map of the ore gold productive area within Ayan-Yurakh Anticlinorium of Verkhoyansk-Kolymsky Orog Verkhoyansk-Kolyma Folder Area en show the distribution of metamorphic hydrothermal metasomatic zones. It allows predicting ore gold perspective of the area during 1:50000 scale survey. The relation between the existence of different levels of the modern erosion areas and stages of metasomatism is described. Erosion of gold-bearing slice corresponding to the occurrence of complex deposits omchak retinue manifested in the area between Huglannakh-Mezhevoy and basin of the creek Storozhilny. It corresponds to the distribution of medium-temperature metasomatic mineral associations that occur on the acid stage and at the stage of decreasing acidity of the hydrothermal solutions. The most favorable mineral assemblage is quartz + sericite + ankerite + pyrite + arsenopyrite. The example of Azial perspective area shows the efficiency maps of metamorphic and hydrothermal-metasomatic formations to assess the prospects of ore-bearing territory.

Keywords: Ayan-Yuryakh Anticlinorium, upper Permian, survey works, metamorphism, metasomatism.

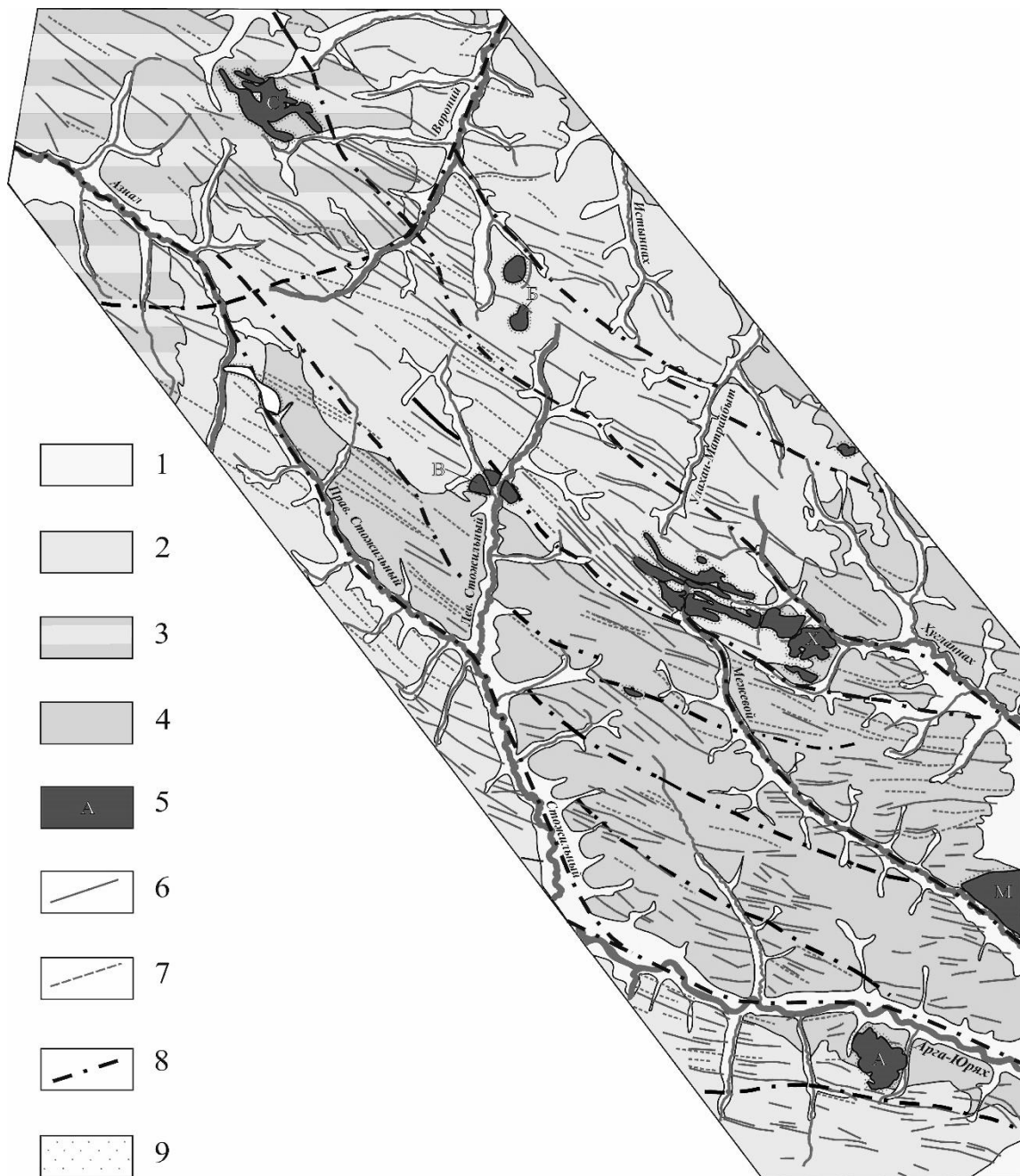
Изучение гидротермально-метасоматических образований для целей прогнозного районирования и оценки перспектив рудоносности территорий на стадии проведения поисково-оценочных работ масштаба 1:50000 является важной проблемой прикладной геологии, которая приобрела особое звучание в связи с разработкой специальной методики крупномасштабного картирования слабопроявленных гидротермально-метасоматических изменений [1, 2]. На ее основе возможны выявление и использование региональных метасоматических формаций – устойчивых совокупностей зон разнофациальных гидротермально-метасоматических образований, обусловленных конкретным геологическим событием (внедрением или длительным становлением интрузивных массивов, развитием подводных или субаэральных вулканических построек, тектонической перестройкой и др.). Методические рекомендации по изучению метаморфизма рудовмещающих толщ в золотоносных районах северо-востока России разработаны на основе многолетнего изучения метаморфизма этой территории. При проведении геологического картирования масштаба 1:50000 в золотоносных районах целесообразно составлять карты гидротермально-метаморфических образований. Их наличие повышает надежность прогнозного районирования, оценки перспектив рудоносности и проведения крупномасштабных поисковых работ.

Эффективность картирования гидротермально-метаморфических образований показана на примере Азияльской перспективной площади, расположенной в пределах Аян-Юрхского антиклинория Верхояно-Колымской складчатой области вблизи его северо-восточного фланга и границы с Иньяли-Дебинским синклинорием. В геологическом строении территории участвуют морские терригенные и вулканогенно-осадочные отложения верхней перми и в небольшом объеме триаса (трусская толща, обнажающаяся в бассейне среднего течения р. Арга-Юрх) смятые в сложные, преимущественно линейные складки северо-западного простирания и прорванные многочисленными дайками и штоками интрузивных пород (рис. 1). Залегание толщ нарушено многочисленными разломами, имеющими преимущественно северо-западное и широтное направление. Выше несогласно залегают неогеновые и четвертичные рыхлые континентальные образования. Верхнепермский комплекс стратиграфически непрерывен и расчленен на атканскую, омчакскую и старательскую свиты. В его средней части залегают характерные туфогенные породы – туфоалевролиты, туфопесчаники, алевритовые и псаммитовые лито-кристалло-кластические туффиты дацита и андезидацита атканской и омчакской свит [3–5].

Интрузивные породы занимают менее 3 % площади. В соответствии с легендой Нера-Бохапчинской серии листов среди них выделяются позднеюрский нера-бохапчинский габбро-гранит-диоритовый гипабиссальный комплекс малых интрузий, а также позднеюрский басугуньинский диорит-гранит-гранодиоритовый и поздне меловой биликанский монзонит-сиенитовый plutонические интрузивные комплексы [6–8]. Они сформировались в условиях мезозональной фации глубинности на глубине не более 5 км. В целом позднеюрские породы относятся к нормально-щелочному и низкощелочному рядам. Поздне меловые породы отличаются повышенной щелочностью.

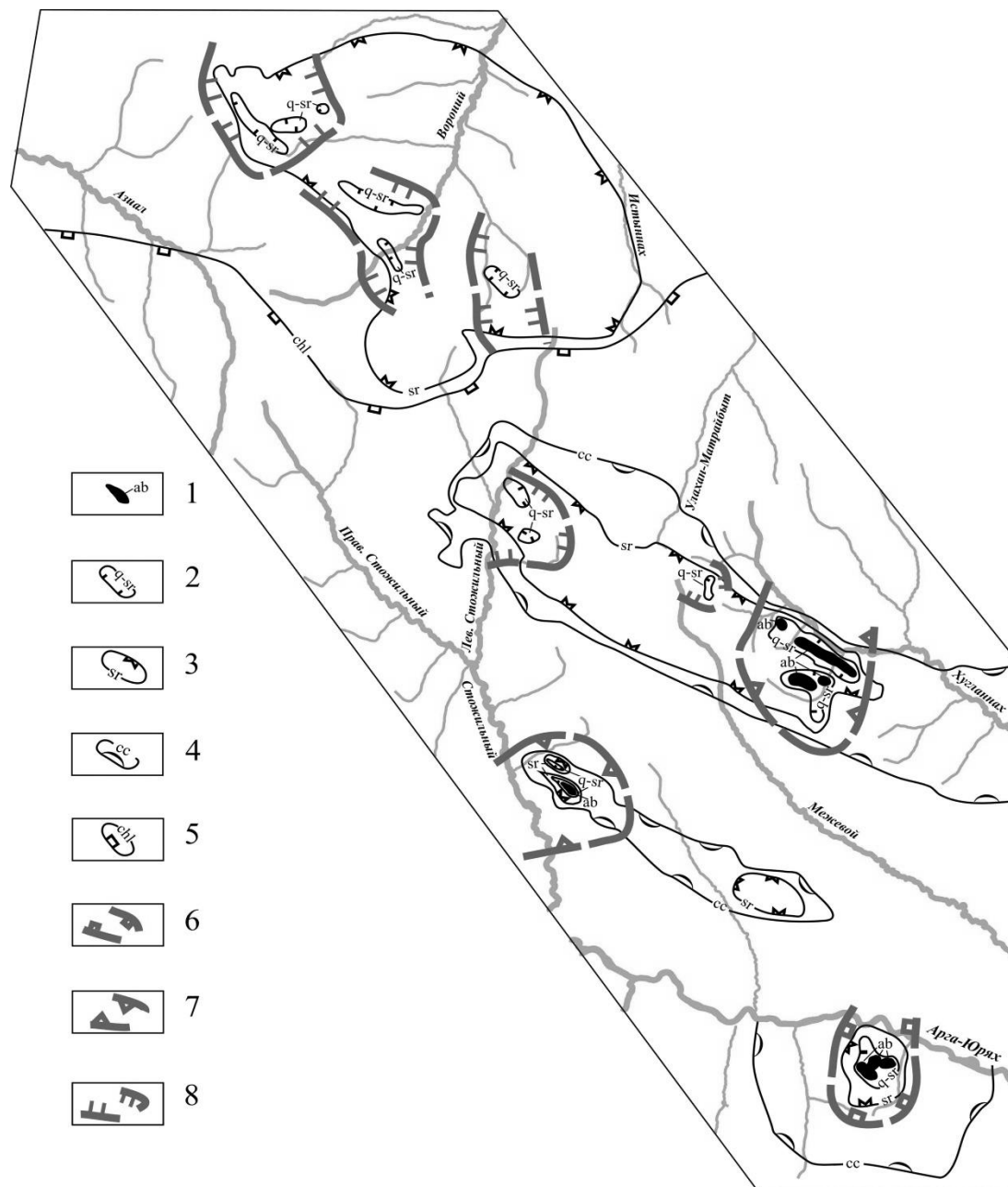
Для разбраковки Азияльской площади по перспективам золотоносности необходимо иметь четкое представление о природе, областях распространения и пространственно-временных соотношениях различных типов метаморфизма и метасоматоза отложений верхоянского комплекса и прорывающих его интрузивных образований. Необходимо также учитывать влияние на эти изменения зон тектонических нарушений. Такой подход позволит объяснить связь золотого оруденения с определенными типами метаморфизма и метасоматоза.

