

ИЗВЕСТИЯ
ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

*Северо-Кавказский
регион*

ЕСТЕСТВЕННЫЕ

НАУКИ

2020

1

Журнал основан в 1972 г. Ю.А. Ждановым

Редакционная коллегия:

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

Учредители:

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

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

Подписано в печать 02.04.2020. Выход в свет 06.04.2020. Формат 60×84 1/8. Бумага офсетная.

Шрифт Times. Усл. печ. л. 14,41. Уч.-изд. л. 17,06. Тираж 250 экз. Заказ № 7571

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

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

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

Journal was founded in 1972 by Yu.A. Zhdanov

Editorial Board:

V.E. Zakrutkin - Chairman of the Editorial Board, Doctor of Geology and Mineralogy, Professor, Southern Federal University, Russia
V.A. Babeshko - Academician, Russian Academy of Sciences, Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Kuban State University, Russia
B.S. Karamurzov - Doctor of Technical Sciences, Professor, Berbekov Kabardino-Balkarian State University, Russia
V.I. Kolesnikov - Academician, Russian Academy of Sciences, Doctor of Technical Sciences, Professor, Rostov State Transport University, Russia
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
G.G. Matishov - Academician, Russian Academy of Sciences, Doctor of Geology and Mineralogy, Professor, Federal Research Center the Southern Scientific Center, Russian Academy of Sciences, Russia
V.I. Minkin - Academician, Russian Academy of Sciences, Doctor of Chemistry, Professor, Southern Federal University, Russia
M.H. Rabadanov - Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Dagestan State University, Russia
E.Z. Emirbekov - Doctor of Biology, Professor, Southern Federal University, Russia
V.N. Trufanov - Deputy Chairman of the Editorial Board, Doctor of Geology and Mineralogy, Professor, Southern Federal University, Russia
A.V. Abanin - Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Southern Federal University, Russia
O.S. Bezuglova - Doctor of Biology, Professor, Southern Federal University, Russia
N.I. Boiko - Doctor of Geology and Mineralogy, Professor, Southern Federal University, Russia
A.V. Bochkarev - Doctor of Geology and Mineralogy, Professor, Gubkin Russian State University of Oil and Gas, Russia
V.V. Vnukov - Doctor of Biology, Professor, Southern Federal University, Russia
L.S. Vorovich - Candidate of Physics and Mathematics, Associate Professor, Southern Federal University, Russia
O.N. Dyomina - Doctor of Biology, Professor, Aliev Karachay-Cherkess State University, Russia
A.G. Zakharov - Doctor of Technical Sciences, Professor, Southern Federal University, Russia
L.M. Zubov - Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Southern Federal University, Russia
Ya.M. Erusalimsky - Deputy Chairman of the Editorial Board, Candidate of Physics and Mathematics, Doctor of Technical Sciences, Professor, Southern Federal University, Russia
M.I. Karjakin - Doctor of Physics and Mathematics, Associate Professor, Southern Federal University, Russia
S.B. Klimentov - Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Southern Federal University, Russia
S.I. Kolesnikov - Candidate of Geography, Doctor of Agricultural Science, Professor, Southern Federal University, Russia
G.V. Kupovykh - Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Southern Federal University, Russia
S.V. Kurbatov - Doctor of Chemistry, Professor, Southern Federal University, Russia
A.M. Lerer - Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Southern Federal University, Russia
V.A. Minoranskiy - Doctor of Agricultural Science, Professor, Southern Federal University, Russia
V.V. Onishchenko - Doctor of Geography, Professor, Aliev Karachay-Cherkess State University, Russia
O.V. Nazarenko - Candidate of Geography, Associate Professor, Southern Federal University, Russia
G.V. Pirogovskaya - Doctor of Agricultural Science, Professor, Institute of Soil Science and Agrochemistry, National Academy of Sciences of Belarus, Belarus
V.S. Rabinovich - Doctor of Physics and Mathematics, Professor, National Polytechnic Institute, Mexico
A.K. Saghatel'yan - 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
E.A. Shinkarenko - Assistant Editor of the Journal, Southern Federal University, Russia
T.A. Vatulyan - Assistant Editor for Publishing of the Journal, Southern Federal University, Russia

The Founders

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

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

Signed print 02.04.2020. The publication 06.04.2020. Format 60×84 1/8. Offset paper. Font Times.
Conv. print. sheets 14,41. Publ. sign. 17,06. Edition 250 copies. Order number 7571.

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

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

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

ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ. СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ РЕГИОН

BULLETIN OF HIGHER EDUCATIONAL INSTITUTIONS. NORTH CAUCASUS REGION.

DOI 10.18522/1026–2237-2020-1

Свидетельство о регистрации
ПИ № ФС 77 – 77252 от 25.11.2019,
выдано Федеральной службой по надзору
в сфере связи, информационных технологий
и массовых коммуникаций
Научный журнал
Издается с 1973 г.
Периодичность серии 4 номера в год
№ 1 (205) 2020 г.

Registration certificate
PI No. FS 77 - 77252 dated 25.11.2019
issued Federal Service for Supervision
of Communications, Information Technology,
and Mass Media
Science magazine
Published since 1973.
4 issues per a year
No. 1 (205) 2020

ЕСТЕСТВЕННЫЕ НАУКИ

NATURAL SCIENCE

СОДЕРЖАНИЕ

CONTENTS

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ

PHYSICAL AND MATHEMATICAL SCIENCES

Жуков М.Ю., Полякова Н.М., Ширяева Е.В. Квазистационарное турбулентное течение в цилиндрическом канале с неровными стенками4
Куракин Л.Г., Курдоглыян А.В. О применении критериев устойчивости равновесия для систем дифференциальных уравнений с двумя косимметриями в критических случаях 11
Мусатова Н.К., Сумбатян М.А. Излучение звука точечным источником вблизи поверхности летательного аппарата17

Zhukov M.Yu., Polyakova N.M., Shiryayeva E.V. Quasi-Stationary Turbulent Flow in Cylinder Channel with Irregular Walls 4
Kurakin L.G., Kurdoglyan A.V. On Applying of Equilibrium Stability Criteria for Systems of Differential Equations with Two Cosymmetries in Critical Cases11
Musatova N.K., Sumbatyan M.A. Sound Radiation by a Point Source Near a Surface of Aircraft..... 17

НАУКИ О ЗЕМЛЕ

SCIENCES OF EARTH

Battsetseg D., Lkhagvasuren Ch., Batkhishig O., Zoljargal Kh. Soils of Buyant River Basin: Types, Properties, and Relation to Other Environmental Parameters26
Гибков Е.В., Закруткин В.Е., Решетняк В.Н., Решетняк О.С. Эколого-геохимические особенности донных отложений рек Восточного Донбасса36
Дахова О.О., Каирова Л.Л., Хучунаев Б.М., Куповых Г.В. Геоэкологическое картографирование Кабардино-Балкарской Республики47

Battsetseg D., Lkhagvasuren Ch., Batkhishig O., Zoljargal Kh. Soils of Buyant River Basin: Types, Properties, and Relation to Other Environmental Parameters 26
Gibkov E.V., Zakrutkin V.E., Reshetnyak V.N., Reshetnyak O.S. Ecological and Geochemical Features of the River Sediments of East Donbass..... 36
Dakhova O.O., Kairova L.L., Khuchunaev B.M., Kupovykh G.V. Geoecological Mapping of Kabardino-Balkarian Republic 47

<i>Ивасенко Р.Н., Попов Ю.В., Фомина М.И., Михалицына Т.И., Скильская Е.Д.</i> Минеральные ассоциации золоторудных проявлений Берентальского рудного поля (Северо-Восток России).....	53	<i>Ivasenko R.N., Popov Yu.V., Fomina M.I., Mikhailitsyna T.I., Skilskaya E.D.</i> Mineral Associations of Gold-Ore Occurrences, Berental Ore Cluster (North-East of Russia)	53
<i>Назаренко О.В.</i> Изменение некоторых метеорологических показателей в бассейне Азовского моря.....	62	<i>Nazarenko O.V.</i> Variability of Some Meteorological Parameters in the Basin of Azov Sea	62
<i>Панов Б.Н., Спиридонова Е.О., Пятинский М.М., Арутюнян А.С.</i> Результаты мониторинга температурных условий миграции и промысла азовской хамсы	71	<i>Panov B.N., Spiridonova E.O., Pyatinskiy M.M., Arutyunyan A.S.</i> Results of Monitoring of Temperature Conditions of Migration and Fishing of the Azov Khamsa	71
<i>Радионофф А.А.</i> О малых колебаниях магмы в питающей системе вулкана.....	78	<i>Radionoff A.A.</i> On Small Oscillations Inside a Volcano Feeding System	78
<i>Романов Р.В., Вараксин Г.С.</i> Анализ кадастровой оценки земель с учетом зонирования земель по престижности в городе Красноярске.....	85	<i>Romanov R.V., Varaksin G.S.</i> Analysis of the Cadastral Assessment of Lands, Taking into Account Zoning of Lands at a Prestige in Krasnoyarsk	85

БИОЛОГИЧЕСКИЕ НАУКИ

<i>Алешукина А.В., Голошва Е.В., Твердохлебова Т.И.</i> Исследование влияния дезинфицирующих средств на биопленкообразующие неферментирующие бактерии	89	<i>Aleshukina A.V., Goloshva E.V., Tverdokhlebova T.I.</i> Investigation of the Effect of Disinfectants on Biofilm Forming Non-Fermenting Bacteria.....	89
<i>Исламмагомедова Э.А., Халилова Э.А., Котенко С.Ц., Абакарова А.А., Аливердиева Д.А.</i> Морфологические особенности дрожжей рода <i>Saccharomyces</i> в процессе адаптации к экстремальным значениям глюкозы и этанола	95	<i>Islammagomedova E.A., Khalilova E.A., Kotenko S.Ts., Abakarova A.A., Aliverdieva D.A.</i> The Morphological Features of Adaptation of the Yeast of the Genus <i>Saccharomyces</i> to Extreme Values of Glucose and Ethanol	95
<i>Самбыла Ч.Н.</i> Распределение запасов фитомассы кустарниковых тундр Алтае-Саянской горной области в связи с экспозицией склонов	102	<i>Sambyla Ch.N.</i> Distribution of Altay-Sayan Mountain Region Shrub Tundra Phytomass Reserves in Connection With Slope Exposure	102
<i>Соколова Т.А., Ермолаева О.Ю.</i> Редкие виды растений естественных лесов Ростовской области	111	<i>Sokolova T.A., Ermolaeva O.Yu.</i> Rare Plant Species of Natural Forests of Rostov Region.....	111

НАШИ ЮБИЛЯРЫ

<i>Михайлов И.Е., Калинин В.В.</i> Владимир Исаакович Минкин (85 лет со дня рождения)	122	<i>Mikhailov I.E., Kalinchuk V.V.</i> Vladimir Isaakovich Minkin (85 years Since the Birth)	122
---	-----	---	-----

ПАМЯТИ УЧЕНОГО

<i>Назаренко О.В.</i> Никаноров Анатолий Максимович (22.05.1935–28.12.2019)	125	<i>Nazarenko O.V.</i> Nikanorov Anatoly Maksimovich (22.05.1935–28.12.2019).....	125
---	-----	--	-----

BIOLOGICAL SCIENCES

OUR PERSONS

SCIENTIST'S MEMORY

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ

PHYSICAL AND MATHEMATICAL SCIENCES

УДК 532.5, 556

DOI 10.18522/1026–2237-2020-1-4-10

КВАЗИСТАЦИОНАРНОЕ ТУРБУЛЕНТНОЕ ТЕЧЕНИЕ
В ЦИЛИНДРИЧЕСКОМ КАНАЛЕ С НЕРОВНЫМИ СТЕНКАМИ*© 2020 г. М.Ю. Жуков^{1,2}, Н.М. Полякова¹, Е.В. Ширяева¹¹Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, Россия²Южный математический институт – филиал Владикавказского научного центра РАН, Владикавказ, РоссияQUASI-STATIONARY TURBULENT FLOW IN CYLINDER CHANNEL
WITH IRREGULAR WALLSM.Yu. Zhukov^{1,2}, N.M. Polyakova¹, E.V. Shiryayeva¹¹Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia²Southern Mathematical Institute - Branch of the Vladikavkaz, Scientific Centre, Russian Academy of Science, Vladikavkaz, Russia

Жуков Михаил Юрьевич – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой вычислительной математики и математической физики, Институт математики, механики и компьютерных наук им. И.И. Ворovichа, Южный федеральный университет, ул. Мильчакова, 8а, г. Ростов-на-Дону, 344090, Россия; профессор, Южный математический институт – филиал Владикавказского научного центра РАН, ул. Маркуса, 22, г. Владикавказ, Республика Северная Осетия-Алания, 362027, Россия, e-mail: myzhukov@sfnu.ru

Michael Yu. Zhukov - Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Head of Department of Mathematics and Mathematical Physics, Vorovich Institute of Mathematics, Mechanics and Computer Sciences, Southern Federal University, Milchakova St., 8a, Rostov-on-Don, 344090, Russia; Professor, Southern Mathematical Institute - Branch of the Vladikavkaz, Scientific Centre, Russian Academy of Science, Markusa St., 22, Vladikavkaz, Republic of North Ossetia Alania, 362027, Russia, e-mail: myzhukov@sfnu.ru

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

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

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

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

Построена и исследована простейшая асимптотическая модель стационарного вращательно-симметричного течения в бесконечном цилиндрическом канале с неровными стенками. Кинематическая вязкость выбрана зависящей от радиальной и осевой координат. В качестве краевого условия на боковой границе цилиндра принято кинематическое условие, соответствующее непроницаемости границы для жидкости. Предполагается, что классическое условие прилипания выполнено лишь на прямолинейных участках границы. Для участков, не являющихся прямолинейными, никаких дополнительных условий, кроме кинематического, не задается. Показано, что при любом расходе жидкости в областях, в которых кривизна боковой границы цилиндра отрицательна, в стационарном течении имеются тороидаль-

* Работа выполнена при финансовой поддержке базовой части технического задания 1.5169.2017/8.9 Министерства образования и науки РФ, ЮФУ.

ные вихри. Решение задачи построено в аналитической форме и справедливо в любой области с достаточно гладкими боковыми границами цилиндра. В качестве примера рассмотрен случай турбулентной кинематической вязкости, обращающейся в нуль на боковой границе цилиндра. Для предотвращения возникновения сингулярностей скорости вводится шероховатость боковой стенки. Предложенная модель может имитировать течение крови по сосудам и, в частности, использоваться для изучения квазистационарного движения примеси, например, эритроцитов, в течении с известной структурой.

Ключевые слова: вязкая жидкость, турбулентное течение, вращательная симметрия, квазистационарное течение, условия проскальзывания.

A simple asymptotic model of a stationary rotationally symmetric flow in an infinite cylindrical channel with irregular walls is constructed and investigated. We assume that kinematic viscosity depends on the radial and axial coordinates. The kinematic condition corresponding to the impermeability of the boundary for the liquid is chosen. It is assumed that the classical non-slip condition is completed only in straight segments of the boundary. For parts of the boundary that are not straight, any additional terms, in addition to the kinematic conditions, are not required. It is shown that at any fluid flow rate in domains where the curvature of the cylinder boundary is negative, there are toroidal vortices in the stationary flow. The solution of the problem is constructed in analytical form. This solution is valid in any domain with sufficiently smooth cylinder boundaries. As an example, we consider the case of turbulent kinematic viscosity vanishing at the cylinder boundary. To prevent the velocity singularities the roughness of the wall is introduced. The proposed model can simulate the blood flow through the vessels and, in particular, be used to study the quasi-stationary motion of impurities, for example, erythrocytes, in the flow with the known structure.

Keywords: viscous liquid, turbulent flow, rotational symmetry, stationary flow, slip conditions.

Введение

На основе асимптотической модели исследуется вращательно-симметричное стационарное течение вязкой несжимаемой жидкости в бесконечном цилиндре переменного сечения. Плотность жидкости считается постоянной. Коэффициент кинематической вязкости $\mu = \mu(r^2, z)$ выбран зависящим от радиальной r и осевой z координат. Например, в простейшем варианте $\mu(r, z) = \mu_0(\eta^2(z) - r^2)$, где функция $\eta(z)$ задает боковую поверхность цилиндра $r = \eta(z)$; μ_0 – характерная величина вязкости. Такой выбор типичен для турбулентных течений и соответствует логарифмическому по переменной r профилю осевой скорости w . В случае цилиндрической области с постоянным сечением указанный коэффициент согласуется с экспериментами по реальному турбулентному течению жидкости [1, гл. 20]. Анализ задачи показывает, что при таком выборе вязкости на боковых границах цилиндра имеются сингулярности скорости течения, для предотвращения которых вводится шероховатость стенки при помощи функции $\delta(z)$ [1, гл. 20]. Течение жидкости рассматривается не в области $0 \leq r \leq \eta(z)$, а в области $0 \leq r \leq h(z)$, $h(z) = \eta(z) - \delta(z)$ (рис. 1).

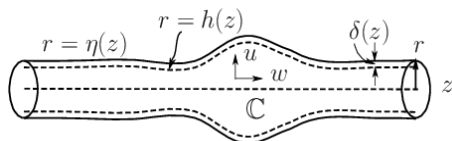


Рис. 1. Схема области /
Fig. 1. Sketch of the domain

Асимптотическая модель – это главные члены асимптотического разложения по малому параметру (отношению характерного радиуса цилиндра к его характерной длине) уравнений движения вязкой несжимаемой жидкости. Особенностью модели является отказ от условия прилипания жидкости к боковой границе цилиндра на тех участках границы, которые не являются прямолинейными. На этих участках задается лишь кинематическое условие, соответствующее непроницаемости границы. По-видимому, следует отказаться от условия прилипания и в случае сильношероховатых границ, когда граница $r = \eta(z)$ или $r = h(z)$ имеет мелкие шероховатости и в среднем является прямолинейной, например,

$$r = h(z) = h_0 + a \sin \omega z, \quad \omega \gg 1, \quad a \ll 1.$$

В этом случае разумно ставить условие прилипания лишь на осредненной границе $r = h_0$.

В уравнениях асимптотической модели по сравнению с исходными уравнениями отсутствуют нелинейные и инерциальные члены, что позволяет построить аналитическое решение. Заметим, что в случае плоской границы можно указать градиент давления, для которого при заданном постоянном расходе жидкости выполнено условие прилипания.

Модель позволяет рассматривать и квазистационарную задачу, когда градиент давления зависит от времени. Разумеется, это справедливо для ситуации, когда характерное время изменения градиента много меньше, чем характерное время скорости течения жидкости. В этом случае при изменении градиента давления происходит перестройка вихревых структур. В таком варианте модель мо-

жет быть использована для грубого описания течения крови и образования тромбов на стенках кровеносных сосудов [2, 3].

Основные уравнения и постановка задачи

Асимптотическая модель вращательно-симметричного течения строится на основе общих уравнений [4] в безразмерных переменных для вязкой несжимаемой жидкости, записанных в цилиндрических координатах (r, θ, z) , при условии отсутствия азимутальной скорости ($v = 0$) и зависимости от угла θ ($\partial_\theta = 0$)

$$\begin{aligned} (ru)_r + (rw)_z &= 0, \\ u_t + uu_r + ww_z &= -p_r + \\ &+ \frac{1}{r}(rT^{rr})_r + (T^{rz})_z - \frac{1}{r}T^{\theta\theta}, \\ w_t + uw_r + ww_z &= -p_z + \\ &+ \frac{1}{r}(rT^{rz})_r + (T^{zz})_z, \\ T &= \mu(r, z)\varepsilon, \\ \varepsilon^{rr} &= 2u_r, \quad \varepsilon^{\theta\theta} = \frac{2u}{r}, \quad \varepsilon^{r\theta} = 0, \\ \varepsilon^{zz} &= 2w_z, \quad \varepsilon^{rz} = u_z + w_r, \quad \varepsilon^{z\theta} = 0, \end{aligned} \quad (1)$$

где u, w – радиальная и осевая компоненты скорости; p – давление; ε, T – тензоры деформаций и вязких напряжений; $\mu(r, z)$ – кинематическая вязкость жидкости.

Уравнения (1) записаны для напряжений и деформаций, а не для компонент скорости, так как вязкость зависит от координат. Соотношения для компонент тензора напряжений и их производных в цилиндрических координатах указаны, например, в [5, с. 433].

Замена переменных $u \rightarrow \varepsilon u, r \rightarrow \varepsilon r, p \rightarrow \varepsilon^{-1}p, \mu \rightarrow \varepsilon\mu$, где ε – малый параметр, характеризующий отношение характерного радиуса цилиндра и характерного размера в осевом направлении, позволяет, сохраняя лишь главные члены, получить асимптотические уравнения

$$0 = -p_z + \frac{1}{r}(\mu r w_r)_r, \quad (2)$$

$$(ru)_r + (rw)_z = 0, \quad (3)$$

которые приведены для квазистационарного случая, когда безразмерное время $O(t) = 1$ и инерциальные члены при $\varepsilon \rightarrow 0$ исчезают, но тем не менее зависимость от времени сохраняется – $u = u(r, z, t), w = w(r, z, t), p_z = p_z(z, t)$. Фактически t играет роль параметра и далее при записи соотношений опускается.

Для определенности рассматриваем турбулентное течение, для которого вязкость выбирается зависящей от r, z

$$\mu = \mu(r, z) = \eta^2(z) - r^2, \quad \mu_r(0, z) = 0. \quad (4)$$

Здесь $\eta(z)$ – функция, определяющая границу бесконечной цилиндрической области ($0 \leq r \leq \eta(z)$).

Такая вязкость типична для турбулентных течений [1, гл. 20; 6].

Соотношения для функции тока $\psi(r, z)$, позволяющие автоматически удовлетворить уравнению неразрывности (3), имеют вид

$$ru = -\psi_z, \quad rw = \psi_r. \quad (5)$$

Уравнения решаем в области

$$C = \{0 \leq r \leq h(z), -\infty < z < \infty\},$$

$$h(z) = \eta(z) - \delta(z),$$

где $\delta > 0$ – параметр (точнее, функция), определяющий шероховатость стенки [1, гл. 20]; $h(z)$ – фактический радиус области, в которой происходит течение жидкости (рис. 1).

Введение параметра $\delta(z)$ типично при рассмотрении турбулентных течений и связано с тем, что при $\delta(z) = 0$ скорости u, w имеют сингулярности при $r = \eta(z)$ (как показывает анализ решения). Параметр $\delta(z)$ является феноменологическим. Существует большое количество теорий и полуэмпирических соотношений для его определения (см. краткий обзор в [7, с. 147–150]). В принципе, теория позволяет считать шероховатость δ зависящей от координаты z , что и сделано в дальнейшем. Обратим внимание, что $\delta(z)$ встречается в соотношениях лишь косвенно. Достаточно задавать лишь функции $\eta(z)$ и $h(z)$, соблюдая условие $\eta(z) > h(z)$.

Для уравнений (2)–(5) задаем условия на оси цилиндра

$$u(0, z) = 0, \quad w_r(0, z) = 0, \quad \psi(0, z) = 0, \quad (6)$$

и кинематическое краевое условие

$$\psi(h(z), z) = Q, \quad (7)$$

$$\begin{aligned} Q &= \int_0^{h(z)} rw(r, z) dr = \\ &= \int_0^{h(z)} \psi_r(r, z) dr = \psi(h(z), z), \end{aligned}$$

соответствующее отсутствию нормальной компоненты скорости на боковой границе цилиндра $z = h(z)$; Q – расход жидкости (полураход).

В силу уравнения неразрывности (3) и условия непроницаемости стенки цилиндра для жидкости (7) расход Q является постоянным и далее определяется по формуле

$$Q = \psi(h(\infty), \infty) = const. \quad (8)$$

Заметим, что в терминах компонент скорости кинематическое условие для стационарного течения имеет вид $u(h(z), z) = h_z(z)w(h(z), z)$.

Напомним, что все уравнения и соотношения записаны в безразмерных переменных и переход от размерных переменных к безразмерным осуществляется стандартным образом. Укажем лишь связь безразмерного давления с размерным $p'_z = p_z \frac{L_* w_* \mu_* \rho_*}{R_*^2}$, где p'_z – размерный градиент давления; w_* – характерная величина осевой скорости; ρ_* – плотность жидкости; μ_* – харак-

терная кинематическая вязкость; R_* , L_* – характерные размеры в радиальном и осевом направлениях.

Решение и его анализ

Линейная задача (2)–(8) легко решается. Функция тока имеет вид

$$\begin{aligned} \psi(r, z) &= \frac{1}{8} p_z (\eta^2 - r^2) \phi(r, \eta) - \\ &- \frac{1}{8} p_z \frac{r^2 (\eta^2 - h^2)}{h^2} \phi(h, \eta) + \frac{Q r^2}{h^2}, \\ \phi(r, \eta) &= \ln \frac{\eta^2 - r^2}{\eta^2}, \end{aligned} \quad (9)$$

где $\phi(r, \eta)$ – вспомогательная функция.

Осевая w и радиальная u скорости записываются в форме

$$\begin{aligned} w(r, z) &= -\frac{1}{4} p_z \phi(r, \eta) - \frac{1}{4} p_z - \\ &- \frac{1}{4} p_z \frac{(\eta^2 - h^2)}{h^2} \phi(h, \eta) + \frac{2Q}{h^2}, \\ u(r, z) &= -\frac{1}{r} (\psi_h h_z(z) + \psi_\eta \eta_z(z)), \\ \psi_\eta &= \frac{p_z \eta}{4} \left(\phi(r, \eta) - \frac{r^2}{h^2} \phi(h, \eta) \right), \\ \psi_h &= \frac{p_z r^2}{4h} \left(\frac{\eta^2}{h^2} \phi(h, \eta) + 1 \right) - \frac{2Q r^2}{h^3}. \end{aligned} \quad (10)$$

Здесь аргументы функций $\eta(z)$, $h(z)$ опущены для сокращения формул. Осевая скорость $w(r, z)$ записана в виде (10) из-за громоздкости и для того, чтобы подчеркнуть линейную зависимость $w(r, z)$ от производных $h_z(z)$, $\eta_z(z)$. В частности, это означает, что радиальная скорость $u(r, z) = 0$ при $h(z) = const$, $\eta(z) = const$, т.е. в случае плоских границ имеется только осевая скорость $w(r, z)$.

Если отказаться от условия прилипания для всей боковой поверхности цилиндра, то величина Q и функция $p_z(t)$ могут быть любыми.

В случае выполнения условия $p_z(t) = p_z^*$, где

$$p_z^* = \frac{8Q}{h_\infty^2 + \eta_\infty^2 \ln \frac{\eta_\infty^2 - h_\infty^2}{\eta_\infty^2}}, \quad (11)$$

условие прилипания удовлетворено на участках $h(z) = const$, $\eta(z) = const$, в частности, при $z = \infty$.

Одним из обоснований отсутствия прилипания может быть проскальзывание Навье, которое, в принципе, можно считать феноменологическим условием, но можно и объяснить наличием слоя проникновения, аналогичного шероховатостям стенки [8, 9; 10, с. 37–40]. Наконец, заметим, что, строго говоря, граница $r = h(z)$ и не является твердой – это всего лишь (феноменологическая) граница шероховатостей, введенная в рассмотрение с целью ликвидации сингулярностей скорости.

Формально решения (9), (10) справедливы при любой достаточно гладкой функции $h(z)$. Однако на практике естественно требовать, чтобы при $|z| \rightarrow \infty$ указанная функция стремилась к некото-

рым константам (возможно, различным при $z = \pm\infty$), т.е. чтобы цилиндр C имел постоянные радиусы на бесконечности. Это автоматически приведет к стремлению на бесконечности осевой скорости w к некоторым константам, радиальной скорости u – к нулю. Конечно, имеются и исключения, когда, например, функция $h(z)$ является периодической, не имеющей предела на бесконечности (гофрированная граница). В этом случае под h_∞ (и η_∞) можно понимать, в частности, среднее значение периодической функции.

Структура течения

В некоторых случаях, представляющих практический интерес, структура течения жидкости может быть указана достаточно детально на основе исследования фазового портрета системы уравнений

$$\frac{dr}{dt} = u(r, z), \quad \frac{dz}{dt} = w(r, z), \quad (12)$$

стационарные точки (r_k, z_k) которой определяются системой

$$u(r_k, z_k) = 0, \quad w(r_k, z_k) = 0. \quad (13)$$

Напомним, что если $p_z = p_z^*$, то на бесконечности выполняются условия прилипания $w(r, \infty) = 0$ (11), и при известном z_k значения r_k явно определяются соотношением, вытекающим из равенства $w(r_k, z_k) = 0$ и условия прилипания

$$\begin{aligned} h_k^2 \phi(r_k, \eta_k) + (\eta_k^2 - h_k^2) \phi(h_k, \eta_k) &= \\ = h_\infty^2 - h_k^2 + \eta_\infty^2 \phi(r_\infty, \eta_\infty), \end{aligned} \quad (14)$$

где $h_k = h(z_k)$, $\eta_k = \eta(z_k)$.

Если $h(z)$, $\eta(z)$ не имеют предела при $z \rightarrow \infty$ (например, периодические функции), то под η_∞ , h_∞ понимаются средние значения соответствующих функций. В частности, условие $w(r, \infty) = 0$ следует заменить условием $w(h_\infty, \infty) = 0$.

Обратим внимание на то, что, во-первых, уравнение (14) может и не иметь решения относительно r_k , а во-вторых, точка (r_k, z_k) , соответствующая решению уравнения (14), может не принадлежать области, C в которой происходит течение жидкости.

Для исследования структуры течения система (12) линеаризуется в окрестности стационарной точки (r_k, z_k) , задаваемой уравнениями (13), и определяется тип стационарной точки (седло или центр).

С практической точки зрения наиболее интересными являются два случая: (i) – плоская граница $r = \eta(z) = const$; (ii) – постоянная толщина шероховатости $\delta(z) = const$.

Первый случай соответствует плоской внешней границе, в то время как граница $r = h(z)$, определяющая шероховатость, может быть произвольной ($h(z) < \eta(z)$). Такая область может моделировать

кровеносный сосуд, у которого внутренняя стенка $r = h(z)$ возникла в результате налипания на стенки сосуда частиц (тромбов), создающих шероховатость (в частности, $h(z)$ может быть некоторой случайной функцией). Во втором случае граница шероховатости повторяет профиль внешней границы.

Сформулируем основной результат.

Утверждение. Пусть $p_z = p_z^*$, т.е. выполнено условие прилипания на бесконечности. Если в стационарной точке (r_k, z_k) , которая принадлежит области C , выполнено условие $h_{zz}(z_k) < 0$, то в области имеется (тороидальный) вихрь с центром в точке (r_k, z_k) .

Такое утверждение справедливо для любой почти произвольной кинематической вязкости (не только для случая (4)). Для того чтобы это показать, следует записать систему (12) в гамильтоновой форме, что, в частности, позволяет сделать общие выводы о типах стационарных точек.

Введем новую переменную

$$s = r^2, \quad \partial_r = 2r \partial_s.$$

Тогда уравнения (12) записываются в форме

$$\frac{ds}{dt} = -2\psi_z(s, z), \quad \frac{dz}{dt} = 2\psi_s(s, z),$$

$$H(s, z) = 2\psi(s, z),$$

где $H(s, z)$ – гамильтониан.

Для определения в новых переменных (s, z) функции $\psi(s, z)$ имеем задачу

$$\psi_{ss}(s, z) = \frac{p_z}{8\mu(s, \eta(z))}, \quad (15)$$

$$\psi(0, z) = 0, \quad \psi(h^2(z), z) = Q.$$

Здесь для вязкости использовано обозначение $\mu(s, \eta(z)) = \mu(s, z)$, чтобы подчеркнуть зависимость вязкости от $\eta(z)$ как функционального параметра.

Решение задачи (15) записывается в виде

$$\psi(s, z) = \frac{1}{8} p_z \varphi(s, z) -$$

$$- \frac{1}{8} p_z \frac{s}{h^2} \varphi(h^2, z) + \frac{Qs}{h^2},$$

$$\text{где } \varphi(s, z) = \int_0^s \frac{(s-s') ds'}{\mu(s', \eta(z))}.$$

Естественно, вязкость следует выбирать так, чтобы обеспечить существование функции (интеграла) $\varphi(s, \eta(z), h(z))$.

Стационарные точки (s_k, z_k) функции $\psi(s, z)$ удовлетворяют условиям:

$$\psi_s(s_k, z_k) = 0, \quad \psi_z(s_k, z_k) = 0.$$

Тип стационарных точек – экстремум (или седло) определяется знаками Δ и вторых производных, где $\Delta = \psi_{ss}(s_k, z_k)\psi_{zz}(s_k, z_k) - \psi_{sz}^2(s_k, z_k)$.

При $\Delta > 0$, $\psi_{ss} > 0$ имеем минимум, а при $\Delta > 0$, $\psi_{ss} < 0$ – максимум. В случае $\Delta < 0$ точка (s_k, z_k) является седловой.

Так как при $p_z < 0$ производная $\psi_{ss}(s, z) < 0$ (15), максимумы функции $\psi(s, z)$ всегда являются центрами. Если точка максимума $(s_k, z_k) \in C$, то она является центром вихря.

Опуская громоздкие доказательства, сформулируем основные результаты.

1. Плоская граница $r = \eta(z) = \text{const}$ при произвольной вязкости:

а) пусть (s_k, z_k) – равновесие, которое не является экстремумом (точнее, стационарной точкой) функции $\psi(s, z)$, т.е. $h_z(z_k) \neq 0$. Тогда такое равновесие является седлом.

Указанное равновесие всегда присутствует в системе, если $s_k = h^2(z_k) = h_{\infty}^2$, т.е. граница $s = h^2(z)$ пересекает фиктивную границу $s = h_{\infty}^2$, на которой осевая скорость $w(s_k, \infty) = 0$;

б) пусть (s_k, z_k) – равновесие, которое может являться экстремумом функции $\psi(s, z)$, т.е. $h_z(z_k) = 0$. Тогда указанное равновесие в зависимости от знака $h_{zz}(z_k)$ является либо центром ($h_{zz}(z_k) < 0$), либо седлом ($h_{zz}(z_k) > 0$).

2. Постоянная толщина шероховатости $\delta(z) = \eta(z) - h(z) = \text{const}$.

В этом случае реальная граница области C , т.е. $r = h(z)$, повторяет границу $r = \eta(z)$, на которой вязкость обращается в нуль:

а) пусть $h_z(z_k) = 0$, $p_z < 0$ и $\mu_{\eta}(s, \eta) > 0$. Тогда указанное равновесие в зависимости от знака $h_{zz}(z_k)$ является либо центром ($h_{zz}(z_k) < 0$), либо седлом ($h_{zz}(z_k) > 0$);

б) пусть $\eta_z(z_k) = h_z(z_k) \neq 0$. Тогда равновесие является седлом.

Результаты расчетов

Несмотря на то что решение записывается в аналитической форме, соотношения достаточно громоздки, и имеет смысл привести их визуализацию для лучшего понимания результатов.

Один из вариантов течения и имеющихся пристеночных вихрей приведен на рис. 2, 3 для случая, когда граница задана уравнением

$$r = \eta(z) = 1 + \alpha(e^{-\beta(z-z_0)^4} + e^{-\beta(z+z_0)^2}). \quad (16)$$

В (16) параметр α выбран достаточно большим для улучшения визуализации изображений. Никаких принципиальных изменений в структуре течения, показанного на рис. 2, 3, при уменьшении α не происходит.

В случае (16) равновесие системы определяется координатами:

$$(r = 1,318, z = -1,077), \quad \text{седло,}$$

$$(r = 1,320, z = -1,48), \quad \text{центр,}$$

$$(r = 1,527, z = 0,603), \quad \text{центр.}$$

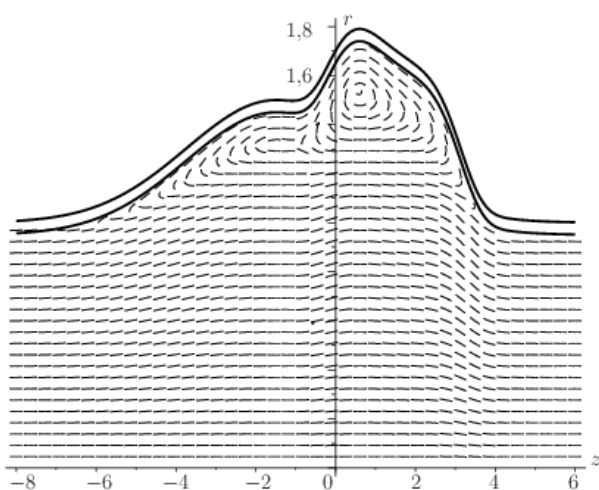


Рис. 2. Поле скоростей в случае (16): $\alpha = 0,5; \beta = 0,1; \delta = 0,05; z_0 = 1,5; p_z = -5,60; Q = 1; p_z^* = -5,612$ /
 Fig. 2. Velocity field in the case (16): $\alpha = 0.5; \beta = 0.1; \delta = 0.05; z_0 = 1.5; p_z = -5.60; Q = 1; p_z^* = -5.612$

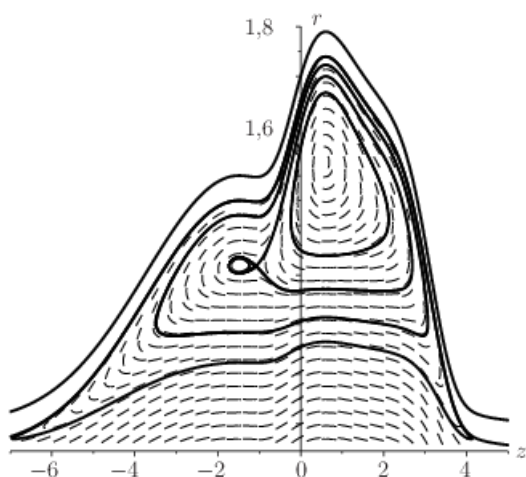


Рис. 3. Фрагмент области с вихрями в случае (16): $\alpha = 0,5; \beta = 0,1; \delta = 0,05; z_0 = 1,5; p_z = -5,60; Q = 1; p_z^* = -5,612$ /
 Fig. 3. Fragment of the region with vortices in the case (16): $\alpha = 0.5; \beta = 0.1; \delta = 0.05; z_0 = 1.5; p_z = -5.60; Q = 1; p_z^* = -5.612$

Заключение

Полученные результаты, на первый взгляд, означают, что выбор вязкости не влияет на общую структуру течения, в частности, результаты справедливы и для постоянной вязкости. Однако имеются, по крайней мере, две причины, по которым такой вывод не является совсем верным. Первая из них – это отсутствие радиальной скорости ($u(s, z) \equiv 0$) при постоянной вязкости. В этом случае в области может возникнуть противоток, если не требовать выполнения условия прилипания, но

вихри образоваться не могут. Вторая причина – это исчезновение мотивации выбора шероховатости при постоянной вязкости. Иными словами, вязкость следует выбирать такой, чтобы на границе $s = \eta(z)$ возникали сингулярности скорости. В частности, вязкость на границе должна обращаться в нуль, т.е. в переменных (s, z) требуется выполнение условия $\mu(\eta^2, \eta) = 0$. При этом, естественно, функция $\mu^{-1}(s, z)$ должна быть интегрируема по переменной s . Простейший вариант такой вязкости $\mu = \eta^2 - s$ соответствует логарифмическому по переменной s профилю осевой скорости, типичному для турбулентных течений. В более общем случае, например, разумно выбирать $\mu = F(\theta)$, $\theta = \eta^2 - s, F(0) = 0$.

На самом деле, если граница $r = \eta(z)$ или $r = h(z)$ имеет мелкие шероховатости и в среднем является прямолинейной, например, $r = h(z) = h_0 + a \sin \omega z$, $\omega \gg 1, a \ll 1$, вновь разумно ставить условие прилипания лишь на осредненной границе $r = h_0$. В этом случае даже при постоянной вязкости в окрестности максимумов функции $h(z)$ будут присутствовать вихри, сравнимые по размерам с амплитудой границы a . Так как область представляет собой бесконечный цилиндр, такие стационарные вихри являются торoidalными.

Наличие аналитических решений позволяет строить эффективные алгоритмы расчета переноса примеси в известных стационарных течениях, в частности переноса эритроцитов в турбулентных течениях крови. Принимая во внимание тот факт, что боковые границы цилиндра не являются прямолинейными, наиболее разумно использовать для расчетов метод конечных элементов. Подробные алгоритмы расчетов при помощи пакета FreeFem++ [11] приведены, например, в [12].

Литература

1. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. М.: Наука, 1974. 712 с.
2. Каро К., Педли Т., Шротер Р., Сид У. Механика кровообращения. М.: Мир, 1981. 624 с.
3. Педли Т. Гидродинамика крупных кровеносных сосудов. М.: Мир, 1983. 400 с.
4. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Гидродинамика. Теоретическая физика. М.: Наука, 1986. Т. VI. 736 с.
5. Димитриенко Ю.И. Тензорное исчисление. М.: Высшая школа, 2001. 575 с.
6. Монин А.С., Яглом А.М. Статистическая гидромеханика. Механика турбулентности. М.: Наука, 1965. Ч. I. 641 с.
7. Жуков М.Ю., Ширяева Е.В. Математическое моделирование процесса седиментации примеси в

потоке жидкости. Ростов н/Д.: Изд-во ЮФУ, 2016. 208 с.

8. Belyaev A.V., Vinogradova O.I. Wetting, roughness and flow boundary conditions // *J. Phys.: Condens. Matter*. 2011. Vol. 23. P. 184104.

9. Lauga E., Brenner M.P., Stone H.A. Microfluidics: The No-Slip Boundary Condition // *Handbook of Experimental Fluid Dynamics* / C. Tropea, A. Yarin, J.F. Foss (Eds.), Chapter 19 Springer, 2007. P. 1219–1240.

10. Жуков М.Ю., Ширяева Е.В. Микрогидродинамика, жидкие плёнки и электрофорез. Ростов н/Д.: Изд-во ЮФУ, 2015. 240 с.

11. Hecht F. New development in FreeFem++ // *J. Numer. Math.* 2012. Vol. 20, № 3–4. P. 251–265.

12. Жуков М.Ю., Ширяева Е.В. Решение задач математической физики при помощи пакета конечных элементов FreeFem++. Ростов н/Д.: Изд-во ЮФУ, 2008. 256 с.

References

1. Shlichting G. (1974). *Theory of the boundary layer*. Moscow, Nauka Publ., 712 p. (in Russian).

2. Caro K., Pedley T., Schroter R., Sid W. (1981). *Mechanics of blood circulation*. Moscow, Mir Publ., 624 p. (in Russian).

3. Pedley T. (1983). *The fluid mechanics of large blood vessels*. Moscow, Mir Publ., 1983, 400 p. (in Russian).

4. Landau L.D., Lifshits E.M. (1986). *Hydrodynamics. Theoretical physics*. Moscow, Nauka Publ., vol. VI, 736 p. (in Russian).

5. Dimitrienko Yu. I. (2001). *Tensor calculus*. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 575 p. (in Russian).

6. Monin A.S., Yaglom A.M. (1965). *Statistical hydrodynamics. Mechanics of turbulence*. Moscow, Nauka Publ., part I, 641 p. (in Russian).

7. Zhukov M.Yu., Shiryayeva E.V. (2016). *Mathematical modeling of the impurity sedimentation process in a liquid flow*. Rostov-on-Don, Southern Federal University Press, 208 p. (in Russian).

8. Belyaev A.V., Vinogradova O.I. (2011). Wetting, roughness and flow boundary conditions. *J. Phys.: Condens. Matter*, vol. 23, p. 184104.

9. Lauga E., Brenner M. P., Stone H. A. Microfluidics: The No-Slip Boundary Condition. *Handbook of Experimental Fluid Dynamics*. C. Tropea, A. Yarin, J. F. Foss (Eds.), chapter 19, Springer, 2007, pp. 1219-1240.

10. Zhukov M.Yu., Shiryayeva E.V. (2015). *Microhydrodynamics, liquid film and electrophoresis*. Rostov-on-Don, Southern Federal University Press, 240 p. (in Russian).

11. Hecht F. (2012). New development in FreeFem++. *J. Numer. Math.*, vol. 20, no. 3-4, pp. 251-265.

12. Zhukov M.Yu., Shiryayeva E.V. (2008). *Solving problems of mathematical physics using the FreeFem++ finite element package*. Rostov-on-Don, Southern Federal University Press, 256 p. (in Russian)

УДК 517-938, 531-36

DOI 10.18522/1026-2237-2020-1-11-16

О ПРИМЕНЕНИИ КРИТЕРИЕВ УСТОЙЧИВОСТИ РАВНОВЕСИЯ ДЛЯ СИСТЕМ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ С ДВУМЯ КОСИММЕТРИЯМИ В КРИТИЧЕСКИХ СЛУЧАЯХ*

Л.Г. Куракин^{1, 2, 3}, А.В. Курдоглыан¹

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

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

³Институт водных проблем РАН, Москва, Россия

ON APPLYING OF EQUILIBRIUM STABILITY CRITERIA FOR SYSTEMS OF DIFFERENTIAL EQUATIONS WITH TWO COSYMMETRIES IN CRITICAL CASES

L.G. Kurakin^{1, 2, 3}, A.V. Kurdoglyan¹

¹Southern Federal University, Russia,

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

³Institute of Water Problems, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Куракин Леонид Геннадиевич – доктор физико-математических наук, доцент, профессор, кафедра вычислительной математики и математической физики, Институт математики, механики и компьютерных наук имени И.И. Воровича, Южный федеральный университет, ул. Мильчакова, 8а, г. Ростов н/Д, 344090, Россия; главный научный сотрудник, Южный математический институт – филиал Владикавказского научного центра РАН, ул. Маркуса, 22, г. Владикавказ, Республика РСО-Алания, 362027, Россия; ведущий научный сотрудник, Институт водных проблем РАН, ул. Губкина, 3, г. Москва, 119333, Россия, e-mail: kurakin@math.sfedu.ru

Leonid G. Kurakin - Doctor of Physics and Mathematics, Associate Professor, Professor, Department of Computational Mathematics and Mathematical Physics, Vorovich Institute of Mathematics, Mechanics and Computer Science, Southern Federal University, Milchakova St., 8a, Rostov-on-Don, 344090, Russia; Main Researcher, Southern Mathematical Institute - Branch of the Vladikavkaz Scientific Center, Russian Academy of Sciences, Markusa St., 22, Vladikavkaz, Republic of North Ossetia - Alania, 362027, Russia; Leading Researcher, Institute of Water Problems, Russian Academy of Sciences, Gubkina St., 3, Moscow, 119333, Russia, e-mail: kurakin@math.sfedu.ru

Курдоглыан Аик Варужанович – младший научный сотрудник, кафедра вычислительной математики и математической физики, Институт математики, механики и компьютерных наук имени И.И. Воровича, Южный федеральный университет, ул. Мильчакова, 8а, г. Ростов н/Д, 344090, Россия, e-mail: aik_kurdoglyan@mail.ru

Aik V. Kurdoglyan - Junior Researcher, Department of Computational Mathematics and Mathematical Physics, Vorovich Institute of Mathematics, Mechanics and Computer Science, Southern Federal University, Milchakova St., 8a, Rostov-on-Don, 344090, Russia, e-mail: aik_kurdoglyan@mail.ru

Рассматриваются критические случаи устойчивости равновесий дифференциальных уравнений с двумя косимметриями. Спектр устойчивости равновесия состоит из объединения двух спектральных множеств: непустого нейтрального спектра, лежащего на мнимой оси, и устойчивой части спектра, лежащей строго в левой полуплоскости. Исследование критических случаев в общей теории сводится к изучению нелинейных модельных систем. Вычисление их коэффициентов считается отдельной задачей. В предшествующей работе авторов были получены критерии устойчивости для модельных систем, отвечающих шести различным случаям нейтрального спектра устойчивости. Цель данной работы – выразить коэффициенты этих систем через коэффициенты ряда Тейлора исходного уравнения. Стандартный алгоритм построения модельной системы состоит из двух последовательных преобразований исходного уравнения. Сначала строится его сужение на нейтральную поверхность. В результате размерность исходной системы редуцируется до размерности ее нейтрального подпространства. Затем полученное уравнение нормализуется до некоторого конечного порядка и отбрасываются слагаемые старшей степени. В данной работе для вычисления коэффициентов модельной системы применяется алгоритм, предложенный В.И. Юдовичем. Это позволило объединить оба преобразования в одно. Полученные формулы коэффициентов модельных систем не

* Работа выполнена при финансовой поддержке Южного федерального университета ВнГр.2020-04-ИМ, 2020 (Министерство образования и науки Российской Федерации)

зависят от размерности исходного уравнения. Они применимы как к конечномерным, так и к бесконечномерным системам и удобны для реализации с помощью пакетов аналитических вычислений.

Ключевые слова: косимметрия, равновесие, устойчивость, дифференциальное уравнение, инвариантная поверхность, полуинвариантная форма.

Critical cases of equilibrium stability are considered for differential equations with two cosymmetries. Stability spectrum of such equilibrium consists of two spectral sets. The first is the non-trivial neutral spectrum that is on the imaginary axis. The second is a stable part of the spectrum that lies in the left half-plane. According to the general theory, research of the critical cases comes down to study of nonlinear model systems. To calculate the coefficients for such systems is a separate problem. Stability criteria for the model systems are described in the previous work of the authors. The purpose of given paper is to express the coefficients of Taylor's series for model systems from such coefficients for the original equation. A usual algorithm constructing a model system consists of two coherent conversions of the original equation. The first is to form the reduction on the neutral surface for this equation. As a result its dimension is decreased to the neutral subspace's dimension. Then the constriction is transformed to normal form to some finite order. The higher order terms are ignored. In this work the coefficients of the model systems are computed with the help of algorithm of V.I. Yudovich. It makes possible to unite both conversions into one. The obtained formulae for coefficients of model systems are independent of the original equation's dimension. Thus it is applicable to systems of finite or infinite dimension and usable to realize using packages of analytical calculations.

Keywords: cosymmetry, equilibrium, stability, differential equation, invariant surface, semi-invariant form.

Постановка задачи и описание метода

Рассматриваются системы дифференциальных уравнений с двумя косимметриями [1]. Изучаются критические случаи устойчивости равновесий, когда для ответа об устойчивости требуется нелинейный анализ.

Данная работа является естественным продолжением работы [2], где получены критерии устойчивости для систем с двумя косимметриями, и работы [3], где получены полуинвариантные формы критериев устойчивости для систем с одной косимметрией.

Рассмотрим автономное дифференциальное уравнение, обладающее нулевым равновесием, в пространстве \mathbb{R}^n

$$\dot{u} = f(u) = Au + g(u), \quad g(u) = \sum_{j=2}^{\infty} K_j u^j, \quad f(0) = 0. \quad (1)$$

Здесь $A: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$ – линейный оператор. Действующий в \mathbb{R}^n симметрический однородный степени j оператор K_j определяется j -линейным отображением $(u_1, \dots, u_j) \rightarrow K_j(u_1, \dots, u_j)$, $K_j u^j = K_j(u, \dots, u)$, где $u_1, \dots, u_j, u \in \mathbb{R}^n$.

Отображение $f: \Omega \rightarrow \mathbb{R}^n$ является аналитическим в некоторой окрестности нуля $\Omega \subset \mathbb{R}^n$ и допускает две непрерывные косимметрии $L_1, L_2: \Omega \rightarrow \mathbb{R}^n$. Согласно определению, введенному В.И. Юдовичем [1, 4, 5], это означает, что в каждой точке $u \in \Omega$ и $j=1, 2$ векторы $f(u)$ и $L_j(u)$ ортогональны: $(f(u), L_j(u)) = 0$.

Считаем выполненными следующие предположения:

1°. Точка $0 \in \Omega$ является некосимметричным равновесием уравнения (1):

$$f(0) = 0, \quad L_1(0) \neq 0, \quad L_2(0) \neq 0.$$

В работах [1, 5] показано, что векторы $L_1(0)$ и $L_2(0)$ принадлежат ядру оператора A^* , сопряженного к производной $A = f'(0)$. Таким образом, точка нуль принадлежит спектрам $\sigma(A)$ и $\sigma(A^*)$ операторов A и A^* .

2°. Выполнено условие минимальности вырождения: ядро оператора A является двумерным: $\dim \ker A = 2$. При этом векторы $L_1(0)$ и $L_2(0)$ линейно независимы.

3°. Спектр $\sigma(A)$ оператора A состоит из нейтрального $\sigma_0(A)$ и устойчивого $\sigma_1(A)$:

$$\sigma_0(A) = \{\lambda: \lambda \in \sigma(A), \operatorname{Re} \lambda = 0\},$$

$$\sigma_1(A) = \{\lambda: \lambda \in \sigma(A), \operatorname{Re} \lambda < 0\}.$$

При этом нейтральный спектр $\sigma_0(A)$ содержит 2-кратное нулевое собственное значение и отличен от него.

Далее будем следовать алгоритму, предложенному в работе [6].

Спектральным множествам σ_0 и σ_1 отвечают спектральные подпространства U_0 , U_1 и спектральные проекторы P_0 , P_1 .

Согласно [7], в некоторой окрестности $V \subset \Omega \subset \mathbb{R}^n$ точки $u=0$ существует инвариантная поверхность $M_0 \subset V$ системы (1), которая в точке $u=0$ касается нейтрального подпространства U_0 .

При этом M_0 – график некоторого отображения $F: V_0 \rightarrow U_1$, где $V_0 = V \cap U_0$.

Множество M_0 иногда называют нейтральным (или центральным) многообразием.

Из принципа сведения [7] следует эквивалентность задач устойчивости нулевого равновесия для исходного уравнения (1) и для его сужения на M_0 .

Систему (1) запишем в виде

$$\begin{aligned} \dot{u}_0 &= P_0 f(u_0 + u_1) = A_0 u_0 + P_0 g(u_0 + u_1), \\ \dot{u}_1 &= P_1 f(u_0 + u_1) = A_1 u_1 + P_1 g(u_0 + u_1), \end{aligned} \quad (2)$$

где $u_k = P_k u$, $A_k = P_k A$, $k = 0, 1$.

Введем новые переменные $\xi_0 = u_0$, $\xi_1 = u_1 - F(u_0)$. Нейтральное многообразие в этих переменных определяется из условия $\xi_1 = 0$. При этом уравнение (2) принимает вид

$$\begin{aligned} \dot{\xi}_0 &= P_0 f(\xi_0 + \xi_1 + F(\xi_0)), \\ \dot{\xi}_1 &= (P_1 - F'(\xi_0)P_0)f(\xi_0 + \xi_1 + F(\xi_0)). \end{aligned} \quad (3)$$

Согласно принципу сведения, устойчивость нулевого равновесия достаточно исследовать на нейтральном многообразии ($\xi_1 = 0$)

$$\dot{\xi}_0 = P_0 f(\xi_0 + F(\xi_0)). \quad (4)$$

Отображение F можно представить в виде ряда Тейлора

$$F(\xi_0) = \sum_{j=2}^{\infty} F_j \xi_0^j, \quad (5)$$

где $F_j: \xi_0 \rightarrow F_j \xi_0^j$ ($j = 2, 3, \dots$) – симметричная векторнозначная форма j -й степени на U_0 со значениями на U_1 .

Известно, что ряд (5) может быть расходящимся, однако для критических случаев, рассматриваемых далее, достаточно знать лишь несколько первых его членов.

Для определения F из условия инвариантности получаем уравнение

$$P_1 f(\xi_0 + F(\xi_0)) = F'(\xi_0)P_0 f(\xi_0 + F(\xi_0)).$$

Подставляя ряд (5) в последнее уравнение и приравнявая слагаемые одинаковых степеней, получим систему уравнений для определения F_j ($j = 2, 3, \dots$).

Замена $v_0 = \xi_0 - G(\xi_0)$ ($G: V_0 \rightarrow U_0$) приводит уравнение (4) к нормальной форме до некоторого порядка [8, 9].

Приведение уравнения (4) к нормальной форме в ряде случаев упрощается, если F и G разыскивать в виде $F = P_1 T$, $G = P_0 T$, а отображение $T: V_0 \rightarrow V$ определять так, чтобы замена $v = u - T(u_0)$ в уравнении (3) обращала в нуль нерезонансные члены [8], содержащие u_0 .

Таким образом, задача устойчивости нулевого равновесия уравнения (1) приводится к случаю уравнения на нейтральном многообразии в нормальной форме, исследованной в статье [2]. В этой статье искомая задача упорядочена по коразмерности вырождения в классе всех возможных систем с двумя косимметриями.

Далее результаты работы [2] представлены в полуинвариантной форме – используется жорданов базис лишь в нейтральном подпространстве, а не во всем пространстве. В приведенных формулах нигде не фигурирует размерность системы, так что они применимы и для бесконечномерных задач, скажем, для систем уравнений в частных производных.

В каждом из критических случаев, рассматриваемых далее, принята следующая схема представления результатов:

1. Приводятся условия вырождения линейной части. Вводятся нейтральный спектр σ_0 и проектор P_0 .

2. Записывается уравнение на нейтральном многообразии M_0 в нормальной форме. При этом используется асимптотическое представление уравнения при $|v_0| \rightarrow 0$.

3. Задается модельная система – укороченное уравнение на нейтральном многообразии, в котором присутствуют лишь те члены тейлоровского разложения, которые используются в критерии. В полуинвариантной форме формулируется критерий устойчивости, полученный в работе [2].

Далее нейтральный спектр $\sigma_0(A)$ матрицы A задается, например, в следующей форме: $\sigma_0(A) = \{0^k, 0^l, \pm i\omega_1, \pm i\omega_2\}$. Это означает, что нейтральный спектр состоит из двух простых пар чисто мнимых собственных значений и $k+l$ -кратного нулевого собственного значения, соответствующего двум жордановым клеткам матрицы A : k -мерной и l -мерной.

Системы с двумя косимметриями

Случай нейтрального спектра $\sigma_0(A) = \{0^2, 0\}$

1. Собственное значение – нуль кратности 3, которому отвечают двумерная и одномерная жордановы клетки. Соответствующие корневые векторы операторов A и A^* суть φ , ψ , φ_1 и $L_{10} = L_1(0)$, Ψ , $L_{20} = L_2(0)$:

$$A\varphi = 0, \quad A\psi = \varphi, \quad A\varphi_1 = 0, \quad A^*L_{10} = 0,$$

$$A^*\Psi = L_{10}, \quad A^*L_{20} = 0;$$

$$(\varphi, \Psi) = (\psi, L_{10}) = (\varphi_1, L_{20}) = 1.$$

Проектор на нейтральное подпространство U_0 имеет вид $P_0v = x_1\varphi + x_2\psi + x_3\varphi_1$.

Компоненты вектора $x = (x_1, x_2, x_3) \in R^3$ – скалярные произведения:

$$x_1 = (v_0, \Psi), \quad x_2 = (v_0, L_{10}), \quad x_3 = (v_0, L_{20}).$$

2. Уравнение на нейтральном многообразии в нормальной форме

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 + x_2 O(|x|^2), \\ \dot{x}_2 &= a_1 x_1 x_2 + a_2 x_1^2 x_2 + x_2 O(|x_1|^3 + |x_2|), \\ \dot{x}_3 &= x_2 O(|x|^3). \end{aligned} \quad (6)$$

3.1. Модельная система:

$$\dot{x}_1 = x_2, \quad \dot{x}_2 = a_1 x_1 x_2, \quad \dot{x}_3 = 0.$$

Здесь $a_1 = 2 \cdot (K_2(\varphi, \psi) - W_2 \varphi^2, L_{10})$, где

$$W_2 \varphi^2 = -A^{-1} K_2 \varphi^2.$$

Критерий устойчивости. Нулевое равновесие системы (6) неустойчиво, если $a_1 \neq 0$.

3.2. Выполнено условие вырождения: $a_1 = 0$.

Модельная система:

$$\dot{x}_1 = x_2, \quad \dot{x}_2 = a_2 x_1^2 x_2, \quad \dot{x}_3 = 0.$$

Здесь $a_2 = (M, L_{10})$, где

$$\begin{aligned} M &= 3K_3(\varphi^2, \psi) + 2K_2(\psi, W_2 \varphi^2) + \\ &+ 4K_2(\varphi, W_2(\varphi, \psi)) - 2a_1 W_2(\varphi, \psi) - 3W_3 \varphi^3. \end{aligned}$$

$$W_2(\varphi, \psi) = -\frac{1}{2} A^{-1} [2K_2(\varphi, \psi) - a_1 \psi - 2W_2 \varphi^2],$$

$$W_3 \varphi^3 = -A^{-1} [K_3 \varphi^3 + 2K_2(\varphi, W_2 \varphi^2)].$$

Критерий устойчивости. Пусть $a_1 = 0$. Нулевое равновесие системы (6) устойчиво, если $a_2 < 0$, и неустойчиво, если $a_2 > 0$.

Случай нейтрального спектра $\sigma_0(A) = \{0, 0, \pm i\omega\}$

1. Собственные значения – нуль кратности 2 и простая пара $\pm i\omega$ ($\omega > 0$) на мнимой оси. Жорданова матрица, отвечающая нейтральному спектру $\sigma_0(A)$, диагональна. Соответствующие корневые векторы операторов A и A^* : $\varphi_1, \varphi_2, \varphi, \varphi^*$ и $L_{10} = L_1(0), L_{20} = L_2(0), \Phi, \Phi^*$:

$$\begin{aligned} A\varphi_1 = A\varphi_2 = 0, \quad A\varphi = i\omega\varphi, \quad A\varphi^* = -i\omega\varphi^*, \\ A^*L_{10} = A^*L_{20} = 0, \quad A^*\Phi = -i\omega\Phi, \quad A^*\Phi^* = i\omega\Phi^*; \\ (\varphi_1, L_{10}) = (\varphi_2, L_{20}) = (\varphi, \Phi) = (\varphi^*, \Phi^*) = 1. \end{aligned}$$

Проектор на нейтральное подпространство U_0 :

$$P_0v = x_1\varphi_1 + x_2\varphi_2 + z\varphi + z^*\varphi^*.$$

Компоненты вектора $v_0 = (x_1, x_2, z, z^*) \in R^2 \times C^2$ – скалярные произведения:

$$\begin{aligned} x_1 = (v_0, L_{10}), \quad x_2 = (v_0, L_{20}), \quad z = (v_0, \Phi), \\ z^* = (v_0, \Phi^*). \end{aligned}$$

2. Уравнение на нейтральном многообразии в нормальной форме:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= \delta |z|^2 + O(|z|^3), \\ \dot{x}_2 &= |z|^2 O(|x_1|^3 + |x_2| + |z|), \end{aligned} \quad (7)$$

$$\dot{z} = i\omega z + z(C_1 x_1 + C_2 x_1^2) + z O(|x_2 z| + |z|^3).$$

3.1. $\delta \operatorname{Re} C_1 \neq 0$. Модельная система:

$$\dot{x}_1 = \delta |z|^2, \quad \dot{x}_2 = 0, \quad \dot{z} = i\omega z + C_1 x_1 z.$$

Здесь $\delta = 2(K_2(\varphi, \varphi^*), L_{10})$, $C_1 = 2(K_2(\varphi_1, \varphi), \Phi)$.

Критерий устойчивости. Пусть $c_1 = \operatorname{Re} C_1$. Нулевое равновесие системы (7) неустойчиво, если $\delta c_1 > 0$, и устойчиво, если $\delta c_1 < 0$.

3.2. Выполнено условие вырождения: $c_1 = 0$.

Модельная система:

$$\dot{x}_1 = \delta |z|^2, \quad \dot{x}_2 = 0, \quad \dot{z} = i\omega z + C_1 x_1 z + C_2 x_1^2 z.$$

Здесь $C_2 = (M, \Phi)$, где

$$\begin{aligned} M &= 3K_3(\varphi_1^2, \varphi) + 2K_2(\varphi, W_2 \varphi_1^2) + \\ &+ 4K_2(\varphi_1, W_2(\varphi_1, \varphi)) - 2C_1 W_2(\varphi_1, \varphi), \end{aligned}$$

$$W_2 \varphi_1^2 = -A^{-1} K_2 \varphi_1^2,$$

$$W_2(\varphi_1, \varphi) = \frac{1}{2} (i\omega I - A)^{-1} (2K_2(\varphi_1, \varphi) - C_1 \varphi).$$

Критерий устойчивости. Пусть $c_1 = 0$, а $\delta \neq 0$. Нулевое равновесие системы (7) неустойчиво, если $\operatorname{Re} C_2 > 0$, и устойчиво, если $\operatorname{Re} C_2 < 0$.

Случай нейтрального спектра $\sigma_0(A) = \{0^3, 0\}$

1. Собственное значение – нуль кратности 4, которому отвечают трехмерная и одномерная жордановы клетки. Соответствующие корневые векторы операторов A и A^* : $\varphi_0, \psi_1, \psi_2, \varphi$ и $L_{10} = L_1(0), \Psi_1, \Psi_2, L_{20} = L_2(0)$:

$$A\varphi_0 = A\varphi = 0, \quad A\psi_1 = \varphi_0, \quad A\psi_2 = \psi_1;$$

$$A^*L_{10} = A^*L_{20} = 0, \quad A^*\Psi_1 = L_{10}, \quad A^*\Psi_2 = \Psi_1;$$

$$(\varphi_0, \Psi_2) = (\psi_1, \Psi_1) = (\psi_2, L_{10}) = (\varphi, L_{20}) = 1.$$

Проектор на нейтральное подпространство U_0 :

$$P_0v = x_1\varphi_0 + x_2\psi_1 + x_3\psi_2 + x_4\varphi.$$

Компоненты вектора $x = (x_1, x_2, x_3, x_4) \in R^4$ – скалярные произведения:

$$\begin{aligned} x_1 = (v_0, \Psi_2), \quad x_2 = (v_0, \Psi_1), \\ x_3 = (v_0, L_{10}), \quad x_4 = (v_0, L_{20}). \end{aligned}$$

2. Уравнение на нейтральном многообразии в нормальной форме:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 + O(|x|^2), \\ \dot{x}_2 &= x_3 + O(|x|^2), \\ \dot{x}_3 &= ax_1 x_2 + x_2 O(|x|^2 + |x_4|) + x_3 O(|x|), \\ \dot{x}_4 &= x_2 O(|x|) + x_3 O(|x|). \end{aligned} \quad (8)$$

3. Модельная система:

$$\dot{x}_1 = x_2, \quad \dot{x}_2 = x_3, \quad \dot{x}_3 = ax_1x_2, \quad \dot{x}_4 = 0.$$

Здесь $a = 2 \cdot (K_2(\varphi_0, \psi_1) + A^{-1}K_2\varphi_0^2, L_{10})$.

Критерий устойчивости. Нулевое равновесие системы (8) неустойчиво, если $a \neq 0$.

Случай нейтрального спектра $\sigma_0(A) = \{0^2, 0^2\}$

1. Собственное значение – нуль кратности 4, которому отвечают две двумерные жордановы клетки. Соответствующие корневые векторы операторов A и A^* суть $\varphi_1, \psi_1, \varphi_2, \psi_2$ и $L_{10} = L_1(0), \Psi_1, L_{20} = L_2(0), \Psi_2$:

$$A\varphi_1 = A\varphi_2 = 0, \quad A\psi_1 = \varphi_1, \quad A\psi_2 = \varphi_2;$$

$$A^*L_{10} = A^*L_{20} = 0, \quad A^*\Psi_1 = L_{10}, \quad A^*\Psi_2 = L_{20};$$

$$(\varphi_1, \Psi_1) = (\psi_1, L_{10}) = (\varphi_2, \Psi_2) = (\psi_2, L_{20}) = 1.$$

Проектор на нейтральное подпространство U_0 :

$$P_0v = x_1\varphi_1 + x_2\psi_1 + x_3\varphi_2 + x_4\psi_2.$$

Компоненты вектора $x = (x_1, x_2, x_3, x_4) \in R^4$ – скалярные произведения:

$$x_1 = (v_0, \Psi_1), \quad x_2 = (v_0, L_{10}),$$

$$x_3 = (v_0, \Psi_2), \quad x_4 = (v_0, L_{20}).$$

2. Уравнение на нейтральном многообразии в нормальной форме:

$$\dot{x}_1 = x_2 + O(|x|^2),$$

$$\dot{x}_2 = a_1x_1x_2 + a_2x_1x_4 + a_3x_3x_2 + a_4x_3x_4 + O(|x|^3), \quad (9)$$

$$\dot{x}_3 = x_4 + O(|x|^2),$$

$$\dot{x}_4 = b_1x_1x_2 + b_2x_1x_4 + b_3x_3x_2 + b_4x_3x_4 + O(|x|^3).$$

3. Модельная система:

$$\dot{x}_1 = x_2,$$

$$\dot{x}_2 = a_1x_1x_2 + a_2x_1x_4 + a_3x_3x_2 + a_4x_3x_4,$$

$$\dot{x}_3 = x_4,$$

$$\dot{x}_4 = b_1x_1x_2 + b_2x_1x_4 + b_3x_3x_2 + b_4x_3x_4.$$

Здесь $a_j = 2 \cdot (M_j, L_{10}), \quad b_j = 2 \cdot (M_j, L_{20})$

($j = 1, 2, 3, 4$), где

$$M_1 = K_2(\varphi_1, \psi_1) + A^{-1}K_2\varphi_1^2,$$

$$M_2 = K_2(\varphi_1, \psi_2) + A^{-1}K_2(\varphi_1, \varphi_2),$$

$$M_3 = K_2(\varphi_2, \psi_1) + A^{-1}K_2(\varphi_1, \varphi_2),$$

$$M_4 = K_2(\varphi_2, \psi_2) + A^{-1}K_2\varphi_2^2.$$

Критерий устойчивости. Нулевое равновесие системы (9) неустойчиво, если $a_1 + (a_2 + a_3)\alpha + a_4\alpha^2 \neq 0$. Здесь α – любой из вещественных корней многочлена $P(\alpha) = b_1 + (b_2 + b_3 - a_1)\alpha + (b_4 - a_2 - a_3)\alpha^2 - a_4\alpha^3$.

Случай нейтрального спектра $\sigma_0(A) = \{0^2, 0, \pm i\omega\}$

1. Собственные значения – нуль кратности 3, которому отвечают двумерная жорданова клетка и простая пара $\pm i\omega$ на мнимой оси. Соответствующие корневые векторы операторов A и A^* : $\varphi_1, \psi, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_3^*$ и $L_{10} = L_1(0), \Psi, L_{20} = L_2(0), \Phi_3, \Phi_3^*$: $A\varphi_1 = A\varphi_2 = 0, A\psi = \varphi_1, A\varphi_3 = i\omega\varphi_3, A\varphi_3^* = -i\omega\varphi_3^*; A^*L_{10} = A^*L_{20} = 0, A^*\Psi = L_{10},$

$$A^*\Phi_3 = -i\omega\Phi_3, A^*\Phi_3^* = i\omega\Phi_3^*;$$

$$(\varphi_1, \Psi) = (\psi, L_{10}) = (\varphi_2, L_{20}) = (\varphi_3, \Phi_3) = (\varphi_3^*, \Phi_3^*) = 1.$$

Проектор на нейтральное подпространство U_0 :

$$P_0v = x_1\varphi_1 + x_2\psi + x_3\varphi_2 + z\varphi_3 + z^*\varphi_3^*.$$

Компоненты векторов $x = (x_1, x_2, x_3) \in R^3$ и $v_0 = (x, z, z^*) \in R^3 \times C^2$ – скалярные произведения:

$$x_1 = (v_0, \Psi), \quad x_2 = (v_0, L_{10}), \quad x_3 = (v_0, L_{20}),$$

$$z = (v_0, \Phi_3), \quad z^* = (v_0, \Phi_3^*).$$

2. Уравнение на нейтральном многообразии в нормальной форме:

$$\dot{x}_1 = x_2 + O(|v_0|^2),$$

$$\dot{x}_2 = ax_1x_2 + O(|z|^2 + x_2^2 + |x_2x_3|) + O(|z| \cdot |v_0|^2), \quad (10)$$

$$\dot{x}_3 = x_2O(|x|^2) + O(|z| \cdot |v_0|^2),$$

$$\dot{z} = i\omega z + zO(|x|) + z^*O(|v_0|^4).$$

3. Модельная система:

$$\dot{x}_1 = x_2, \quad \dot{x}_2 = ax_1x_2, \quad \dot{x}_3 = 0, \quad \dot{z} = i\omega z.$$

Здесь $a = 2 \cdot (K_2(\varphi_1, \psi) + A^{-1}K_2\varphi_1^2, L_{10})$.

Критерий устойчивости. Нулевое равновесие системы (10) неустойчиво, если $a \neq 0$.