Результаты проведенных исследований изображены на схеме метаморфических и гидротермально-метасоматических изменений территории (рис. 2). На ней в качестве элементарных подразделений выделены зоны распространения ассоциаций минералов, возникших в результате метаморфических и гидротермально-метасоматических процессов. Анализ распространения эпигенетической минерализации производился последовательно в контурах исходных пород от наиболее молодых к древним. В результате выделены границы зон распространения эпипородных тел. В качестве дополнительных данных для прослеживания и ограничения этих зон использовались полевые макроскопические наблюдения, все ранее известные пункты обнаружения гидротермальной минерализации, а также разнообразные косвенные признаки, включая рельеф, растительность, аэрофотоснимки, геофизические и геохимические материалы. В ходе составления схемы устанавливалась сопряженность метасоматических зон, подразделяемых на периферические и центральные. Их сопряженность проверялась по связанности в пространстве и времени с определенным геологическим явлением; направленности щелочно-кислотной эволюции по пути возможного движения растворов; регрессивности в термодинамическом отношении стадийности минералообразования; наличию промежуточных и барьерных парагенезисов в области сочленения зон; взаимосвязи зон по геологическим, геофизическим, геохимическим и другим признакам.



Площади распространения стратиграфических подразделений: 1 – четвертичных отложений (Q); 2 – атканской свиты (P_{2at}); 3 – омчакской свиты (P_{2om}); 4 – старательской свиты (P_{3st}). Интрузивные образования: 5 – позднеюрские и позднемиоценовые штоки (С – Соготохский шток гранодиоритов и кварцевых диоритов позднеюрского басугуньинского интрузивного комплекса – I_{3b}; Б – шток Быстрый, представленный двумя разрозненными изометричными выходами граносиенит-порфириров и монцодиоритов позднемиоценового биликанского интрузивного комплекса – K_{2bl}; В – Верхне-Стожильненский шток гранодиоритов позднеюрского басугуньинского интрузивного комплекса – I_{3b}; Х – шток Хугланнах гранитов позднеюрского басугуньинского интрузивного комплекса – I_{3b}; А – Арга-Юряхский шток плагиогранитов и кварцевых диоритов позднеюрского нера-бохапчинского гипабиссального комплекса малых интрузий – I_{3nb}; М – шток Межевой кварцевых диоритов позднеюрского басугуньинского интрузивного комплекса – I_{3b}); 6 – дайки гранитов, гранодиоритов, плагиогранитов и их порфириров нера-бохапчинского, басугуньинского и биликанского комплексов (автометаморфизм: серицитизация, окварцевание); 7 – дайки кварцевых диоритов, диоритов и их порфириров, габбро-порфириров нера-бохапчинского, басугуньинского и биликанского комплексов (автометаморфизм: хлоритизация, сосюритизация, альбитизация, кальцитизация); 8 – тектонические нарушения; 9 – биотитово-кварцевые, биотитовые, альбит-актинолитовые роговики и узловатые сланцы, парагенезисы которых соответствуют мусковит-роговиковой фации контактового метаморфизма

Рис. 1. Схема геологического строения Азимальской перспективной площади
 / Fig. 1. Scheme of the geological structure of Azial promising areas



Метасоматоз: 1 – границы полей развития рудоносных интенсивно березитизированных кварц-полевошпатовых метасоматитов, березитов, анкеритово-кварцевого, алибитово-кварцевого и серицитово-кварцевого прожилкования (ab) – кварц + альбит + серицит + анкерит (кальцит) + пирит + арсенопирит); 2 – границы развития полей интенсивно березитизированных пород (q-sr) – кварц + серицит + анкерит (кальцит) + пирит; 3 – границы развития полей березитизированных пород (серицит + кварц + пирит); 4 – границы развития полей площадной приповерхностной пропилитизации и слабой березитизации пород (cc) – хлорит + кальцит + эпидот + серицит; 5 – границы полей слабой приповерхностной пропилитизации пород (chl) – хлорит + кальцит. Границы развития метасоматических минеральных ассоциаций, вскрытых современным эрозионным срезом: 6 – грейзен-березитовая минеральная ассоциация (кварц+серицит+железистые карбонаты + хлорит), возникшая в результате глубинной березитизации (4–3 км) при температуре 400–300 °С; 7 – минеральная ассоциация (кварц + альбит + серицит + анкерит/кальцит + пирит + арсенопирит), возникшая на глубине 3–2 км вследствие кварц-полевошпатового метасоматоза, произошедшего при температуре 350–250 °С и последующей интенсивной березитизации при температуре 250–150 °С; 8 – минеральная ассоциация (хлорит + кальцит + эпидот + кварц + серицит + пирит), возникшая в результате площадной пропилитизации, произошедшей при температуре 300–200 °С, и последующей березитизации при температуре 250–50 °С (глубина образования ассоциации – 2–0,5 км).

Во всех случаях берг-штриховка направлена внутрь полей распространения индекс-минералов и показывает нарастание интенсивности обозначаемого процесса.

Рис. 2. Схема гидротермально-метасоматических образований Азимальской перспективной площади
 / Fig. 2. Scheme of hydrothermal metasomatic formations of Azial promising areas

С учетом современных представлений [9] в результате проведенных исследований установлено, что на Азиальской перспективной площади выделяются следующие типы эпигенеза и метаморфизма: 1) метагенез, связанный с эпохой складкообразования, взбросо-сдвиговых дислокаций и рассланцевания в геодинамических условиях сжатия; 2) контакто-термальный метаморфизм, связанный во времени с формированием дайкового комплекса и сопровождаемый мощным метасоматозом; 3) контактовый метаморфизм, вызванный внедрением интрузий типа и штоков; 4) динамометаморфизм, обусловленный влиянием тектонических нарушений.

Метагенез на исследуемой территории проявлен повсеместно, представляя собой доинтрузивные эпигенетические преобразования толщи верхоянского комплекса, которые не испытали регионального метаморфизма зеленосланцевой фации [10–14].

Контактовый и контакто-термальный метаморфизм наложены на метагенез пород верхоянского комплекса. Контактовый метаморфизм, вызванный внедрением штокообразных интрузий, сопровождался образованием контактовых ореолов. В экзоконтактах залегают биотитово-кварцевые, биотитовые, альбитово-актинолитовые роговики и узловатые сланцы, парагенезисы которых соответствуют мусковит-роговиковой фации.

Контакто-термальный метаморфизм контролируется зонами разломов преимущественно северо-западного простирания, к которым приурочены свиты автометаморфизованных даек и штокообразные тела. В терригенных и вулканогенно-осадочных верхнепермских отложениях он выражен площадной пропилитизацией (зеленокаменными изменениями), произошедшей на глубине 2–1 км при температуре 300–200 °С. Неодинаковая степень термального воздействия внедрившихся интрузивных масс на толщу верхоянского комплекса на исследованной площади привела к возникновению зональности, отражающей интенсивность пропилитизации. В северо-западной части площади, во внешней зоне, где прогрев был наименьшим, распространены рассланцованные породы, не испытавшие площадной пропилитизации. В центральной и юго-восточной частях Азиальской площади, где толща верхоянского комплекса разогревалась сильнее, залегают умеренно рассланцованные породы, содержащие биотит метаморфического происхождения и агрегатные скопления лейкоксена. Вблизи тектонических нарушений и дайковых полей в ходе последующих зеленокаменных изменений биотит и другие темноцветные минералы почти полностью были замещены хлоритом, карбонатами, а также эпидотом и серицитом.

Во внутренних зонах распространения контакто-термального метаморфизма залегают обширные поля гидротермально-метасоматически измененных пород верхоянского комплекса, которые

здесь не сланцеватые, плотные, с трудом раскалывающиеся и образующие ребристую поверхность. Такой облик они приобретают вследствие слипания пластин сланцеватости под действием температуры и метасоматических процессов. В пределах внутренних зон расположены дайки и встречаются породы, содержащие сульфидную минерализацию. Так как для этих зон характерен масштабный метасоматоз, то в них часто распространены осветленные (окварцованные) петротипы, а также породы, содержащие тонкие и мелкие (от долей миллиметра до 1–2 см) прожилки хлорита, серицита, карбонатов, кварца, мелкие гнезда сульфидов и тонкоагрегатное золото. В контурах внутренних зон Азиальской площади находятся россыпи ручьев Стожильный и Хугланнах, так как водотоки размывают толщу, содержащую рассеянное коренное оруденение.

Гидротермально-метасоматические изменения протекали в три этапа.

Первый этап – это процесс кварц-полевошпатового метасоматоза, происходивший на контакте гранитоидной интрузии и вмещающей вулканогенно-осадочной толщи на глубине 3–2 км при температуре 350–250 °С. В результате калиевый полевой шпат гранитоидов подвергся альбитизации, и в нем появились пертиты замещения пятнистой формы, по которым в дальнейшем развился шахматный альбит. В это же время в результате деанортитизации кальцийсодержащих плагиоклазов возникли более кислые плагиоклазы, иногда с реакционными каемками альбита. Интенсивнее всего деанортитизации были подвержены плагиоклазы с высоким номером. Процесс альбитизации зональных плагиоклазов привел к образованию индивидов с обратной и рекуррентной зональностью. Иногда в одном зерне наблюдается несколько чередующихся зон разного состава. При альбитизации освобождался кремнезем, образующий кварц.

На втором этапе произошло растрескивание и дробление породы. Это способствовало более глубокому проникновению гидротермальных растворов и интенсивному выщелачиванию боковых пород, которое было компенсировано осаждением кварца. В породах появились жилы и прожилки, имеющие зональное строение и состоящие из нескольких разновидностей кварца. Во внутренней зоне таких прожилков наблюдается среднекристаллический кварц размером от 0,9 до 1,7 мм, реже до 2,5 мм, шестоватый и/или изометричный округлоугловатый, бурый из-за большого количества газовой-жидких включений (5–15 % поверхности зерен) и рудной пыли, с микротрещинами и часто обильным погасанием. Во внешней зоне находится микро- и мелкозернистый округлый или лапчатый (0,06–0,4 мм) кварц без включений. Граница прожилков часто подчеркивается скоплениями пылеватого пирита. В зальбандах кварцевых жил наблюдается более интенсивное замещение полевых шпатов.