Случай нейтрального спектра

$$\sigma_0(A) = \{0, 0, \pm i\omega_1, \pm i\omega_2\}$$

1. Собственные значения – нуль кратности 2 и две ненулевые пары $\pm i\omega_1, \pm i\omega_2$ на мнимой оси. Между собственными значениями $i\omega_1$ и $i\omega_2$ отсутствуют резонансы $\omega_1 > \omega_2 > 0, \omega_1 \neq 2\omega_2, \omega_1 \neq 3\omega_2$. Жорданова матрица, отвечающая нейтральному спектру $\sigma_0(A)$, диагональна. Соответствующие

собственные векторы операторов A и A^* : $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4, \varphi_3^*, \varphi_4^*$ и $L_{10} = L_1(0), L_{20} = L_2(0),$

$$\Phi_3, \Phi_4, \Phi_3^*, \Phi_4^*: A\varphi_1 = A\varphi_2 = 0, A\varphi_j = i\omega_{j-2}\varphi_j,$$

$$A\varphi_j^* = -i\omega_{j-2}\varphi_j^* \quad (j = 3, 4), A^*L_{10} = A^*L_{20} = 0,$$

$$A^*\Phi_j = -i\omega_{j-2}\Phi_j, A^*\Phi_j^* = i\omega_{j-2}\Phi_j^* \quad (j = 3, 4),$$

$$(\varphi_k, L_{k0}) = (\varphi_{k+2}, \Phi_{k+2}) = (\varphi_3^*, \Phi_3^*) = (\varphi_4^*, \Phi_4^*) = 1 \quad (k = 1, 2).$$

Проектор на нейтральное подпространство U_0 :

$$P_0 v = x_1 \varphi_1 + x_2 \varphi_2 + z_1 \varphi_3 + z_2 \varphi_4 + z_1^* \varphi_3^* + z_2^* \varphi_4^*.$$

Компоненты векторов $x = (x_1, x_2) \in R^2$,

$z = (z_1, z_2) \in C^2$ и $v_0 = (x, z, z^*)$ – скалярные произведения:

$$x_j = (v_0, L_{j0}), \quad z_j = (v_0, \Phi_{j+2}),$$

$$z_j^* = (v_0, \Phi_{j+2}^*) \quad (j = 1, 2).$$

2. Уравнение на нейтральном многообразии в нормальной форме:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= a_{11} |z_1|^2 + a_{12} |z_2|^2 + O(|z|^2 \cdot |v_0|^2), \\ \dot{x}_2 &= a_{21} |z_1|^2 + a_{22} |z_2|^2 + O(|z|^2 \cdot |v_0|^2), \\ \dot{z}_1 &= i\omega z_1 + z_1(B_{11}x_1 + B_{12}x_2) + O(|z| \cdot |v_0|^2), \\ \dot{z}_2 &= i\omega z_2 + z_2(B_{21}x_1 + B_{22}x_2) + O(|z| \cdot |v_0|^2). \end{aligned} \quad (11)$$

3. Модельная система:

$$\dot{x}_1 = a_{11} |z_1|^2 + a_{12} |z_2|^2,$$

$$\dot{x}_2 = a_{21} |z_1|^2 + a_{22} |z_2|^2,$$

$$\dot{z}_1 = i\omega z_1 + z_1(B_{11}x_1 + B_{12}x_2),$$

$$\dot{z}_2 = i\omega z_2 + z_2(B_{21}x_1 + B_{22}x_2).$$

Здесь коэффициенты a_{jk} , B_{jk} ($j = 1, 2$; $k = 1, 2$)

определены равенствами

$$a_{jk} = 2 \cdot (K_2(\varphi_{k+2}, \varphi_{k+2}^*), L_{j0}),$$

$$B_{jk} = 2 \cdot (K_2(\varphi_k, \varphi_{j+2}), \Phi_{j+2}).$$

Достаточное условие устойчивости и неустойчивости. Введем обозначения:

$$b_{jk} = 2 \operatorname{Re} B_{jk}, \quad c_{jk} = a_{1k} b_{j1} + a_{2k} b_{j2}, \quad k = 1, 2, \quad j = 1, 2.$$

Пусть $\Delta = c_{11}c_{22} - c_{12}c_{21}$.

Нулевое равновесие системы (11) неустойчиво, если $\Delta \neq 0$ и выполнено одно из двух условий: $c_{11} > 0$ либо $c_{22} > 0$. Это равновесие устойчиво, если выполнены четыре неравенства:

$$c_{11} < 0, \quad c_{22} < 0, \quad \Delta > 0, \quad c_{12}c_{21} > 0.$$

Литература

1. Юдович В.И. Косимметрия, вырождение решений операторных уравнений, возникновение фильтрационной конвекции // Мат. заметки. 1991. Т. 49, № 5. С. 142–148.

2. Куракин Л.Г., Курдоглыан А.В. Критические случаи устойчивости равновесий в дифференциальных уравнениях с двумя косимметриями // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2018. № 1. С. 26–32.

3. Kurakin L.G., Kurdoglyan A.V. Semi-Invariant Form of Equilibrium Stability Criteria for Systems with One Cosymmetry // Russian J. of Nonlinear Dynamics. 2019. Vol. 15, № 4. P. 525–531.

4. Yudovich V.I. Secondary cycle of equilibria in a system with cosymmetry, its creation by bifurcation and impossibility of symmetric treatment of it // Chaos. 1995. Vol. 5, № 2. P. 402–411.

5. Yudovich V.I. The cosymmetric version of the implicit function theorem // Linear topological spaces and complex analysis. Ankara, 1995. Vol. 2. P. 105–125.

6. Куракин Л.Г., Юдович В.И. Полуинвариантная форма критериев устойчивости равновесия в критических случаях // Прикладная математика и механика. 1986. Т. 50, № 5. С. 707–711.

7. Плисс В.А. Принцип сведения в теории устойчивости движения // Изв. АН СССР. Серия математическая. 1964. Т. 6. С. 1297–1324.

8. Хазин Л.Г., Шноль Э.Э. Устойчивость критических положений равновесия. Пушкино: ОНТИ НЦБИ АН СССР, 1985. 215 с.

9. Арнольд В.И. Дополнительные главы теории обыкновенных дифференциальных уравнений. М.: Наука, 1978. 304 с.

References

1. Yudovich V.I. (1991). Cosymmetry, degeneration of solutions of operator equations, and onset of a filtration convection. *Mathematical Notes*, vol. 49, no. 5, pp. 540-545.

2. Kurakin L.G., Kurdoglyan A.V. (2018). Critical cases of equilibrium stability for differential equations with two cosymmetries. *Izv. vuzov. Sev.-Kavk. region. Estestv. nauki* (Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science), no. 1, pp. 26-32. (in Russian).

3. Kurakin L.G., Kurdoglyan A.V. (2019). Semi-invariant form of equilibrium stability criteria for systems with one cosymmetry. *Russian Journal of Nonlinear Dynamics*, vol. 15, no. 4, pp. 525-531.

4. Yudovich V.I. (1995). Secondary cycle of equilibria in a system with cosymmetry, its creation by bifurcation and impossibility of symmetric treatment of it. *Chaos*, vol. 5, no. 2, pp. 402-411.

5. Yudovich V.I. (1995). The cosymmetric version of the implicit function theorem. *Linear topological spaces and complex analysis*. Ankara, vol. 2, pp. 105-125.

6. Kurakin L.G., Yudovich V.I. (1986). Semi-invariant form of equilibrium stability criteria in critical cases. *Journal of Applied Mathematics and Mechanics*, vol. 50, no 5, pp. 543-546.

7. Pliss V.A. (1964). A reduction principle in the theory of stability of motion. *Izv. AN SSSR. Seriya matematicheskaya*, vol. 28, no. 6, pp. 1297-1324. (in Russian).

8. Khazin L.G., Shnol E.E. (1985). *Stability of critical equilibrium states*. Manchester University Press, 208 p.

9. Arnold V.I. (1978). *Supplementary chapters to the theory of ordinary differential equations*. Moscow, Nauka Publ., 304 p. (in Russian).

УДК 534.2

DOI 10.18522/1026-2237-2020-1-17-25

ИЗЛУЧЕНИЕ ЗВУКА ТОЧЕЧНЫМ ИСТОЧНИКОМ ВБЛИЗИ ПОВЕРХНОСТИ ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА*

© 2020 г. Н.К. Мусатова¹, М.А. Сумбатян¹¹Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, Россия

SOUND RADIATION BY A POINT SOURCE NEAR A SURFACE OF AIRCRAFT

N.K. Musatova¹, M.A. Sumbatyan¹¹Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia

Мусатова Наталия Кристиановна – магистр, кафедра теоретической и компьютерной гидроаэродинамики, Институт математики, механики и компьютерных наук им. И.И. Воровича, Южный федеральный университет, ул. Мильчакова, 8а, г. Ростов н/Д, 344090, Россия, e-mail: musatova.nataliasfedu.ru@gmail.com

Natalia K. Musatova - Master, Department of Theoretical and Computational Hydroaerodynamics, Vorovich Institute of Mathematics, Mechanics and Computer Science, Southern Federal University, Milchakova St., 8a, Rostov-on-Don, 344090, Russia, e-mail: musatova.natalia-sfedu.ru@gmail.com

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

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

Изучается задача излучения звука источником, расположенным в хвосте летательного аппарата. Сравниваются три способа нахождения акустического давления: метод граничных интегральных уравнений, физическая теория дифракции Кирхгофа и лучевая теория. Рассматривается простейшая модель в виде двумерной задачи и некоторого тонкого удлиненного тела с острой задней кромкой. Задача дифракции для акустически твердого препятствия заключается в решении интегрального уравнения Фредгольма второго рода. Благодаря применению метода граничных интегральных уравнений уравнение по всей области сводится к уравнению по граничной кривой. Для численного решения уравнения применяется дискретизация по узлам сетки, выбранной на граничной кривой с использованием метода коллокации. Образуется система линейных алгебраических уравнений с вещественными коэффициентами, из которой находится полное акустическое давление. Физическая теория дифракции Кирхгофа заключается в том, что при коротковолновой дифракции на произвольном выпуклом теле граничное значение давления в окрестности каждой граничной точки в зоне света равно удвоенному давлению в падающем поле. Согласно геометрической теории, модуль акустического давления в отраженном поле описывается функцией Ханкеля, аргумент которой равен полному пути пролёта луча при его однократном отражении от границы. Графически сравнивается давление в полном поле при существовании в острой кромке узла разбиения и при его отсутствии; строятся отраженное поле, посчитанное тремя теориями, и отраженное поле в дальней точке приёма.

Ключевые слова: аэроакустика, летательный аппарат, метод граничных интегральных уравнений, физическая теория дифракции Кирхгофа, лучевая теория, сингулярные интегралы, метод коллокации, акустическое давление, бесселевы функции, функция Грина.

The problem of sound radiation by a source located in the tail of an aircraft is considered. Three methods of finding acoustic pressure are compared: the boundary element method, the Kirchhoff's physical theory of diffraction and the ray theory. The simplest model in the form of two-dimensional problem and some thin long shape with acute angle is considered. The diffraction problem for an acoustically solid obstacle lay in the solving Fredholm's integral equation of the second kind. Due to the boundary element method application, the equation along the entire region is reduced to the equation along the

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

boundary. Discretization by grid nodes, selected on the boundary curve, using the collocation method is applied for numerical solution. A system of linear algebraic equations with real coefficients is formed, then the total acoustic pressure is found. The Kirchhoff's physical theory of diffraction is based on the fact that on an arbitrary convex body in case of short-wave diffraction in the vicinity of each boundary point in the zone of light the boundary value of pressure is equal to twice pressures in the incident field. By the ray theory the modulus of the acoustic pressure in the scattering field is described by the Hankel function. Argument of this function is equal to the length of full path of the beam when it is reflected once from the border. In conclusion, the pressure in cases, when in the sharp edge there is a split node and when there isn't, are compared. Also a scattering field calculated by three theories and scattering field in the far receiving point are built.

Keywords: aeroacoustics, aircraft, boundary element method, Kirchhoff's physical theory of diffraction, ray theory, singular integrals, collocation method, acoustic pressure, Bessel functions, Green's function.

Введение

Одной из актуальных проблем аэроакустики является задача излучения звука источником, расположенным в хвосте летательного или подводного аппарата (к примеру, звук от двигателя самолета или подводной лодки). Для изучения этого явления необходимо исследовать дифракцию от точечного источника звука на остром угле хвоста летательного или подводного аппарата. Цель данного исследования – сравнение трёх способов расчета акустическо-

го давления: метода граничных интегральных уравнений (точное решение), физической теории дифракции Кирхгофа и лучевой теории дифракции, а также построение рассеянного поля в дальней зоне.

Постановка задачи

Рассмотрим точечный источник звука S , расположенный вблизи хвостовой части аппарата. Исследуется структура дифракционного поля в окрестности острого угла.

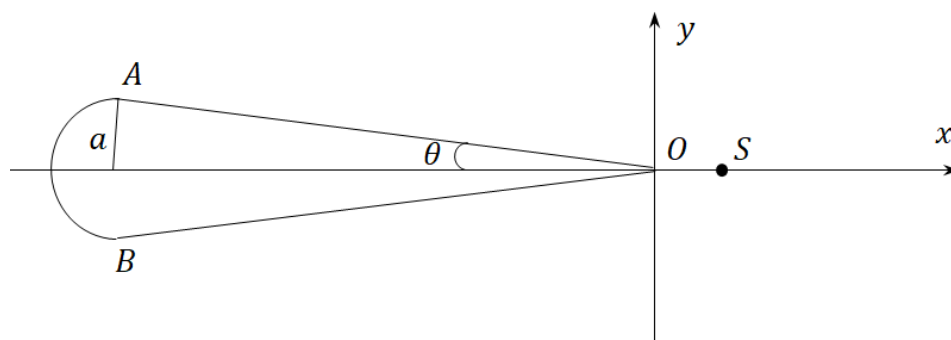


Рис. 1. Схема летательного аппарата / Fig. 1. Aircraft scheme

На рис. 1 точка S обозначает точечный источник звука; оси x и y соответствуют декартовой системе координат; A , B – точки касания отрезков и круга; O – точка начала координат; a – радиус круга.

Для исследования влияния острой кромки на дифракцию падающей волны выбрана простейшая двумерная модель летательного аппарата в виде сегмента круга радиуса a (кабина), сопряженного с парой боковых прямолинейных отрезков (корпус), которые касаются круга в точках A и B . Полный угол раствора равен 2θ , как изображено на рис. 1, и $AO = BO = L$. Граничный контур – гладкий, кроме задней острой кромки. Геометрические размеры для рассмотренных численных примеров подробно описаны ниже.

Как известно, если падающая акустическая волна с угловой частотой ω и амплитудой акустического давления p^{inc} встречает препятствие, она дифрагирует. Как следствие, возникает рассеянная волна с амплитудой давления p^{sc} . Из-за наличия препятствия (в данном случае – двумерной области) и возникновения рассеянной волны структура полного поля представляет собой сумму этих волн $p = p^{inc} + p^{sc}$. Волновой процесс предполагается гармоническим во времени с множителем $e^{-i\omega t}$.

После преобразований, аналогичных приведённым в [1, 2], задача дифракции для акустически твёрдого препятствия сводится к интегральному уравнению Фредгольма второго рода:

$$p(y_0) - 2 \int_l p(y) \frac{\partial \Phi(|y_0 - y|)}{\partial n_y} ds_y = 2p^{inc}(y_0). \quad (1)$$

Здесь l – граничный контур области; y, y_0 – внутренняя и внешняя переменные интегрирования на контуре; Φ – функция Грина; n_y – нормаль к контуру в точке y ; ds_y – элементарная длина дуги в точке y .

Если один из узлов разбиения внешней переменной y_0 совпадает с острой задней кромкой, коэффициент перед внеинтегральным членом в формуле (1) изменяется [3, 4], и формула приобретает вид

$$\frac{2\theta}{\pi} p(y_0) - 2 \int_l p(y) \frac{\partial \Phi(|y_0 - y|)}{\partial n_y} ds_y = 2p^{inc}(y_0). \quad (2)$$

Здесь θ – величина половины острого угла задней кромки (рис. 1).

Методы моделирования рассматриваемой задачи

1. Метод граничных интегральных уравнений (ГИУ).

Задача сводится к интегральному уравнению по границе области с помощью функции Грина. Размерность исследуемой задачи снижается на единицу [5–7].

Функция Грина для двумерной задачи представляет собой функцию Ханкеля первого рода [8, 9]

$$\Phi(|y_0 - y|) = \Phi(r) = \frac{i}{4} H_0^{(1)}(kr).$$

Её производная по нормали вычисляется в явном виде

$$\frac{\partial \Phi}{\partial n_y} = \frac{\partial \Phi}{\partial r} \cdot \frac{\partial r}{\partial n_y} = -\frac{ik}{4} H_1^{(1)}(kr) \cdot \frac{(\vec{r}, \vec{n}_y)}{r}.$$

Падающая волна от точечного источника звука имеет вид $p^{inc}(y_m) = \frac{i}{4} H_0^{(1)}(kr_s^m)$, где r_s^m – расстояние от источника звука до точки y .

После подстановки производной от функции Грина и падающего поля уравнение (1) принимает вид

$$p(y_m) + \frac{ik}{2} \int_l H_1^{(1)}(kr) \cdot \frac{(\vec{r}, \vec{n}_y)}{r} p(y) dl_y = \frac{i}{2} H_0^{(1)}(kr_s^m).$$

Для численного решения данного интегрального уравнения применяется дискретизация по узлам сетки, т. е. разбиение границы области на K равных отрезков, с использованием метода коллокаций. При этом исходная задача сводится к системе линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) с комплексными коэффициентами относительно вектора

$\mathbf{P} = (p_1, p_2, \dots, p_k)$ с матрицей размером $K \times K$. Разделяя вещественную и мнимую части, получим СЛАУ размером $2K \times 2K$ с вещественными коэффициентами:

$$\begin{cases} P_m^{Re} + \frac{k}{2} \sum_{j=1}^K \tilde{N}_{mj} \cdot [-J_1 \cdot P_j^{Im} - Y_1 \cdot P_j^{Re}] = -\frac{Y_0(kr_s^m)}{2} \\ P_m^{Im} + \frac{k}{2} \sum_{j=1}^K \tilde{N}_{mj} \cdot [J_1 \cdot P_j^{Re} - Y_1 \cdot P_j^{Im}] = \frac{J_0(kr_s^m)}{2}, \end{cases}$$

$m = 1, \dots, K$.

Здесь

$$C_{mj} = \frac{(x_m - x_j)(y_{j+1} - y_{j-1}) - (y_m - y_j)(x_{j+1} - x_{j-1})}{h_j} \cdot \Delta_j,$$

$$h_j = \sqrt{(x_{j+1} - x_{j-1})^2 + (y_{j+1} - y_{j-1})^2}$$

При этом длина элементарной дуги

$$\Delta_j = \frac{1}{2} \left(\sqrt{(x_j - x_{j-1})^2 + (y_j - y_{j-1})^2} + \sqrt{(x_j - x_{j+1})^2 + (y_j - y_{j+1})^2} \right).$$

Стоит отметить, что из данной СЛАУ находится акустическое давление полного поля $p(y)$ на граничной кривой. При этом акустическое давление рассеянного поля вычисляется по формуле

$$p^{sc}(x) = \int_l p(y) \frac{\partial \Phi}{\partial n_y} dl_y. \quad (3)$$

2. Физическая теория дифракции Кирхгофа.

Суть данной теории сводится к четырём аксиомам: препятствие выпукло; вся граница препятствия состоит из двух участков: зоны света и зоны тени (куда прямой звук от источника не попадает), акустическое давление в зоне тени равно нулю; в зоне света в малой окрестности каждой точки границы падающая волна является плоской; кривизна отражающей поверхности локально в окрестности каждой точки равна бесконечности (по сравнению с малой длиной волны), т.е. отражающая поверхность предполагается плоской в малой окрестности каждой точки границы.

Из этого следует, что в любой точке в зоне света локально задача дифракции сводится к падению плоской волны на твёрдую плоскую границу. Исходя из этих физических посылок, Кирхгоф ввел гипотезу [10, 11]. Её идея – при коротковолновой дифракции на произвольном выпуклом теле граничное значение давления в окрестности каждой

граничной точки в зоне света такое же, как и при отражении плоской волны от бесконечной плоской границы, т.е. равно удвоенному давлению в падающем поле. Тогда рассеянное поле по-прежнему определяется формулой (3), при этом после подстановки найденного граничного давления оно сводится к выражению

$$p^{sc}(x) = \int_l p(y) \frac{\partial \Phi}{\partial n_y} dl_y = 2 \int_{l^+} p^{inc}(y) \frac{\partial \Phi}{\partial n_y} dl_y.$$

Как и в ГИУ, здесь можно разделить вещественную и мнимую части

$$p^{sc} = -\frac{k}{8} \sum_{j=1}^K \frac{(\bar{r}, \bar{n}_y)}{r} \cdot \left(J_0(kr_s^m) \cdot J_1(kr) - Y_0(kr_s^m) \cdot Y_1(kr) \right) + i \left[J_0(kr_s^m) \cdot Y_1(kr) + Y_0(kr_s^m) \cdot J_1(kr) \right].$$

3. Лучевая теория дифракции.

Согласно лучевой теории [12, 13], при отражении звукового луча от абсолютно твердой границы акустическое давление в произвольной точке такое же, как и от источника без отражений (если расстояние от источника до приемника принято равным полному пути пролёта звукового луча). Следу-

ет заметить, что эта формула справедлива, если существует луч отражения из источника в приёмник (рис. 2), в противном случае отраженное поле равно нулю: $|p^{sc}| = \frac{i}{4} H_0^{(1)}(k|R-S'|)$.

4. Рассеянное поле в дальней зоне.

Выше были описаны три метода для вычисления акустического давления вблизи граничной кривой. Теперь вычислим его в дальней зоне, когда точка приёма находится на расстоянии, достаточно большом в сравнении с размерами тела.

Для решения поставленной задачи возьмём рассеянное поле

$$|p^{sc}| = \left| \int_l p(y) \cdot e^{-\frac{ik(x,y)}{|x|}} \cdot \cos(\bar{n}_y, \bar{x}) dl_y \right|. \quad (4)$$

После некоторых подстановок и преобразований формула (4) примет окончательный вид

$$|p^{sc}| = \left| \int_l (p^{Re}(y) + i \cdot p^{Im}(y)) \cdot (n_y^1 \cos \alpha + n_y^2 \sin \alpha) \times (\cos(k\beta) - i \sin(k\beta)) dl_y \right|,$$

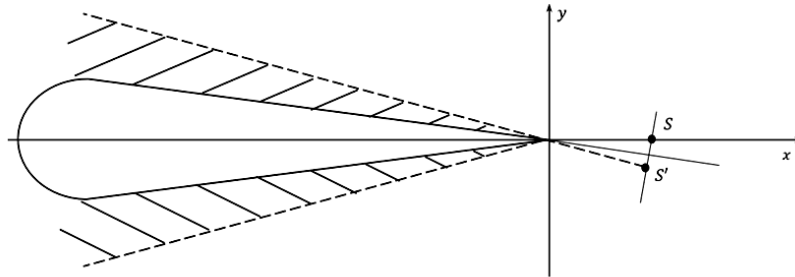


Рис. 2. Область, в которой существует луч отражения из источника в приемник (обозначена штрихом) / Fig. 2. The area where there is a reflection ray from the source to the receiver (indicated by a stroke)

где $\beta = y_1 \cos \alpha + y_2 \sin \alpha$; α – угол между началом координат и отрезком, соединяющим точку приёма и начало координат (рис. 3).

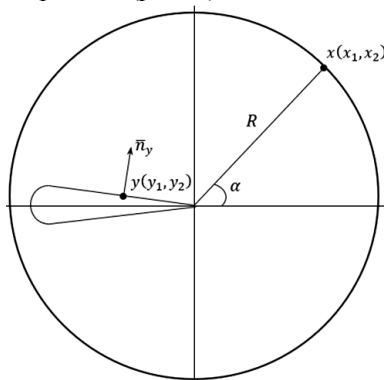


Рис. 3. Область и точка приема в дальней зоне в полярной системе координат / Fig. 3. Area and receiving point in the far zone in the polar coordinate system

Результаты

Для проведения расчетов по изложенным выше теориям разработана программа на языке C++. При этом метод ГИУ реализован в двух случаях – когда сетка разбиения построена таким образом, что в острой кромке есть узел (формула (2)), и когда узел отсутствует.

Для сравнения результатов по трем теориям были заданы следующие размеры: угол $\theta = \frac{\pi}{6}$, длина прямолинейного отрезка $L = 32$, радиус полуокружности $R = L \cdot \tan \theta \approx 18,48$.

На рис. 4 приведено давление в полном поле, полученное методом ГИУ.

Рассмотрены 2 случая: наличие в острой кромке узла разбиения и его отсутствие.

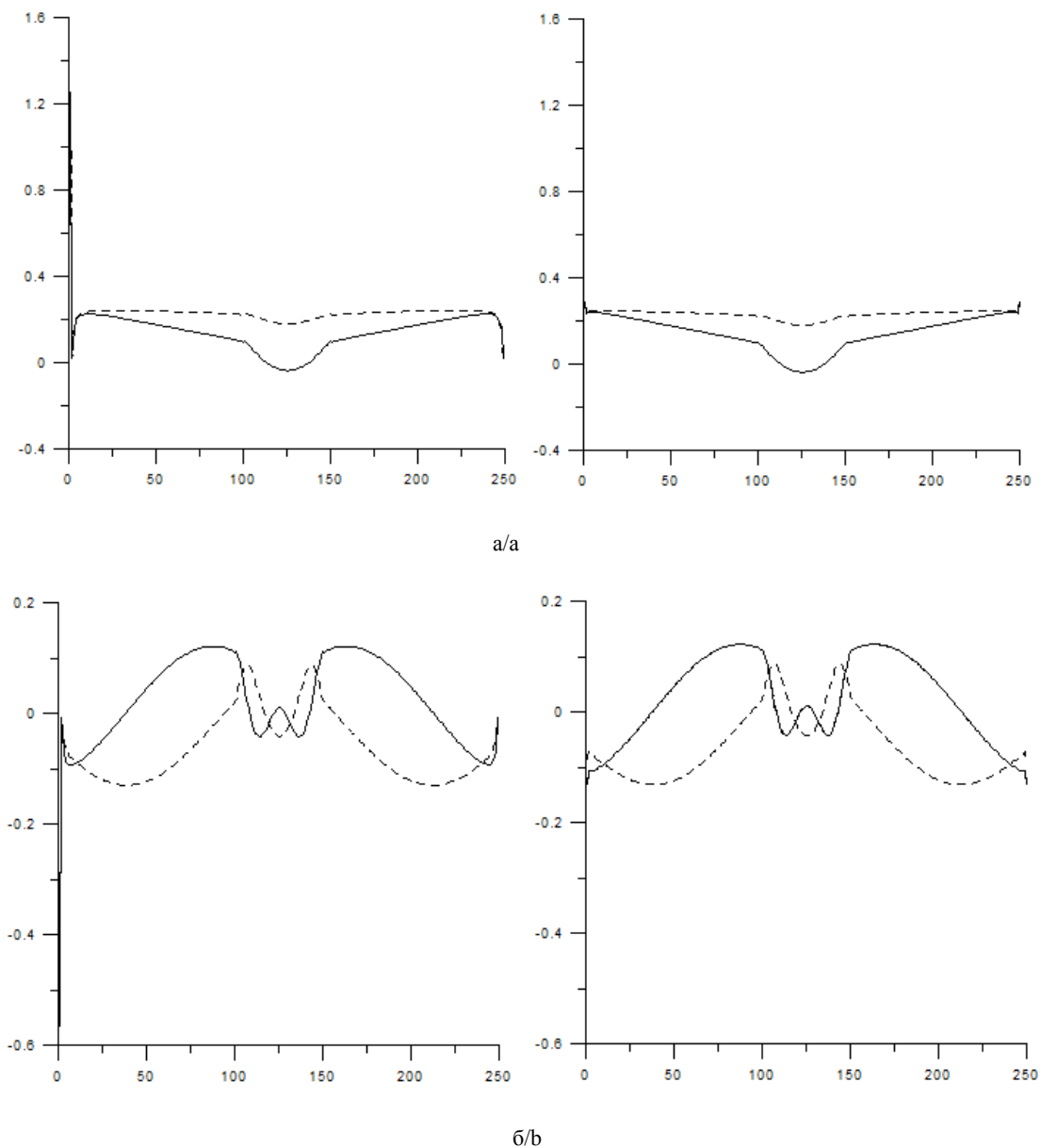


Рис. 4. Решение, полученное методом ГИУ при $K=250$ в двух случаях: в острой кромке узел есть (слева) и в острой кромке узла нет (справа) (а – $K=0,01$; б – $K=0,1$) / Fig. 4. The solution obtained by the SIU method for $K=250$ in two cases: the sharp edge has a node (on the left) and the sharp edge does not have a node (on the right) (a - $K=0.01$; b - $K=0.1$)

На одном графике расположены вещественная (сплошная линия) и мнимая (пунктирная линия) части акустического давления.

По вертикали отложено акустическое давление, по горизонтали – номера узлов разбиения граничного контура. При этом узлы идут вдоль граничного контура против часовой стрелки, начиная от острого угла.

Для вычисления полного акустического давления при волновых числах $k=0,1$ и $k=0,01$ количество разбиений $k=250$ оказалось вполне доста-

точно (в сравнении с $k=400$). Нетрудно заметить, что вблизи узла на острой кромке существует некий всплеск, тогда как без узла в острой кромке этого всплеска нет. Рассмотрим отраженное поле (рис. 5). На одном графике представлены решения, полученные с помощью метода ГИУ (сплошная линия), теории Кирхгофа (пунктирная линия) и лучевой теории (штрихпунктирная линия). По вертикали отложен модуль акустического давления, по горизонтали – волновое число k .

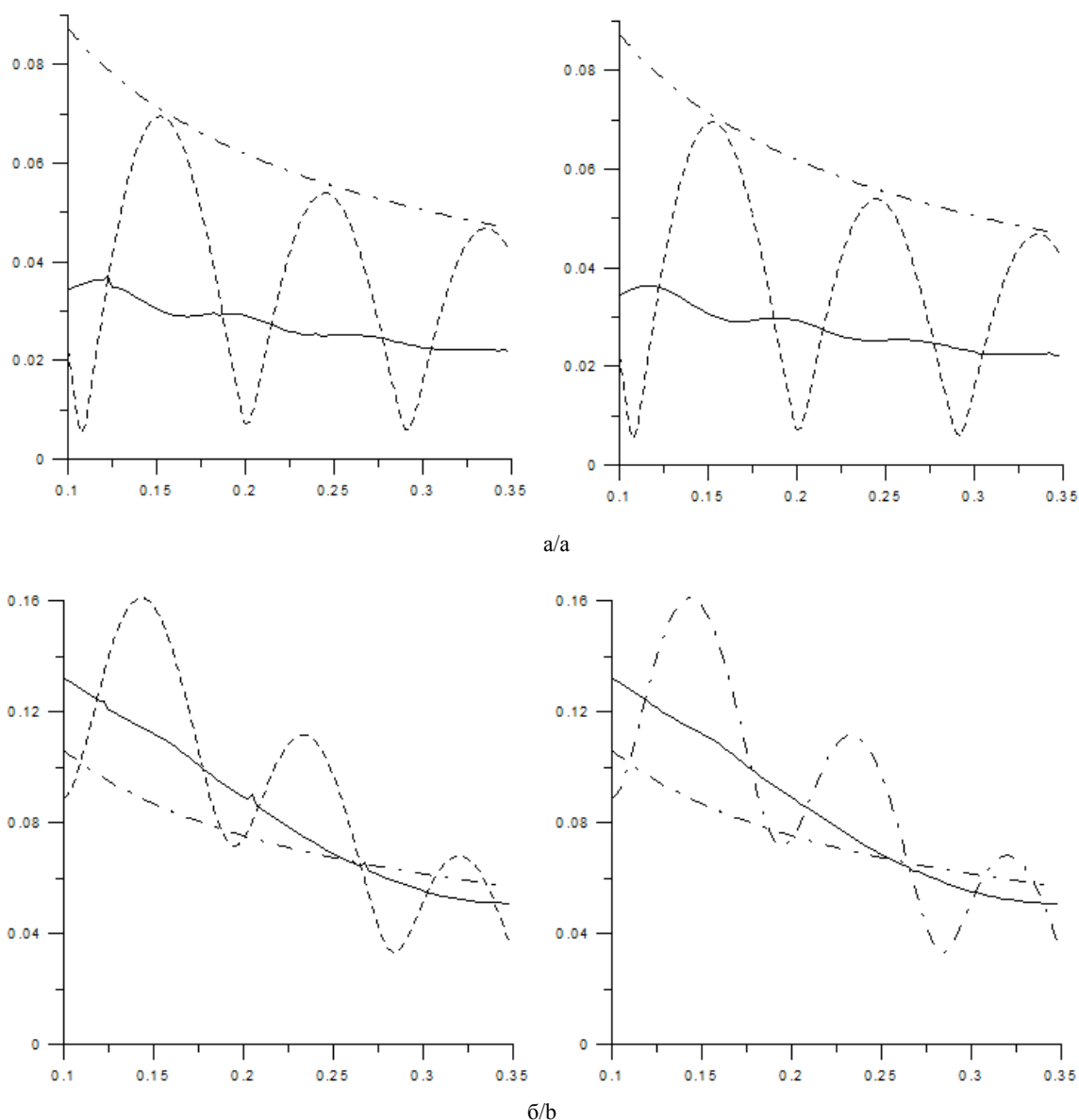


Рис. 5. Давление в рассеянном поле, полученное тремя методами, в зависимости от волнового числа K : в острой кромке есть узел (слева), в острой кромке узла нет (справа); а – $K=750$; $S(0,20)$ – точка источника; $s \cdot (10, -10\sqrt{3}, -10)$ – точка мнимого источника; $R(-20, 25)$ – точка приемника; б – $K=750$; $S(0,20)$ – точка источника; $s \cdot (-10\sqrt{3}, -10)$ – точка мнимого источника; $R(-20, 25)$ – точка приемника / Fig. 5. The pressure in the scattered field obtained by three methods, depending on the wave number k : there is a node in the sharp edge (on the left), there is no node in the sharp edge (on the right); а - $K=750$; $S(0, 20)$ - the source point; $s \cdot (10, -10\sqrt{3}, -10)$ - the imaginary point source; $R(-20, 25)$ - point receiver; б - $K=750$; $S(0,20)$ - point source; $s \cdot (-10\sqrt{3}, -10)$ - the imaginary point source; $R(-20, 25)$ - point receiver

Таким образом, несмотря на то что решения СЛАУ с узлом в острой кромке и без него отличаются, на акустическое давление в рассеянном поле это практически не повлияло.

Вычислено отраженное поле в дальней точке приёма при разных волновых числах (рис. 6, 7).

Точка расположения источника равна $S(20,0)$. На одном графике представлены метод ГИУ

(сплошная линия) и теория Кирхгофа (пунктирная линия). Лучевая теория в данном случае не рассматривалась, так как для большей части углов рассеяния она дает нулевое рассеянное поле. Рассматривался случай $k=250$ с расположением узла на острой кромке, поскольку наличие или отсутствие узла никак не повлияло на результаты в дальней зоне.

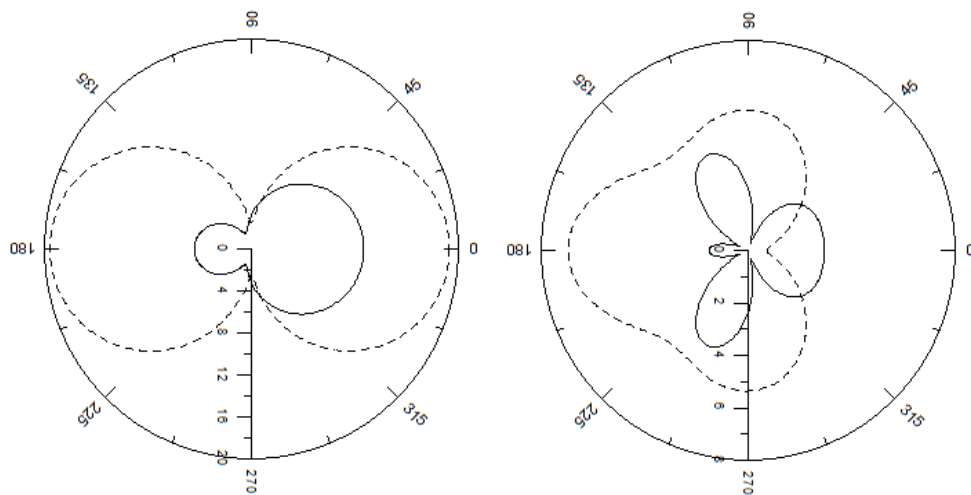


Рис. 6. Рассеянное поле в дальней зоне при волновых числах $k=0,01$ (левый график), $k=0,1$ (правый график)
/ Fig. 6. Scattered field in the far zone with wave numbers $k=0.01$ (left graph), $k=0.1$ (right graph)

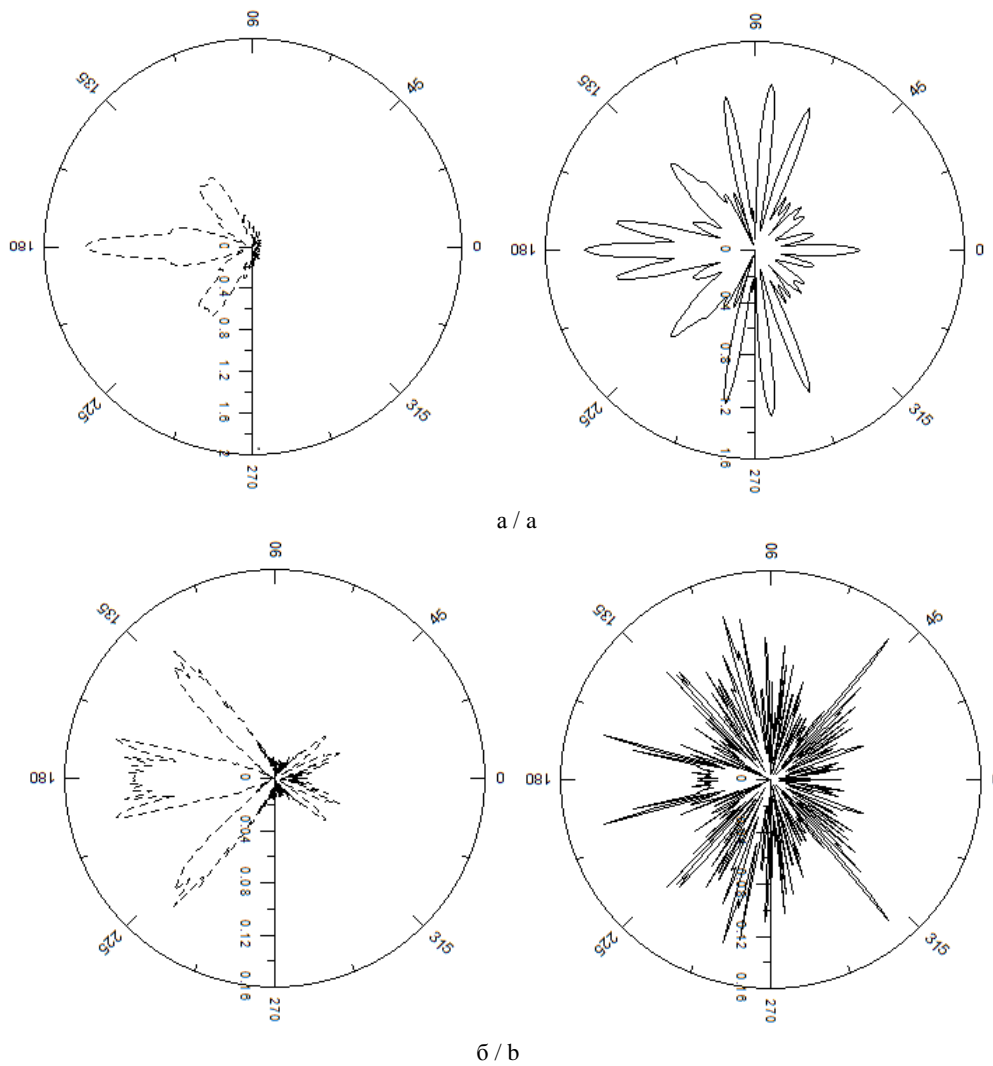


Рис. 7. Рассеянное поле в дальней зоне: теория Кирхгофа (слева), метод ГИУ (справа); а - $k=1$; б - $k=10$
/ Fig. 7. Scattered field in the far zone: Kirchhoff theory (left), GIU method (right); а - $k=1$; б - $k=10$

Заключение

По результатам проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Сравнение решений по методу ГИУ в двух случаях (когда в острой кромке есть узел и когда его нет) показывает, что в остром угле есть особенность, отвечающая уравнению (2). Точный характер особенности известен из решения задачи дифракции на бесконечном клине [2]. Однако подстановка этих решений в формулу для рассеянного поля показывает, что влияние этой особенности практически отсутствует.

2. Рассматриваемая задача дифракции на остром угле аппарата решена при помощи трёх методов. Точное решение для давления на граничном контуре методом ГИУ оказалось далеким и от теории Кирхгофа, и от лучевой теории. Таким образом, для рассматриваемой сильно нерегулярной границы, где препятствие представляет собой тонкое тело, да еще и с острым углом, только точная теория на основе ГИУ может дать правильный результат.

3. Результаты по методу ГИУ и по теории Кирхгофа сравнивались также в дальней зоне. Оказалось, что теория Кирхгофа при наличии острой кромки даёт правдоподобные результаты лишь по порядку величины, а числовые значения по этой теории далеки от точных. Таким образом, в ситуации, когда источник звука расположен вблизи хвостовой острой кромки аппарата, надёжные результаты может давать только точная теория.

4. На больших частотах диаграмма рассеяния имеет несколько резких явно выраженных максимумов. На соответствующих углах рассеяния система аппарат – источник звука акустически видна в дальнем поле. По остальным направлениям она практически не видна. Этот факт дает теоретическую базу для конструирования систем типа самолет-невидимка или подводная лодка – невидимка.

Литература

1. Сумбатьян М.А., Скалия А. Основы теории дифракции с приложениями в механике и акустике. М.: Физматлит, 2013. 328 с.
2. Шендеров Е.Л. Волновые задачи гидроакустики. Л.: Судостроение, 1972. 352 с.
3. Бенерджи П., Баттерфилд Р. Метод граничных элементов в прикладных науках: пер с англ. М.: Мир, 1984. 494 с.

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

5. Nethercote M.A., Assier R.C., Abrahams I.D. Analytical methods for perfect wedge diffraction: A review // *Wave Motion*. 2020. Vol. 93. Article 102479.

6. Chandler-Wilde S., Peplow A. A boundary integral equation formulation for the Helmholtz equation in a locally perturbed half-plane // *ZAMM – J. of Applied Mathematics and Mechanics*. 2005. Vol. 85. P. 79–88.

7. Tsuji T., Kagawa Y. Finite element and boundary element modelling for acoustic wave transmission in mean flow medium // *J. of Sound and Vibration*. 2002. Vol. 255. P. 849–866.

8. Кузьмин Р. Бесселевы функции. М.; Л.: ГТТИ, 1933. 152 с.

9. Абрамовиц М., Стиган И. Справочник по специальным функциям. М.: Наука, 1979. 832 с.

10. Lyrntzis A., George A. Use of the Kirchhoff method in acoustics // *AIAA J.* 1989. Vol. 27. P. 1451–1453.

11. Ghorbaniasl G., Siozos-Rousoulis L., Lacor C. A time-domain Kirchhoff formula for the convective acoustic wave equation // *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. 2016. Vol. 472. P. 1–17.

12. Бабич В.М., Булдырев В.С. Асимптотические методы в задачах дифракции коротких волн. М.: Наука, 1972. 456 с.

13. Pierce A.D. Acoustics: An Introduction to Its Physical Principles and Applications. N. Y.: ASA Publ. 1991. Chapter 8: Ray Acoustics.

References

1. Sumbatyan M.A., Scalia A. (2013). *Fundamentals of the diffraction theory with applications in mechanics and acoustics*. Moscow, Fizmatlit Publ., 328 p. (in Russian).
2. Shenderov E.L. (1972). *Wave problems of hydroacoustics*. Leningrad, Sudostroenie Publ., 352 p. (in Russian).
3. Banerjee P., Batterfield R. (1984). *Boundary element methods in engineering science*. Transl. from English. Moscow, Mir Publ., 494 p. (in Russian).
4. Brebbia C., Telles J., Wrobel L. (1987). *Boundary element techniques*. Transl. from English. Moscow, Mir Publ., 524 p. (in Russian).
5. Nethercote M.A., Assier R.C., Abrahams I.D. (2020). Analytical methods for perfect wedge diffraction: A review. *Wave Motion*, vol. 93, article 102479.
6. Chandler-Wilde S., Peplow A. (2005). A boundary integral equation formulation for the Helmholtz equation in a locally perturbed half-plane. *ZAMM – Journal of Applied Mathematics and Mechanics*, vol. 85, pp. 79–88.

7. Tsuji T., Kagawa Y. (2002). Finite element and boundary element modelling for acoustic wave transmission in mean flow medium. *Journal of Sound and Vibration*, vol. 255, pp. 849-866.

8. Kuzmin R. (1933). *Bessel functions*. Moscow, Leningrad, State Technical and Theoretical Publishing House, 152 p. (in Russian).

9. Abramovits M., Stigan I. (1979). *Handbook of special functions*. Moscow, Nauka Publ., 832 p. (in Russian).

10. Lyrintzis A., George A. (1989). Use of the Kirchhoff method in acoustics. *AIAA Journal*, vol. 27, pp. 1451-1453.

11. Ghorbaniasl G., Siozos-Rousoulis L., Lacor C. (2016). A time-domain Kirchhoff formula for the convective acoustic wave equation. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, vol. 472, pp. 1-17.

12. Babich V.M., Buldyrev V.S. (1972). *Asymptotic methods in short-wave diffraction problems*. Moscow, Nauka Publ., 456 p. (in Russian).

13. Pierce A.D. (1991). *Acoustics: An introduction to its physical principles and applications*. New York, ASA Publ. Chapter 8: Ray Acoustics.

Поступила в редакцию / Received

17 февраля 2020 г. / February 17, 2020

НАУКИ О ЗЕМЛЕ

SCIENCES OF EARTH

УДК 631.4

DOI 10.18522/1026-2237-2020-1-26-35

**SOILS OF BUYANT RIVER BASIN: TYPES, PROPERTIES,
AND RELATION TO OTHER ENVIRONMENTAL PARAMETERS**© 2020 D. Battsetseg¹, Ch.L. Khagvasuren¹, O. Batkhishig², Kh. Zoljargal²¹Khovd University, Khovd, Mongolia,²Institute of the Geography and Geoecology, Mongolian Academy of Sciences, Ulaanbaatar, Mongolia**ПОЧВЫ БАСЕЙНА РЕКИ БУЯНТ: ТИПЫ, СВОЙСТВА
И ОТНОШЕНИЕ К ДРУГИМ ЭКОЛОГИЧЕСКИМ ПАРАМЕТРАМ**Д. Баттцэцэг¹, Ч. Лхагвасурэн¹, О. Батхишиг², Х. Цолжаргал²¹Ховдский университет, Ховд, Монголия²Институт географии и геоэкологии, Монгольская академия наук, Улан-Батор, Монголия

Battsetseg Dugersuren - Postgraduate, Lecturer, Department of Geography and Geology, Khovd University, 16/4300, Jargalant sum 8400, Khovd, Mongolia, e-mail: batts_dn@yahoo.com

Баттцэцэг Дугерсүрэн – аспирант, преподаватель, кафедра географии и геологии, Ховдский университет, 16/4300, Ховд, Монголия, e-mail: batts_dn@yahoo.com

Lkhagvasuren Choijinjav - Doctor of Geography, Professor, Department of Geography and Geology, Khovd, University, 16/4300, Jargalant sum 8400, Khovd, Mongolia, e-mail: hovd_lha157@yahoo.com

Лхагвасурэн Чойджинджав – доктор географических наук, профессор, кафедра географии и геологии, Ховдский университет, 16/4300, Ховд, Монголия, e-mail: hovd_lha157@yahoo.com

Batkhishig Ochirbat - Doctor of Geography, Head of Soil Laboratory, Institute of the Geography and Geoecology, Mongolian Academy of Sciences, 81, Baruun Selbe 15, Chingeltei District, 4th Khoroo, Ulaanbaatar, 15170, Mongolia, e-mail batkhishig@gmail.com

Батхишиг Очирбат – доктор географических наук, заведующий почвенной лабораторией, Институт географии и геоэкологии Монгольская академия наук, 81, г. Улан-Батор, 15170, Монголия, e-mail batkhishig@gmail.com

Zoljargal Khavtgai - Doctor of Geography, Head of Soil Laboratory Institute of the Geography and Geoecology, Mongolian Academy of Sciences, 81, Baruun Selbe-15, Chingeltei District, 4th Khoroo, Ulaanbaatar, 15170, Mongolia, e-mail: zoljargalk@gmail.com

Цолжаргал Хавтгай – доктор географических наук, заведующий почвенной лабораторией, Институт географии и геоэкологии, Монгольская академия наук, 81, г. Улан-Батор, 15170, Монголия, e-mail: zoljargalk@gmail.com

Buyant river basin is one of the most elevated river basins of Mongolia. Its total area is 8488.7 km², and the basin, administratively, occupy the territories of 33 bags belonging to 5 soums of Khovd (Duut, Jargalant, Buyant, and Khovd) and Bayan-Ulgi (Deluun) aimags. For the past 300 years, bottoms of the basin used for agriculture while majority of rest land exploited by traditional nomadic livestock breeding. The soils in the basin is contrast due to its altitudinal differences. There are 35 types of soils belonging to 18 soil groups of 9 orders are distributed in the Buyant river basin. The purpose of this paper is to define quantitative analysis for soil and its properties and identify external linkages with other natural factors and socio-economic indicators. The research is employed basic soil laboratory analysis following traditional methods. For the factor analysis, the multiple linear regression analysis is used. According to the results, the soils in the Buyant river basin are generally low fertile with sandy and sandy clay texture. The soil physical properties largely dependent on climate change, aridity, and land use. Besides, abovementioned natural factors and their impacts of soil properties the soil itself define social processes going on in at the basin level.

Keywords: Buyant River basin, soil properties, salinity, carbonate, texture, soil organic matter, pH, available potassium, phosphorus.

Бассейн реки Буянт относится к наиболее возвышенным речным бассейнам Монголии. Его общая площадь составляет 8488,7 км². На его территории располагаются 5 сомонов, относящихся к двум аймакам: Ховдскому (сомоны Дуут, Джаргалант, Буянт и Ховд) и Баян-Улгийскому (Делуун). Район исследования характеризуется высокой изменчивостью природных условий, определяемой высотной поясностью. Здесь выделено 9 групп, 18 типов и 35 родов почв. На состояние почвы долины реки оказывают воздействие различные секторы экономики, включающие традиционное животноводство, а также выращивание зерновых, картофеля и овощей, которое проводится более 300 лет. Основной целью исследования являются анализ почвенных характеристик и физических свойств почвы в бассейне реки Буянт и выявление связей с другими природными факторами и социально-экономическими показателями. При проведении исследования использовался базовый лабораторный анализ почвы с использованием традиционных методов, а также множественный линейный регрессионный анализ. Установлено, что почвы в бассейне реки Буянт, как правило, обладают песчаной и песчано-глинистой текстурой и являются малоплодородными. Физические свойства в значительной степени зависят от изменения климата, засушливости и вида землепользования. Кроме того, характеристики почвы определяют социальные процессы, происходящие на уровне речного бассейна.

Ключевые слова: бассейн реки Буянт, свойства почвы, засоленность, карбонаты, текстура, органическое вещество почвы, pH, доступный калий, фосфор.

Introduction

Buyant river is one of the largest tributary rivers of the Khovd river, which is located in the Central Asian Internal Drainage Basin. Its headwaters formed in high mountains of the Mongolian Altai region. The Buyant river stretches through about 195 km and passes several natural regions: high mountain steppe, dry steppe, and desert steppe. Besides, its natural uniqueness, the Buyant river, has a tremendous socio-economic impact on society. One of the largest cities of Western Mongolia - Khovd city - is located on the banks of this river. Since 1685 the estuaries of Khovd and the Buyant river used for agriculture to supply the region with significant crops and vegetables [1].

The first soil survey over the region is conducted in a framework of expeditions led by the Mongolian Commission (a former scientific collaboration between the Soviet Union and Mongolia). This research aimed to assess soil fertility and possibilities to expand current agriculture practice. The researches led by Prof. Andreev [2] occupied only estuaries of the Buyant river where small-hold agriculture practiced for many years.

In 1960-1980, the soil research in rangelands and agricultural field was initiated by the Government of Mongolia. As a result of this nation-wide initiative series of soil maps with the scales of 1:100000 and 1:200000 are developed, and one of which dedicated to the Buyant river basin [3].

Besides researches mentioned above, several other expeditions were organized in the region and mainly dealt with soil fertility issues [4-8].

The Buyant river stretched through the different surfaces with unique landscapes, the contrast of which can be observed within a short distance. The soil cover in the basin is also diverse. The most soil

types identified in a region characterized by sandy loam structure, stony throughout all horizons, and low fertility. Majority of land used for traditional nomadic livestock breeding and only territories close to Khovd city used for various types of land use in major for small-hold agriculture.

This research aims to introduce the major types of soil in the Buyant river basin, provide characteristics of the soils and identify which environmental parameters they are linked to.

Materials and methods

Study area

The Buyant river basin located in Western part of Mongolia (N 47.343°-48.318° and E 90.065°-92.214°), and covers an area of 8488.7 km². Administratively, the basin occupy the territories of 33 bags belonging to 5 soums of Khovd (Duut, Jargalant, Buyant, and Khovd) and Bayan-Ulgi (Deluun) aimags.

If to take an altitudinal belts, totally 14.1 % of total territory belonging to the Buyant river basin are that the altitudes of more than 3000 m, 62.8 % with altitudes of 2000-3000 m, and 23.01 % are at the altitudes of 1157-2000 m ASL (Fig. 1). The basin, therefore, can be considered as one of the highly elevated river basins in the country.

The climate of the basin is distinct continental with harsh and cold winter and dry and hot summer. According to the selected three station in upper (Deluun), middle (Khovd), and down (Myangad) stream of the Buyant river, the temperatures range between -3.7...-0.8 °C in upper stream area, between -1.04...2.57 °C in a middle stream and between -1.04...3.28 °C in downstream areas. In the winter the Northern parts of the basin highly impacted by

Asiatic anticyclone the average temperatures for January in down streams is $-25.18\text{ }^{\circ}\text{C}$, middle streams is $-23.93\text{ }^{\circ}\text{C}$, and in upperstreams is $-21.9\text{ }^{\circ}\text{C}$. The summer is relatively chilly comparing to other natural

regions of the country due to its elevated surface. The average temperatures for July in down streams is $21.39\text{ }^{\circ}\text{C}$, middle streams $20.78\text{ }^{\circ}\text{C}$, and in upperstreams is $14.9\text{ }^{\circ}\text{C}$.

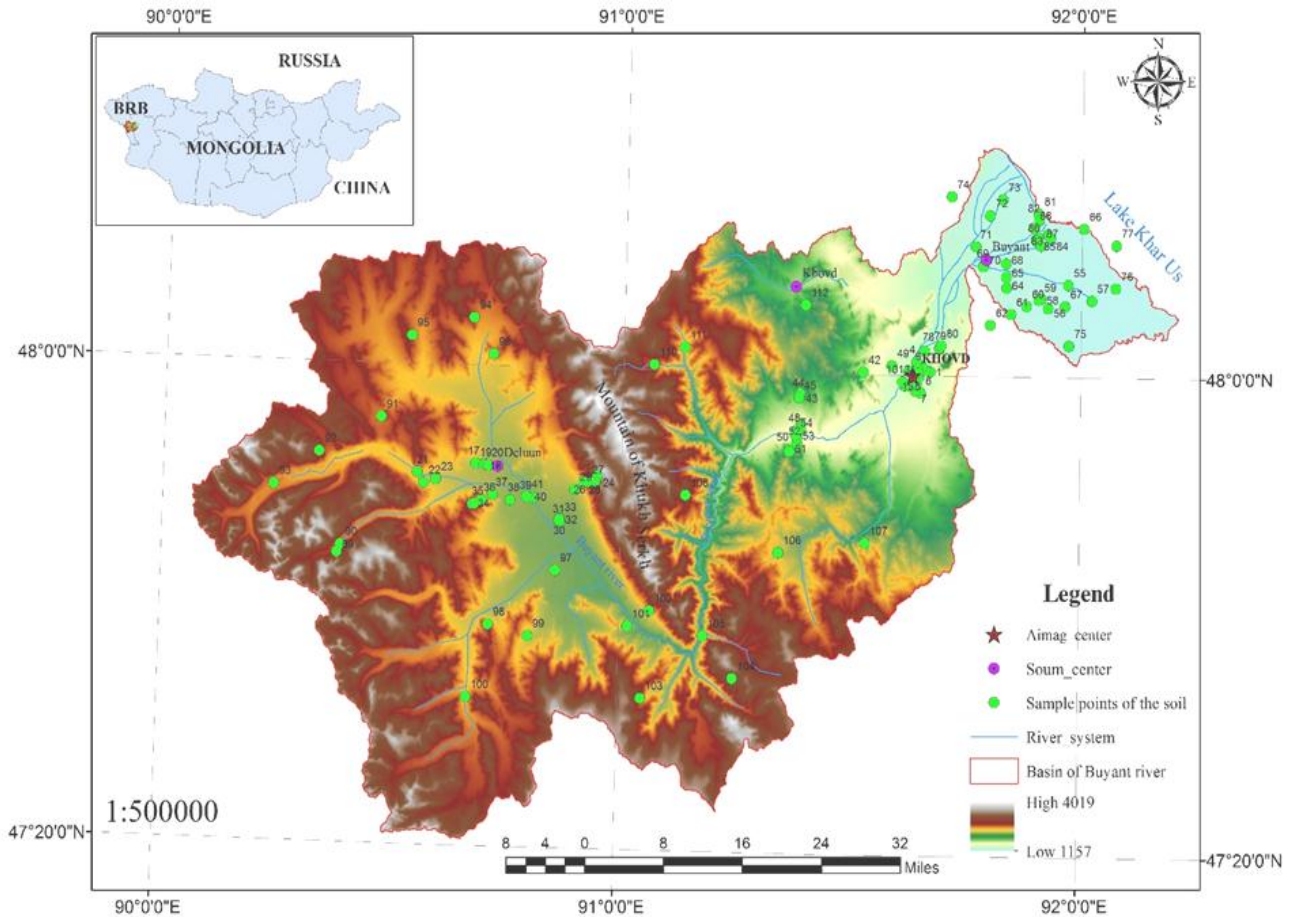


Fig. 1. Buyant river basin, its location, and distribution of sampling points
 / Рис. 1. Бассейн реки Буянт: его местонахождение и положение точек отбора проб

The average rainfall of the region varies between 100 and 150 mm per annum. Similarly, more than 70 percents of total rainfall falls in June, July, and August.

In terms of socio-economy, the Buyant river basin is inhabited by 45614 people from 11760 families. The primary land use type is rangeland, with total number of livestock by 2018 is 756 thousands. The second largest land use type is agriculture. By 2018, the basin had around 5000 hectares of agricultural fields with total productivity of 17000 tons. The principal crops are potatoes, cereals, and vegetables.

Sampling

The field researches were implemented during April-September of 2014-2017. Totally 300 samples were collected from 90 sites (Fig. 1). Moreover, to compare results data and information provided in liter-

ature were extracted and compared. Besides, direct soil parameters, the natural and socio-economic information for the basin were obtained from large amount of sources. Soil samples were taken under Mongolian National Standards MNS 3298:1990 [9]. The samples were taken by excavating a pit with dimensions 70-80 cm by 120-130 cm and using standard methods for disturbed soil sampling for each soil profile its morphological descriptions has given.

Dataset

The soil analysis were carried out by the Soil Laboratory of the Institute of Geography and Geoecology at Mongolian Academy of Sciences, Mongolia, Laboratory of Soil Biochemistry of the Nart Research and Experimental Center, Mongolian University of Life Sciences, Mongolia, and in the Soil Laboratory of the Inner Mongolia Normal University, PRC.

The regional meteorological dataset were obtained from the Khovd branch of the National Meteorological Agency of Mongolia. The surface characteristics were extracted from the digital elevation model by Suttle Radar Topography Mission (SRTM - <https://www2.jpl.nasa.gov/srtm/>) [10].

The socio-economic data for the administrative units territorially belonging to the Buyant river basin is provided by the National Statistical Data Portal (www.nso.mn) [11].

Methods for laboratory analysis

All soil samples were air dried and sieved with 2 mm sieves before analysis [12]. The soil pH and EC were determined with a suspension of 1 part soil by weight to 2.5 parts liquid by volume using glass electrode pH meter [13].

Soil organic matter was determined using Turin method. The method is based on the oxidation of organic matter. Depending on the humus content samples of 0.05-1.0 g are taken from the samples and after a dichromate digestion with 10 ml 0.4 N oxidizing solution ($K_2Cr_2O_4$: H_2SO_4 - 1:1) at 120 °C for 45 minutes in presence of catalyser Ag_2SO_4 , the consumed oxidizer (oxidizing agent) is determined by titration with $Fe(NH_4)_2(SO_4) \cdot 6H_2O$ using phenylanthranilic acid as an indicator [13].

The soil texture is determined by hydrometer method by A.N. Kachinsky [15].

The available phosphorus and potassium content was identified according to the Machigin method [16]. Soil carbonate was measured by using calcimeter apparatus [17].

Methods for data analysis

The descriptive statistics to obtain mean, standard deviation, analyses of variance has performed using standard methods. The soil texture were analysed using twelve major soil texture classifications are defined by the USDA [13].

The linear relationship between soil characteristics and other environmental factors is calculated by the Pearson correlation coefficient as follows.

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}}. \quad (1)$$

Multiple regression analysis was carried out in the transformation of soil properties.

$$\bar{y} = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \varepsilon_i, \quad (2)$$

$$\bar{y} = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_n x_n + \varepsilon,$$

\bar{y} - dependent variable; x - independent variable; β_0 - intercept; β_1 - slope coefficient; ε - error. The primary condition for analysis is that the mean error is 0.

All data analysis is performed on SPSS 22 environment.

Results and discussion

Soils of the Buyant river

According to O. Batkishig (2016), there are 35 types of soils belonging to 18 soil groups of 9 orders are distributed in the Buyant river basin [18].

The upper streams of the Buyant river are mountainous; thus the soil distribution follows altitudinal gradients. The uplands, generally, formed with mountain, primitive types of soil, and, along the altitudinal gradient, the soil depth is increasing.

The primary soil type of the uplands of both the Mongol Altai Mountain and the Huh Serh Mountain (2700 m elevation) are *Umbrisols*, and *Cryosols*, which can be found at the altitudes up to 2500-3000 m. Over the slopes and foots of the mountains, the soils become more dry due to the climatic inversion. Here the majority of soil cover presented by *Aridic Leptosol* and its variations. The bottoms of hollows, estuaries, and lowlands in majority covered by saline variations of major soil types, e.g., *Calcisols*, *Leptic*, and *Leptic aridic Kastanozems*. Across the hills and terrain of the river basin, *Calcisols* and *Leptic Calcisols* are widespread. Surrounding the Buyant River the alluvial types of soils, e.g., *Mollic*, *Loamic*, *Gleyic* and *Cryic Fluvisols*, can be identified. The bottoms, estuaries of the lowlands sometimes are covered by *Solonetz*, the most saline forms of soils.

The Buyant river has created many deltas above the Ulaan Bogoch mineral spring of the Khovd city. This delta is the most fertile part of the basin where the central agricultural zone is situated. Due to long-lasting irrigated farming practices, the properties of *Loamic Fluvisols* and *Calcisols* have changed. Dr. O. Batkishig [18] described these changed soils as an agricultural soil with uniform soil profile throughout all its horizons. The surrounding area of Har Us lake is a distribution of *Histosols* where the most dense vegetation cover is formed due to its constant moisture regime. In the land use, the are of Har Us lake is used for hay making for a long history of the development of region [18].

The soils in/around large towns and cities are considered as a *Technosols* and are mainly highly disturbed by human activities. These types of soils has no vegetation cover, highly compacted, and very polluted by waste.

Soil characteristics

For the purpose to define the capacity of soils for use as well as characterize each type of soil in the Buyant river basin, the ranges of soil pH, carbonates, electric conductivity, available phosphorus and potassium, and soil texture were selected for further analysis. In the Table 1, the descriptive statistics of soil properties in the river basin are shown.

Table 1

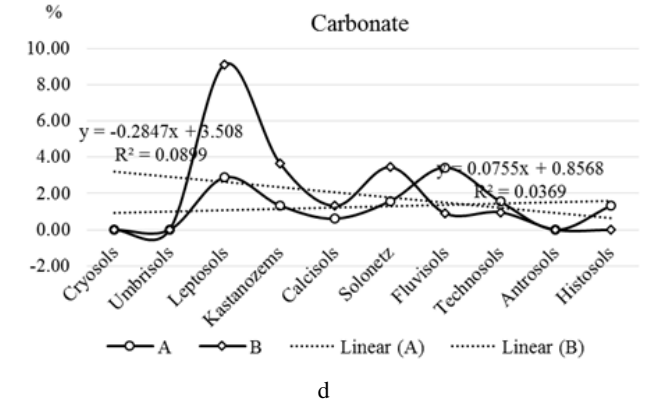
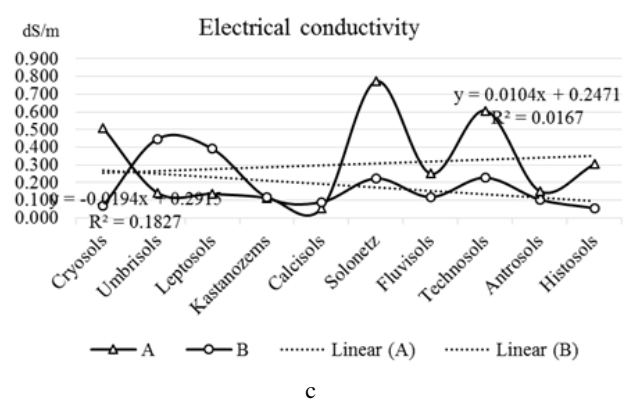
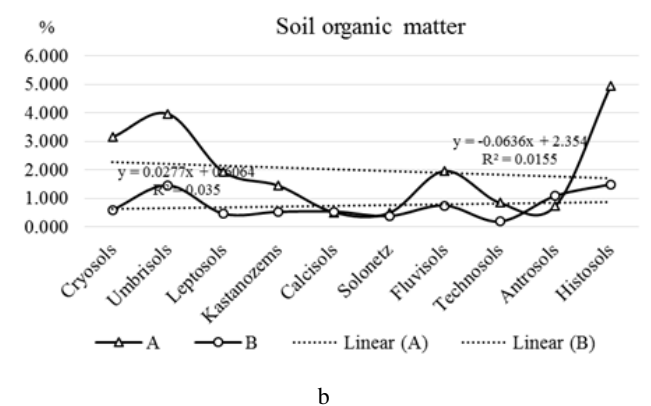
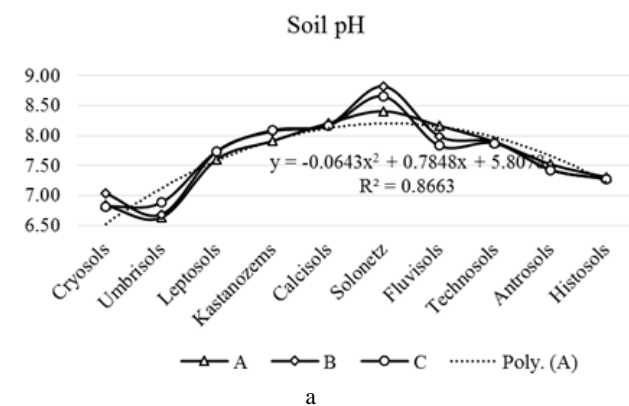
**Physical and chemical properties of soil of Buyant river basin /
Физико-химические свойства почвы бассейна реки Буйант**

Properties	pH	CaCO ₃ , %	SOM, %	EC, dS/m	P ₂ O ₅ , mg100g1	K ₂ O, mg 100g1	Sand, %	Silt, %	Clay, %
n	237	237	237	237	196	196	237	237	237
Mean (A)	7.65	1.27	2.00	0.3	2.08	19.07	55.60	31.96	12.44
Mean (B)	7.71	1.94	0.76	0.18	1.03	9.48	56.54	31.82	11.64
Min	6.17	0.00	0.018	0.005	0.11	1.00	3.70	4.20	0.20
Max	9.60	21.81	6.500	3.84	6.33	85.70	93.60	70.60	25.70

Results of analysis showed soil pH in the river basin was from slightly acidic to strongly alkaline ranged as 6.17-9.6. Soil average pH of horizon A was 7.65, and horizon B was 7.71; therefore these soils are slightly alkaline [19]. The uplands of the river basin are mountainous; likewise mountain soil pH ranges from slightly acidic to neutral pH. Within the uplands to the bed of the river basin, alkalinity increased, so *Calcisols* pH was moderately alkaline. A horizon of *Fluvisols* pH in the Buyant river was moderately alkaline and the C horizon was slightly alkaline. *Solonetz* pH in horizons A and B became moderately to strongly alkaline (Table 1, Fig. 2). Considering that the optimum pH range for

most plants is between 5.5 and 7.5 [20], the sparse vegetation cover formed on mountains somehow depends on soil pH.

Carbonate content ranged between 0-21.81 %. Average carbonate content of horizon A was 1.27 %, and B horizon was 1.94 %. The carbonates in *Umbrisols* and *Antrosols* are washed out due to irrigation and leaching, Ad and A horizons of *Fluvisols* and *Histosols* were carbonated. However, AB and B horizons did not include carbonate. Between the A to B horizon, carbonate content increased more in *Mollic*, *Aridic*, and *Lithic leptosols*. Carbonate content increased less in *Natric Calcisols* between the A and B horizons (Table 1, Fig. 2).



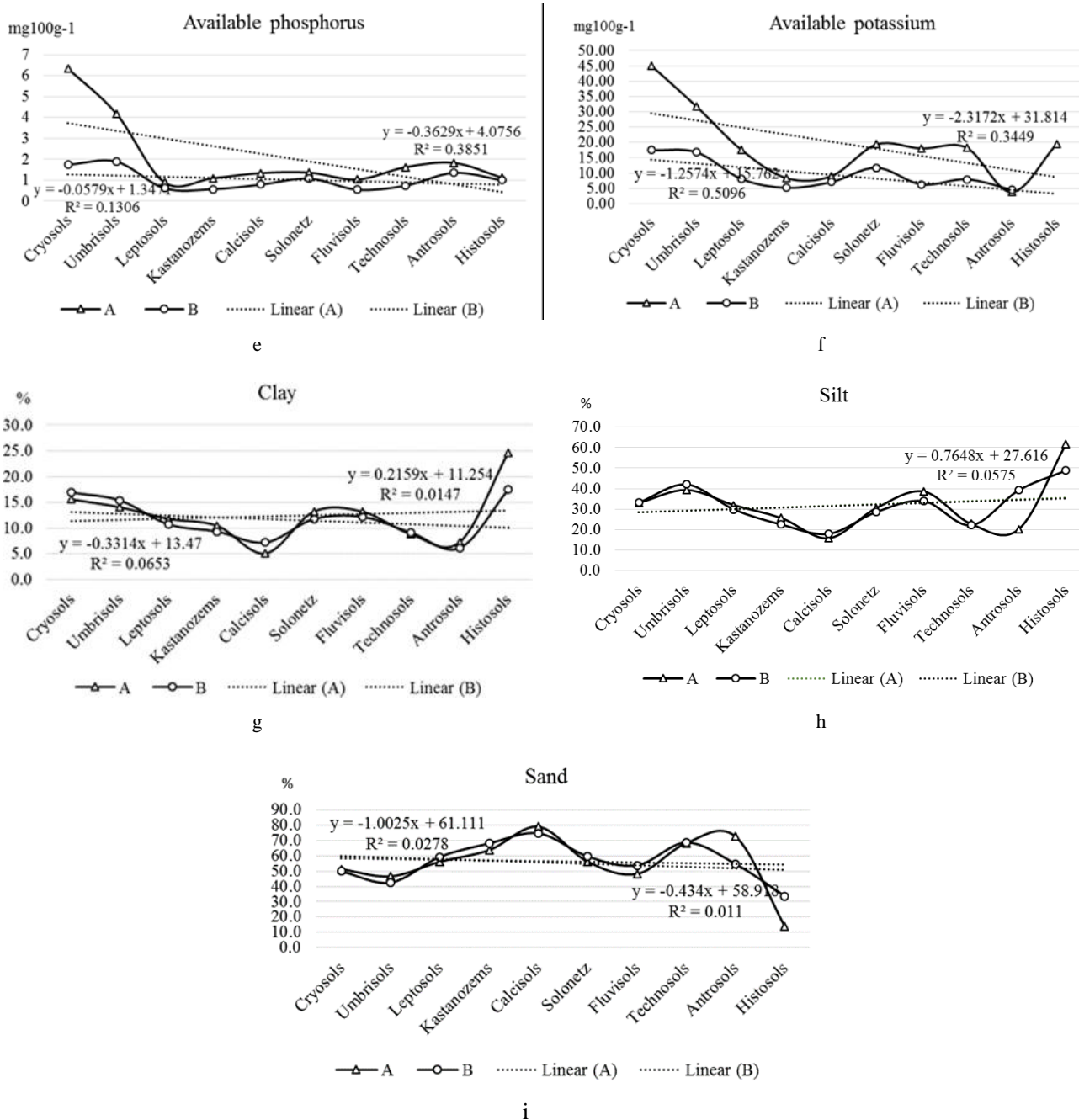


Fig. 2. Soil properties of Buyant River basin (a - soil pH, b - soil organic matter, c - electrical conductivity, d - carbonate, e - available phosphorus, f - available potassium, g - clay, h - silt, i - sand) / Рис. 2. Свойства почвы бассейна реки Буянт (а – pH почвы, б – органическое вещество почвы, с – электрическая проводимость, d – содержание карбоната, e – доступный фосфор, f – доступный калий, g – глина, h – ил, i – песок)

Soil organic carbon in the soil is an essential part of the ecosystem. Soil in the river basin is dominated by a consistency with less organic matter and nutrients. The contents of organic matter, available phosphorus, and potassium is decreasing from horizon A to C. Soil organic matter ranged between 0.018-6.5 %. Average SOM content of horizon A was 2 % and B horizon was 0.76 %. Soil organic carbon of *Um-*

brisols is ranging between 4.34 and 6.5 % on the Northern slopes of the Mongol Altai Mountains. In the surrounding area of Chigertei mineral waters, this was the maximum value for this river basin. *Antrosols* soil organic carbon decreased due to long term planting and ploughing (Table 1, Fig. 2).