Нередко отмечается образование новых минералов, представленных пластинчатыми и призматическими кристаллами мусковита, ориентированными вдоль прожилков, призматическими и таблитчатыми идиоморфными кристаллами шахматного альбита. В зонах дробления наблюдаются участки катаклазированных пород.

Третий этап – низкотемпературный околотрещинный кислотный метасоматоз (березитизация), произошедший в приповерхностных условиях (2–0,5 км) при температуре 250–150 °С. Преобладающими формами минералов являются псевдоморфозы замещения первичных минералов, прожилки и новообразования в пустотах. Замещение минералов проходило поэтапно. В первую очередь разрушению подвергались железо-магниево-силикатные, представленные в основном биотитом. По биотиту развивались псевдоморфозы серицита, мусковита, иногда пеннина, рутила и пирита, полностью замещая биотит на участках интенсивной трещиноватости. Затем по преимуществу кальцийсодержащим плагиоклазам образовывались агрегаты сосюрита и пеннина, а по преимуществу натрийсодержащим – альбит-серицитовые агрегаты. В зональных плагиоклазах замещение вторичными минералами имело избирательный характер. Часто в таких плагиоклазах узкие каемки чистого альбита оставались неизменными. По трещинам спайности и по краям пертитов развивались микрозернистые агрегаты анкерита. В интенсивно березитизированных породах на месте псевдоморфоз образовывались скопления мельчайших кристалликов аксессуарных минералов. В результате разрушения полевых шпатов в виде кварца отлагался освобожденный кремнезем, замещая полевые шпаты и первичный кварц, заполняя микротрещины и пустоты в породе. Распространенными являются просечки микро- и мелкозернистого кварца, секущие гранитоиды и кварцевые прожилки раннего происхождения. Новообразованный кварц прозрачный, в нем отсутствуют или содержатся единичные газово-жидкие включения.

Наиболее ранняя сульфидизация гранитоидов проявилась в образовании тонкодисперсных и скрытокристаллических агрегатов пирита, замещающих биотит и полевые шпаты. Более поздние скопления новообразованных кристаллов арсенопирита приурочены к метасоматическим прожилкам микрозернистого кварца позднего происхождения. Окончательный этап изменения гранитоидов связан с незначительной кальцитизацией. Линзочки микрозернистого кальцита реже скопления крупных кристаллов отмечены как на месте разложения полевых шпатов и биотита, так в интерстициях породы, и в пустотах кварцевых прожилков.

Динамометаморфизм оказал влияние на характер метаморфических и особенно гидротермально-мета-

соматических преобразований в пределах Азиальской площади. Его проявления приурочены к разрывным нарушениям, сформировавшимся в коллизионной обстановке. Эти нарушения ограничивают и разделяют территорию на отдельные структурные единицы. Самым крупным и самым древним разрывным нарушением, пересекающим Азиальскую площадь, является Хинике-Кулинская зона разломов северо-западного простирания. Она фиксируется Арга-Юряхским полем даек, к ней приурочены выходы Арга-Юряхского штока. В зонах приразрывного кливажа алевритопелитовые и пелитово-алевритовые породы имеют грубое рассланцевание (расстояние между трещинами сланцеватости составляет несколько миллиметров и больше) и раскальваются по неровным поверхностям. Вблизи зон разломов и приуроченных к ним дайковых полей наблюдается околотрещинное ороговикование пород верхоянского комплекса, в которых развиты процессы рудоносного кислотного метасоматоза (березитизации). В зональных метасоматических структурах, приуроченных к тектоническим нарушениям, могут находиться золоторудные тела. Конфигурация ореолов перспективно рудоносных березитизированных пород определяется в основном распределением в пространстве и строением разрывных нарушений и систем трещиноватости. Это, прежде всего, жиллообразные тела вдоль одиночных трещин мощностью от десятков сантиметров до первых метров, прослеживающиеся на десятки, иногда сотни метров. В сложно построенных тектонических зонах дробления и рассланцевания развиваются тела более затейливой конфигурации с многочисленными реликтами исходных пород. Общая их мощность достигает 10 и более метров. Вдоль систем сближенных субпараллельных трещин березитизация наиболее интенсивная. Особого внимания заслуживают березитизированные, ороговикованные, а также катаклазированные породы в зонах тектонических нарушений. Безусловно, рудоконтролирующей является тектоническая зона северо-западного простирания. По времени заложения она является складчатой. Внедрение интрузивных тел происходило практически одновременно со складкообразованием. Возможно, этим объясняется сложная форма контактов и кровли штоков. В этой зоне наблюдается ороговикование пород верхоянского комплекса, а березитизация приобретает площадной характер.

В результате совокупности произошедших на Азиальской площади процессов, приведших к стадийному изменению температуры и кислотности гидротермальных растворов, в магматических, терригенных и вулканогенно-осадочных породах возникли и существуют одинаковые минеральные ассоциации. Эти ассоциации формируют вертикальную метасоматическую колонку и образуют 6 зон, отображающих различную степень метаморфических и

гидротермально-метасоматических изменений петротипов, слагающих территорию (рис. 2). Это зоны: 1) отсутствия гидротермально-метасоматических изменений; 2) слабой площадной пропилитизации отложений верхоянского комплекса (индекс-минералы: хлорит + кальцит); 3) пропилитизированных и слабоберезитизированных пород (хлорит + кальцит + эпидот + серицит); 4) березитизированных пород (серицит + кварц + пирит); 5) интенсивно березитизированных пород (кварц + серицит + анкерит/кальцит + пирит); 6) рудных зон, в пределах которых распространены интенсивно березитизированные кварц-полевошпатовые метасоматиты, березиты, анкеритово-кварцевое, альбитово-кварцевое и серицитово-кварцевое прожилкование (кварц + альбит + серицит + анкерит/кальцит + пирит + арсенопирит).

Наиболее перспективными являются зоны сочленения и наложения метасоматоза и контактовых ореолов (эндо- и экзоконтактов) гранитоидных штоков, где проявляются кварц-полевошпатовый метасоматоз и березитизация. Здесь происходят локализация и перераспределение золотого оруденения.

Метасоматоз, сопровождающийся золотым оруденением, проявлен не на всей Азиальской площади. Это объясняется наличием различных уровней современного эрозионного среза территории, выводящего на поверхность различные горизонты единой метасоматической колонки (см. рис. 2).

Наиболее благоприятный (рудноносный) эрозионный срез соответствует залеганию отложений омчакской свиты. Он вскрывает уровень минеральной ассоциации, возникшей в результате кварц-полевошпатового метасоматоза и наложенной на него березитизации (индекс-минералы: кварц + серицит + альбит + анкерит + пирит + арсенопирит).

В западной части Азиальской площади, где обнажается толща старательской свиты, существует высокие (надрудный) уровень эрозионного среза. Здесь наблюдается только наиболее низкотемпературная, безрудная часть метасоматической колонки, соответствующая верхнему горизонту развития приповерхностной березитизации, в пределы которого рудное вещество не поступало в связи с понижением кислотности гидротермальных растворов.

Эрозионный срез территории, выводящий на поверхность толщу атканской свиты, является более глубоким (подрудным). На этом уровне большинство продуктов гидротермально-метасоматической деятельности уничтожено. Об уровне эрозионного среза Арга-Юряхского штока можно судить по характеру метасоматоза слагающих его плагиогранитов. Во-первых, метасоматоз здесь соответствует грейзен-березитовой минеральной ассоциации (кварц + мусковит + серицит + железистые карбонаты + хлорит), возникшей на глубине 4–3 км при температуре 400–300 °С [9]. Во-вторых, метасоматически измененные породы находятся в границах

штока. Ничего подобного на остальной территории Азиальской площади нет. Там метасоматоз, представленный березитизацией, приурочен к контактовым ореолам штоков и зонам тектонических нарушений. Это значит, что уровень эрозионного среза Арга-Юряхского штока более глубокий, чем рудноносный, вскрывающий толщу омчакской свиты. Вся низкотемпературная часть метасоматической колонки над Арга-Юряхским штоком размыта. Уровень эрозионного среза штока Межевой еще более глубокий. В его границах на дневную поверхность выходят неизмененные интрузивные породы.

Таким образом, установлено, что в пределах Азиальской площади наблюдаются определенные пространственно-временные соотношения различных типов метаморфизма, приведших к формированию единой метасоматической колонки. Метасоматоз, сопровождающийся золотым оруденением, проявлен не на всей площади. Существование неодинаковых уровней современного эрозионного среза исследуемой территории привело к тому, что на дневную поверхность выходят горизонты, отвечающие стадиям метасоматоза, происходящим при различной температуре и кислотно-щелочном режиме. Золотоносный эрозионный срез, соответствующий залеганию комплекса отложений омчакской свиты, проявлен на междуречье Хугланнах – Межевой и в бассейне ручья Стожильного. Он соответствует уровню распределения среднетемпературных метасоматических минеральных ассоциаций, возникающих на кислотной стадии и на стадии понижающейся кислотности гидротермальных растворов. Наиболее благоприятная минеральная ассоциация – кварц + серицит + анкерит + пирит + арсенопирит. На примере Азиальской перспективной площади показана эффективность использования карт метаморфических и гидротермально-метасоматических образований для оценки перспектив рудоносности территории.

Литература

1. Плющев Е.В., Ушаков О.П., Шатов В.В., Беляев Г.М. Методика изучения гидротермально-метасоматических образований. Л. : Недра, 1981. 262 с.
2. Плющев Е.В., Шатов В.В. Геохимия и рудоносность гидротермально-метасоматических образований. Л. : Недра, 1985. 247 с.
3. Геодинамика, магматизм и металлогения Востока России : в 2 кн. / ред. А.И. Ханчук. Владивосток : Дальнаука, 2006.
4. Геология СССР. Т. XXX. Северо-восток СССР. Геологическое описание. Кн. 2. М. : Недра, 1970. 536 с.
5. Чехов А.Д. Тектоническая эволюция северо-востока Азии. М. : Научный мир, 2000. 204 с.
6. Жуланова И.Л., Русакова Т.Б., Котляр И.Н. Геохронология и геохронометрия эндогенных событий в мезозойской истории северо-востока Азии. М. : Наука, 2007. 358 с.

7. Котляр И.Н., Жуланова И.Л., Русакова Т.Б., Ганиева А.М. Изотопные системы магматических и метаморфических комплексов северо-востока России. Магадан : СВКНИИ ДВО РАН, 2001. 319 с.