The soil salinity is determined by recent electrical conductivity testing. By definition, saline soils have a

high concentration of soluble salts, and an EC is greater than 1 dS/m. Electrical conductivity of the river basin ranged between 0.005-3.84 dS/m. The average content in the A horizon was 0.3 dS/m, while the B horizon showed 0.18 dS/m. EC of *Histosols*, *Fluvisols*, *Solonetz*, *Technosols* and *Antrosols* increased in the A horizon and EC of *Umbrisols* and *Leptosols* increased in B horizon (Table 1, Fig. 2).

Soils of the Buyant river basin are characterized by Loamy sand, Sandy loam, and Loam texture. From the uplands to the bed of the river basin, silt and clay contents ranged between 39.32-16.7 % and 14.7-7.5 %, respectively. Sand content ranged between 46.6-75.8 %. The maximum value of silt reached 25.7 %, which shows that soil of the Buyant river basin is light texture (Table 1, Fig. 2).

As shown Fig. 2, sand content, and pH were increased from upper to bed of river basin but organic

matter, available phosphorus, silt and clay content were decreased from upper to bed.

The regression analysis is performed in order to determine which parameter is closely related to soil fertility. The results showed that the sand content showed significant negative correlations with SOC, available potassium, clay, and silt content ($P < 0.01$). Sand content showed significant and positive correlations with EC, available phosphorus, and carbonate content ($P < 0.05$). Silt and clay showed significant and positive correlation with SOC, available potassium ($P < 0.01$), and carbonate ($P < 0.05$). The silt content is showed positive correlation with EC and clay and positively correlated with available phosphorus ($P < 0.05$). The SOC is showed positive correlation with available phosphorus and potassium ($P < 0.01$). The soil pH has had a negative correlation with SOC and AP. Soil pH, carbonate, and EC showed positive correlation each other (Table 2).

Table 2

Correlation between soil properties
/ Корреляция между показателями свойствами почвы

	Sand	Silt	Clay	SOM	P ₂ O ₅	K ₂ O	pH	CaCO ₃	EC
Sand		-.979**	-.879**	-.446**	-.301*	-.439**	.200	-.301*	-.308*
Silt	**		.764**	.439**	.268	.397**	-.219	.286*	.315*
Clay	**	**		.384**	.330*	.466**	-.125	.288*	.239
SOM	**	**	**		.354**	.459**	-.285*	.163	.304*
P ₂ O ₅	*		*	**		.541**	-.366**	.061	.133
K ₂ O	**	**	**	**	**		-.043	.510**	.639**
pH				*	**			.375**	.289*
CaCO ₃	*	*	*			**	**		.507**
EC	*	*		*		**	*	**	

** - correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed); * - correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed).

Factors impacting the soil properties

The Buyant river basin occupies different natural forms, e.g., high mountains of Mongolian Altai, desert steppes, and gobi of the Great lake Depression. Such geographic heterogeneity defines the formation of several natural zones within the river basin, which is logically impacting on soil cover and its characteristics. In order to determine which external factors or determinants influencing on soil properties the multiple regression analysis and correlation analysis are performed. The results of correlation analysis of external factors, e.g., average air temperature, precipitation, wind, elevation, slope, aspect total number of population and live-

stock density, has shown in Table 3 and 4. Multiple regression analysis is performed by stepwise and provides a linear equation with many independent variables that affect the soil properties (Table 4). Dependent variables are soil quality properties, and independent variables are the external factors mentioned above.

According to the results of the multiple regression analysis, the elevation has shown a significant impact soil properties among all other external factors. In addition to the impacts of external factors on soil characteristics, the soil have also showed significant relation to external factors. For instance, the soil pH is directly linked to the population number.

Table 3

**Correlation between impact factor and soil properties /
Корреляция между факторами воздействия и свойствами почвы**

	Sand	Silt	Clay	SOM	P ₂ O ₅	K ₂ O	pH	CaCO ₃	EC
Elevation	-.456**	.461**	.367**	.441**	.470**	.268	-.639**	-.057	-.246
Slope	-.177	.198	.099	.331*	.231	.167	-.478**	.039	-.253
Aspect	-.184	.206	.100	.088	.251	.097	-.147	-.281*	.072
Temperature	.457**	-.481**	-.323*	-.361**	-.413**	-.176	.527**	.059	.188
Precipitation	-.198	.167	.239	.330*	.252	.408**	-.373**	-.093	-.039
Wind	.372**	-.333*	-.399**	-.173	-.082	-.385**	.090	-.215	-.026
Density of population	.063	-.075	-.024	-.233	.030	.123	-.070	.034	.162
Density of livestock	.072	-.083	-.033	-.238	.024	.123	-.057	.035	.168

** - correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed); * - correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed).

Table 4

**Regression analysis equation with affected factors on soil properties /
Уравнение регрессионного анализа под влиянием факторов на свойства почвы**

Regression equation	R	R. Sq	Sig.
$Y_{pH} = -0.257 - 0.961X_{Elevation} - 0.507X_{wind} + 0.353X_{Temperature} - 1.98X_{Density\ population}$	0.773	0.597	0.000
$Y_{CaCO_3} = 0.35 - 0.269X_{Aspect}$	0.281	0.079	0.043
$Y_{SOM} = 0.205 + 0.477X_{Elevation}$	0.44	0.195	0.001
$Y_{P_2O_5} = 0.205 + 0.535X_{Elevation}$	0.494	0.244	0.000
$Y_{K_2O} = 0.076 + 0.427X_{Precipitation}$	0.375	0.141	0.006
$Y_{sand} = -0.212 - 0.492X_{Elevation}$	0.456	0.208	0.001
$Y_{Clay} = -0.082 - 0.383X_{wind}$	0.414	0.171	0.002

Discussion

In Buyant river basin, the majority of the land is used as a rangelands (837 thousand ha); the urban and agricultural land occupy only 0.8 and 0.7 percent of total land area. Eventhough the traditional livestock breeding considered as highly adapted to climate change and suitable for the vast steppe area, several negative consequences have observed in Buyant river basin since the privatization and transition economy time. Firstly, the number of livestock is doubled leading to decreased pasture carrying capacity. To date, the pasture carrying capacity have exceeded 1.6 times. This socio-economic transformation is impacting soil cover as high number of livestock trampling the soil cover, increasing erodibility by reducing vegetation cover, and increasing soil pollution.

According to J. Garidkhuu et al. [4], the soils of Buyant river basin is saline and stony with sandy clay texture. In soil oraganic matter, the content of fulvo acids are prevailed, the content of nitrogen is low, while the amount of potassium in topsoil layer is high [4]. The similar conclusion we can make for the soils distributed in estuaries of Buyant river. The soils here used in irrigated agriculture for past 300 years without any technological innovations. The only method for fertility enchancement is to use a manure. Unfortunately, only putting the manure is no longer can sustain the soil fertility the other biophysical techniques of soil processing has to be introduced.

Academician D. Dorjgotov (2003) is mentioned in his manuscript that along the 30 years of agricultural development on *Kastanozems* and *Aridic Kastanozems*, the soil fertility declined up to 1.8-2.1 % and SOM

sources reduced by 40 percents [21]. The similar trend probably happened for the soils in Buyant river basin; thus, the more specific time related researches over the significant soil properties are required in order to develop sound scientific justifications for soil protection and furtherer land degradation.

Conclusions

There are 35 types of soils belonging to 18 soil groups of 9 orders are distributed in the Buyant river basin. The primary external factors impacting soil formation processes as well as soil properties, are linked to surface, e.g., altitudes, inclination, and distribution of energy along the altitudinal gradient.

Soils in the Buyant river basin are generally low fertile with sandy and sandy clay texture. The soil pH in majority of soil samples used in this research showed that in uplands, it is slightly alkaline and alkalinity increased downward to the bottom of the basin.

The top soil horizon characterizes with relatively high contents of organic matter, available phosphorus and potassium comparing to lower horizons, e.g., B and C horizon.

The soil physical properties are largely dependent on climate change, aridity, and land use. Across the study area, the *Technosols* is highly compacted, the carbonate contents of *Antrosols* has leached, and the concentration of organic matter and nutrient elements are reduced. The horizon *Ad* in *Fluvisols* had much more carbonate contents and electrical conductivity than in other horizons.

Besides, abovementioned natural factors and their impacts of soil properties, the soil itself define social processes going on in at the basin level. For instance, the density of population has significantly correlated with soil pH level.

References

1. Gongor D. (1964). *Brief history of Khovd*. Ulaanbaatar, 227 p.
2. Andryeev S.E. (1935). Soils of the delta of the river Buyant and Kovdos economic. *Proceedings of the Mongolian Commission*. Leningrad, Academy of Sciences, no. 16, 42 p.
3. Munkhbat M., Suren Ch. (1977). *Soil research report of Khovd province. Soil map of Khovd aimag 1:200000*. Ulaanbaatar, Land Management Institute Press.
4. Garidkhuu J., Jamsran J., Birzana O., Banzragch D., Tsendee B. (1972). Soil agrochemistry in lake depression. *Izvestiya Akademii nauk*, no. 3, pp. 23-30.
5. Oyunchimeg T. (1998). *Soil geochemistry and some characteristics in dried area*. Dissertation. Ulaanbaatar.

6. Lkhagvasuren Ch. (2001). *Distribution of some micro metals around Lake Khar-Uls*. Dissertation. Ulaanbaatar.

7. Strauss A., Schickhoff U. (2007). Vegetation zonation in a Western Mongolian lake shore-semi-desert ecotone. *Erkundung*, vol. 61 (1), pp. 72-92.

8. Yakutin M.V., Andreivskii V.S., Lhagvasuren Ch., Battsetseg D. (2014). Transformation of zoo-microbial complex in soils of the Southern part of the Great lakes Depression of Western Mongolia in conditions of desertification. *Euroasian Entomological Journal*, vol. 13 (5), pp. 489-493.

9. MNS 3298:1990. *Nature protection. Soil. General requirements on sampling for the analysis*. Ulaanbaatar, Mongolian Agency for Standardization and Metrology Press.

10. Shuttle Radar Topography Mission. Available at: <https://www2.jpl.nasa.gov/srtm/> (accessed September 23, 2019).

11. National Statistical Office. Available at: www.nso.mn (accessed August 20, 2019).

12. MNS ISO 11464:2000. ISO 11464:2006. *Soil quality - Pretreatment of samples for physico-chemical analysis*. Ulaanbaatar, Mongolian Agency for Standardization and Metrology Press.

13. Soil Science Division Staff. (2017). *Soil survey manual*. C. Ditzler, K. Scheffe, and H.C. Monger (Eds.). Handbook 18. Washington, D.C., U.S. Gov. Print. Office.

14. Tjurin I.V. (1937). Soil organic matter and its role in pedogenesis and soil productivity. *Study of soil humus*. Moscow, Leningrad, Sel'skhozgiz Publ., 285 p. (in Russian).

15. Vadyunina A., Korchagina Z. (1986). *Methods of researching the physical properties of soils and ground*. Moscow, Agropromizdat Publ., 416 p. (in Russian).

16. GOST 26205-84. *Determining available phosphorus and potassium by Machigin method*. Moscow, Committee for Standardization and Metrology Press. (in Russian).

17. GOST 34467-2018. *Soils. Laboratory methods for determination of calcium carbonate content*. Moscow, Standartinform Publ. (in Russian).

18. Batkhisig O. (2016). Soil classifications in Mongolia. *Mongolia's Soil Study*, no. 1, pp. 18-31.

19. *Soil survey manual. Soil Conservation Service*. (1993). Handbook 18. Washington, D.C., U.S. Gov. Print. Office, 437 p.

20. *Queensland Department of Environment and Heritage Protection. Soil pH*. Available at: www.qld.gov.au (accessed May 15, 2017).

21. Dorjgotov D. (2003). *Soils of Mongolia*. Ulaanbaatar: Admon Publ., 288 p.

Литература

1. Гонжор Д. Краткая история Ховда. Улан-Батор, 1964. 227 с.
2. Андреев С.Е. Почвы дельты реки Буянт и Ковдосое аймачное хозяйство // Труды Монгольской ко-

миссии № 16. Л.; М.: Изд-во Академии наук СССР, 1935. 42 с.

3. Мунхбат М., Сурэн Ч. Почвенная карта Ховдаского аймака масштаба 1 : 200 000: отчет о почвенных исследованиях Ховдской губернии. Улан-Батор: Ин-т землеустройства, 1977.

4. Гаридхуу Ж., Джамсран Ж., Бирзана О., Банжрадх Д., Цэндээ Б. Агрохимия почв впадины озера Ачит // Известия Академии наук. 1972. № 3. С. 23–30.

5. Оюунчимег Т. Геохимия и некоторые характеристики почв в засушливых районах: дис. ... д-ра геогр. наук. Улан-Батор, 1998.

6. Лхагвасурэн Ч. Распределение некоторых микрометаллов в районе озера Хар-Ус: дис. ... д-ра геогр. наук. Улан-Батор, 2001.

7. Штраус А., Шикхофф У. Растительная зональность прибрежно-полупустынного экотона озёр Западной Монголии // Эрдкунде. 2007. № 61 (1). С. 72–92.

8. Якутин М.В., Андреевский В.С., Лагвасурэн Ч., Батцэцэг Д. Трансформация зоомикробного комплекса в почвах южной части Котловины Больших озер в Западной Монголии в условиях опустынивания // Евразийский энтомологический журнал. 2014. № 13 (5). С. 489–493.

9. MNS 3298: 1990. Охрана природы. Почва: общие требования по отбору проб для анализа. Улан-Батор: Монгольское агентство по стандартизации и метрологии, 1990.

10. Suttle Radar Topography Mission. Available at: <https://www2.jpl.nasa.gov/srtm/> (accessed September 23, 2019).

11. National Statistical Office. Available at: www.nso.mn (accessed August 20, 2019).

12. MNS ISO 11464.2000. ISO 11464:2006. Качество почвы. Предварительная обработка образцов для физико-химического анализа. Улан-Батор: Монгольское агентство по стандартизации и метрологии, 2000.

13. Soil Science Division Staff. Soil survey manual. C. Ditzler, K. Scheffe, and H.C. Monger (Eds.). Handbook 18. Washington, D.C.: U.S. Gov. Print. Office, 2007.

14. Тюрин И.В. Органическое вещество почвы и его роль в педогенезе и продуктивности почвы // Изучение гумуса почвы. М.: Сельхозгиз, 1937. 287 с.

15. Вадюнина А.Ф., Корчагина З.А. Методы исследования физических свойств почв и грунтов. М.: Агропромиздат, 1986. 416 с.

16. ГОСТ 26205-84. Почвы. Определение содержания фосфора и калия по методу Мачигина в модификации ЦИНАО. М.: Комитет стандартизации и метрологии, 1985.

17. ГОСТ 34467-2018. Грунты. Метод лабораторного определения содержания карбоната кальция. М.: Стандартинформ, 2019. 9 с.

18. Батхишиг О. Классификация почв в Монголии // Почвы Монголии. 2016. № 1. С. 18–31.

19. Soil Survey Division Staff. Soil survey manual. 1993. Soil Conservation Service Handbook 18. Washington, D.C., U.S. Department of Agriculture 1993.

20. Queensland Department of Environment and Heritage Protection. Soil pH. Available at: www.qld.gov.au. (accessed May 15, 2017).

21. Дороджготов Д. Почвы Монголии. Улан-Батор: Адмон аблишинг, 2003.

УДК 550. 461

DOI 10.18522/1026-2237-2020-1-36-46

ЭКОЛОГО-ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ РЕК ВОСТОЧНОГО ДОНБАССА

© 2020 г. *Е.В. Гибков¹, В.Е. Закруткин¹, В.Н. Решетняк¹, О.С. Решетняк^{1,2}*¹Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, Россия²Гидрохимический институт Росгидромета, Ростов-на-Дону, Россия

ECOLOGICAL AND GEOCHEMICAL FEATURES OF THE RIVER SEDIMENTS OF EAST DONBASS

*E.V. Gibkov¹, V.E. Zakrutkin¹, V.N. Reshetnyak¹, O.S. Reshetnyak^{1,2}*¹Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia,²Hydrochemical Institute, Roshydromet, Rostov-on-Don, Russia

Гибков Евгений Викторович – кандидат географических наук, доцент, кафедра геоэкологии и прикладной геохимии, Институт наук о Земле, Южный федеральный университет, ул. Зорге, 40, г. Ростов-на-Дону, 344103, Россия, e-mail: irvict@mail.ru

Eugeny V. Gibkov - Candidate of Geography, Associate Professor, Department of Geoecology and Applied Geochemistry, Institute of Earth Sciences, Southern Federal University, Zorge St., 40, Rostov-on-Don, 344103, Russia, e-mail: irvict@mail.ru

Закруткин Владимир Евгеньевич – доктор геолого-минералогических наук, заведующий кафедрой геоэкологии и прикладной геохимии, Институт наук о Земле, Южный федеральный университет, ул. Зорге, 40, г. Ростов-на-Дону, 344103, Россия, e-mail: vezak@list.ru

Vladimir E. Zakrutkin - Doctor of Geology and Mineralogy, Head of the Department of Geoecology and Applied Geochemistry, Institute of Earth Sciences, Southern Federal University, Zorge St., 40, Rostov-on-Don, 344103, Russia, e-mail: vezak@list.ru

Решетняк Виктор Николаевич – магистрант, Институт наук о Земле, Южный федеральный университет, ул. Зорге, 40, г. Ростов-на-Дону, 344103, Россия, e-mail: vnresh3@gmail.com

Viktor N. Reshetnyak - Magistrate, Institute of Earth Sciences, Southern Federal University, Zorge St., 40, Rostov-on-Don, 344103, Russia, e-mail: vnresh3@gmail.com

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, 344103, Россия; старший научный сотрудник, Гидрохимический институт Росгидромета, пр. Стачки, 198, г. Ростов-на-Дону, 344090, Россия, e-mail: olgare1@mail.ru

Olga S. Reshetnyak - Candidate of Geography, Associate Professor, Department of Geoecology and Applied Geochemistry, Institute of Earth Sciences, Southern Federal University, Zorge St., 40, Rostov-on-Don, 344103, Russia; Senior Researcher, Hydrochemical Institute, Roshydromet, Stachki Ave, 198, Rostov-on-Don, 344090, Russia, e-mail: olgare1@mail.ru

Представлены результаты исследования донных отложений рек двух основных речных бассейнов Восточного Донбасса – Северского Донца и Тузлова. Было установлено, что в реках первого из названных бассейнов распределение микроэлементов (Fe, Mn, Pb, Cu, Ni, Cr, Zn, V, Sr) характеризуется большими вариациями величин, что в значительной степени связано с неоднородным гранулометрическим составом речного аллювия. В результате анализа распределения металлов в тяжелой, песчано-алевритовой и пелитовой фракциях выявлено значение последней как основного носителя микроэлементов в донных отложениях. Расчет суммарного показателя уровня загрязненности донных отложений по валовым пробам и в специально выделенной пелитовой фракции показал, что в целом для рек региона характерен слабый уровень загрязнения. Установлено, что именно пелитовая фракция, а не донные осадки в целом, несет наиболее объективную информацию о состоянии водной среды.

Ключевые слова: донные отложения, поверхностные воды, Восточный Донбасс, тяжелые металлы, уровень загрязнения.

The article presents the results of research of bottom sediments of rivers of two main river basins of East Donbass - Seversky Donets and Tuzlov. In the rivers Seversky Donets basin, the distribution of trace elements (Fe, Mn, Pb, Cu, Ni, Cr, Zn, V, Sr) was found to be characterized by large variations, largely due to the more heterogeneous granulometric composition of river alluvium. As a result of the analysis of heavy metals, distribution in heavy, sandy-aleurite and pelite fractions, the value of the latter as the main carrier of trace elements in bottom sediments was revealed. The calculation of the total level of bottom sediments contamination of gross samples and the pelite fraction showed that, in general, the rivers of the region have a weak level of pollution. It has been established that it is the pelite fraction gives the most objective information about the aquatic environment.

Keywords: *bottom sediments, surface water, East Donbass, heavy metals, pollution level.*

Как известно, донные отложения (ДО) являются конечным звеном ландшафтно-геохимических сопряжений, поэтому в значительной степени отражают геохимические особенности водосборной площади. Однако изучение ДО важно само по себе, так как, являясь, по выражению В.И. Вернадского, «подводной почвой», они определяют многие экологические особенности водных систем. В частности, имеющийся литературный материал свидетельствует о том, что в ряде случаев ДО, загрязненные тяжелыми металлами (ТМ), обладают сублетальной токсичностью для многих водных организмов [1]. Кроме того, результаты натурных и экспериментальных наблюдений указывают на возможность перехода загрязняющих веществ из ДО в водную фазу. При этом, в случае интенсивного загрязнения, время их отрицательного воздействия может быть очень велико даже при прекращении поступления загрязняющих веществ в речную сеть. Вывод химического элемента из водной фазы свидетельствует лишь о временном самоочищении водной массы, но не водного объекта в целом (как экологической системы). Таким образом, ДО, будучи важнейшим компонентом аквальных экосистем, могут являться, с одной стороны, индикатором степени загрязнения водной толщи, а с другой – источником ее вторичного загрязнения [2].

Исследования ДО Восточного Донбасса (Ростовская область) проводились в период 2014–2019 гг. на реках двух основных бассейнов – Северского Донца и Тузлова, различающихся по своим природным характеристикам и особенностям хозяйственного освоения. Отбор проб для проведения геохимических исследований проводили дночерпателем. Масса отбираемых донных отложений составляла от 1000 до 1500 г. После морфологического описания отобранные пробы донных осадков были высушены до воздушно-сухого состояния и переданы в лабораторию для минералогического и химического анализов.

Изучение минерального состава проводилось по специально выделенным фракциям – легкой (с подразделением на пелитовую и песчано-алевритовую) и тяжелой (терригенные и аутигенные минералы).

Как показали исследования, донные осадки большинства рек Восточного Донбасса по гранулометрическому составу представлены слабодифференцированным псаммит-алеврит-пелитовым материалом [3]. При этом в речных осадках бассейна Северского Донца, как правило, преобладает песчано-алевритовый компонент (12–92 %, в среднем 54 %), а в бассейне Тузлова – пелитовый (34–76 %, в среднем 65 %), что подтверждается данными на рис. 1, где демонстрируется положение фигуративных точек гранулометрического состава ДО в том или ином поле диаграммы Шепарда [4]. Из нее видно, что донные осадки бассейна Тузлова в большей степени сосредоточены в переходной от песков к глинам зоне, в то время как осадки рек Северского Донца характеризуются менее однородным составом.

Пелитовая фракция ДО исследуемых рек, как видно из табл. 1 и 2, состоит преимущественно из глинистых минералов (гидрослюды с примесью монтмориллонита и каолинита). В меньших количествах присутствуют кварц, полевой шпат, чешуйки слюд, современное органическое вещество, кальцит и частицы угля (в сумме до трети легкой фракции).

Песчано-алевритовая фракция ДО представлена в основном зернами кварца и полевого шпата. В отдельных реках в заметном количестве (до 10 % в бассейне Северского Донца и до 18 % в бассейне Тузлова) присутствует терригенный обломочный материал в виде частиц песчаника, углистых аргиллитов, алевролитов, карбонатов и кремнистых пород.

Помимо этого, часто встречаются современное органическое вещество и частицы угля (в сумме достигая 14–19 % от легкой фракции в реках Атюхта, Быстрая и Малая Каменка). Реже обнаруживаются обломки карбонатов, опалы, глаукониты, слюды и гидроокислы железа.

В составе тяжелой фракции преобладают терригенные минералы (ильменит, магнетит и гематит), на долю которых приходится в среднем 75 % от общего состава фракции для рек бассейна Северского Донца и 80 % – для бассейна Тузлова. К группе второстепенных относятся цир-

кон, рутил, кианит, ставролит, турмалин. Существенно реже встречаются мусковит, биотит, амфиболы, хромит и хромшпинелиды. Среди аутигенных минералов доминирующая роль принад-

лежит окислам и гидроокислам железа (12 – в бассейне Тузлова и 22 % – в бассейне Северского Донца). В ДО р. Тузлов значительная доля (27 %) приходится на пирит.

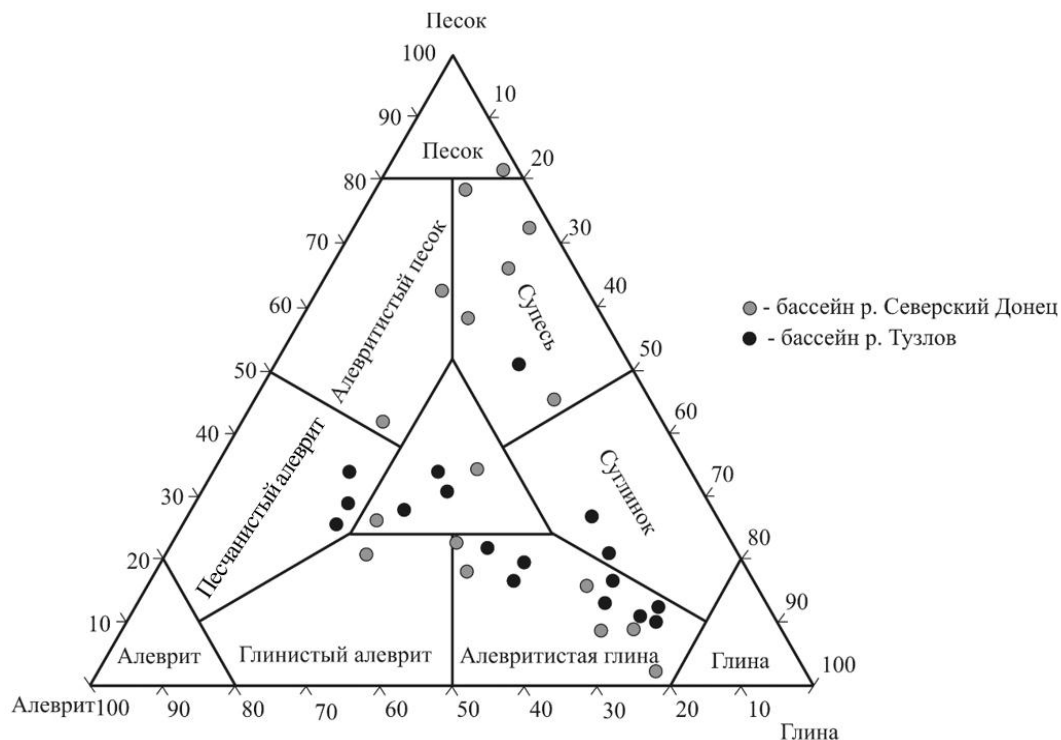


Рис. 1. Гранулометрический состав ДО рек Восточного Донбасса /
Fig. 1. Granulometric composition of bottom sediments of East Donbass rivers

Таблица 1

Распределение основных минералов в легкой фракции ДО рек бассейна Тузлова, % /
Distribution of the main minerals in the light fraction of bottom sediments of the Tuzlov basin rivers, %

Река	Пелитовая фракция								Песчано-алевритовая фракция						
	Выход фракции	Глинистое вещество	Чешуйки слюды	Полевой шпат	Кварц	Уголь	Кальцит	Совр. органика	Выход фракции	Кварц	Полевой шпат	Обломки осадочных пород	Уголь	Карбонаты	Современная органика
Большой Невсета́й	65,4	45,9	1,0	2,9	4,2	2,0	5,0	6,4	34,6	19,6	2,9	5,2	1,6	1,4	3,5
Малый Невсета́й	60,4	34,7	1,5	2,1	3,7	Ред.	13,0	7,2	39,6	20,8	2,1	3,5	1,1	4,3	7,4
Аюта	75,1	47,9	2,0	1,2	3,9	1,0	9,8	9,6	24,9	11,2	1,7	2,9	1,0	2,8	6,6
Атюхта	33,5	22,1	1,0	1,1	1,4	3,0	2,8	3,8	66,5	24,6	1,1	18,0	12,3	2,6	6,9
Грушевка	75,5	47,7	2,5	2,0	5,1	1,7	4,3	14,6	24,5	15,1	2,0	1,9	1,3	1,2	3,8
Кадамовка	73,5	47,2	2,2	1,2	4,8	0,9	7,6	12,5	26,5	14,3	1,2	4,2	0,7	3,0	4,0
Тузлов	75,2	42,1	1,5	1,3	6,8	Ред.	8,1	6,1	24,8	11,6	0,6	7,1	1,4	4,2	7,1

Таблица 2

**Распределение основных минералов в легкой фракции ДО рек бассейна Северского Донца, % /
Distribution of the main minerals in the light fraction of bottom sediments of the Seversky Donets basin rivers, %**

Река	Пелитовая фракция								Песчано-алевритовая фракция						
	Выход фракции	Глинистое вещество	Чешуйки слюд	Полевой шпат	Кварц	Уголь	Кальцит	Совр. органика	Выход фракции	Кварц	Полевой шпат	Обломки осадочных пород	Уголь	Карбонаты	Совр. органика
Большая Каменка	69,1	44,2	2,1	0,7	6,9	4,8	4,1	6,5	30,9	17,8	1,5	3,0	3,0	1,8	3,3
Малая Каменка	39,7	28,2	1,1	Ред.	2,6	2,1	3,2	2,7	60,3	32,2	3,4	10,3	6,8	4,2	7,1
Лихая	79,7	50,6	1,5	Ред.	3,1	3,2	13,2	12,9	20,3	8,3	1,5	3,1	0,7	4,4	2,4
Калитва	10,5	7,3	1,3	0,5	0,9	Ред.	1,4	1,4	89,5	73,3	3,0	5,4	0,4	3,9	4,2
Быстрая	8,2	5,2	0,2	Ред.	0,3	0,9	0,1	1,7	91,8	57,3	2,3	10,1	8,7	5,0	8,1
Большая Гнилуша	87,8	54,7	1,8	Ред.	4,9	1,8	9,8	13,1	12,2	5,0	0,6	0,8	0,3	1,5	3,2
Кундрючья	66,5	46,9	1,3	Ред.	2,7	0,7	7,6	5,6	33,5	20,3	1,8	2,7	0,9	4,0	1,8
Северский Донец	12,2	7,6	0,3	Ред.	0,6	Ред.	2,1	1,3	87,8	63,8	3,9	4,8	Ред.	8,7	4,3

В табл. 3 демонстрируется распределение валовых содержаний элементов в ДО рек Восточного Донбасса по сравнению с другими реками европейской части России. Видно, что ДО рек нашего региона обогащены широким спектром ТМ, прежде всего Mn, Pb, Cu, Ni, Cr, Zn. Также обращает на себя внимание, что диапазоны пределов колебаний концентраций микроэлементов в бассейне Северского Донца существенно шире, отражая более неоднородный гранулометрический состав отложе-

ний (рис. 1). Ниже приведены сведения о химическом составе ДО рек двух бассейнов (табл. 4).

Что касается *марганца*, то он распределен в ДО весьма неравномерно. Разброс его средних значений в реках бассейна Северского Донца составляет 150–2850 мг/кг, что заметно выше, чем в реках бассейна Тузлова (750–3000 мг/кг). Однако при расчете средних для бассейна концентраций картина оказывается противоположной (1475 мг/кг – для бассейна Тузлова и 871 мг/кг – Северского Донца).

Таблица 3

Распределение валовых содержаний элементов в ДО рек европейской части РФ, мг/кг / Distribution of gross content of elements in bottom sediments of rivers of the European part of the Russian Federation, mg/kg

Бассейн, реки	Fe	Mn	Pb	Cu	Co	Ni	Cr	Zn	V
Бассейн Оки, реки Лопатовка, Мутенка, Свинка, Плавка [5]	900–2500	350–750	2–4	20–30	4–30	20–60	30–80	20–70	–
Бассейн Волги, реки Поля, Шерна, Гвозденка [6]	600–1300	50–210	1,5–2	3–5	2–20	0,1–5	12–50	7–20	–
Река Дон [7]	–	300–340	1,0	15–20	5–8	12–21	59–73	39–49	60–71
Река Северский Донец [7]	–	310	12	16–20	–	12–22	36–73	61–65	35–53
Средний фон для рек [1]	–	–	29	30	–	18	51	123	–
Бассейн Северского Донца [3]	9700–45000	183–2850	4–15	11–95	6–37	18–80	55–550	13–167	57–117
Бассейн Тузлова [3]	25700–39000	750–3000	9–133	33–55	11–42	40–77	93–300	70–450	73–150
Кларк осадочных пород [8]	35400	730	12	31	14	37	76,6	69	91

Таблица 4

**Среднее содержание ТМ в ДО рек Восточного Донбасса, мг/кг [3] /
Average heavy metal content in bottom sediments of East Donbass rivers, mg/kg**

Река	Mn	Ni	V	Cr	Zn	Pb	Cu	Sr
<i>Бассейн Северского Донца</i>								
Большая Каменка	800 (740)	80 (40)	200 (100)	100 (150)	150 (80)	15 (15)	200 (40)	20 (30)
	400	30	100	40	60	10	40	15
Малая Каменка	700 (533)	60 (40)	133 (93)	117 (367)	133 (70)	17 (13)	167 (33)	33 (37)
	433	31	98	43	80	12	32	13
Лихая	1433 (1567)	77 (67)	133 (117)	93 (110)	117 (167)	11 (13)	167 (60)	32 (43)
	1367	53	150	50	120	200	57	33
Калитва	667 (183)	70 (22)	133 (57)	87 (393)	150 (13)	10 (4)	150 (11)	33 (13)
	110	4	18	0	33	4	13	0
Быстрая	650 (200)	55 (18)	175 (100)	90 (210)	175 (20)	18 (5)	250 (12)	15 (15)
	175	4	70	10	30	5	14	0,5
Большая Гнилуша	2350 (2850)	80 (80)	90 (100)	115 (550)	200 (13)	14 (14)	225 (95)	25 (50)
	3500	45	100	65	125	14	60	80
Кундрючья	850 (750)	60 (45)	125 (100)	90 (200)	100 (90)	13 (15)	175 (40)	30 (40)
	130	33	120	50	125	12	35	32
Северский Донец	600 (150)	60 (18)	150 (50)	115 (55)	200 (95)	7 (8)	300 (15)	60 (25)
	90	6	20	20	90	12	20	9
<i>Бассейн Тузлова</i>								
Большой Несветай	1433 (1067)	56 (50)	147 (80)	133 (143)	87 (100)	18 (23)	133 (43)	47 (30)
	467	30	116	63	90	8,7	33	13
Малый Несветай	4166 (3000)	170 (77)	117 (73)	83 (93)	213 (103)	12 (8)	150 (33)	60 (40)
	1100	37	93	45	63	6,3	45	28
Аюта	2066 (1400)	50 (47)	117 (87)	100 (117)	86 (70)	15 (18)	150 (47)	53 (33)
	667	37	137	76	70	11,7	53	25
Атюхта	850 (750)	65 (45)	125 (150)	100 (300)	250 (200)	55 (45)	300 (55)	60 (45)
	550	35	45	45	90	15	53	32
Грушевка	1250 (1675)	58 (43)	125 (108)	137 (138)	115 (85)	14 (132)	120 (35)	33 (40)
	625	21	21	31	60	14	41	20
Кадамовка	1766 (1433)	60 (40)	150 (100)	116 (233)	117 (93)	17 (133)	183 (47)	37 (40)
	567	27	27	27	67	9,3	43	23
Тузлов	700 (1000)	55 (40)	150 (100)	100 (250)	200 (450)	18 (9)	175 (55)	50 (45)
	650	25	25	25	530	23	50	40

Примечание. В числителе приведены средние значения для пелитовой фракции, в знаменателе – для песчано-алевритовой, в скобках даны валовые содержания.

Никель отличается широким разбросом валовых содержаний в реках бассейна Северского Донца – от 18 (в р. Быстрая) до 80 мг/кг (в р. Большая Гнилуша) (табл. 4). В бассейне же Тузлова содержание элемента, как правило, находится в пределах 40–50 мг/кг, и только в р. Малый Несветай оно увели-

чивается до 77 мг/кг. В целом ДО рек двух бассейнов незначительно отличаются друг от друга (49 мг/кг – в бассейне Тузлова и 41 мг/кг – Северского Донца).

Отличительной чертой распределения *хрома* является его предпочтительное накопление в реч-

ных отложениях Северско-Донецкого бассейна, где его содержание варьирует в очень широких пределах – от 55 (р. Северский Донец) до 550 мг/кг (р. Большая Гнилуша). Средняя же величина элемента для бассейна в целом составляет 254 мг/кг. Что касается речных отложений бассейна Тузлова, то в них характер распределения элемента менее контрастный (от 93 мг/кг в р. Малый Несветай до 300 мг/кг в р. Аюта) при среднем для бассейна значении 182 мг/кг.

Ванадий, в отличие от предшествующих металлов, в ДО распределен относительно равномерно. В бассейне Тузлова его среднее содержание изменяется от 73 мг/кг в р. Малый Несветай до 150 мг/кг в р. Атюхта. В бассейне Северского Донца минимальное содержание элемента обнаружено в основной водной артерии (50 мг/кг), а максимальное отмечено в р. Лихой (117 мг/кг).

По содержанию *цинка* ДО двух бассейнов резко отличаются друг от друга. Его концентрации в бассейне Тузлова изменяются от 70 (р. Аюта) до 450 мг/кг (р. Тузлов), а в среднем составляют 157 мг/кг. Что касается речных осадков бассейна Северского Донца, то здесь содержание элемента лежит в пределах 13 (р. Большая Гнилуша) – 167 мг/кг (р. Лихая), а среднее его значение составляет 69 мг/кг.

Характер распределения *свинца* во многом напоминает распределение предыдущего элемента. Он, как и цинк, преимущественно накапливается в речных осадках бассейна Тузлова, где его среднее для бассейна содержание составляет 69 мг/кг при разбросе значений от 8 мг/кг в р. Малый Несветай до 133 мг/кг в р. Кадамовка. В ДО бассейна Северского Донца свинец распределен более равномерно. Его наименьшие количества (в среднем 4 мг/кг) установлены в р. Калитва, а наибольшие (15 мг/кг) – в реках Большая Каменка и Кундрючья. Средняя для данного бассейна величина составляет 11 мг/кг, что на порядок меньше, чем в ДО рек бассейна Тузлова.

Медь и *стронций* отличаются весьма равномерным распределением в ДО рек бассейна Тузлова. При этом наименьшее содержание Cu (33 мг/кг) установлено в р. Малый Несветай, а наибольшее (55 мг/кг) – в р. Атюхта и Тузлов. Близкие средние значения установлены и для стронция (в среднем 30–45 мг/кг). Для ДО рек в бассейне Северского Донца характерен более широкий диапазон колебаний элементов: 11–95 мг/кг (в среднем 38 мг/кг) для меди и 13–50 мг/кг (в среднем 32 мг/кг) для стронция (табл. 3, 4).

В табл. 5–7 приведены данные о распределении изученных элементов в отдельных фракциях ДО – пелитовой, песчано-алевритовой и тяжелой. Важно подчеркнуть, что каждая из выделенных фракций представляет собой поликомпонентную систему,

включающую глинистые минералы, органическое вещество, обломки минералов и горных пород, а также аутигенные карбонаты, сульфиды и гидроксиды железа. Очевидно, что все эти составляющие могут быть в разной степени носителями изученных ТМ. Данное обстоятельство учитывалось при компоновке табличного материала.

Следует отметить, что в ДО рек Восточного Донбасса, равно как и в речных осадках других регионов, основное количество рассматриваемых элементов связано с *пелитовой фракцией*, представленной главным образом глинистыми минералами, что подтверждается прямой корреляцией валовых содержаний этих элементов с выходом пелитового вещества [3]. Однако, помимо глинистых минералов, доля которых во фракции варьирует в пределах от 64 до 81 %, в значительных количествах могут присутствовать в качестве примесей органическое вещество современного происхождения и хемогенные карбонаты. Для оценки указанных компонентов как носителей ТМ определены их коэффициенты концентрации относительно условного фона, при расчете которого использованы пробы, резко обедненные (менее 1 % от фракции в целом) этими примесями. Как видно из табл. 5, элементы, присутствующие в пелитовой фракции, можно сгруппировать следующим образом. Первая группа включает большинство изученных элементов (Ni, V, Cr, Zn, Pb), которые, судя по минимальным значениям коэффициентов концентрации, связаны практически целиком с глинистыми минералами.

Вторую группу образуют медь и стронций, в распределении которых заметную роль играют органическое вещество (Cu) или хемогенные карбонаты (Sr). И, наконец, марганец в пелитовой фракции, помимо глинистых минералов, связан в бассейне Северского Донца с органическим веществом, а в бассейне Тузлова – с обеими примесями.

В *песчано-алевритовой фракции*, как отмечалось ранее, помимо кварц-полевошпатовой составляющей, заметную роль играют обломки осадочных пород (аргиллиты, алевролиты, песчаники и карбонатные породы) и органическое вещество (современное и углефицированный детрит). И в этой фракции, в отличие от пелитовой, именно второстепенные примеси являются основными носителями рассматриваемых ТМ. При этом большинство элементов преимущественно связано с обломками осадочных пород (главным образом аргиллитов и алевролитов), что особенно характерно для ДО рек бассейна Северского Донца (табл. 6).

Таблица 5

Содержание ТМ в пробах пелитовой фракции ДО со значительным количеством органического вещества и хемогенных карбонатов, мг/кг / Heavy metals content in samples of pelite fraction of bottom sediments with significant amount of organic substance and chemogenic carbonates, mg/kg

Элемент	Бассейны					
	Северский Донец			Тузов		
	Условный фон	Органическое вещество (18 %)	Карбонаты (35 %)	Условный фон	Органическое вещество (17 %)	Карбонаты (36 %)
Mn	600	2250 (3,8)	800 (1,3)	650	1500 (2,3)	1500 (2,3)
Ni	55	60 (1,1)	50 (0,9)	55	60 (1,1)	60 (1,1)
V	200	150 (0,8)	100 (0,5)	150	150 (1,0)	100 (0,7)
Cr	90	100 (1,1)	100 (1,1)	130	150 (1,2)	100 (0,8)
Zn	150	200 (1,3)	50 (0,3)	120	100 (0,8)	60 (0,5)
Pb	20	15 (0,8)	8 (0,4)	15	15 (1,0)	10 (0,7)
Cu	170	300 (1,8)	150 (0,9)	120	280 (2,3)	150 (1,3)
Sr	17	15 (0,9)	60 (3,3)	30	30 (1,0)	80 (2,6)

Примечание. В скобках приведены коэффициенты концентрации относительно условного фона.

Таблица 6

Содержание ТМ в пробах песчано-алевритовой фракции ДО со значительным количеством органического вещества и обломков осадочных пород, мг/кг / Heavy metals content in samples of sand-aleurite fraction of bottom sediments with significant amount of organic matter and debris of sedimentary rocks, mg/kg

Элемент	Бассейны					
	Северский Донец			Тузов		
	Условный фон	Органическое вещество (19 %)	Обломки осадочных пород (37 %)	Условный фон	Органическое вещество (43 %)	Обломки осадочных пород (34 %)
Mn	90	300 (3,3)	550 (6,1)	300	650 (2,2)	600 (2,0)
Ni	3	17 (5,7)	50 (16,7)	10	30 (3,0)	35 (3,5)
V	10	48 (4,8)	150 (15,0)	50	150 (3,0)	140 (2,8)
Cr	10	15 (1,5)	70 (7,0)	37	60 (1,6)	60 (1,6)
Zn	30	45 (1,5)	115 (3,8)	60	50 (0,8)	105 (1,8)
Pb	4	8 (2,0)	15 (3,8)	6	5 (0,8)	8 (1,3)
Cu	10	23 (2,3)	40 (4,0)	20	60 (3,0)	40 (2,0)
Sr	3	9 (3,0)	25 (6,3)	15	15 (1,0)	25 (1,7)

Примечание. В скобках приведены коэффициенты концентрации относительно условного фона, для оценки которого использованы пробы с минимальным содержанием второстепенных примесей.

И лишь свинец в бассейне Тузова выпадает из этой закономерности. Что касается органического вещества, то оно в качестве носителя элементов особенно характерно для марганца, никеля, ванадия и меди, в меньшей степени – для стронция. Для оставшихся металлов – хрома и цинка – значение органического вещества в их накоплении в речных отложениях Восточного Донбасса невелико.

Как известно, *тяжелая фракция* в ряде случаев в зависимости от своего минерального состава может

являться концентратом многих микроэлементов, что хорошо видно из данных табл. 7. Прежде всего, обращает на себя внимание, что подавляющее большинство элементов тяготеет к существенно ильменитовой фракции. Медь, свинец, цинк в значительной степени связаны также с окислами (магнетит, гематит) и в меньшей степени с гидроокислами железа. Что касается никеля и стронция, то они не проявляют тенденции к накоплению в тяжелой фракции ДО рек Восточного Донбасса.

Таблица 7

**Содержание ТМ в тяжелой фракции ДО рек Восточного Донбасса, мг/кг /
Heavy metals content in heavy fraction of bottom sediments of East Donbass rivers, mg/kg**

Река	Mn	Ni	V	Cr	Cu	Pb	Zn	Sr	Основные минералы, %		
									Ильме-нит	Магнетит, гематит	Гидроксиды железа
Большая Каменка	400 (0,5)	20 (0,5)	5 (0,05)	30 (0,2)	10000 (500)	2000 (133,3)	10000 (125,0)	5 (0,6)	9,5	54	25,8
Малая Каменка	8000 (15,0)	50 (1,25)	100 (1,1)	400 (1,2)	1000 (30,3)	300 (23,1)	1000 (14,3)	30 (0,8)	6,5	22,6	57,3
Калитва	2000 (10,9)	40 (1,8)	200 (3,5)	1500 (3,8)	50 (4,8)	200 (50,0)	400 (30,8)	5 (0,1)	52,6	17	6,3
Быстрая	4000 (20,0)	30 (1,67)	300 (3,0)	1000 (4,8)	50 (4,2)	150 (30,0)	500 25,0	5 (0,3)	58,6	9,3	14,4
Северский Донец	1500 (10,0)	15 (0,8)	500 (10,0)	2000 (40,0)	60 (4,0)	100 (12,5)	300 (3,1)	5 (0,2)	60,0	10,1	2,4
Большой Несветай	800 (0,75)	40 (0,8)	150 (1,9)	400 (2,8)	100 (4,2)	150 (6,5)	500 (5,0)	3 (0,1)	18,0	Ред.	55,7
Грушевка	1000 (0,6)	40 (0,9)	400 (3,7)	1500 (10,9)	150 (4,3)	150 (1,1)	400 (4,7)	5 (0,1)	46,3	12,8	2,9

Примечание. В скобках приведены коэффициенты концентрации относительно валовых содержаний.

В табл. 8 приведены ориентировочные результаты расчета баланса элементов в ДО. Как видно, в бассейне Тузлова основным носителем большинства элементов является пелитовая фракция, представленная в основном глинистыми минералами, и в меньшей степени – песчано-алевритовая, вклад которой в общий баланс элементов варьирует от 13 до 36 %.

Таблица 8

**Ориентировочный баланс элементов в бассейнах
Тузлова и Северского Донца, % / Balance of elements in
bottom sediments of Tuzlov and Seversky Donets basins, %**

Фракция	Mn	Ni	V	Cr	Zn	Pb	Cu	Sr
Тяжелая	0,4	0,3	1	4	1	19	3	0,1
	1,0	0,3	0,7	3	5	10	2	0,1
Пелитовая	68	87	90	61	68	58	81	80
	47	73	69	43	64	39	79	45
Песчано-алевритовая	14	21	36	24	30	13	28	23
	45	35	52	41	55	39	48	40
Сумма	82	108	127	89	99	90	112	103
	93	108	122	87	124	88	129	85

Примечание. В числителе приведены средние значения для рек бассейна Тузлова, в знаменателе – для Северского Донца.

В бассейне Северского Донца картина несколько иная. Здесь вклад песчано-алевритовой фракции

в распределение элементов в осадке более существен, хотя большинство элементов, по-прежнему, концентрируется в пелитовой фракции. Что касается тяжелой фракции, то ей принадлежит в подавляющем большинстве случаев подчиненная роль в общем балансе ТМ, несмотря на весьма существенные концентрации широкого спектра химических элементов.

Оценка уровня загрязненности ДО в соответствии с рекомендациями, предложенными в работе Е.П. Янина [9], проводилась в 2 этапа. На первом этапе для характеристики техногенных геохимических аномалий в ДО рек определены коэффициенты концентрации (K_c) химических элементов, характеризующие степень их накопления (уровень аномальности) в ДО относительно фонового содержания. При этом за минимально аномальное содержание принята концентрация металла, в 1,5 раза превышающая фон, поскольку это указывает на природную вариацию содержания вещества (отсутствие аномалии). На втором этапе был определен суммарный показатель загрязнения Z_c , представляющий собой сумму коэффициентов концентрации (K_c) (за вычетом фона) элементов, входящих в геохимическую ассоциацию.

При оценке загрязненности ДО ключевым моментом является установление для них фоновых геохимических параметров, что предполагает отбор фоновых проб на участках рек, удаленных от антропогенных источников. Следует напомнить, что Восточный Донбасс в геохимическом отношении представляет собой природно-техногенную анома-

лию, где практически не осталось водных объектов, не испытывающих длительного антропогенного воздействия. Данное обстоятельство ставит под сомнение возможность определения корректных региональных параметров геохимического фона в ДО. В этом случае для них целесообразно использовать кларки осадочных пород.

Однако, как было показано выше (рис. 1, табл. 1 и 2), ДО рек Восточного Донбасса характеризуются большим разнообразием гранулометрического состава с преобладанием слабоотсортированных осадков. Учитывая данное обстоятельство, для сравнения степени загрязненности ДО в разных речных створах предпочтительнее использовать не валовые пробы, а выделенные из них пелитовые фракции. Это оправдано по ряду причин. Во-первых, пелитовая составляющая доминирует в

подавляющем большинстве проб донных осадков. Во-вторых, она является основным носителем большинства изученных элементов. В-третьих, именно пелитовая фракция, находясь в наиболее длительном контакте с водной средой, лучше всего сохраняет информацию о ее состоянии. И, наконец, изучая пелитовую фракцию ДО рек Восточного Донбасса, мы соблюдаем основное требование в сравнительной геохимии – однородность выборки. В качестве же условного фона для пелитовой фракции предлагается использовать кларки глины и глинистых сланцев [8].

Результаты оценки загрязнения ДО рек по интенсивности накопления металлов в пелитовой фракции с использованием общепринятой ориентировочной шкалы приведены в табл. 9 и 10.

Таблица 9

Оценка техногенного загрязнения рек бассейна Тузлова по интенсивности накопления металлов в ДО /
Assessment of technogenic pollution of Tuzlov basin rivers by the intensity of metal accumulation in bottom sediments

Река	Номер створа	Z _C валовой пробы	Уровень загрязнения	Z _C пелитовой фракции	Уровень загрязнения
Большой Несветай	1.1	2,6	Слабый	3,8	Слабый
	2.1	6,4	Слабый	6,7	Слабый
	2.2	3,6	Слабый	2,7	Слабый
Малый Несветай	3.1	2,8	Слабый	4,4	Слабый
	4.1	4,5	Слабый	2,1	Слабый
	4.2	17,3	Средний	12,4	Средний
Аюта	5.1	3,7	Слабый	6,0	Слабый
	6.1	2,0	Слабый	3,2	Слабый
	6.2	6,9	Слабый	12,5	Средний
Атюхта	7.1	19,5	Средний	8,1	Слабый
	7.2	5,4	Слабый	5,6	Слабый
Грушевка	8.1	3,8	Слабый	9,6	Слабый
	9.1	5,5	Слабый	12,8	Средний
	9.2	52,2	Высокий	4,4	Слабый
	25.2	8,2	Слабый	29,4	Средний
Кадамовка	10.1	8,8	Слабый	1,7	Слабый
	11.1	4,2	Слабый	3,9	Слабый
	11.2	4,6	Слабый	2,7	Слабый
Тузлов	12.1	3,9	Слабый	4,7	Слабый
	12.2	18,5	Средний	7,1	Слабый
Среднее для бассейна		9,0	Слабый	6,5	Слабый

Таблица 10

**Оценка техногенного загрязнения рек бассейна Северского Донца по интенсивности накопления металлов в ДО /
Assessment of technogenic pollution of Seversky Donets basin rivers by the intensity of metal accumulation in bottom sediments**

Река	Номер створа	Z _c валовой пробы	Уровень загрязнения	Z _c пелитовой фракции	Уровень загрязнения
Большая Каменка	15.1	5,4	Слабый	5,9	Слабый
	15.2	7,5	Слабый	6,0	Слабый
Малая Каменка	16.1	5,2	Слабый	5,6	Слабый
	17.1	2,9	Слабый	5,1	Слабый
	17.2	11,9	Средний	4,5	Слабый
Лихая	18.1	2,9	Слабый	1,6	Слабый
	19.1	10,9	Средний	7,9	Слабый
	19.2	15,3	Средний	13,7	Средний
Калитва	20.1	16,1	средний	3,1	Слабый
	21.1	2,0	Слабый	1,0	Слабый
	21.2	1,0	Слабый	3,1	Слабый
Быстрая	22.1	6,1	Слабый	2,5	Слабый
	23.1	1,0	Слабый	3,7	Слабый
Большая Гнилуша	25.1	28,4	Средний	18,4	Средний
	25.3	7,5	Слабый	5,3	Слабый
Кундрючья	24.2	6,9	Слабый	4,4	Слабый
	26.1	4,1	Слабый	4,1	Слабый
	27.1	4,7	Слабый	7,1	Слабый
Северский Донец	28.2	1,0	Слабый	1,0	Слабый
Среднее для бассейна		4,9	Слабый	4,2	Слабый

Здесь же для сравнения дана соответствующая информация о ДО в целом. Как видно, уровень техногенного загрязнения большинства рек по интенсивности накопления металлов в ДО следует считать в основном слабым. При сравнении же двух бассейнов по величине Z_c видно, что реки бассейна Тузлова загрязнены в большей степени, чем реки Северского Донца. Обращает на себя внимание несоответствие в ряде случаев уровней загрязнения валовых проб ДО и выделенных

из них пелитовых фракций (3 – в бассейне Северского Донца и 6 – в бассейне Тузлова). Данное обстоятельство служит, с нашей точки зрения, дополнительным аргументом в пользу пелитовой фракции как индикатора степени загрязнения водной среды.

Таким образом, проведенные исследования ДО рек Восточного Донбасса показали, что концентрации ТМ в них варьируют в очень широких пределах. Это связано в первую очередь с большой неоднородностью гранулометрического состава ДО.

Оценка уровня загрязненности ДО по суммарному показателю позволила отнести их преимущественно к слабозагрязненным. При этом установлено, что именно пелитовая фракция, а не донные осадки в целом, несет наиболее объективную информацию о состоянии водной среды.

Литература

1. Саит Ю.Е., Ревич Б.А., Янин Е.П. Геохимия окружающей среды. М.: Недра, 1990. 335 с.
2. Решетняк О.С., Закруткин В.Е. Донные отложения как источник вторичного загрязнения речных вод металлами (по данным лабораторного эксперимента) // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2016. № 4. С. 102–109.
3. Закруткин В.Е., Склярченко Г.Ю., Бакаева Е.Н., Решетняк О.С., Гибков Е.В., Фоменко Н.Е. Поверхностные и подземные воды в пределах техногенно нарушенных геосистем Восточного Донбасса: формирование химического состава и оценка качества. Ростов н/Д.: Изд-во ЮФУ, 2016. 171 с.

4. Shepard D. A two dimensional interpolation function for irregularly spaced data // Proc. 23rd Nat. Conf. ACM. 1968. P. 517–523.

5. Ухватов В.П. Микроэлементы донных отложений субаквальных ландшафтов рек центра Европейской России // География и природные ресурсы. 1998. № 4. С. 99–103.

6. Бреховских В.Ф., Волкова З.В., Катунин Д.Н., Казмирук В.Д., Казмирук Т.Н., Островская Е.В. Тяжелые металлы в донных отложениях Верхней и Нижней Волги // Водные ресурсы. 2002. Т. 29, № 5. С. 587–595.

7. Хованский А.Д., Приваленко В.В. Геохимическая оценка состояния речной системы Нижнего Дона. Ростов н/Д.: Изд-во Рост. ун-та, 1990. 144 с.

8. Григорьев Н.А. Распределение химических элементов в верхней части континентальной коры. Екатеринбург: Ин-т геологии и геохимии УрО РАН, 2009. 381 с.

9. Янин Е.П. Экологическая геохимия и проблемы биогенной миграции химических элементов 3-го рода // Труды биогеохимической лаборатории Ин-та геохимии и аналитической химии РАН. 2003. Т. 24. С. 37–75.

References

1. Saet J.E., Revich B.A., Yanin E.P. (1990). *Environmental geochemistry*. Moscow, Nedra Publ., 335 p. (in Russian).

2. Reshetnyak O.S., Zakrutkin V.E. (2016). Bottom sediments as a source of secondary water pollution by metals (according to the laboratory experiment). *Izv. vuzov. Sev.-Kavk. region. Estestv. nauki* (Bulletin of

Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science), no. 4, pp. 102-109. (in Russian).

3. Zakrutkin V.E., Sklyarenko G.Yu., Bakaeva E.N., Reshetnyak O.S., Gibkov E.V., Fomenko N.E. (2016). *Surface and underground waters within technogenically disturbed geosystems of Eastern Donbass: formation of chemical composition and quality assessment*. Rostov-on-Don: Southern Federal University Press, 171 p. (in Russian).

4. Shepard D. (1968). A two dimensional interpolation function for irregularly spaced data. *Proc. 23rd Nat. Conf. ACM*, pp. 517-523.

5. Uchvatov V.P. (1998). Microelements of bottom sediments of subaquial landscapes of rivers of the center of European Russia. *Geografiya i prirodnye resursy*, no. 4, pp. 99-103. (in Russian).

6. Brekhovskikh V.F., Volkova Z.V., Katunin D.N., Kazmiruk V.D., Kazmiruk T.N., Ostrovskaya E.V. (2002). Heavy metals in the bottom sediments of the Upper and Lower Volga. *Vodnye resursy*, vol. 29, no. 5, pp. 587-595. (in Russian).

7. Khovansky A.D., Privalenko V.V. (1990). *Geochemical assessment of the Lower Don river system*. Rostov-on-Don, Rostov University Press, 144 p. (in Russian).

8. Grigoriev N.A. (2009). *Distribution of chemical elements in the upper part of the continental crust*. Ekaterinburg, Institute of Geology and Geochemistry Press, Urals Branch of RAS, 381 p. (in Russian).

9. Yanin E.P. (2003). Ecological geochemistry and problems of biogenic migration of chemical elements of the 3rd kind. *Trudy biogeokhimicheskoi laboratorii In-ta geokhimii i analiticheskoi khimii RAN*, vol. 24, pp. 37-75. (in Russian).

УДК 504.054

DOI 10.18522/1026-2237-2020-1-47-52

ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКОЕ КАРТОГРАФИРОВАНИЕ КАБАРДИНО-БАЛКАРСКОЙ РЕСПУБЛИКИ

© 2020 г. **О.О. Дахова¹, Л.Л. Каирова¹, Б.М. Хучунаев², Г.В. Куповых³**¹Кабардино-Балкарский университет им. Х.М. Бербекова, Нальчик, Россия,²Высокогорный геофизический институт, Нальчик, Россия,³Южный федеральный университет, Таганрог, Россия

GEOECOLOGICAL MAPPING OF KABARDINO-BALKARIAN REPUBLIC

O.O. Dakhova¹, L.L. Kairova¹, B.M. Khuchunaev², G.V. Kupovykh³¹Berbekov Kabardino-Balkarian State University, Nalchik, Russia,²High-Mountain Geophysical Institute, Nalchik, Russia,³Southern Federal University, Taganrog, Russia

Дахова Оксана Олеговна – кандидат географических наук, доцент, кафедра биологии, геоэкологии и молекулярно-генетических основ живых систем, Институт химии и биологии, Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова, ул. Чернышевского, 173, г. Нальчик, Кабардино-Балкарская Республика, 360004, Россия, e-mail: dakhva@rambler.ru

Oksana O. Dakhova - Candidate of Geography, Associate Professor, Department of Biology, Geoecology and Molecular Genetic Foundations of Living Systems, Institute of Chemistry and Biology, Berbekov Kabardino-Balkarian State University v. St., Chernyshevskogo, 173, Nalchik, Kabardino-Balkarian Republic, 360030, Russia, e-mail: dakhva@rambler.ru

Каирова Людмила Леонидовна – магистрант, Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова, ул. Чернышевского, 173, г. Нальчик, Кабардино-Балкарская Республика, 360004, Россия, e-mail: s_iriya@mail.ru

Lyudmila L. Kairova - Master Student, Berbekov Kabardino-Balkarian State University, Chernyshevskogo St., 173, Nalchik, Kabardino-Balkarian Republic, 360030, Russia, e-mail: s_iriya@mail.ru

Хучунаев Бузигит Муссаевич – доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник, заведующий лабораторией микрофизики облаков, Высокогорный геофизический институт, пр. Ленина, 2, г. Нальчик, Кабардино-Балкарская Республика, 360030, Россия, e-mail: buzgigit@mail.ru

Buzigit M. Khuchunaev - Doctor of Physics and Mathematics, Senior Researcher, Head of the Department of Physics of Clouds of High-Mountainous, Geophysical Institute, Lenina Ave., 2, Nalchik, Kabardino-Balkarian Republic, 360030, Russia, e-mail: buzgigit@mail.ru

Куповых Геннадий Владимирович – доктор физико-математических наук, профессор, Инженерно-технологическая академия, Южный федеральный университет, ул. Чехова, 22, г. Таганрог, 347928, e-mail: kupovykh@sfnu.ru

Gennady V. Kupovykh - Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Academy for Engineering and Technologies, Southern Federal University, Taganrog, Chekhov, St., 22, 347928, Russia, e-mail: kupovykh@sfnu.ru

Для картографирования территории Кабардино-Балкарской Республики проведены сбор, систематизация и анализ многолетних данных по геоэкологическим, геологическим, геохимическим и гидрогеологическим характеристикам ее состояния. На основе осуществленного геоэкологического опробования проведено районирование территории республики. Сделана оценка геоэкологического состояния природных ландшафтов и степени антропогенного воздействия. Установлено, что проблема загрязнения природной среды становится все более актуальной как из-за роста объемов промышленного и сельскохозяйственного производства, так и в связи с его качественным изменением под влиянием научно-технического прогресса. Показано, что основными источниками техногенного загрязнения в исследуемом регионе являются промышленные предприятия, автотранспортные средства и коммунальное хозяйство. На территории республики проведено экологическое зонирование, и на его основе выделено и оконтурено 11 областей, отличающихся по степени экологического благополучия.

Ключевые слова: антропогенное воздействие, географическая среда, геоэкология, районирование, картографирование, загрязнение, природные ландшафты.

To map the territory of the Kabardino-Balkar Republic, long-term data on geoecological, geological, geochemical and hydrogeological characteristics of its state were collected, systematized and analyzed. On the basis of the performed geo-ecological testing, zoning of the territory of the Republic was carried out. The assessment of the geoecological state of natural landscapes and the degree of anthropogenic impact is made. It is established that the problem of environmental pollution is becoming more and more urgent, both due to the growth of industrial and agricultural production, and due to its qualitative change under the influence of scientific and technological progress. It is shown that the main sources of technogenic pollution in the studied region are industrial enterprises, motor vehicles and utilities. Ecological zoning has been carried out in the territory of the KBR, and 11 areas that differ in the degree of ecological well-being have been identified and outlined on its basis.

Keywords: anthropogenic impact, geographical environment, geoecology, zoning, mapping, pollution, natural landscapes.

Введение

Глобальные изменения в мире, вызванные антропогенным воздействием на природную среду, приобрели такой характер и масштабы, что ведут к ее разрушению. Антропогенное воздействие на окружающую среду сильно изменяет естественные природные процессы.

Геоэкология – комплексная система наук об интеграции геосфер и общества на стыке экологии и географии. Зарождение геоэкологии связывают с именем немецкого географа К. Тролля (1899–1975), который ещё в 1930-х гг. понимал под ней одну из ветвей естествознания, объединяющую экологические и географические исследования в изучении экосистем. По его мнению, термины «геоэкология» и «ландшафтная экология» являются синонимами. В России широкое использование термина «геоэкология» началось с 1970-х гг., после упоминания его известным советским географом В.Б. Сочавой (1905–1978). Как отдельная наука окончательно сложилась в начале 90-х гг. XX в. и направлена на изучение негативных антропогенных воздействий на природную среду.

Проблема загрязнения природной среды становится столь острой как из-за роста объемов промышленного и сельскохозяйственного производства, так и в связи с качественным изменением производства под влиянием научно-технического прогресса. Многие металлы и сплавы, которыми пользуется человек, неизвестны природе в чистом виде, и хотя они в какой-то мере подвластны утилизации и вторичному потреблению, часть их рассеивается, накапливаясь в биосфере в виде отходов.

Картографирование, как метод пространственного анализа, является одним из важнейших приемов и средств, сопровождающих все без исключения географические исследования, которые на современном этапе становятся все более экологизированными. Создание геоэкологических (экологиче-

ческих) карт следует рассматривать как логическое завершение самостоятельного исследования – эколого-географического (экодиагностического) анализа любой территории, нацеленного на определение тех условий и свойств, которые характеризуют окружающую человека среду.

При этом основным стержнем геоэкологического картографирования остается изучение природных свойств территории и тех изменений, которые имеют важное экологическое значение с точки зрения проживания человека [1–3].

В Кабардино-Балкарской Республике (КБР) сосредоточены уникальные природные комплексы и ландшафты, места произрастания редких видов растений и обитания животных, в непосредственной близости от населенных пунктов располагаются вековые леса и величественные горы.

По особенностям своего строения и характеру рельефа территория Кабардино-Балкарии делится на три части: равнинную (33), предгорную (16) и горную (51 %).

КБР находится в южной части умеренного климатического пояса. По сочетанию тепла и влаги она расположена в двух климатических областях: в Предкавказье и высокогорном Кавказе [4–7].

В результате сбора, изучения, систематизации и анализа фондовых и опубликованных работ по геоэкологическим, геологическим, геохимическим, гидрогеологическим и другим исследованиям в пределах территории КБР были получены данные для картографирования.

Рассматривая экологическое состояние трех таких компонентов геологической системы, как почвы, поверхностные воды и их донные отложения, сравнительно систематично изученных в пределах КБР, мы выстраиваем следующий ряд загрязненности: *почвы – донные отложения – поверхностные воды*.

В этом ряду происходит повышение уровня загрязненности от компонента к компоненту. Даже при наличии определенных условностей, вытекающих, прежде всего, из мелкого масштаба и разного

уровня систематичности при опробовании изучаемых компонентов географической среды (ГС) в различных районах КБР, существуют относительно устойчивые природные явления, определяющие формирование ряда загрязненности. Так, можно обратить внимание на более низкую загрязненность депонирующих (почвы, донные осадки) компонентов по сравнению с транспортирующим (поверхностные воды). Воды, являясь растворителем, активно переводят природные и антропогенные загрязняющие вещества в растворимые формы и в большей степени, чем другие компоненты, концентрируют в себе поллютанты любого происхождения. Мощным природным концентратом любых загрязнителей в поверхностных водах является рельеф.

Антропогенное воздействие на ГС равнинной зоны более значительно, разнонаправленно и длительно, чем на горную зону. При этом равнинные ландшафты не всегда способны противостоять этому воздействию, их геохимическая и геодинамическая устойчивости, как правило, не превышают средних параметров, нередко являясь низкими. По днищам долин антропогенное давление проникает и в горную зону.

Территория деятельности Тырныаузского вольфрамо-молибденового комбината (ТВМК), где грубо нарушен природный геохимический и геодинамический баланс [8, 9], является в полном смысле этого слова экологически неблагоприятной территорией.

На подавляющей части площади КБР (около 70 %) почвы находятся в благоприятном состоянии. В основном горные почвы республики находятся в природном состоянии, тогда как почвы равнины, как правило, являются нарушенными в результате целого комплекса антропогенного воздействия. Антропогенное воздействие негативно сказывается на состоянии не только почв, но и прочих компонентов ландшафтов и геосистем в целом.

Кроме того, благоприятное состояние почв не означает полного экологического благополучия поверхностных и подземных вод, а также донных отложений. Неблагоприятное или условно благоприятное состояние поверхностных вод и их донных осадков при сравнительном благополучии окружающих почв имеет место, например, в долине р. Баксан ниже г. Тырныауза. Всего лишь условно благоприятное состояние подземных вод, природно загрязненных радиоактивными элементами, при благополучии почв, наблюдается в истоках р. Баксан. Химическое загрязнение подземных вод при сравнительном экологическом благоприятном состоянии почв имеет место в районе, расположенном южнее г. Нальчика.

Качественная характеристика грунтовых вод территории КБР представлена по данным типового химического анализа. Наибольшее количество качественных показателей грунтовых вод, превышающих ПДК, выявлено среди проб из колодцев (60 %). Наиболее характерны повышенные жесткость и содержание нитратов. Из 94 опробованных родников в 20 обнаружены повышенные, по сравнению с ПДК, содержания некоторых компонентов.

Результаты и выводы

В результате составления первого на Северном Кавказе комплекта геоэкологических карт [10] территория КБР была выделена в качестве наиболее экологически благополучной.

Однако на сегодняшний день эта ситуация может измениться. По новым данным геоэкологической изученности, всю площадь республики можно разделить на ряд территорий (рисунок):

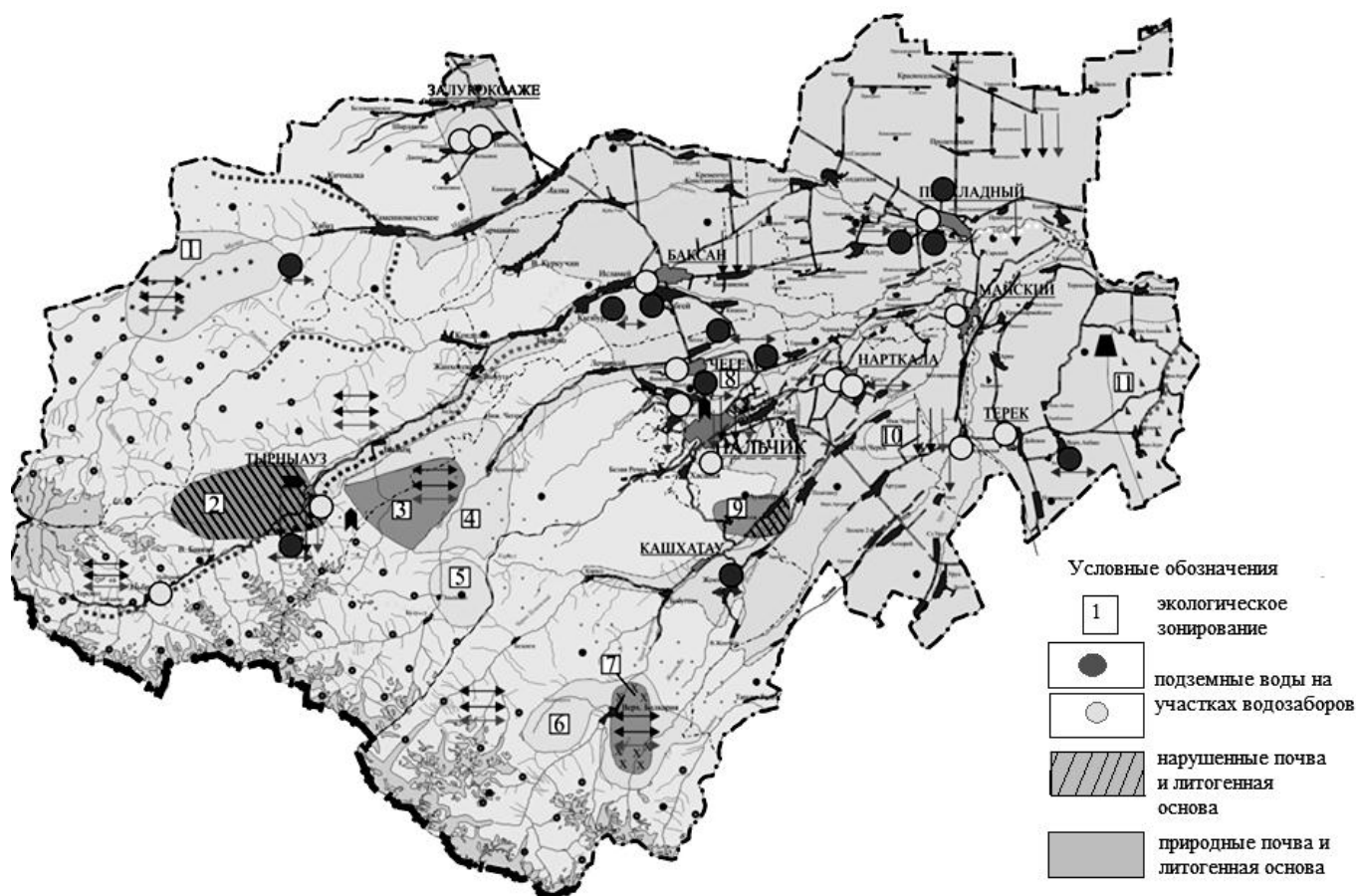
Территория 1 расположена в верховьях р. Малка, Хасаут и Мушт. Основываясь на данных по изученности геосистем, мы определяем природную экологическую ситуацию в почвах и экзогенных экологических процессах, с учетом сейсмической обстановки, как условно благоприятную.