8. Маннафов Н.Г. Легенда Неро-Бохапчинской серии государственной геологической карты Российской Федерации масштаба 1:200 000 (издание второе). Т. IV. Магадан : Магаданский ТФГИ, 1999.

9. Плющев Е.В., Шатов В.В., Каушин С.В. Металлогения гидротермально-метасоматических образований. СПб. : Изд-во ВСЕГЕИ, 2012. 560 с.

10. Астахова А.А., Хардииков А.Э. Литогенез пермских толщ Аян-Юряхского антиклинория Яно-Колымской складчатой области // Изв вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2016. № 1. С. 84–89.

11. Астахова А.А., Хардииков А.Э., Холодная И.А. О роли вулканогенного материала в образовании атканской свиты Аян-Юряхского антиклинория Яно-Колымской складчатой области // Изв вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2016. № 2. С. 78–85.

12. Хардииков А.Э., Парада С.Г., Холодная И.А. Литолого-фациальные условия золотоносности верхнепермских отложений Аян-Юряхского антиклинория Яно-Колымской складчатой области // Руды и металлы. 2009. № 3. С. 22–28.

13. Хардииков А.Э., Холодная И.А. Литолого-фациальные особенности и условия образования верхнепермских отложений Аян-Юряхского антиклинория Верхояно-Колымской складчатой области // Стратиграфия и седиментология нефтегазоносных провинций. 2010. № 1. С. 65–74.

14. Khardikov A.E., Kholodnaya I.A. Lithological conditions of gold content in the upper permian deposits of the Ayan-Yuryakh anticlinorium within the Yano-Kolyma folded region // Stratigraphy and sedimentology of oil-gas basins. 2010. № 1. P. 86–94.

References

1. Plyushchev E.V., Ushakov O.P., Shatov V.V., Belyaev G.M. *Metodika izucheniya gidrotermal'no-metasomaticheskikh obrazovaniy* [The method of studying the hydrothermal-metasomatic formations]. Leningrad: Nedra, 1981, 262 p.

2. Plyushchev E.V., Shatov V.V. *Geokhimiya i rudonosnost' gidrotermal'no-metasomaticheskikh obrazovaniy* [Geochemistry and ore-bearing hydrothermal metasomatic formations]. Leningrad: Nedra, 1985, 247 p.

3. *Geodinamika, magmatizm i metallogeniya Vostoka Rossii* [Geodynamics, magmatism and metallogeny of the East of Russia]. In 2 books. Ed. A.I. Khanchuk. Vladivostok: Dal'nauka, 2006.

4. *Geologiya SSSR* [Geology of the USSR]. T. XXX. *Severo-vostok SSSR. Geologicheskoe opisaniye* [North-east of the USSR. Geological description]. Book 2. Moscow: Nedra, 1970, 536 p.

5. Chekhov A.D. *Tektonicheskaya evolyutsiya severo-vostoka Azii* [Tectonic evolution of the north-east of Asia]. Moscow: Nauchnyi mir, 2000, 204 p.

6. Zhulanova I.L., Rusakova T.B., Kotlyar I.N. *Geokhronologiya i geokhronometriya endogennykh sobytii v mezozoiskoi istorii severo-vostoka Azii* [Geochronology and geochronometry of endogenous events in the Mesozoic history of north-east Asia]. Moscow: Nauka, 2007, 358 p.

7. Kotlyar I.N., Zhulanova I.L., Rusakova T.B., Gageeva A.M. *Izotopnye sistemy magmaticheskikh i metamorficheskikh kompleksov severo-vostoka Rossii* [Isotope systems of igneous and metamorphic complexes of the north-east of Russia]. Magadan: SVKNII DVO RAN, 2001, 319 p.

8. Mannafov N.G. *Legenda Nero-Bokhapchinskoi serii gosudarstvennoi geologicheskoi karty Rossiiskoi Federatsii masshtaba 1:200 000* [Legend of the Nero-Bohachinsk series of the state geological map of the Russian Federation at a scale of 1: 200 000]. 2nd. Magadan: Magadanskii TFGI, 1999, vol. IV.

9. Plyushchev E.V., Shatov V.V., Kashin S.V. *Metallogeniya gidrotermal'no-metasomaticheskikh obrazovaniy* [Metallogeny of hydrothermal-metasomatic formations]. Saint Petersburg: Izd-vo VSEGEI, 2012, 560 p.

10. Astakhova A.A., Khardikov A.E. Litogenez permских толщ Аян-Юряхского антиклинория Яно-Колымской складчатой области [Lithogenesis of Permian strata of Ayan-Yuryakh anticlinorium of the Yano-Kolyma folded region]. *Izv vuzov. Sev.-Kavk. region. Estestv. nauki*. 2016, No. 1, pp. 84–89.

11. Astakhova A.A., Khardikov A.E., Kholodnaya I.A. О роли вулканогенного материала в образовании атканской свиты Аян-Юряхского антиклинория Яно-Колымской складчатой области [On the role of volcanogenic material in the formation of the Atkan suite of the Ayan-Yuryakh anticlinorium of the Yano-Kolyma folded region]. *Izv vuzov. Sev.-Kavk. region. Estestv. nauki*. 2016, No. 2, pp. 78–85.

12. Khardikov A.E., Parada S.G., Kholodnaya I.A. Литолого-фациальные условия золотоносности верхнепермских отложений Аян-Юряхского антиклинория Яно-Колымской складчатой области [Lithological and facies conditions of gold content of the Upper Permian deposits of the Ayan-Yuryakh anticlinorium of the Yano-Kolyma folded region]. *Rudy i metally*. 2009, No. 3, pp. 22–28.

13. Khardikov A.E., Kholodnaya I.A. Литолого-фациальные особенности и условия образования верхнепермских отложений Аян-Юряхского антиклинория Верхояно-Колымской складчатой области [Lithological and facial features and conditions for the formation of the Upper Permian deposits of the Ayan-Yuryakh anticlinorium of the Verkhoyansk-Kolyma folded region]. *Stratigrafiya i sedimentologiya neftegazonosnykh provintsii*. 2010, No. 1, pp. 65–74.

14. Khardikov A.E., Kholodnaya I.A. Lithological conditions of gold content in the upper permian deposits of the Ayan-Yuryakh anticlinorium within the Yano-Kolyma folded region. *Stratigraphy and sedimentology of oil-gas basins*. 2010, No. 1, pp. 86–94.

ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ДИНАМИКИ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ЗЕМЕЛЬ РОСТОВСКОЙ ОБЛАСТИ

© 2017 г. Д.Ю. Шишкина¹

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

ENVIRONMENTAL ASSESSMENT OF THE DYNAMICS OF AGRICULTURAL LAND OF THE ROSTOV REGION

D.Yu. Shishkina¹

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

Шишкина Диана Юрьевна – 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: diana@sfedu.ru

Diana Yu. Shishkina - 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: diana@sfedu.ru

Анализируются динамика и состояние сельскохозяйственных земель Ростовской области. Изучены динамика землепользования и изменение площадей природных и антропогенных ландшафтов на протяжении последних 400 лет. На основе обработки обширных материалов земельно-учетной и сельскохозяйственной статистики проведен детальный анализ сокращения посевных площадей и изменения структуры посевов. Установлена основная тенденция – расширение сельскохозяйственных угодий за счет сокращения пастбищ. Выявлено уменьшение площади пахотных земель и посевных площадей в конце XX – начале XXI в. Проведено сопоставление показателей экологически сбалансированной антропогенной нагрузки в степной зоне с данными по Ростовской области. Дана дифференцированная оценка экологических и экономических последствий кризисной динамики землепользования.

Ключевые слова: экологическая оценка, Ростовская область, динамика землепользования, структура землепользования, пашни, пастбища, посевные площади, залежи.

The article is devoted to the dynamics and status of agricultural lands of the Rostov Region. A detailed analysis of cultivated area decrease, changes in crop structure was carried out. The dynamics of land use and changing areas of natural and anthropogenic landscapes over the past 400 years has been studied. The main trend is established - the expansion of agricultural lands due to the reduction of pastures. A decrease in the area of arable land and crop areas in the late XX - early XXI centuries was revealed. Comparison of indicators of ecologically balanced anthropogenic load in the steppe zone with data for the Rostov Region is carried out. A differentiated assessment of the ecological and economic consequences of the crisis dynamics of land use is given.

Keywords: environmental assessment, Rostov Region, land use dynamics, land use structure, arable lands, pastures, croplands, fallows.

Введение

Антропогенное воздействие на геосистемы наиболее наглядно проявляется через структуру землепользования, поскольку виды использования земель различаются по характеру и уровню антропогенной нагрузки. Сравнение структуры земельного фонда территории с оптимальным для конкретной природной зоны соотношением различных видов и категорий использования земель позволяет уменьшить антропогенную нагрузку путем корректировки структуры землепользования.

Интенсивное развитие земледелия на Дону начиная со второй половины XIX в. обусловило появление и быстрое распространение различных процессов деградации почв [1]. В настоящее время водная и ветровая эрозия, дегумификация почв по площади развития лидируют среди экологических проблем Ростовской области [2]. Преимущественно аграрная ориентация земельного фонда Ростовской области и широкое развитие процессов деградации почв сельскохозяйственных угодий обусловили интерес исследователей к изучению структуры и динамики именно сельскохозяйственных земель. Различные аспекты этой проблемы нашли отражение в ряде публикаций, посвя-

ценных нормированию антропогенного воздействия на геосистемы, эколого-экономической оценке агроландшафтов, разработке почвозащитной системы земледелия [3–6]. Однако тема эта далеко не исчерпана, многие положения и выводы нуждаются в корректировке и дополнении, особенно с учетом современных тенденций в аграрном секторе. В настоящей работе основное внимание уделено изучению нескольких показателей, наиболее полно отражающих региональную специфику аграрного землепользования. Прежде всего, это распаханность территории как наиболее репрезентативный индикатор сельскохозяйственной нагрузки на ландшафты. Интенсивность вовлечения земель в агропроизводство иллюстрирует соотношение «посевные площади – пашни». Наконец, анализ площадей, занимаемых различными по почвозащитным свойствам культурами, позволяет оценить экологические риски, присущие современным севооборотам.

Структура землепользования складывалась на протяжении всего периода хозяйственного освоения Ростовской области и её исторического предшественника, земли Войска Донского, поэтому для лучшего понимания закономерностей и тенденций синхронных процессов эволюции природопользования и антропогенной трансформации ландшафтов проведен их ретроспективный анализ. С этой целью использовалась обширная источниковая база, включающая дореволюционные труды по экономической географии Дона, работы советских ученых и разнообразные статистические материалы [7–17].

Результаты и их обсуждение

Ландшафтная структура Ростовской области определяется абсолютным преобладанием сельскохозяйственных ландшафтов: по данным 2016 г., они занимают 84,3 % от общей площади области. Внутриобластное распределение агроландшафтов весьма неравномерно. Их удельный вес заметно ниже вблизи больших водных объектов (Цимлянский район – всего 58 %), в местах распространения крупных лесных массивов (Верхнедонской район – 74,8 %), в окрестностях городских агломераций (Азовский, Аксайский, Мясниковский районы – менее 79 %).

Динамика «пашни – пастбища». Наиболее распространены полевые ландшафты (пашни) – на их долю приходится 58,3 %, за ними следуют пастбища – 25,4 %. Лишь в Заветинском и Ремонтненском районах, отличающихся жесткими природными условиями, сложилась принципиально иная структура сельхозугодий: превалирование пастбищ (более 50 %) при пониженной доле пашен (около 40 %).

Однако преобладание пашен проявилось только во второй половине XIX в., когда земледелие стало главным занятием жителей Дона (рис. 1). Расширение пашни происходило за счёт природных кормовых угодий на протяжении всей аграрной истории Дона и продолжалось до 1960-х гг. Исторический максимум пашни зафиксирован в 1963 г., когда она достигла 61 % от общей площади Ростовской области. Затем наступил тридцатилетний период стабилизации, в течение которого прирост пашни за счёт пастбищ компенсируется её отчуждением для нужд строительства, промышленности и транспорта. Аграрные реформы обусловили сокращение распашки в конце 1990-х гг. Наименьшую в постсоветской истории площадь – 56,3 % – пахотные земли занимали в 2003 г., после чего их сжатие приостановилось. Современная доля пашни в структуре земель Ростовской области – 58,3 %.

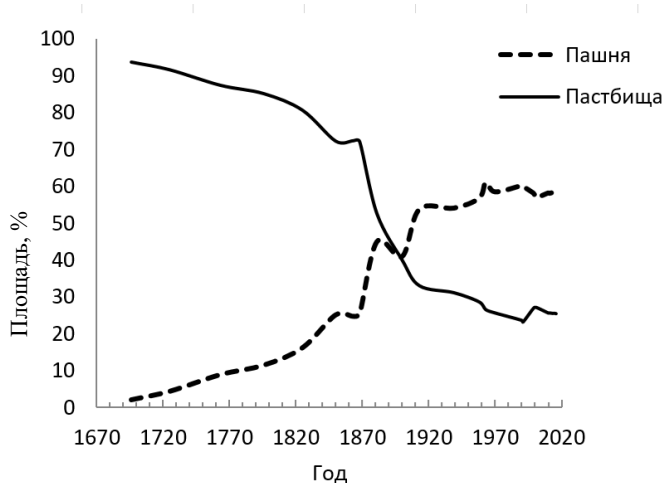


Рис. 1. Изменение доли пашен и пастбищ в общей площади Ростовской области (земли Войска Донского) с 1695 по 2016 г. (по [11, 12, 17–19]) / Fig. 1. Change in the share of arable land and pastures in the total area of the Rostov Region (the Don Cossack Land) from 1695 to 2016

Обращает на себя внимание синхронная смена трендов на рубеже XX–XXI вв. Связана она с деградацией пашни и трансформацией её в менее ценные угодья, как правило, пастбищные. Так, в 2000 г. площадь пашни уменьшилась на 100,9 тыс. га. Однако уже с 2002 г. улучшенные коренным образом пастбища снова возвращаются в состав пахотных земель. Таким образом, площадь природных кормовых угодий медленно, но постоянно снижается, составив в 2016 г. 25,4 %. Следует отметить, что региональным экологическим нормативом, характеризующим оптимальный баланс пашни – пастбища, донские учёные признают соотношение площадей этих угодий в 1940 г. – 55 % пашни и 32 % пастбищ [20]. В настоящее время площади полевых и пастбищных

ландшафтов стабилизировались, а сельскохозяйственные земли достигли своего максимума, и их дальнейшее увеличение маловероятно.

Динамика посевных площадей. Площадь пашни во второй половине XX – начале XXI в., невзирая на определённые колебания, изменялась незначительно, гораздо сильнее менялись посевные площади. Достигнув максимума в начале 1960-х гг. (1963 г. – 5994,7 тыс. га, больше современной пашни), они начинают снижаться, особенно резко в конце 1990-х гг. (рис. 2). В 1997 г. посевная площадь оценивается в 3767,4 тыс. га, или 61,9 % от пашни. Если оперировать абсолютными величинами, то это меньше посевной площади 1913 г., составлявшей 3802 га. С 2001 г. начинается медленный рост посевов. В 2015 г. они достигли 4467,8 тыс. га, что составило 76 % от всех пахотных земель. В то же время эта величина лишь немного превышает показатель 1940 г., когда посевы размещались на площади 4448,1 тыс. га.

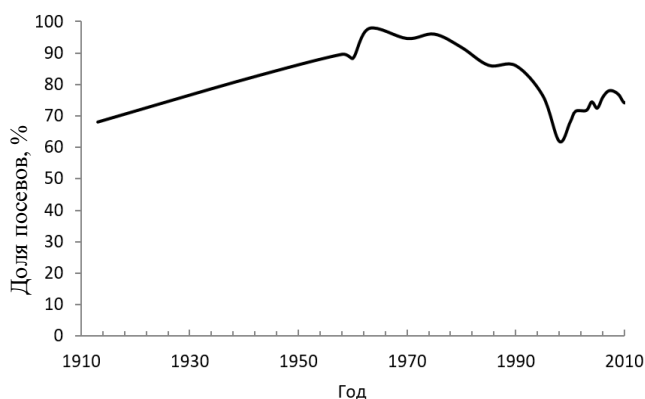


Рис. 2. Доля посевов от общей площади пашни с 1913 по 2015 г. (по [11, 13, 15, 16]) / Fig. 2. The share of crops from the total area of arable land from 1913 to 2015

Складывается впечатление, что структура землепользования стала такой же, как и в середине XIX в., в эпоху доминирования трехпольного земледелия: 2/3 пашен засеивается, 1/3 отдыхает под паром, причём эта ситуация типична для всей страны [21]. Вероятнее всего, формально числящиеся под паром пашни на самом деле давно выведены из хозяйственного использования и обращены в залежь. Причинами такой трансформации могут быть низкое плодородие почв или удаленность угодий от поселений. На территории юго-востока Ростовской области рост площади «чистых паров» зафиксирован нами еще в начале 1990-х гг. [4].

Рост урожайности основных сельскохозяйственных культур компенсирует уменьшение посевных площадей и обеспечивает растущие валовые сборы продукции растениеводства. Таким образом, сокращение посевных площадей не только целесообразно

по экологическим причинам, но и приемлемо по экономическим соображениям. Вместе с тем при благоприятной конъюнктуре на мировом рынке посевы зерновых и подсолнечника могут увеличиться.

Изменение структуры посевов. Соотношение посевов различных сельскохозяйственных культур является отражением агрогенной нагрузки на территорию. Особенно показательны в этом отношении многолетние травы и подсолнечник, обладающие противоположной почвозащитной способностью: коэффициент эрозионной опасности подсолнечника один из самых высоких – 0,75 – в то время как для многолетних трав он колеблется от 0,01 до 0,03. Минимальная периодичность возврата на прежнее место составляет для подсолнечника 6–7 лет, т.е. удельный вес его в посевах не должен превышать 14–16 % [3]. До начала аграрных реформ площади обеих культур в севооборотах Ростовской области были относительно стабильны и не превышали 10 % посевов. С начала 1990-х гг. посевы подсолнечника стали расти стремительными темпами и достигли максимума – 1328,1 тыс. га, или 30,4 % от посевной площади, – в 2006 г. (рис. 3). Для предотвращения истощения почв в 2009 г. был введен региональный норматив, ограничивающий площадь, занятую подсолнечником, на уровне 15 % от общей площади пашни [22]. Отталкиваясь от этой величины, можно констатировать превышение экологической нормы в 1999–2000 и 2003–2010 гг.

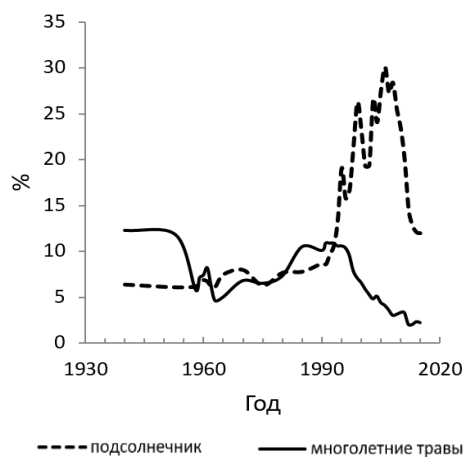


Рис. 3. Соотношение удельного веса подсолнечника и многолетних трав в структуре посевов с 1940 по 2015 г. (по [11–16]) / Fig. 3. The ratio of the relative weight of sunflower and perennial grasses in the structure of crops from 1940 to 2015

В 2013–2015 гг. площадь подсолнечника колебалась на уровне 12 % от общей посевной площади. Вместе с тем многие производители намерены расширять посевы подсолнечника. Аграриев мотивирует высокая рентабельность – себестои-

мость производства 1 кг семян составляет 7 рублей, зато продать его можно не менее чем за 20 рублей [23]. Помимо высокой рентабельности, интерес к подсолнечнику объясняется еще и меньшими рисками со стороны госрегулирования: на рынке зерна работают механизмы регулирования, такие как экспортная пошлина, закупочные интервенции, из-за чего зерновой рынок менее предсказуем [24].

Начиная с середины 1990-х гг. резко падают площади под многолетними травами, что вызвано негативными тенденциями в животноводстве. Вследствие резкого сокращения поголовья животных полевое кормопроизводство становится невостребованным. Если в 1986 г. крупного рогатого скота насчитывалось 2,339, а овец – 4,26 млн голов, то в 2016 г. – 0,59 и 1,183 млн голов. За этот же период площадь

многолетних трав снизилась с 550,7 до 96,4 тыс. га, т.е. в 5,5 раза.

Структура землепользования как фактор устойчивости агроландшафтов. Подробный перечень критериев оптимальной пространственной структуры ландшафтов степной зоны приведен в работе И.В. Орловой [25]. Сопоставление этих величин с данными по Ростовской области выявляет в первую очередь дефицит естественных ландшафтов, притом что в наших расчетах их площади завышены: к природным геосистемам отнесены, помимо заповедных территорий, еще пастбища и сенокосы [26]. Очевидно, что доля пашни приблизилась к предельной величине и её дальнейшее расширение недопустимо (таблица). Очень низка лесистость региона, по этому показателю Ростовская область занимает одно из последних мест в России.