Территория 2 находится в пределах Тырныаузского рудного района и в сфере деятельности ТВМК. Сочетание природной и антропогенной загрязненности почв тяжелыми металлами и радиоактивными элементами, высокая сейсмическая активность заставляют относить данную территорию к неблагоприятной.

Территория 3 может характеризоваться так же, как территория 2. Здесь сохраняется опасный уровень загрязненности почв тяжелыми металлами (мышьяк, свинец, хром), но падает уровень радиоактивного загрязнения. Уровень подверженности геосистем экзогенным процессам, как и уровень потенциальной сейсмичности площади, сохраняется. Загрязненность донных осадков здесь снижается.

Территория 4 отличается от территории 3 снижением уровня загрязнения почв и пораженности экзогенными геологическими процессами, некоторым повышением загрязненности донных отложений (вольфрам, молибден, медь, мышьяк, железо), сохранением уровня сейсмичности [11].

Территория 5 расположена в верховьях р. Чегем и определена как условно благоприятная. Экологическое состояние донных осадков, находящихся в природном состоянии, колеблется от благоприятного до условно благоприятного. В качестве наиболее негативных загрязняющих веществ здесь представлены кобальт, никель, мышьяк, вольфрам, хром, имеющие преимущественно природное происхождение.



Геоэкологическая карта КБР (масштаб 1:800 000) / Geoeological map of KBR (scale 1:800 000)

Практически таковы же основания для выделения в качестве условно благоприятной территории 6, находящейся в междуречье Черка Хуламского и Черка Балкарского, а также в верховьях р. Псыгансу. Некоторое повышение уровня экологического неблагополучия здесь происходит за счет выявления не химического, а радиоактивного (уран, торий) загрязнения геосистем.

Территория 7 расположена в междуречье Черка Балкарского и Псыгансу. Решающим обстоятельством для выделения данной площади в качестве одной из наиболее неблагополучных в геоэкологическом смысле в пределах КБР являются опасная природная радиоактивность почв и коренных пород, повышенная химическая загрязненность донных отложений.

Территория 8 включает г. Нальчик и район к северо-востоку от него [12, 13]. Кроме городской территории, к объектам, определяющим повышенную загрязненность ГС, относятся республиканский аэропорт, городские очистные сооружения и проч. Нахождение указанных хозяйственных объ-

ектов и определяет геоэкологическое состояние как условно благоприятное.

Почвы территории 9, находящейся к юго-востоку от 8, опасно загрязнены (мышьяк, свинец, хром, медь, марганец) и в связи с этим отнесены к неблагоприятным. Судя по набору поллютантов, причина загрязнения почв, по-видимому, смешанная (природно-антропогенная), а для более надежного определения генезиса загрязнения необходимы опытно-методические исследования. Дополнительными факторами для отнесения данной площади к неблагоприятному состоянию литогенной основы являются ее высокая пораженность оползнями и оврагами, а также потенциальная сейсмичность, достигающая 9 баллов по шкале Рихтера.

Территория 10, расположенная юго-восточнее г. Нарткала, отнесена к условно благоприятной, в связи с умеренно опасным загрязнением почв комплексом химических элементов (свинец, сурьма, мышьяк, хром). Исходя из того, что рассматриваемая территория является объектом интенсивного орошаемого земледелия, допустимо предположение о пре-

имущественно антропогенном происхождении перечисленных загрязняющих веществ.

На восточном фланге КБР выделяется территория 11. Отнесение данной территории к условно благоприятному уровню экологического состояния связано с природной радиоактивностью почв, коренных пород, донных отложений.

Завершив краткую характеристику наиболее экологически неблагоприятных территорий КБР, вернемся к собственно зонированию ее площади с точки зрения экологического состояния ГС. При этом мы попытаемся не только выполнить эту задачу покомпонентно, но и определить экологическое состояние ГС в целом, в пределах двух основных ландшафтов зон республики – горной и равнинной.

Выводы

Таким образом, на основе проведенного анализа околонуриено 11 территорий, отличающихся по степени экологического благополучия. Территории 1, 4, 5, 6, 8, 10, 11 отнесены к условно благоприятным. Территория 2, включающая г. Тырныауз, характеризуется природной и антропогенной загрязненностью почв тяжелыми металлами и радиоактивными элементами и отнесена к неблагоприятной, территория 3 примыкает к территории 2 и характеризуется меньшей степенью неблагоприятности. Территория 7 расположена в междуречье Черка Балкарского и Псыгансу, решающим обстоятельством для выделения данной площади в качестве одной из наиболее неблагоприятных в геоэкологическом смысле в пределах КБР является опасная природная радиоактивность почв и коренных пород. Почвы территории 9, находящейся к юго-востоку от г. Нальчика, опасно загрязнены комплексом тяжелых металлов. Рекомендации по рациональному использованию геоэкологической среды сводятся к нежелательности наращивания хозяйственной деятельности, кроме рекреационной, в горных районах республики, усилению природоохранной деятельности и экологическому просвещению населения.

Литература

1. Кочуров Б.И. Геоэкологическое картографирование. М.: Академия, 2012. 224 с.
2. Дахова О.О., Хучунаев Б.М., Мустафаева З.А., Куповых Г.В., Даов И.С. Экологические проблемы Кабардино-Балкарской Республики // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2018. № 4. С. 72–76.
3. Дахова О.О., Татаренко Н.В., Кумыкова А.М. Агроэкологическое состояние почв КБР // Проблемы

опустынивания: динамика, оценка, решение, материалы Междунар. науч.-практ. конф. (13–14 декабря 2019 г., г. Самарканд, Узбекистан). Самарканд, 2019. С. 200–206.

4. Huchunayev B.M., Dakhova O.O., Bekkiyeva S.A., Hatefova S.B. Impact of the slurry pond of the Tyrnyauz Tungsten-Molybdenum Complex on the mountain territories environment // Materials Science Forum. 2018. Vol. 931. P. 1070–1075.

5. Татаренко Н. В., Паиштова Л.Р., Емузова Л.З., Дахова О.О. Утилизация твердых бытовых отходов и экологические проблемы воздействия на окружающую среду (на примере КБР) // Успехи современного естествознания. 2018. № 12, ч. 2. С. 385–389.

6. Дахова О.О., Хучунаев Б.М., Куповых Г.В. Химическое и физическое загрязнение городских экосистем автотранспортом // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2016. № 4 (192). С. 67–72.

7. Дахова О.О. Мониторинг атмосферного воздуха городской среды // Безопасность природопользования в условиях устойчивого развития : материалы Междунар. науч.-практ. конф. (г. Иркутск, 25–29 сентября 2017 г.). Иркутск: ИГУ, 2017. С. 94–101.

8. Дахова О.О., Паиштова Л.Р., Татаренко Н.В., Сабанова Р.К. Оценка развития экологии региона // Университетский науч. сб. Нальчик: КБГУ, 2017. № 1. С. 72–75.

9. Дахова О.О., Паиштова Л.Р., Татаренко Н.В., Сабанова Р.К. Некоторые виды загрязнения городских ландшафтов // Университетский науч. сб. Нальчик: КБГУ, 2018. № 2. С. 53–58.

10. Прокуронов П.В., Чернов И.И. Объяснительная записка к комплекту геоэкологических карт Северного Кавказа масштаба 1:1000000. Ессентуки, 1997. № 2. 225 с.

11. Аксаментов Е.В. Информационный отчет о результатах геоэкологического картирования масштаба 1:500000 экологически неблагоприятных территорий центральной и восточной части Северо-Кавказского региона (территория Кабардино-Балкарской Республики). Нальчик: КБГУ, 2002.

12. Дахова О.О. Оценка состояния городских антропогенных ландшафтов // Изв. КБНЦ РАН. 2012. № 6 (50). С. 77–81.

13. Uzdenova A.B., Kanametova F.E., Dakhova O.O., Tatarenko N.V., Miskarova R.G., Otarova A.S., Gergokova Z.Zh. Natural risks in the Kabardino-Balkar Republic's landscape zones // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 663 (1), iss. 1. P. 1–1.

References

1. Kochurov B.I. (2012). *Geoecological mapping*. Moscow, Akademiya Publ., 224 p. (in Russian).
2. Dakhova O.O., Khuchunayev B.M., Mustafayeva Z. A., Kupovykh G.V., Daov I.S. (2018). Environmental problems of the Kabardino-Balkarian Republic. *Izv.*

vuzov. Sev.-Kavk. region. Estestv. nauki (Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science), no. 4, pp. 72-76. (in Russian).

3. Dakhova O.O., Tatarenko N.V., Kumykova A.M. (2019). Agroecological state of soils of the KBR. *Problemy opustynivaniya: dinamika, otsenka, reshenie* [Problems of desertification: dynamics, assessment, solution]. Materials of the International Scientific and Practical Conference (December 13-14, 2019, Samarkand, Uzbekistan). Samarkand, pp. 200-206. (in Russian).

4. Huchunayev B.M., Dakhova O.O., Bekkiyeva S.A., Hatefova S.B. (2018). Impact of the slurry pond of the Tyrnyauz Tungsten-Molybdenum Complex on the mountain territories environment. *Materials Science Forum*, vol. 931, pp. 1070-1075.

5. Tatarenko N.V., Pashtova L.R., Emuzova L.Z., Dakhova O.O. (2018). Utilization of solid household waste and environmental problems of impact on the environment (on the example of the KBR). *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya*, no. 12, ch. 2, pp. 385-389. (in Russian).

6. Dakhova O.O., Khuchunaev B.M., Kupovykh G.V. (2016). Chemical and physical pollution of urban ecosystems by motor transport. *Izv. vuzov. Sev.-Kavk. region. Estestv. nauki* (Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science), no. 4 (192), pp. 67-72. (in Russian).

7. Dakhova O. O. (2017). Monitoring of atmospheric air of city environment. *Bezopasnost' prirodopol'zovaniya v usloviyakh ustoichivogo razvitiya* [Environmental safety in the context of sustainable development]. Proceedings of the International Scientific and Practical Conference

(Irkutsk, September 25-29, 2017). Irkutsk, Irkutsk State University Press, pp. 94-101. (in Russian).

8. Dakhova O.O., Pashtova L.R., Tatarenko N.V., Sabanova R.K. (2017). Assessment of environmental development of the region. *Universitetskii nauch. sb.* Nalchik: Kabardino-Balkarian State University Press, no. 1, pp. 72-75. (in Russian).

9. Dakhova O.O., Pashtova L.R., Tatarenko N.V., Sabanova R.K. (2018). Some types of urban landscape pollution. *Universitetskii nauch. sb.* Nalchik: Kabardino-Balkarian State University Press, no. 2, pp. 53-58. (in Russian).

10. Prokuranov P.V., Chernov I.I. (1997). *Explanatory note to the set of geo-ecological maps of the North Caucasus scale 1: 1000000*. Essentuki, no. 2. 225 p. (in Russian).

11. Aksamentov E.V. (2002). *Information report on the results of geo-ecological mapping at the scale of 1: 500000 of ecologically unfavorable territories of the Central and Eastern part of the North Caucasus region (the territory of the Kabardino-Balkarian Republic)*. Nalchik, Kabardino-Balkarian State University Press. (in Russian).

12. Dakhova O.O. (2012). Assessment of the status of an urban-thropogenic landscapes. *Izv. KBNTs RAN*, no. 6 (50), pp. 77-81. (in Russian).

13. Uzdenova A.B., Kanametova F.E., Dakhova O.O., Tatarenko N.V., Miskarova R.G., Otarova A.S., Gergokova Z.Zh. (2019). Natural risks in landscape zones of the Kabardino-Balkarian Republic. *IOP Conference series. Materials of Scientific and Technical Conference*, vol. 663 (1), iss. 1, p. 1-1.

УДК 553.411 (571.65)

DOI 10.18522/1026-2237-2020-1-53-61

МИНЕРАЛЬНЫЕ АССОЦИАЦИИ ЗОЛОТОРУДНЫХ ПРОЯВЛЕНИЙ БЕРЕНТАЛЬСКОГО РУДНОГО ПОЛЯ (СЕВЕРО-ВОСТОК РОССИИ)

© 2020 г. Р.Н. Ивасенко¹, Ю.В. Попов², М.И. Фомина³, Т.И. Михалицына^{3,4}, Е.Д. Скильская⁵¹ООО «Золотодобывающая корпорация», Магадан, Россия,²Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, Россия,³Северо-Восточный комплексный научно-исследовательский институт ДВО РАН, Магадан, Россия,⁴Северо-Восточный государственный университет, Магадан, Россия,⁵Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, Россия

MINERAL ASSOCIATIONS OF GOLD-ORE OCCURENCES, BERENTAL ORE CLUSTER (NORTH-EAST OF RUSSIA)

R.N. Ivasenko¹, Yu.V. Popov², M.I. Fomina³, T.I. Mikhailitsyna³, E.D. Skilskaya⁴¹«Zolotodobyvayushchaya korporatsiya» LLC, Magadan, Russia,²Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia,³Shilo North-East Interdisciplinary Scientific Research Institute, FEB RAS, Magadan, Russia,⁴North-Eastern State University, Magadan, Russia,⁵Institute of Volcanology and Seismology, FEB RAS, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia

Ивасенко Руслан Николаевич – геолог, ООО «Золотодобывающая корпорация», ул. Пролетарская, 11, г. Магадан, 685000, Россия, e-mail: rivassenko@sfedu.ru

Ruslan N. Ivasenko - Geologist, «Zolotodobyvayushchaya korporatsiya» LLC, Proletarskaya St., 11, Magadan, 685000, Russia, e-mail: rivassenko@sfedu.ru

Попов Юрий Витальевич – кандидат геолого-минералогических наук, доцент, кафедра месторождений полезных ископаемых, Институт наук о Земле; руководитель Центра исследований минерального сырья и состояния окружающей среды, Южный федеральный университет, ул. Зорге, 40, г. Ростов-на-Дону, 344090, Россия, e-mail: popov@sfedu.ru

Yuri V. Popov - Candidate of Geology and Mineralogy, Associate Professor, Institute of Earth Sciences; Head of the Center of Research of Mineral Raw Materials and the State of Environment, Southern Federal University. Zorge St., 40, Rostov-on-Don, 344090, Russia, e-mail: popov@sfedu.ru

Фомина Марина Ивановна – кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник, директор музея естественной истории, Северо-Восточный комплексный научно-исследовательский институт им. Н.А. Шило ДВО РАН, ул. Портовая, 16, г. Магадан, 685000, Россия, e-mail: museum@neisri.ru

Marina I. Fomina - Candidate of Geology and Mineralogy, Researcher, Director of the Museum of Natural History, Shilo North-Eastern Interdisciplinary Scientific Research Institute, FEB RAS Portovaya St., 16, Magadan, 685000, Russia, e-mail: museum@neisri.ru

Михалицына Татьяна Ивановна – кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник, Северо-Восточный комплексный научно-исследовательский институт им. Н. А. Шило ДВО РАН, ул. Портовая, 16, г. Магадан, 685000; доцент, Северо-Восточный государственный университет, ул. Портовая, 14, г. Магадан, 685000, Россия, e-mail: tim_66@mail.ru

Tatiana I. Mikhailitsyna - Candidate of Geology and Mineralogy, Leading Researcher, Shilo North-Eastern Interdisciplinary Scientific Institute, FEB RAS, Portovaya St., 16, Magadan, 685000, Russia; Associate Professor, North-Eastern State University, Portovaya St., 14, Magadan, 685000, Russia, e-mail: tim_66@mail.ru

Скильская Елена Демьяновна – кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, бул. Пиипа, 9, г. Петропавловск-Камчатский, 683006, Россия, e-mail: wideworldscience@gmail.com

Elena D. Skilskaya - Candidate of Geology and Mineralogy, Senior Researcher, Institute of Volcanology and Seismology, FEB RAS, Piipa Boul., 9, Petropavlovsk-Kamchatsky, 683006, Russia, e-mail: wideworldscience@gmail.com

Берентальское прогнозируемое рудное поле (Магаданская область) объединяет ряд рудопроявлений и пунктов минерализации, различающихся минеральным составом, продуктивностью руд, особенностями вторичных и первич-

ных ореолов рассеяния. В результате исследования вещественного состава руд охарактеризованы минеральные ассоциации, установлены стадийность формирования рудопроявлений и зональность рудного поля. Выявлена связь пяти генетических групп самородного золота с рудными ассоциациями. Ключевые рудопроявления сформировались в течение нескольких стадий рудообразования, связанных с эволюцией единой гидротермальной системы. Ранняя минеральная ассоциация (арсенопирит-леллингитовая), содержащая первую генерацию золота, сформирована в условиях кварц-серцитовой фации березитов в контактовой части Берентальского штока и относится к нижнему уровню эрозионного среза. После образовались арсенопирит-теллуридная ассоциация в краевых гранитах и арсенопирит-галеновисмутитовая в приконтактной зоне, содержащие золото второй – четвертой генераций со следами перекристаллизации и диффузионных преобразований. На верхнем уровне эрозионного среза в кальцитсодержащих березитах с кварцевыми прожилками развиты арсенопирит-серебряная и пирит-серебряная рудные ассоциации, несущие низкопробное золото четвертой и пятой генераций. Продуктивная золоторудная минерализация Берентальского рудного поля связана с арсенопирит-теллуридной и арсенопирит-галеновисмутитовой ассоциациями, содержит золото с пробностью 750–945 ‰. Пространственное развитие минеральных ассоциаций согласуется с размещением вторичных и первичных ореолов рассеяния: комплексные ореолы Au-Bi-As природы сопутствуют арсенопирит-леллингитовой, арсенопирит-теллуридной и арсенопирит-галеновисмутитовой ассоциациям; для Au-As-Ag и Au-Ag-Pb-Zn отмечается сопряженность соответственно с арсенопирит-серебряной и пирит-серебряной ассоциациями.

Ключевые слова: золото-редкометалльное оруденение, золото-висмутитовое оруденение, минеральные ассоциации, эрозионный срез, теллуриды висмута, галеновисмутит, золото.

Berental prospective ore cluster (Magadan region) hosts a many ore occurrences, which differ in mineral composition, ore productivity, features of secondary and primary dispersion halos. As a result of the study of ores, mineral associations have been characterized, the stages of formation of ore occurrences and the alteration of the ore cluster have been established. The interrelation of five genetic types of native gold with mineral associations is revealed. Key ore occurrences have formed during several stages of ore formation associated with the evolution of a common hydrothermal system. The earliest mineral association (arsenopyrite-lellingite), which contains the first generation of gold, was formed in the quartz-sericite facies in marginal parts of Berental stock and refers to the lower level of erosion truncation. After that, arsenopyrite-telluride association was formed in the marginal granites and arsenopyrite-galenobismutite association was formed in the exomorphic zone, they contain gold of the second - fourth generations with signs of recrystallization and diffusion transformations. Arsenopyrite-silver and pyrite-silver ore associations are localized at the upper level of the erosion truncation in calcium-containing birch with quartz veins, these associations contain low-fineness gold of the fourth and fifth generations. Pay gold mineralization of the Berental ore field is associated with arsenopyrite-telluride and arsenopyrite-galenobismutite associations, contains gold with a fineness of 750-945 ‰. The spatial placement of mineral associations is consistent with the placement of secondary and primary scattering halos: complex Au-Bi-As halos accompany arsenopyrite-lellingite, arsenopyrite-telluride and arsenopyrite-galenobismutite associations; for Au-As-Ag and Au-Ag-Pb-Zn association there is a spatial conjugation with arsenopyrite-silver and pyrite-silver associations, respectively.

Keywords: IGRS, gold-bismuth mineralization, mineral associations, erosion truncation, bismuth tellurides, galenobismutite, gold.

Введение

Комплексное изучение золоторудных объектов с применением современных инструментальных методов изучения вещественного состава руд даёт основание для более детального анализа их потенциальной рудоносности. Актуальность таких подходов определяется необходимостью наращивания ресурсной базы рудного золота на фоне сокращающейся добычи россыпного золота в Магаданской области [1]. В связи с этим представляет интерес изучение плутоногенных золоторудных проявлений, перспективных в плане обнаружения малых месторождений золото-редкометалльной формации [2–4]. Одним из объектов, в рамках которого сосредоточены поиски на протяжении более двадцати пяти лет, являются Мякит-Хурчанский рудный узел и входящее в его состав Берентальское прогнозиру-

емое рудное поле, в частности. Берентальское рудное поле связано с Берентальским штоком Мякитского массива, прорывающего терригенные нижнетриасовые отложения в пределах северо-западного крыла Мякитской брахиантиклинали Буюдино-Балыгчанского поднятия. Шток относится к полифазному басугуньинскому комплексу. Основную площадь массива составляют нормальнощелочные натрий-калиевые среднекристаллические биотитовые граниты и гранодиориты (второй фазы комплекса). Среди гранитов и во вмещающих осадочных породах присутствуют дайки и силлы гранитов и гранит-порфиров (третьей фазы). Радиологический возраст пород комплекса, определённый на сопредельных территориях U-Pb методом по циркону [5], изменяется от $149,8 \pm 1,6$ до $157,0 \pm 2$ млн лет; Rb-Sr по меланократовым разновидностям пород – от 142 ± 3 до 166 ± 7 млн лет [6, 7] (т.е. от ран-

него мела до средней юры). $^{40}\text{Ar} - ^{39}\text{Ar}$ -датирование мусковита из Мякитского интрузива, давшее значение 141 млн лет [8], близко к верхним значениям Rb-Sr датировок и, видимо, фиксирует время метасоматической переработки. Метасоматические изменения связаны с грейзенизацией, наложенной на породы всех фаз [9], и развитием околорудных бескарбонатных кварц-серицитовых березитов в гранит-порфирах третьей фазы и гранитах штока второй фазы.

Золоторудные проявления в пределах рудного узла обнаружены в 1968 г. в ходе крупномасштабного картирования под руководством З.И. Литовченко (Ягоднинская партия СВГУ); впоследствии изучение рудных объектов осуществлялось сотруниками

СВКНИИ (В.В. Акинин, А.В. Волков, Г.Н. Гамянин, В.И. Гончаров, Н.А. Горячев, С.В. Жигалов, В.М. Кузнецов, И.С. Литвиненко, Т.И. Михалицына, Н.Е. Савва, А.А. Сидоров, Л.А. Соломенцева, М.И. Фомина и др.). В пределах прогнозируемого рудного поля в результате поисковых и поисково-оценочных работ, проведенных ГП «ГЕОС», ФГУП «Магадангеология», ООО «Золотодобывающая корпорация» (под руководством В.В. Бурзайкина, В.Н. Егорова, Г.Г. Вовненко, В.К. Романина, П.А. Шерстобитова, С.С. Юдина и др.) выделен ряд рудопоявлений золота (рис. 1), принципиально отличающихся по геологическому строению и параметрам рудных тел и, что важно, – по вещественному составу руд.

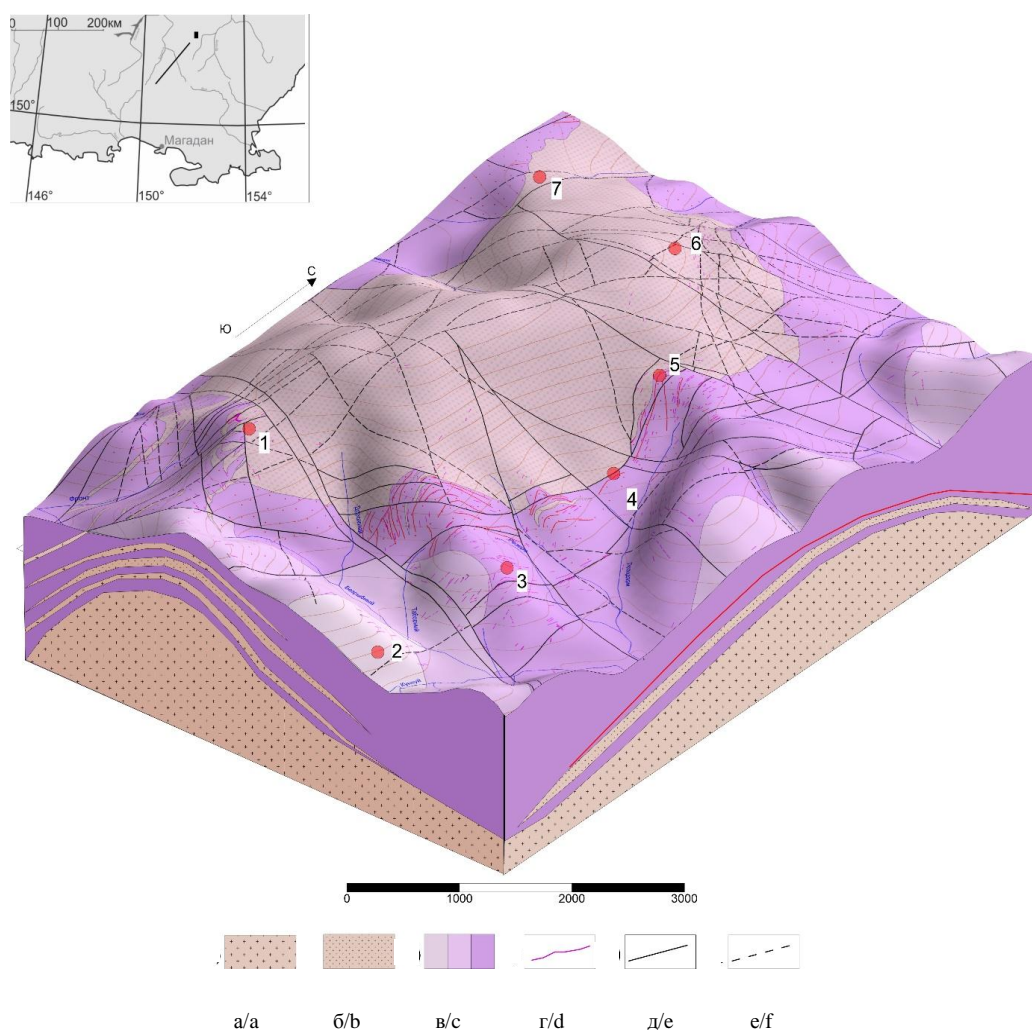


Рис. 1. Трехмерная геологическая схема Берентальского рудного поля: а – Берентальский шток, граниты басугуньинского комплекса; б – малые интрузии, гранит-порфиры басугуньинского комплекса; в – отложения халарской свиты позднего триаса; г – рудные тела; д – разрывные нарушения достоверные; е – разрывные нарушения предполагаемые; рудопоявления:

1 – Фронт; 2 – Кункуйское; 3 – Плацдарм-2; 4 – Плацдарм-1; 5 – Палатка; 6 – Берентал-Северный; 7 – Глобус

/ Fig. 1. 3D geological scheme of the Berentalskoye ore field: a - Berentalskoye stock, granites of basugun complex; b - small intrusions of granite of basugun complex; c - sedimentary rocks of the late Triassic; d - ore bodies; e - faults verified; f - faults inferred; ore occurrences: 1 - Front; 2 - Kunkuyское; 3 - Platsdarm-2; 4 - Platsdarm-1; 5 - Palatka; 6 - Berentalskoye-Severny; 7 - Globus

Рудопроявления по характеру локализации делятся на два основных типа – в пределах гранитоидных интрузий и в их экзоконтактах (рис. 1). Рудопроявления в пределах штока (Фронт, Глобус, Берентал-Северный) представляют собой зоны гидротермально-метасоматической проработки гранитов, выраженные в развитии кварц-серицитовой фации березитов вдоль тектонически ослабленных зон (Берентал-Северный) и в отходящих от штока пологих силлах (Глобус, Фронт). Мощность таких зон варьирует от десятка метров в силлах рудопроявления Фронт до первых десятков сантиметров в зонах сульфидно-кварцевого прожилкования рудопроявления Берентал-Северный. Породы пронизаны кварцевыми и сульфидно-кварцевыми прожилками и жилами мощностью до 0,3–0,4 м.

Рудопроявления второго типа (Кункуйское, Плацдарм-1, Плацдарм-2, Палатка) локализованы в ближнем пологом восточном экзоконтакте штока; характеризуются как зоны гидротермально-метасоматической проработки в тектонически ослабленной зоне разлома Восточный. Здесь прослежены по простирацию сульфидно-кварцевые минерализованные зоны дробления (мощностью до 1,5 м), вмещающие фрагменты более ранних тектонизированных сульфидно-кварцевых жил; содержание сульфидов в таких зонах достигает 20–50 %, содержание золота – до 28,73 г/т (и в единичном сечении по результатам бороздowego опробования – 43,88 г/т). Рудные интервалы сложены катаклазированными кварцевыми жилами с кварц-пирит-арсенопиритовым цементом и алевритами, пронизанными частыми тонкими прожилками кварца.

Материалы и методы исследований

Минеральные ассоциации вышеупомянутых рудопроявлений изучались методами оптической микроскопии и электронно-зондового микроанализа в Центре исследований минерального сырья и состояния окружающей среды Южного федерального университета, Северо-Восточном комплексном научно-исследовательском институте им. Н.А. Шило ДВО РАН, ООО «Золотодобывающая корпорация». Изучение формы и типов включений проводилось в лаборатории вулканогенного рудообразования Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН с помощью оптического микроскопа Nikon Eclipse LV 100 POL.

Для рудного и шлихового золота рудопроявлений Берентальского рудного поля характерно присутствие нескольких морфологических групп и генераций, различающихся внутренним микростроением и спектром элементов-примесей [9–13].

Как правило, в каждом рудопроявлении золотины характеризуются значительными вариациями пробности, связанными с пост- или интравидными преобразованиями, сопровождающимися перераспределением золота. При этом выделены пять генетических групп самородного золота, формирование которых в значительной мере связано с процессами диффузии и рекристаллизации в условиях изменения физико-химических параметров среды минералообразования и поступления новых порций гидротермальных растворов [14]. Первые генерации золота (генетические группы Au-1, Au-2) отмечаются на нижних уровнях эрозионного среза (рудопроявления Фронт, Глобус, Плацдарм). Золото средне-высокопробное (800–950 ‰), характеризующееся примесями меди, ртути и теллура, с признаками частичного замещения Au-1 → Au-2, выраженными в развитии Au-2 в межзерновых промежутках дезинтегрированного Au-1. Группа Au-3 характеризуется пробностью 750–945 ‰, относительно высокими содержаниями висмута, вольфрама, теллура и олова. Присутствует на рудопроявлениях Фронт и Плацдарм, где связано с арсенопирит-теллуридной минеральной ассоциацией. В агрегатах выявляется частичное замещение Au-3 → Au-4: более неоднородное и низкопробное Au-4 (620–740 ‰) заполняет межзерновые границы, а для раннего Au-3 характерны широкие диффузионные каймы. К весьма неоднородному золоту генетической группы Au-4 отнесено также коллоидное тонкопористое с эмульсионно-глобулярным строением золото, образовавшееся, видимо, из золото-мышьяковистых гелей, а также предположительно связанное с разложением золото-серебряных сульфидов [15] или мальдонита [13]. Для этой группы золота типичны присутствие теллура, висмута, мышьяка, платины, высокое содержание изоморфной примеси серебра. Оно широко распространено на рудопроявлениях Плацдарм и Глобус, присутствует на Берентале-Северном и Кункуйском. Au-5 связано с верхним уровнем эрозионного среза и наиболее низкотемпературными условиями, наиболее низкопробное (560–400 ‰), структурно однородное, содержит теллур, вольфрам, иногда мышьяк, свинец, висмут, сурьму, палладий. Отмечается замещение Au-4 → Au-5, при этом позднее золото выполняет прожилки между микроблоками комковидных золотин. Широко распространено на рудопроявлениях Плацдарм, Берентал-Северный, Кункуйское.

Дифференциация самородного золота по рудопроявлениям, имеющим разное положение в геологической структуре и отвечающим разным уровням эрозионного среза, требует более пристального рассмотрения связанных с ними рудоносных минеральных ассоциаций.

Результаты работы и их обсуждение

В пределах проявления Фронт присутствуют две золоторудные минеральные ассоциации, с которыми связаны два типа рудных тел и различающиеся сопутствующие геохимические поля [16]. *Арсенопирит-леллингитовая ассоциация* приурочена к зонами кварц-серицитовых безеритов по гранит-порфирам. Ведущими минералами этой ассоциации являются леллингит и находящийся в подчиненном по отношению к нему количестве арсенопирит. Крупно-среднекристаллические аллотриоморфно-зернистые леллингит и арсенопирит образуют сростания размером до 1 см, местами катаклазированные. Содержат микроскопические округлые включения пирротина, в арсенопирите также отмечаются микровключения самородного золота (до 20–150 мкм), эмульсионные вкрапления висмутита, самородного висмута. С этой ассоциацией связано характерное для рудопроявления Фронт зернистое средне-высокопробное [11, 14].

На рудопроявлении Фронт присутствует также более поздняя *арсенопирит-теллуридная ассоциация*, представленная в прожилках полупрозрачного дымчатого скрытокристаллического кварца в катаклазированных безеритах. Пространственно она частично совмещена с арсенопирит-леллингитовой, локализована в пределах разрывного нарушения субмеридионального простираения. Ведущим минералом ассоциации является аллотриоморфный крупнокристаллический арсенопирит, который образует сростания или корродируется сфалеритом (относящимся, соответственно, к двум генерациям) и ещё более поздним пиритом, окаймляющим сфалерит и заполняющим трещины по его плоскостям спайности. Халькопирит в составе ассоциации присутствует в виде редких мелких (до 0,5 мм) аллотриоморфных зерен в тесном сростании с арсенопиритом. В зернах арсенопирита отмечается вкрапленность теллуридов и сульфотеллуридов висмута размером 10–20 мкм, пирротина размером 10–30 мкм и золота размером 5–10 мкм, образующих тесную парагенетическую ассоциацию. В составе ассоциации описан также мальдонит, кристаллизовавшийся совместно с самородным золотом и минералами висмута, впоследствии замещенного высокопробным [17]. С этой ассоциацией связано преимущественно среднепробное (с широкой вариацией пробности в интервале ~750 до 945 ‰) с выраженными диффузионными преобразованиями золота, относящиеся к группам Au-2 и Au-3 [11, 14]. Значительная часть золота связана с силикатными породами и находится в тонкодисперсной форме [13].