**Экологические параметры сбалансированной территориальной организации в степной зоне
/ Ecological parameters of a balanced territorial organization in the steppe zone**

Показатель	Предельно допустимые экологические параметры	Оптимальные экологические параметры	Ростовская область (по [11, 16])
Доля природных ландшафтов в общей площади территории	Не менее 35–40 %	60 % природных ландшафтов, 40 % преобразованных	25,6 %
Доля пашни от площади территории	Не более 60 %	40–45 %	58,2 %
Доля лесных площадей от площади территории	Не менее 10–15 %	15–20 %	2,4
Доля селитебных территорий	Не более 10 %	1–3 %	3,7
Доля кормовых угодий от площади сельхозугодий	Не менее 30 %	40–50 %	30,2 %
Доля орошаемых земель от площади сельхозугодий	До 20 % в сухой и полусухой зонах; до 15 % в засушливой и полувзасушливой зонах	15–20 % в сухой и полусухой зонах; 10–15 % в засушливой и полувзасушливой зонах	2,7
Доля многолетних трав от площади пашни	Не менее 30 %	30–35 %	2,2 %
Доля полезащитных полос от площади пашни	Не менее 4–5 %	7–10 %	2,0

Выводы

1. В структуре земельного фонда Ростовской области с начала XX в. приоритетное место принадлежит пашням, занимающим более 50 % общей площади. Высокая степень сельскохозяйственной освоенности, длительная и интенсивная обработка почв способствовали широкому развитию деградиционных процессов, прежде всего водной и ветровой эрозии и дегумификации. Представляется целесообразной стабилизация структуры сельскохозяйственных земель на современном уровне (58 % пашни от всего земельного фонда, 76 % посевных площадей от пашни). Расширение пахотных угодий

и посевов недопустимо ввиду агроэкологических ограничений.

2. Перевод малопродуктивных пахотных земель в залежь, не отраженный в официальной земельной статистике, не вызвал сокращения объема сельхозпроизводства. Учитывая высокую распаханность региона, трансформацию угодий следует оценивать как позитивное явление.

Крайне недостаточна площадь полезащитных и противозерозионных лесных насаждений. Достигнув возраста 40–50 лет, они уже подошли к пределу своего производственного ресурса, а через 10–15 лет произойдет их массовая естественная гибель. В современных севооборотах практически утрачены

многолетние травы, являющиеся источником пополнения запасов гумуса в почве, – удельный вес этих культур в 15 раз ниже допустимого значения.

3. Сложившаяся структура посевов весьма неэкологична, прежде всего, из-за высокого удельного веса подсолнечника и низкой доли многолетних трав. Произошло нарушение структуры севооборотов в направлении подсолнечника, агротехнически истощающего почвенное плодородие, в ущерб многолетним травам, его восстанавливающим. Необходимо совершенствовать структуру посевов, применять экологически сбалансированные севообороты, внедрять ландшафтно-адаптивные системы земледелия.

Литература

1. Шишкина Д.Ю. Эволюция природопользования и изменение экологической ситуации в области Войска Донского: опыт ретроспективного анализа // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2007. № 2. С. 96–100.
2. Шишкина Д.Ю., Кочуров Б.И. Региональный прогноз экологической ситуации на основе стратегической матрицы // Проблемы региональной экологии. 2010. № 2. С. 13–19.
3. Закруткин В.Е., Коронкевич Н.И., Шишкина Д.Ю., Долгов С.В. Закономерности антропогенного преобразования малых водосборов степной зоны Юга России (в пределах Ростовской области). Ростов н/Д., 2004. 252 с.
4. Закруткин В.Е., Рышков М.М., Цвылев Е.М., Шишкина Д.Ю. Агрэкоэкосистемы в экстремальных природных условиях (на примере юго-восточных районов Ростовской области). Ростов н/Д., 2002. 152 с.
5. Полуэктов Е.В., Игнатюк О.А., Балакай Г.Т., Балакай Н.И. Комплексные исследования состояния и почвозащитные мероприятия на агроландшафтах // Науч. журн. Российского НИИ проблем мелиорации. 2013. № 4. С. 67–80.
6. Сухомлинова Н.Б., Суханова А.В. Эколого-экономические аспекты состояния агроландшафтов Ростовской области // Вестн. Южно-Российского гос. техн. ун-та. Социально-экономические науки. 2016. № 4. С. 37–42.
7. Сухоруков В.Д. Статистическое описание земли донских казаков, составленное в 1822–1832 гг. Новочеркасск, 1891. 304 с.
8. Краснов Н.И. Материалы для географии и статистики России, собранные офицерами Генерального штаба. Земля Войска Донского. СПб., 1863. 553 с.
9. Номикосов С.Ф. Статистическое описание области Войска Донского. Новочеркасск, 1884. 761 с.
10. Бозачев В.В. Очерки географии Всевеликого войска Донского. Новочеркасск, 1919. 550 с.
11. Ростовская область. Природа, население, хозяйство / под ред. А.И. Гозулова. Ростов н/Д., 1961. 334 с.
12. Лобанов В.М., Чешев А.С., Цвылев Е.М., Вальков В.Ф. Состояние и использование земельного фонда Ростовской области. Ростов н/Д., 1997. 232 с.
13. Народное хозяйство Ростовской области : стат. сб. Ростов н/Д., 1964. 270 с.
14. Народное хозяйство Ростовской области в одиннадцатой пятилетке : стат. сб. Ростов н/Д., 1986. 112 с.
15. Ростовская область в довоенные и послевоенные годы // Территориальный орган Федеральной службы государственной статистики по Ростовской области. URL: http://rostov.gks.ru/wps/wcm/connect/rosstat_ts/rostov/resources/aa0acb004870df5d91fed1f7eaa5adf2/70+%D0%BB%D0%B5%D1%82_%D0%BE%D0%B1%D0%BE%D0%B7%D1%80%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D0%B5.pdf (дата обращения: 15.04.2017).
16. Ростовская область в цифрах – 2015 : стат. сб. // Территориальный орган Федеральной службы государственной статистики по Ростовской области. URL: http://rostov.gks.ru/wps/wcm/connect/rosstat_ts/rostov/resources/f53313804f2ab78d988edf62f1bb3970/Binder1.pdf (дата обращения: 15.04.2017).
17. Экологический вестник Дона «О состоянии окружающей среды и природных ресурсов Ростовской области в 2016 году». Воронеж, 2017. 367 с.
18. Цветков М.А. Изменение лесистости европейской России с конца XVII столетия по 1914 год. М., 1957. 213 с.
19. Шишкина Д.Ю. Структура землепользования как индикатор антропогенной нагрузки (на примере Ростовской области) // Экологические проблемы. Взгляд в будущее : сб. тр. VIII Междунар. науч.-практ. конф. Ростов н/Д., 2017. С. 537–541.
20. Кузнецов В.В., Гарькавый В.В., Лысенко Е.Г., Тарасов А.Н. Экология и производство в аграрном секторе экономики. Ростов н/Д., 1997. 228 с.
21. Люри Д.И., Горячкин С.В., Караваева Н.А., Денисенко Е.А., Нефедова Т.Г. Динамика сельскохозяйственных земель России в XX веке и постагрогенное восстановление растительности и почв. М., 2010. 416 с.
22. Постановление Администрации Ростовской области от 16.04.09 № 182 «Об утверждении Правил рационального использования земель сельскохозяйственного назначения в Ростовской области» // Официальный портал правительства Ростовской области. URL: <http://www.donland.ru/Default.aspx?pageid=88451> (дата обращения: 15.04.2017).
23. Родович И. Производство растительного масла стало рекордным в октябре // Город N. 2016. № 49. 20 дек.
24. Бурлакова Е. Семечка созрела // Ведомости. 2016. № 4131. 4 авг. URL: <https://www.vedomosti.ru/business/articles/2016/08/04/651671-urozhai-podsolnechnika-mire-obschaet-rekordnim-visokogo-proizvodstva-rossii-ukraine> (дата обращения: 15.04.2017).
25. Орлова И.В. Динамика и сбалансированность структуры землепользования приграничных степных районов Западной Сибири // Степной бюл. 2006. № 21–22.

26. Шишкина Д.Ю. Геоэкологический анализ структуры землепользования на территории Ростовской области // Материалы Междунар. науч.-практ. конф. Тамбов, 2015. Ч. 12. С. 178–180.

References

1. Shishkina D.Yu. Evolyutsiya prirodopol'zovaniya i izmenenie ekologicheskoi situatsii v oblasti Voiska Donskogo: opyt retrospektivnogo analiza [Evolution of nature management and environmental change in the field of the Don Army: the experience of retrospective analysis]. *Izv. vuzov. Sev.-Kavk. region. Estestv. nauki.* 2007, No. 2, pp. 96-100.
2. Shishkina D.Yu., Kochurov B.I. Regional'nyi prognoz ekologicheskoi situatsii na osnove strategicheskoi matritsy [Regional forecast of an ecological situation on the basis of a strategic matrix]. *Problemy regional'noi ekologii.* 2010, No. 2, pp. 13-19.
3. Zakrutkin V.E., Koronkevich N.I., Shishkina D.Yu., Dolgov S.V. *Zakonomernosti antropogennogo preobrazovaniya malykh vodosborov stepnoi zony Yuga Rossii (v predelakh Rostovskoi oblasti)* [Regularity of anthropogenic transformation of small catchments of the steppe zone of the South of Russia (within the Rostov Region)]. Rostov-on-Don, 2004, 252 p.
4. Zakrutkin V.E., Ryshkov M.M., Tsvylev E.M., Shishkina D.Yu. *Agroekosistemy v ekstremal'nykh prirodnykh usloviyakh (na primere yugo-vostochnykh raionov Rostovskoi oblasti)* [Agroecosystems in extreme natural conditions (on the example of the south-eastern regions of the Rostov Region)]. Rostov-on-Don, 2002, 152 p.
5. Poluektov E.V., Ignatyuk O.A., Balakai G.T., Balakai N.I. Kompleksnye issledovaniya sostoyaniya i pochvozashchitnye meropriyatiya na agrolandshaftakh [Complex studies of the state and soil protection measures in agrolandscape]. *Nauch. zhurn. Rossiiskogo NII problem melioratsii.* 2013, No. 4, pp. 67-80.
6. Sukhomlinova N.B., Sukhanova A.V. *Ekologo-ekonomicheskie aspekty sostoyaniya agrolandshaftov Rostovskoi oblasti* [Ecological and economic aspects of the state of Rostov Region agrolandscapes]. *Vestn. Yuzhno-Rossiiskogo gos. tekhn. un-ta. Sotsial'no-ekonomicheskie nauki.* 2016, No. 4, pp. 37-42.
7. Sukhorukov V.D. *Statisticheskoe opisanie zemli donskikh kazakov, sostavlennoe v 1822-1832 gg.* [Statistical description of the land of the Don Cossacks, compiled in 1822-1832]. Novocherkassk, 1891, 304 p.
8. Krasnov N.I. *Materialy dlya geografii i statistiki Rossii, sobrannye ofitserami General'nogo shtaba. Zemlya Voiska Donskogo* [Materials for geography and statistics of Russia, collected by officers of the General Staff. The Land of the Don Army]. Saint Petersburg, 1863, 553 p.
9. Nomikosov S.F. *Statisticheskoe opisanie oblasti Voiska Donskogo* [Statistical description of the Don Cossacks area]. Novocherkassk, 1884, 761 p.
10. Bogachev V.V. *Ocherki geografii Vsevelikogo voiska Donskogo* [Essays on the geography of the All-Great Don Army]. Novocherkassk, 1919, 550 p.
11. *Rostovskaya oblast'. Priroda, naselenie, khozyaistvo* [The Rostov Region. Nature, population, economy]. Ed. A.I. Gozulov. Rostov-on-Don, 1961, 334 p.
12. Lobanov V.M., Cheshev A.S., Tsvylev E.M., Val'kov V.F. *Sostoyanie i ispol'zovanie zemel'nogo fonda Rostovskoi oblasti* [Status and use of the land fund of the Rostov Region]. Rostov-on-Don, 1997, 232 p.
13. *Narodnoe khozyaistvo Rostovskoi oblasti* [The national economy of the Rostov Region]. Statistical collection. Rostov-on-Don, 1964, 270 p.
14. *Narodnoe khozyaistvo Rostovskoi oblasti v odinadtsatoi pyatiletke* [The national economy of the Rostov Region in the eleventh five-year plan]. Statistical collection. Rostov-on-Don, 1986, 112 p.
15. [Rostov Region in the pre-war and post-war years]. *Territorial'nyi organ Federal'noi sluzhby gosudarstvennoi statistiki po Rostovskoi oblasti* [Territorial Authority of the Federal Service of State Statistics for the Rostov Region]. Available at: http://rostov.gks.ru/wps/wcm/connect/rosstat_ts/rostov/resources/aa0acb004870df5d91fed1f7eaa5adf2/70+%D0%BB%D0%B5%D1%82_%D0%BE%D0%B1%D0%BE%D0%B7%D1%80%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D0%B5.pdf (accessed 15.04.2017).
16. [Rostov Region in figures – 2015. Statistical collection]. *Territorial'nyi organ Federal'noi sluzhby gosudarstvennoi statistiki po Rostovskoi oblasti* [Territorial Authority of the Federal Service of State Statistics for the Rostov Region]. Available at: http://rostov.gks.ru/wps/wcm/connect/rosstat_ts/rostov/resources/f53313804f2ab78d988edf62f1bb3970/Binder1.pdf (accessed 15.04.2017).
17. *Ekologicheskii vestnik Dona "O sostoyanii okruzhayushchei sredy i prirodnykh resursov Rostovskoi oblasti v 2016 godu"* [Ecological messenger of the Don "On the state of the environment and natural resources of the Rostov Region in 2016"]. Voronezh, 2017, 367 p.
18. Tsvetkov M.A. *Izmenenie lesistosti evropeiskoi Rossii s kontsa XVII stoletiya po 1914 god* [Change in the forest cover of European Russia from the end of the XVII century to 1914]. Moscow, 1957, 213 p.
19. Shishkina D.Yu. [Land use structure as an indicator of anthropogenic load (on the example of the Rostov Region)]. *Ekologicheskie problemy. Vzgl'yad v budushchee* [Ecological problems. A glance into the future]. Collection of works of the VIII International Scientific and Practical Conference. Rostov-on-Don, 2017, pp. 537-541.
20. Kuznetsov V.V., Gar'kavyi V.V., Lysenko E.G., Tarasov A.N. *Ekologiya i proizvodstvo v agrarnom sektore ekonomiki* [Ecology and production in the agrarian sector of the economy]. Rostov-on-Don, 1997, 228 p.
21. Lyuri D.I., Goryachkin S.V., Karavaeva N.A., Denisenko E.A., Nefedova T.G. *Dinamika sel'skokhozyaistvennykh zemel' Rossii v XX veke i postagrogennoe vosstanovlenie rastitel'nosti i pochv* [Dynamics of agri-

cultural lands in Russia in the XX century and the post-agenic restoration of vegetation and soils]. Moscow, 2010, 416 p.

22. [Decree of the Administration of the Rostov Region of 16.04.09 No. 182 "On the approval of the Rules for the rational use of agricultural land in the Rostov Region"]. *Ofitsial'nyi portal pravitel'stva Rostovskoi oblasti* [Official portal of the Government of the Rostov Region]. Available at: <http://www.donland.ru/Default.aspx?pageid=88451> (accessed 15.04.2017).

23. Rodovich I. Proizvodstvo rastitel'nogo masla stalo rekordnym v oktyabre [Production of vegetable oil was a record in October]. *Gorod N.* 2016, No. 49, December 20.

24. Burlakova E. Semechka sozrela [The seed has ripened]. *Vedomosti.* 2016, No. 4131, August 4. Available at:

<https://www.vedomosti.ru/business/articles/2016/08/04/651671-urozhai-podsolnechnika-mire-obschaet-rekordnim-visokogo-proizvodstva-rossii-ukraine> (accessed 15.04.2017).

25. Orlova I.V. Dinamika i sbalansirovannost' struktury zemlepol'zovaniya prigranichnykh stepnykh raionov Zapadnoi Sibiri [Dynamics and balance of the land use structure of the bordered steppe regions of Western Siberia]. *Stepnoi byul.* 2006, No. 21-22.

26. Shishkina D.Yu. [Geoecological analysis of the structure of land use in the territory of the Rostov Region]. *Materialy Mezhdunar. nauch.-prakt. konf.* [Proceedings of the International Scientific and Practical Conference]. Tambov, 2015, ch. 12, pp. 178-180.

Поступила в редакцию / Received

16 августа 2017 г. / August 16, 2017

НАУЧНАЯ ЖИЗНЬ

SCIENTIFIC LIFE

DOI 10.23683/0321-3005-2017-3-1-129-130

СОХРАНИМ ПРИРОДУ СТЕПИ ВМЕСТЕ

SAVE THE NATURE OF STEPPE TOGETHER

Ухудшающаяся экологическая ситуация и проблемы сохранения биоразнообразия обусловили появление Указов Президента РФ от 01.08.2015 № 392 «О проведении в Российской Федерации года особо охраняемых природных территорий (далее РФ и ООПТ)» и от 05.01.2016 № 7 «О проведении в РФ Года экологии», появление Распоряжений Правительства РФ от 26.12.2015 № 2720-р «Об утверждении плана основных мероприятий по проведению в 2017 г. в РФ Года ООПТ» и от 02.06.2016 № 1082-р «Об утверждении плана основных мероприятий по проведению в 2017 г. в РФ Года экологии». Соответствующие планы приняты и на Дону, где природа испытывает сильные антропогенные трансформации. В состав основных мероприятий федерального и областного планов по проведению Года экологии и ООПТ вошел и очередной VI фестиваль экологического туризма «Воспетая степь», проходивший под лозунгом «Сохраним природу Дона вместе».

Первые 3 фестиваля «Воспетая степь» были организованы ассоциацией «Живая природа степи» в буферной зоне заповедника «Ростовский» в 2013-2014 гг. Активное участие в них принимали сотрудники заповедника. С IV фестиваля организаторами его стали минприроды Ростовской области (РО), департамент по предупреждению и ликвидации ЧС РО, ассоциация «Живая природа степи» (Ассоциация), заповедник «Ростовский» и администрация Орловского р-на. В восстановленной естественной степи фестивали собирают сотрудников различных государственных и негосударственных структур, любителей природы, которые подводят итоги своей природоохранной деятельности, обмениваются опытом работы, показывают свои достижения, знакомятся с успехами охраны природы заповедника и ассоциации. Проведение этих фестивалей стало доброй и красочной традицией РО. С годами это полезное, интересное и зрелищное мероприятие набирало популярность. Если I фестиваль посетили около 300 человек, II – 500, III – 630, то IV – 3500, V – 7 тыс.

В прошлом фестивали охватывали 1–2 дня. Увеличение с годами его популярности и числа участников, возрастающая необходимость сохранения степных экосистем, колеблющиеся показатели погодных условий заставляли сотрудников минприроды РО, заповедника и Ассоциации после каждого фестиваля проводить его всесторонний анализ и вносить определенные коррективы в организацию следующего. Для снижения и более равномерного распределения нагрузки от пребывания большого количества участников на степную растительность период проведения VI межрегионального фестиваля растянули со 2-го по 29 апреля. Возросло количество задействованных площадок, улучшились их оборудование и обслуживание. В визит-центре заповедника состоялось открытие информационно-туристического центра (ИТЦ) с интересными и характерными для восстановленной степи экспозициями. Рядом с ним в палатках разместились экспозиции заповедников России (Воронежского, Хоперского, Черных Земель и др.). На стационаре Ассоциации к фестивалю был построен питомник (1734 га) с обширными загонами, водопоями для полувольного содержания ламы, двугорбого верблюда, бизона, буйвола, яка, канны, сайгака, лошади Пржевальского, кулана и других животных. Традиционной площадкой остался Центр редких животных европейских степей с дрофой, сурком, сайгаком, пони, страусами и иными видами. Все желающие в сопровождении экскурсоводов посетили оборудованную природоохранными стендами и проходами экологическую тропу «Лазоревый цветок» на склонах соленого озера Лопуховатое с массовым цветением тюльпанов (двухцветкового, Шренка, Биберштейна), ирисов и других первоцветов. Некоторые участники посетили берега самого крупного в Европе соленого озера Маныч-Гудило, где познакомились с его историей, легендами, животным миром.

Центральной площадкой фестиваля стала естественная степь в 3 км от визит-центра, где развернулся палаточный городок со сценой, красочной аркой, баннерами, стоянками автотранспорта и

другими сопутствующими элементами. В палатках (их соорудили больше, чем в 2016 г.) были представлены экспонаты и стенды минприроды РО, ЮФУ, ЮНЦ РАН, МЧС, донских музеев (Азовско-го историко-краеведческого, Государственного музея-заповедника М.А. Шолохова, археологического музея-заповедника «Танаис» и др.), Ростовской атомной станции, большинства районов РО, Республики Калмыкии, ряда других государственных и общественных организаций и иных структур. В палаточном городке находилось свыше 150 тематических мастер-классов. Они имели направленность на экологическое воспитание населения, прежде всего молодежи, и демонстрировали свою деятельность, историю и природные богатства степей, их рациональное использование и привлекательность для экотуристов, экологические проблемы и пути их решения. Каждый участник фестиваля мог найти здесь занятие по душе: научиться вышивке бисером, искусству декупажа, пирографии, мыловарению, скорняжному мастерству и т.д. На центральной площадке 29 апреля состоялись общие торжественные мероприятия фестиваля с приветствием губернатора РО В.Ю. Голубева и вручением памятных знаков специалистам, внесшим значительный вклад в сохранение донской природы, выступления театральных и творческих коллективов, флешмобы, знакомства с мастер-классами, обмен опытом работы, экскурсии на отдельные площадки. Народные промыслы, экологические акции, научно-просветительские мероприятия, выступления творческих коллективов – всё было посвящено общей идее: осознанию уникальности природных богатств родного края, бережного к ним отношения.

Благодаря растянутости сроков проведения VI фестиваля и увеличению количества демонстрационных площадок число посетивших его участников по сравнению с предыдущими годами возросло, а антропогенная нагрузка на степные экосистемы снизилась. На центральной площадке, площадках в визит-центре и экологической тропе «Лазоревый цветок», стационаре Ассоциации 29 апреля собралось свыше 7 тыс. участников. До этого дня со 2 апреля территорию заповедника и Ассоциации посетили отдельные группы любителей природы, школьники, студенты, журналисты, представители Донской государственной публичной и других библиотек, ООО «Газпром межрегионгаз Ростов-на-Дону», турфирм, специалистов иных структур из РО, Москвы, Калмыкии, Кубани, Воронежской области и других регионов. В открытии ИТЦ в визит-центре заповедника, нового питомника для животных в Ассоциации и

выпуске в него сайгаков участвовали спецпредставитель президента России по вопросам природоохранной деятельности, экологии и транспорта С.Б. Иванов, глава Минприроды РФ С.Е. Донской, губернатор РО В.Ю. Голубев, первый заместитель губернатора В.Г. Гончаров, министр минприроды РО Г.А. Урбан, председатель попечительского совета Ассоциации А.М. Узденов, председатель президиума Ассоциации, заместитель председателя комиссии по вопросам общественной безопасности и общественного контроля РО В.И. Даньков, другие известные люди. В степи они наблюдали за табуном одичавших лошадей, бизонами, верблюдами, сайгаками и многими другими животными. Спецпредставитель президента и глава Минприроды России отметили важность формирования таких центров. «Создание заповедников и национальных парков – это одна из лучших форм защиты уникальных природных мест нашей страны. У нас в этом году, который объявлен президентом РФ Годом экологии и ООПТ, создается много различных визит-центров в национальных парках. В первую очередь чтобы люди пришли сюда и увидели уникальность природы. Правительство РФ утвердило приоритетный проект “Дикая природа”, который предусматривает развитие экологического туризма. А визит-центры – это отправная точка для этого. Мы увидели здесь хороший пример такой работы. А с другой стороны, на этом не надо останавливаться, надо создавать больше визит-центров», – высказал пожелание С.Е. Донской.

В апреле заповедник, оз. Маныч-Гудило, стационар и центр Ассоциации посетили журналисты телекомпаний «Россия-24», «Россия-Культура», «ДонТР», «Южный регион». Ими были сняты различные сюжеты фестиваля, цветущая весенняя степь, соленые озера, дрофа, сайгак, лошадь Пржевальского, олень Давида, бизон в вольерах и полувольных условиях стационара Ассоциации, стрепет, журавль-красавка, лебедь-шипун, серый гусь, желтобрюхий полоз, степная гадюка и другие виды в естественной степи. Известный донской художник О.Н. Майборода, регулярно посещающий фестиваль, организовал мастер-класс для всех интересующихся и выставку своих картин, выполненных в Манычских степях. Фестиваль «Воспетая степь» широко известен за пределами Дона. С каждым годом его популярность растет, а качество улучшается. Он выполняет заметную роль в природоохранном воспитании и образовании населения, и прежде всего молодежи, в развитии экологического туризма.

*В.А. Миноранский, доктор сельскохозяйственных наук, профессор,
Южный федеральный университет*

DOI 10.23683/0321-3005-2017-3-1-131-132

**ВСЕРОССИЙСКАЯ НАУЧНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
«ЯЗЫКИ ПРОГРАММИРОВАНИЯ И КОМПИЛЯТОРЫ»**

(Ростов-на-Дону, 3–5 апреля 2017 г.)

**ALL-RUSSIAN SCIENTIFIC CONFERENCE
"PROGRAMMING LANGUAGES AND COMPILERS"**

(Rostov-on-Don, April 3-5, 2017)



С 3 по 5 апреля 2017 г. на мехмате ЮФУ проходила Всероссийская научная конференция «Языки программирования и компиляторы», посвященная бывшему директору вычислительного центра РГУ Адольфу Львовичу Фуксману (04.07.1937 – 08.01.1978), которому в июле 2017 могло бы исполниться 80 лет.

Доклады конференции направлены на решение актуальной проблемы развития языков программирования и компиляторов в соответствии с потребностями в разработке программного обеспечения для широкой сферы прикладных задач и новых вычислительных систем.

Языки и компиляторы являются основными инструментами разработки программ. Конференций по данной тематике в чистом виде в последнее время в России не наблюдалось. Актуальность данной конференции продиктована быстрорастущей широтой применения информационных технологий и постоянным усложнением вычислительной техники.

Было подано 76 заявок на доклады (включая доклады на молодежную секцию конференции, не

поддержанную фондом). Все заявки проходили неформальное рецензирование (на каждую не менее 2 рецензий). В итоге в программе конференции осталось 60 докладов, включая доклады молодежной секции, доклады о выдающемся ростовском ученом-программисте А.Л. Фуксмане, один спонсорский, 7 пленарных, 49 секционных докладов. Работали 2 секции (примерно равные по количеству докладов): «Языки программирования» и «Компиляторы». В рамках конференции проведены мастер-класс (к.ф.-м.н. Н.В. Шилов, Университет Иннополис) по формальным семантикам языков программирования, а также мастер-класс разработчиков системы PVS-Studio по практическому использованию данной системы для статического анализа кода и поиска ошибок в проекте.

В открытии конференции приняли участие ветераны вычислительного центра Ростовского государственного университета (сейчас ЮФУ), которые работали под руководством А.Л. Фуксмана. Культурную программу конференции представил из своих произведений доцент Ростовской консерватории, кандидат искусствоведения, член Ростовского отделения Союза композиторов РФ Михаил Адольфович Фуксман (сын А.Л. Фуксмана).

На конференции прозвучали актуальные задачи теории языков программирования и компиляторов и был обозначен уровень состояния науки в их решении.

В докладе проф. А.Н. Терехова (в соавторстве с М.А. Тереховым) представлен язык РуСи (русифицированный Си), разрабатываемый для обучения программированию школьников младших классов (которые слабо знакомы с английскими словами, являющимися ключевыми в обычных языках программирования). Разрабатываемый язык имеет синтаксис, подобный языку Си, но с повышенной надежностью (защитой от типичных программистских ошибок). Такое качество оказалось востребованным для некоторых организаций реального сектора экономики.

Ряд докладов представляет теорию типов (И. Сергей, Ю. Белякова), теорию автоматических доказательств теорем (Е. Комендантская), развитие теории функциональных языков (д.ф.-м.н. А. Легалов, А.М. Пеленицын и др.).

В интересном амбициозном докладе А. Кручаненко «Кросс-платформенное средство разработки программного обеспечения “Платформа ДОМИНАНТА”» представлена программная платформа с заявленной производительностью на 40 % выше известных. Автору рекомендовано расширить множество тестов, на которых демонстрируется преимущество его системы.

Представлена серия докладов (проф. А.О. Лацис, к.ф.-м.н. С. Гуда, к.ф.-м.н. А. Бугеря, М. Бахтерев, Ю. Михайлуц, Р. Ибрагимов) о компиляторах на нестандартные вычислительные архитектуры (графические карты, ПЛИС, вычислительную систему «Мультиклет»), о развитии оптимизирующей распараллеливающей системы (ОРС) ЮФУ (д.т.н. Б.Я. Штейнберг, к.ф.-м.н. Д. Дубров, к.т.н. Е.В. Алымова, к.ф.-м.н. О.Б. Штейнберг и др.). В частности, сделано сообщение о разработке конвертора из внутреннего представления ОРС во внутреннее представление компилятора Clang. Такой конвертор позволит подключить высокоуровневые преобразования программ ОРС к компилятору Clang (и, соответственно, к оптимизирующим преобразованиям LLVM и генераторам кода из этой системы).

В докладе д.т.н. Б.Я. Штейнберга обозначены направления развития оптимизирующей компиляции программ для процессоров близкого будущего.

Представлены доклады в области аспектно-ориентированного и расслоённого программирования (основоположником которого является А.Л. Фуксман) – об использовании разделенной функциональности для анализа грамматик языков программирования (А. Головешкин, Ростов-на-Дону) и эволюционной разработки программ с применением процедурно-параметрической парадигмы (А. Легалов, СФУ).

Ряд работ нацелен на создание сертифицированных компиляторов и спецификаций языков программирования (В. Глушкова, ДГТУ, Ю. Белякова, ЮФУ).

Наконец, на конференции в ряде докладов рассмотрены теоретические и прикладные аспекты разработки полноценных компиляторов, созданных

под руководством авторов докладов и реально используемых в ряде областей: компилятор РуСи (А. Терехов, образовательная область и промышленная разработка программ), компилятор Pascal ABC.NET (С.С. Михалкович, образовательная область и область академических исследований), HomeLisp (Б. Файфель, образовательная область), «Платформа ДОМИНАНТА» (А. Кручаненко, промышленная разработка программ).

На данной конференции представлены доклады представителей Новосибирской школы теоретического программирования академика А.Н. Ершова (Н.В. Шилов, Л.В. Городняя), Санкт-Петербургской школы системного программирования Г.С. Цейтина (А.Н. Терехов), Ростовской школы теории компиляции программ А.Л. Фуксмана (С.С. Михалкович, Б.Я. Штейнберг), лаборатории языковых инструментов JetBrains (заведующий лабораторией Д.Ю. Булычев), ведущего специалиста по разработке высокопроизводительных систем с программируемыми ускорителями А.О. Лациса и др.

Изданы труды конференции и книга воспоминаний об А.Л. Фуксмане «Как стать программистом», электронную версию которой предполагается опубликовать на сайте виртуального компьютерного музея <http://www.computer-museum.ru/>, где есть аллея памяти выдающихся отечественных ученых в области ИТ. В этой книге рассказывается история о том, как молодой А.Л. Фуксман, будучи не просто успешным математиком, досрочно защитившим кандидатскую диссертацию, а (судя по воспоминаниям проф. В.П. Захарюты) наиболее сильным математиком в своем поколении, сменил тематику исследований на непрестижное тогда программирование и вывел ВЦ РГУ на передовые позиции по теоретическому программированию. А.Л. Фуксман организовывал всесоюзные конференции по системному программированию, на которые съезжались все звезды программирования СССР. После этого, встречая ростовских ученых-программистов на семинарах в Москве, Санкт-Петербурге или Новосибирске, о них говорили, что они из Ростовского университета, где работал А.Л. Фуксман.

Проведенная конференция подняла интерес ученых, работающих в области теоретического программирования, к дальнейшим исследованиям в области языков программирования и компиляторов. На конференции произошел обмен мнениями многих ученых о трудах коллег из других городов.

Михалкович С.С., кандидат физико-математических наук, доцент,
Южный федеральный университет

Штейнберг Б.Я., доктор технических наук, старший научный сотрудник,
Южный федеральный университет

**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