Арсенопирит-галеновисмутитовая минеральная ассоциация присутствует на рудопроявлениях

Плацдарм-1, Плацдарм-2 и Глобус. На проявлениях Плацдарм-1 и 2 она локализована в прожилках светло-серого скрытокристаллического кварца среди осадочных пород, тектонически проработанных разломом субмеридионального простираения (рудная зона Восточная). На проявлении Глобус – в силлах карбонатсодержащих березитизированных гранит-порфириров, где частично совмещена с арсенопирит-теллуридной ассоциацией. Арсенопирит-галеновисмутитовая ассоциация сходна с арсенопирит-теллуридной, отличаясь заменой теллуридов висмута галеновисмутитом. Ведущим минералом ассоциации является арсенопирит, содержащий включения галенита, сфалерита и пирита размером 50–150 мкм, а также ещё более мелкие, размером 10–25 мкм, фазы галеновисмутита, самородного висмута и золота. Галеновисмутит размещается также в пустотах в арсенопирите. Позднее арсенопирита кристаллизовались образующие сростания (обычно без реакционных взаимоотношений) пирит, галенит и сфалерит. Отмечается заполнение микротрещин в раздробленных крупных кристаллах арсенопирита кварцем и галенитом. В ряде случаев отмечено развитие галенита по тонким (до 10 мкм) трещинам в пирите. В аллотриоморфных зернах сфалерита (имеющих размер до 1 мм) отмечается эмульсионная вкрапленность халькопирита размером до 10 мкм, образованная за счет распада твёрдого раствора; при этом концентрация микрофаз халькопирита отмечается в центральной части, а краевые части практически лишены продуктов распада. Золото в сростаниях с самородным висмутом и галеновисмутитом образует ксеноморфные вкрапленники в арсенопирите и встречается в трещинах арсенопирита. В единичном крупном (~0,6 мм) зерне золота отмечены вкрапленники галеновисмутита. Вероятнее всего, эта ассоциация сменяет арсенид-теллуридную на более высоких уровнях эрозионного среза. На рудопроявлениях Плацдарм-1, Плацдарм-2, где развита эта ассоциация, наряду с характерным для арсенопирит-теллуридной ассоциации Au-2 и Au-3, присутствует и относительно низкопробное золото (600–750 ‰) [10, 11], соответствующее генерации Au-4. В качестве микровключений в золоте установлены серебро, галенит, интерметаллид Au-Ag-Pb, ютенбогаардит, прустит [10].

Арсенопирит-леллингитовая минеральная ассоциация выступает аналогом описанной в пределах рудного поля сульфидно-арсенидной и сульфидно-сульфоарсенидной [15] ассоциаций; арсенопирит-теллуридная и арсенопирит-галеновисмутитовая ассоциации – сульфотеллуридно-висмутовой [15] или мальдонит-золото-сульфотеллуридной [17], но без разделения на две ассоциации.

Арсенопирит-серебряная минеральная ассоциация развита в пределах рудопроявлений Кункуйское, Берентал-Северный и Палатка. Ведущим рудным минералом является мелкозернистый (до 0,2 мм) арсенопирит, сростания аллотриоморфных зерен которого с идиоморфными кристаллами пирита образуют гнезда. В ассоциации также присутствует более ранний крупнозернистый арсенопирит, который содержит тонкие включения висмутита и пирита размером 20 мкм. Часто кристаллы раннего арсенопирита катаклазированы, микротрещины в них выполнены кварцем или гидроокислами железа, заключающими сростки акантита, висмутита, самородного серебра и золота. Золото размером 30–60 мкм отмечается в арсенопирите, гидроокислах железа и в кварце, в единичных случаях – в сростках с акантитом по периферии самородного золота. Редко встречается самородное серебро в виде отдельных вкрапленников в пирите размером 10–50 мкм.

Пирит-серебряная минеральная ассоциация, развитая в пределах рудопроявления Берентал-Северный, связана с тектонически рассланцованными кварцевыми прожилками, вдоль которых развиты кальцитсодержащие березиты, в которых сульфидная минерализация локализована вдоль микротрещин и зальбандов, придавая им местами полосчатую микротекстуру с неравномерной вкрапленностью рудных минералов. Ведущим минералом выступает пирит, гипидиоморфные кри-

сталлы которого часто раздроблены и образуют сростания с аллотриоморфными галенитом, сфалеритом, мелкозернистым арсенопиритом и халькопиритом. В галените отмечаются редкие круглые включения сфалерита. В сфалерите присутствует эмульсионная вкрапленность халькопирита. Часть тончайших микротрещин заполнена пылевидной неравномерной вкрапленностью минералов серебра. Тонкая вкрапленность пирротина, галенита, акантита, пираргирита, самородного серебра и золота присутствует и в пирите. Катаклазированные зерна пирита по трещинам залечены гидроокислами железа. Связанное с этими ассоциациями золото имеет наименьшую пробытность (~400–650 ‰), локализовано в пирите в ассоциации с микровыделениями пирротина, галенита, пираргирита и куранахита. Его образование происходило за счет преобразования золота более ранних генераций, разложения золото-серебряных сульфидов, а также частично в процессе отложения непосредственно из коллоидных растворов («горчичное золото») [10, 14].

Представленные ассоциации хорошо согласуются с результатами геохимической интерпретации результатов опробования вторичных и первичных ореолов рассеяния [16, 18]: для рудопроявлений Фронт, Глобус, Плацдарм-1 и Плацдарм-2 геохимические поля отвечают Au-As-Bi-ассоциации, для рудопроявлений Плацдарм-2 и Кункуйское – Au-As-Ag, для рудопроявления Берентал-Северный – Au-Ag-Pb-Zn-ассоциации.

	Арсенопирит-леллингитовая	Арсенопирит-теллуридная	Арсенопирит-галеновисмутитовая	Арсенопирит-серебряная	Пирит-серебряная	Гипергенная
Леллингит	▨	—				
Арсенопирит-1	▨	▨				
Арсенопирит-2				▨		
Пирит		—			▨	
Пирротин			—			
Халькопирит		—				
Сфалерит		—			▨	
Галенит		—				
Висмутин	—					
Теллурид висмута		—				
Самородный висмут	—					
Галеновисмутит			—			
Серебро			—			
Акантит			—			
Молибденит					—	
Антимонит	—					
Марказит				—	—	
Мельниковит		—				
Ковелин				—		
Церуссит					—	
Сульфосоли Ag		—				
Мальдонит		—				
Лимонит						—
Скородит						—
Золото (1-5)	1	2	3	4	5	

Рис. 2. Минерагеническая схема Берентальского рудного поля / Fig. 2. Mineralogical scheme of the Berental ore field

Апикальной части Берентальского штока – вскрытым на современном уровне эрозионного среза наиболее низким рудоносным горизонтам – соответствуют области развития арсенопирит-леллингитовой и арсенопирит-теллуридной минеральных ассоциаций (рудопроявление Фронт). В периферической зоне интрузии находятся рудопроявления с арсенопирит-галеновисмутитовой минеральной ассоциацией. Высокие уровни эрозионного среза характеризуются рудопроявлениями пирит-серебряной и арсенопирит-серебряной ассоциаций. В целом описанная зональность согласуется с общепринятой схемой зональности плутоногенных гидротермальных месторождений золота [9, 16].

Установленная последовательность образования и пространственной локализации золотосодержащих минеральных ассоциаций, стадийность формирования групп золота и их приуроченность к конкретным минеральным ассоциациям позволяют сформулировать представления о закономерностях образования продуктивных минеральных ассоциаций Берентальского прогнозируемого рудного поля. На ранней стадии происходило формирование золоторудной арсенопирит-леллингитовой ассоциации на участках высокотемпературной березитизации гранитоидов. Поступление следующей порции растворов по отдельным проницаемым разломам (преимущественно субмеридиональной ориен-

тировки) привело к формированию в гранитоидах арсенопирит-теллуридной минеральной ассоциации и существенным диффузионным преобразованиям золота. Формирование этих ассоциаций происходило в высокотемпературных гидротермальных условиях, что согласуется с приуроченностью к фации кварц-серицитовых березитов (образующихся при температурах выше 320 °С [19]) и присутствием в кварцах рудных тел обильных существенно газовых флюидных включений (размером 5–20 мкм), в которых газовый пузырек занимает от 50–70 до практически 99 об. %. Наряду с существенно газовыми включениями в кварце рудоносных жил участка Фронт присутствуют газожидкие водные включения относительно небольшого размера (до 10–12 мкм) с газовым пузырьком объемом от 1–2 до 30 об. %, локализованные обособленно от других включений и имеющие, как правило, четкие формы негативных кристаллов кварца и многофазные включения (размером 14–30 мкм, рис. 3). Из поступивших в породы экзоконтакта более низкотемпературных растворов образована арсенопирит-галеновисмутитовая ассоциация. В кварцах рудопроявления Плацдарм-1 флюидные включения более мелкие (менее 14 мкм), преимущественно газожидкие обводненные; существенно газовые присутствуют, но пользуются резко подчиненным распространением.

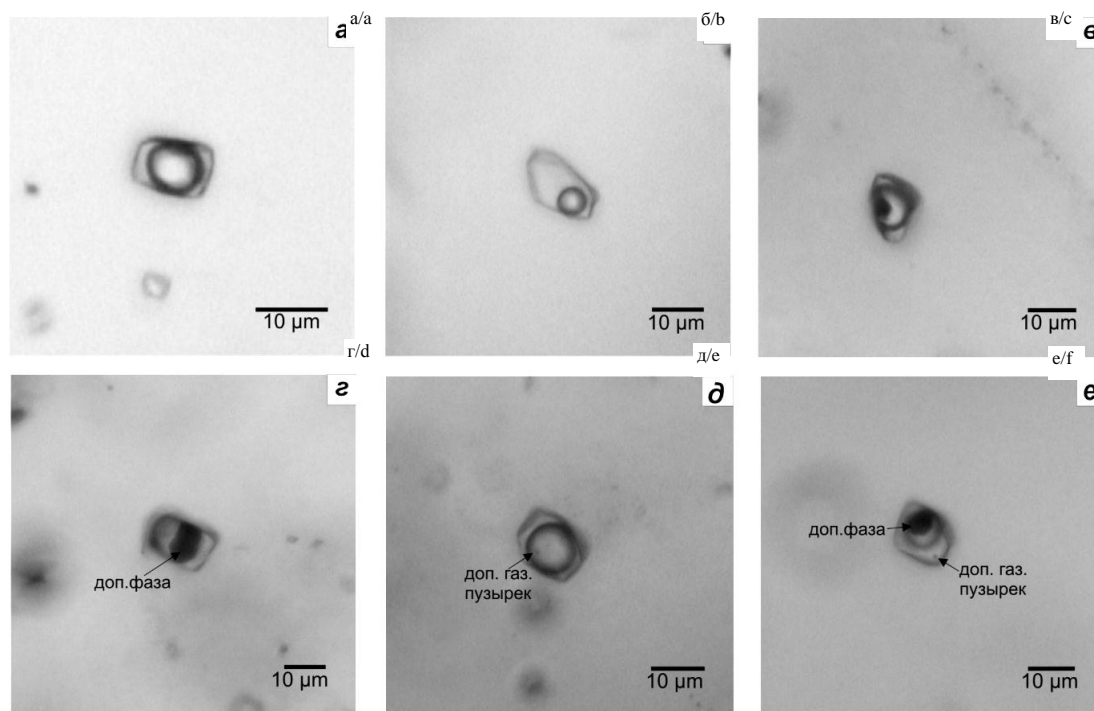


Рис. 3. Флюидные включения рудоносных кварцев: рудопроявления Фронт (а, б); рудопроявления Плацдарм-1 (в, г); рудопроявления Берентал-Северный (д, е) / Fig. 3. Fluid inclusions of ore-bearing quartz: ore manifestations Front (a, b); ore manifestations Platsdarm-1 (c, d); ore manifestations Berental-Severny (e, f)

На верхних (наиболее низкотемпературных) уровнях в тектонически ослабленных зонах как в пределах интрузии на севере штока, так и в осадочных породах на фоне понижающейся роли мышьяка и висмута и увеличения роли серебра (в том числе выносимого в ходе преобразования золота и разложения золото-серебряных сульфидов) происходило формирование арсенопирит-серебряной и пирит-серебряной минеральных ассоциаций.

В кварцах рудопоявления Берентал-Северный флюидные включения редки, наиболее мелкие (порядка 5–8 мкм), при этом газово-жидкие водные включения значительно преобладают в распространении над существенно газовыми.

Продуктивная золоторудная ассоциация развита на рудопоявлениях Фронт и Плацдарм-1, в пределах которых локализованы арсенопирит-теллуридная и арсенопирит-галеновисмутитовая ассоциации, приуроченные к нижним уровням современного эрозийного среза Берентальского штока.

Литература

1. Ван-Ван-Е А.П., Литвинцев В.С., Секисов Г.В. Состояние и развитие ресурсного потенциала золото-добывающей отрасли ДФО // Горный информационно-аналит. бюл. 2009. № 12. С. 32–37.
2. Волков А.В., Савва Н.Е., Сидоров А.А. О плутоногенных месторождениях тонкодисперсного золота Северо-Востока России // Докл. РАН. 2007. Т. 412, № 1. С. 76–80.
3. Гамянин Г.Н., Горячев Н.А., Бахарев А.Г., Колесниченко П.П., Зайцев А.И., Диман Б.Н., Бердников Н.В. Условия зарождения и эволюции гранитоидных золото-магматических систем в мезозоидах Северо-Востока Азии. Магадан: СВКНИИ ДВО РАН, 2003. 196 с.
4. Горячев Н.А. Геология мезозойских золото-кварцевых жильных поясов Северо-Востока Азии. Магадан: СВКНИИ ДВО РАН, 1998. 210 с.
5. Акинин В.В., Прокопьев А.В., Торо Х., Миллер Э.Л., Буден Дж., Горячев Н.А., Альшевский А.В., Бахарев А.Г., Трунилина В.А. U-Pb-SHRIMP-возраст гранитоидов Главного батолитового пояса (Северо-Восток Азии) // Докл. РАН. 2009. Т. 426, № 2. С. 111–116.
6. Котляр И.Н. Золотосеребряная рудоносность вулканоструктур Охотско-Чукотского пояса. М.: Наука, 1986. 263 с.
7. Котляр И.Н., Жуланова И.Л., Русакова Т.Б., Гагиева А.М. Изотопные системы магматических и метаморфических комплексов Северо-Востока России. Магадан: СВКНИИ ДВО РАН, 2001. 319 с.
8. Ньюберри Р.Дж., Лейер П.У., Ганз П.Б., Гончаров В.И., Горячев Н.А., Ворошин С.В. Предварительный анализ хронологии мезозойского магматизма и оруденения на Северо-Востоке России с учетом датировок $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ и данных по рассеянным элементам изверженных и оруденелых пород // Золотое орудене-

ние и гранитоидный магматизм Северной Пацифики. Магадан: СВКНИИ ДВО РАН, 2000. Т. 1. С. 181–205.

9. Кузнецов В.М., Горячев Н.А., Жигалов С.В., Савва Н.Е. Структура и рудоносность Мякит-Хурчанского рудно-рассыпного узла // Вестн. СВНЦ ДВО РАН. 2011. № 4. С. 37–51.

10. Литвиненко И.С., Шилина Л.А. Типоморфизм самородного золота золото-редкометалльного рудопоявления Берентал (Северо-Восток России) // Вопросы геологии и комплексного освоения природных ресурсов Восточной Азии. Благовещенск: ИГиП ДВО РАН, 2018. Т. 1. С. 122–125.

11. Позднякова Н.Н. Внутреннее строение самородного золота Берентальского рудного поля (Яно-Колымский золотоносный пояс) // Современные проблемы теоретической, экспериментальной и прикладной минералогии. Сыктывкар, 2016. С. 54–55.

12. Савва Е.Н., Парфенов М.И., Комина В.И. Генетическая природа бимодального распределения пробыности шлихового золота россыпи руч. Плацдарм (южные отроги Мякитского интрузива) // Геодинамика, магматизм и минералогия континентальных окраин севера Пацифики. Магадан: СВКНИИ ДВО РАН, 2003. Т. 3. С. 132–135.

13. Соломенцева Л.А., Литвиненко И.С. Типоморфизм самородного золота золото-редкометалльного рудного проявления Фронт (Северо-Восток России) // Вестн. Северо-Восточного научного центра ДВО РАН. 2015. № 2. С. 28–39.

14. Позднякова Н.Н., Ивасенко Р.Н., Роднов Ю.Н., Попов Ю.В. Типоморфизм самородного золота рудопоявлений Берентальского рудного поля, Магаданская область // Руды и металлы. 2019. № 3. С. 61–71.

15. Горячев Н.А., Колесниченко П.П. Граниты и грейзены Мякитского интрузива как пример локальной рудно-магматической системы // Рудно-магматические системы Северо-Востока СССР. Хабаровск: ХПИ, 1990. С. 41–53.

16. Ивасенко Р.Н., Хасанов И.М. Геолого-геохимические параметры продуктивного золотого оруденения участка Фронт (эндоконтат Берентальского штока, Магаданская область) // Успехи современного естествознания. 2019. № 5. С. 58–63.

17. Литвиненко И.С., Соломенцева Л.А. Мальдонит в золото-редкометалльных проявлениях Мякит-Хурчанского рудно-рассыпного узла (Северо-Восток России) // Вестн. ДВО РАН. 2015. № 2. С. 68–78.

18. Ивасенко Р.Н., Грановский А.Г. Геохимические поисковые признаки золотого оруденения Берентальского прогнозируемого рудного поля, Магаданская область // Инновационные перспективы Донбасса : материалы 4-й Междунар. научн. конф. Донецк, 2018. С. 15–19.

19. Абрамов С.С., Андреева О.В., Жариков В.А., Зарайский Г.П., Маракушев А.А., Омеляненко Б.И., Перцев Н.Н., Подлесский К.В., Расс И.Т., Русинов В.Л. Метасоматизм и метасоматические породы / ред. В.А. Жариков и В.Л. Русинов. М.: Научный мир, 1998. 492 с.

References

1. Van-Van-E A.P., Litvintsev V.S., Sekisov G.V. (2009). State and development of the resource potential of the gold mining industry of the far Eastern Federal district. *Gornyi informatsionno-analiticheskiy byulleten'*, no. 12, pp. 32-37. (in Russian).
2. Volkov A.V., Savva N.E., Sidorov A.A. (2007). About plutogenic deposits of fine-graded gold of the North-East of Russia. *Doklady Akademii nauk*, vol. 412, no. 1, pp. 76-80. (in Russian).
3. Gamyarin G.N., Goryachev N.A., Bakharev A.G., Kolesnichenko P.P., Zaitsev A.I., Diman B.N., Berdnikov N.V. (2003). *Conditions of origin and evolution of granitoid gold-magmatic systems in mesozoics of North-East Asia*. Magadan, North-Eastern Integrated Research Institute Press, Far Eastern Scientific Center, Russian Academy of Sciences, 196 p. (in Russian).
4. Goryachev N.A. (1998). *Geology of mesozoic gold quartz vein belts in North-East Asia*. Magadan, North-Eastern Integrated Research Institute Press, Far Eastern Scientific Center, Russian Academy of Sciences, 210 p. (in Russian).
5. Akinin V.V., Prokopiev A.V., Toro H., Miller E.L., Buden Dzh., Goryachev N.A., Alshevsky A.V., Bakharev A.G., Trulilina V.A. (2009). U-Pb-SHRIMP age of granitoids of the Main batholithic belt (North-East Asia). *Dokl. RAN*, vol. 426, no. 2, pp. 111-116. (in Russian).
6. Kotlyar I. N. (1986). *Gold-silver ore-bearing of volcanic structures of the Okhotsk-Chukotka belt*. Moscow, Nauka Publ., 263 p. (in Russian).
7. Kotlyar I. N., Zhulanova I. L., Rusakova T. B., Gagieva A. M. (2001). *Isotopic systems of magmatic and metamorphic complexes of the North-East of Russia*. Magadan, North-Eastern Integrated Research Institute Press, Far Eastern Scientific Center, Russian Academy of Sciences, 319 p. (in Russian).
8. Newberry R.J., Leyer P.U., Hansa P.B., Goncharov V.I., Goryachev N.A., Voronin S.V. (2000). Preliminary analysis of the chronology of Mesozoic magmatism and mineralization in the North-East of Russia taking into account $40\text{Ar}/39\text{Ar}$ dates and data on trace elements of igneous and mineralized rocks. *Zolotoe orudnenie i granitoidnyi magmatizm Severnoi Patsifiki* [Gold mineralization and granitoid magmatism of Northern Pacifica]. Magadan, North-Eastern Integrated Research Institute Press, Far Eastern Scientific Center, Russian Academy of Sciences, vol. 1, pp. 181-205. (in Russian).
9. Kuznetsov V.M., Goryachev N.A., Zhigalov S.V., Savva N.E. (2011). Structural setting and ore minerals of the Myakit-Khurchan mineral district. *Vestnik SVNTs DVO RAN*, no. 4, pp. 37-51. (in Russian).
10. Litvinenko I.S., Shilina L.A. (2018). Typomorphism of native gold of IGRS Berental ore lode (North-East of Russia). *Voprosy geologii i kompleksnogo osvoeniya prirodnikh resursov Vostochnoi Azii* [Questions of geology and complex development of natural resources of East Asia]. Blagoveshchensk, Institute of Geology and Nature Management Press, Far Eastern Scientific Center, Russian Academy of Sciences, vol. 1, pp. 122-125. (in Russian).
11. Pozdnyakova N.N. (2016). The internal structure of native gold of the Berental ore field (Yano-Kolyma gold-bearing belt). *Sovremennye problemy teoreticheskoi, eksperimental'noi i prikladnoi mineralogii* [Modern problems of theoretical, experimental and applied mineralogy]. Syktyvkar, pp. 54-55. (in Russian).
12. Savva E.N., Parfenov M.I., Komina V.I. (2003). The genetic nature of the bimodal distribution of the gold fineness in Platsdarm creek plaser (South marginal part of Myakit batholith). *Geodinamika, magmatizm i minerageniya kontinental'nykh okrain Severa Patsifiki* [Geodynamics, magmatism and mineralogy of the continental margins of the North of Pacifica]. Magadan, North-Eastern Integrated Research Institute Press, Far Eastern Scientific Center, Russian Academy of Sciences, vol. 3, pp. 132-135. (in Russian).
13. Solomentseva L.A., Litvinenko I.S. (2015). Native gold typomorphism at the Front Au lode, North-East of Russia. *Vestnik Severo-Vostochnogo nauchnogo tsentra DVO RAN*, no. 2, pp. 28-39. (in Russian).
14. Pozdnyakova N.N., Ivashenko R.N., Rodnov Yu.N., Popov Yu.V. (2019). Native gold typomorphism at Berental ore field mineral occurrences, Magadan region. *Rudy i metally*, no. 3, pp. 61-71. (in Russian).
15. Goryachev H.A., Kolesnichenko P.P. (1990). Granites and greisens of the Myakit batholith as an example of a local ore-magmatic system. *Rudno-magmaticheskie sistemy Severo-Vostoka SSSR* [Ore-magmatic systems of the North-East of the USSR]. Khabarovsk, Khabarovsk Border Institute Press, pp. 41-53. (in Russian).
16. Ivashenko R.N., Khasanov I.M. (2019). Geological and geochemical parameters of productive gold mineralization Front gold ore occurrence (endocontact of the Berental stock, Magadan region). *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya*, no. 5, pp. 58-63. (in Russian).
17. Litvinenko I.S., Solomentseva L.A. (2015). Maldonite in the IGRS Myakit-Khurchan ore cluster (North-East of Russia). *Vestnik DVO RAN*, no. 2, pp. 68-78. (in Russian).
18. Ivashenko R.N., Granovsky A.G. (2018). Geochemical prospecting indicators of gold mineralization Berental ore cluster, Magadan region. *Innovatsionnye perspektivy Donbassa* [Innovative perspectives of Donbass]. Materials of the 4th International Scientific Conference. Donetsk, pp. 15-19. (in Russian).
19. Abramov S.S., Andreeva O.V., Zharikov V.A., Zaraisky G.P., Marakushev A.A., Omelyanenko B.I., Pertsev N.N., Podlesskii K.V., Rass I.T., Rusinov V.L. (1998). *Metasomatism and metasomatic rocks*. V.A. Zharikov, V.L. Rusinov (Eds.). Moscow, Nauchnyi mir Publ., 492 p. (in Russian).

УДК 551.583

DOI 10.18522/1026-2237-2020-1-62-70

ИЗМЕНЕНИЕ НЕКОТОРЫХ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ В БАССЕЙНЕ АЗОВСКОГО МОРЯ

© 2020 г. О.В. Назаренко¹¹Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, Россия

VARIABILITY OF SOME METEOROLOGICAL PARAMETERS IN THE BASIN OF AZOV SEA

O.V. Nazarenko¹¹Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia

Назаренко Олеся 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: ovnazarenko@sfnu.ru

Olesya V. Nazarenko - 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: ovnazarenko@sfnu.ru

Представлены результаты исследований тенденций изменчивости температуры и осадков в бассейне Азовского моря. Территория является важным аграрным и индустриальным районом, природа которого претерпела серьезные изменения. В работе рассматривается изменение температуры и осадков по метеостанциям, расположенным преимущественно в степной зоне. Проведен анализ как многолетних данных, так и за период 2001–2015 гг. Необходимо отметить, что за последние 15–20 лет произошли значительные изменения особенностей климата. Дан сравнительный анализ изменений как в годовом срезе, так и по сезонам. Установлена устойчивая тенденция к потеплению. Выявлено повышение годовых температур на 0,4–2,8 °С, январских – на 2,6–3,1 и июльских на 0,7–2,1 °С. Изучение температуры воздуха по сезонам показало, что зима стала теплее на 1,1 (Краснодар) – 5,8 °С (Гигант). Меньше всего изменилась температура летом в Урюпинске и Фролово (0,8–0,9 °С), больше всего – в Краснодаре (2,2 °С). Тенденция изменения осадков выражена менее отчетливо. Отмечается увеличение количества выпавших осадков в зимний и осенний периоды. Весной количество осадков увеличивается по всем исследуемым станциям, за исключением Воронежа и Чертково. Летом изменение осадков носит сложный характер. Преобладает уменьшение осадков (Воронеж, Краснодар, Матвеев Курган, Таганрог, Гигант, Фролово, Цимлянск), отмечено небольшое увеличение (Чертково, Армавир, Ростов, Урюпинск и Ремонтное).

Ключевые слова: изменение климата, осадки, температура воздуха, степь, бассейн Азовского моря.

The results of research of trends in temperature and precipitation variability in the Azov sea basin are presented. The territory is an important agricultural and industrial area, the nature of which has undergone major changes. The paper considers changes in temperature and precipitation at stations located mainly in the steppe zone. The analysis of both long – term data and for the period 2001-2015 is carried out. Over the past 15-20 years there have been significant changes in climate features. A comparative analysis of annual and season changes is given. A steady warming trend has been established. An increase in annual temperatures by 0.4-2.8 °C, January - by 2.6-3.1 °C and July - by 0.7-2.1 °C. The study of air temperature by season showed that winter become warmer by 1.1 (Krasnodar) - 5.8 °C (Gigant). The temperature changed the least in summer in Uryupinsk and Frolovo (0.8-0.9 °C), the most in Krasnodar (2.2 °C). The precipitation trend is less noticeable. There is an increase in the amount of precipitation in the winter and autumn periods. In the spring the amount of precipitation increases for all the stations under investigation, with the exception for Voronezh and Chertkovo. In summer precipitation changes complicatedly. A decrease in precipitation prevails (Voronezh, Krasnodar, Matveev Kurgan, Taganrog, Gigant, Frolovo, Tsimlyansk) and a slight increase (Chertkovo, Armavir, Rostov, Uryupinsk, and Remontnoye).

Keywords: climate change, precipitation, temperature, steppe, basin of Azov Sea.

В настоящее время изучение климатических изменений активно проводится как в России, так и в мире [1–16]. Подробная характеристика основных климатообразующих факторов, климатических районов, а также оценка изменения климата на территории Ростовской области приводятся в [5–7]. Интерес вызывают не только сами изменения метеорологических показателей, но и последствия, к которым они приводят в сельском и лесном, жилищно-коммунальном хозяйстве, рекреационном комплексе и др.

Бассейн Азовского моря расположен на юге европейской части России и включает в себя бассейны рек Дона и Кубани. В данной работе основное внимание уделено анализу изменения температуры и осадков по метеостанциям, расположенным в бассейне Азовского моря. Опорные станции расположены в разных ландшафтных зонах: лесостепь (Воронеж), степь умеренно засушливая (Чертково, Краснодар, Армавир), степь засушливая (Матвеев Курган, Таганрог, Ростов, Гигант), степь сухая

(Урюпинск, Фролово, Цимлянск), полупустыня (Ремонтное).

Анализ изменений температуры и осадков выполнен на основе [10–12], были использованы суточные и средние месячные данные наблюдений по метеостанциям за период с 1966 по 2018 г. из архива ВНИИГМИ-МЦД [11, 12]. Средние температуры воздуха за месяц, год и сезон высчитывались путем осреднения данных. Абсолютные минимальные и максимальные значения температур выявлялись на основе суточных данных.

Результаты исследований

Для европейской территории России хорошо прослеживается изменение статистических характеристик температуры. В представленном исследовании анализировались данные суточных температур 12 метеостанций, которые располагаются преимущественно в степной зоне (табл. 1).

Таблица 1

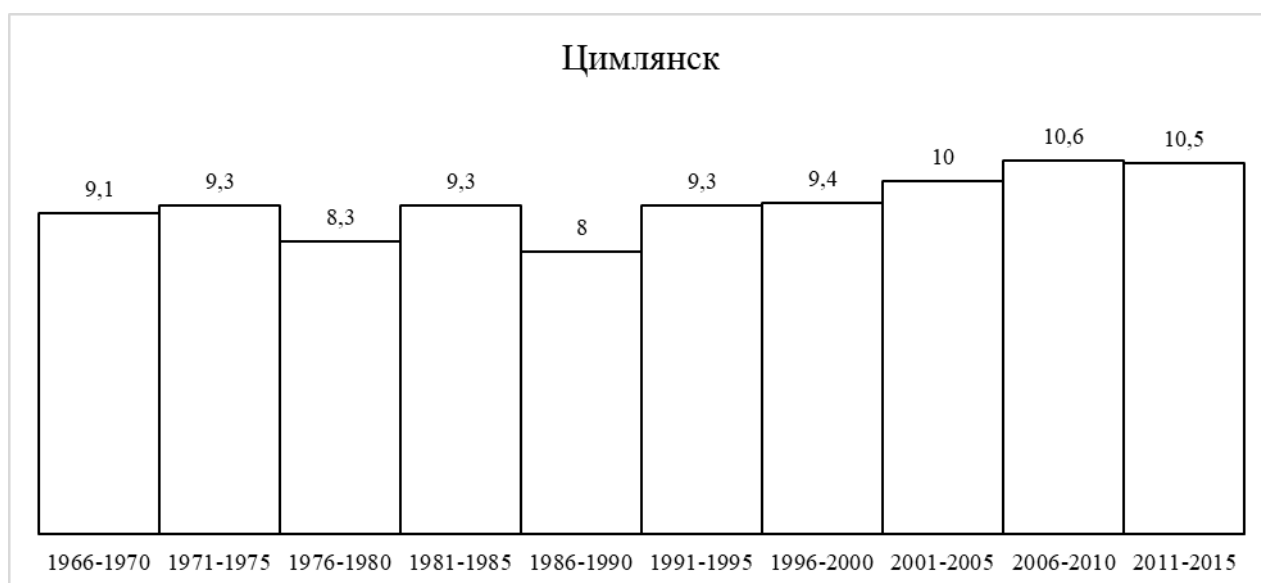
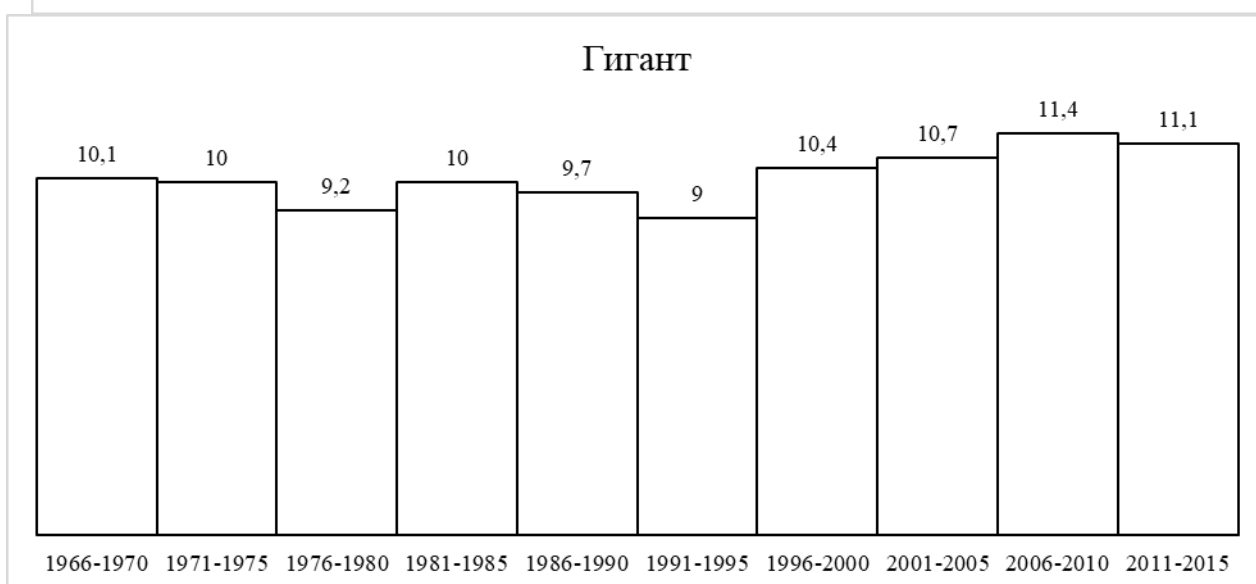
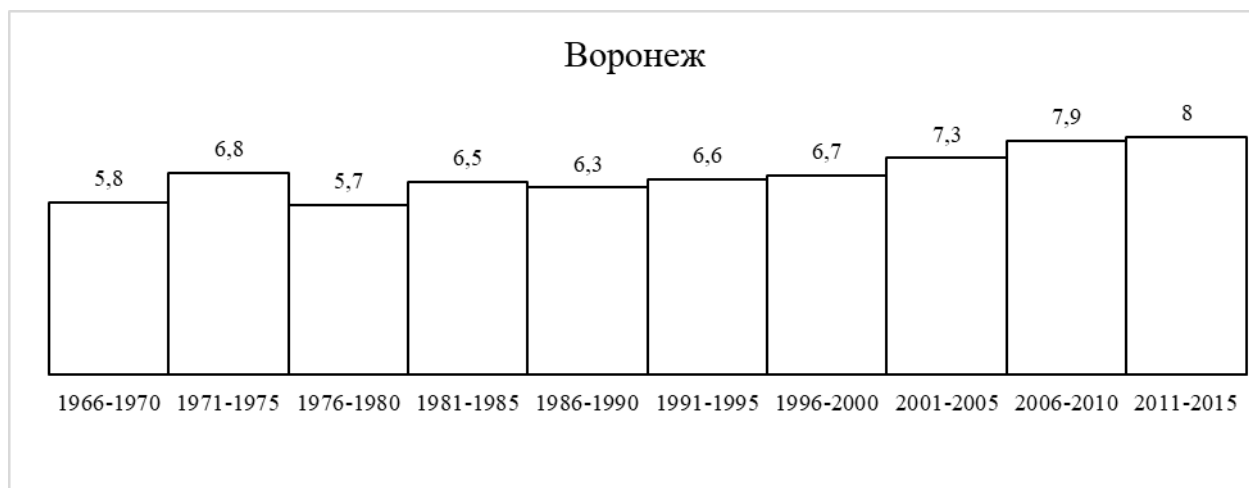
Среднемесячная температура воздуха / Average monthly air temperature

Опорная станция	Температура воздуха, °С			Ландшафт
	Год	Январь	Июль	
Воронеж	4,9	–9,2	21,7	Лесостепь
Чертково	6,7	–8,4	21,7	Степь умеренно засушливая
Краснодар	10,8	–1,8	23,2	
Армавир	9,9	–3,4	22,7	
Среднее	9,1	–4,5	22,5	
Матвеев Курган	8,5	–5,7	22,8	Степь засушливая
Таганрог	9,1	–5,4	23,5	
Ростов	8,7	–5,7	22,9	
Гигант	9,0	–5,5	23,5	
Среднее	8,8	–5,6	23,2	Степь сухая
Урюпинск	6,1	–9,8	21,6	
Фролово	6,3	–10,0	22,6	
Цимлянск	8,2	–7,0	23,4	
Среднее	6,9	–8,9	22,5	Полупустыня
Ремонтное	8,4	–6,6	23,6	

С 70-х гг. XX в. наблюдается монотонное поднятие температуры воздуха. 2007, 2002, 2005 и 2004-й стали самыми теплыми годами не только для России, но и Северного полушария и земного шара в целом [1].

Многолетнее распределение температуры воздуха (средней за 5 лет) показало преобладание положительных трендов, что подтверждает стабильное повышение среднегодовых значений температуры воздуха. Период с 1976 по 1980 г. харак-

теризуется понижением температуры по всем метеостанциям – от 0,3 (Краснодар) до 1,1 °С (Воронеж). Наибольшее отклонение от многолетних данных отмечается для города Воронежа и составляет 3 (2006–2010 гг.) – 3,1 °С (2011–2015). Для остальных метеостанций отклонение от многолетних данных составило 2–2,4 °С и приходится на тот же период. Таким образом, наибольшие значения повышения температуры характерны для г. Воронежа (рис. 1).



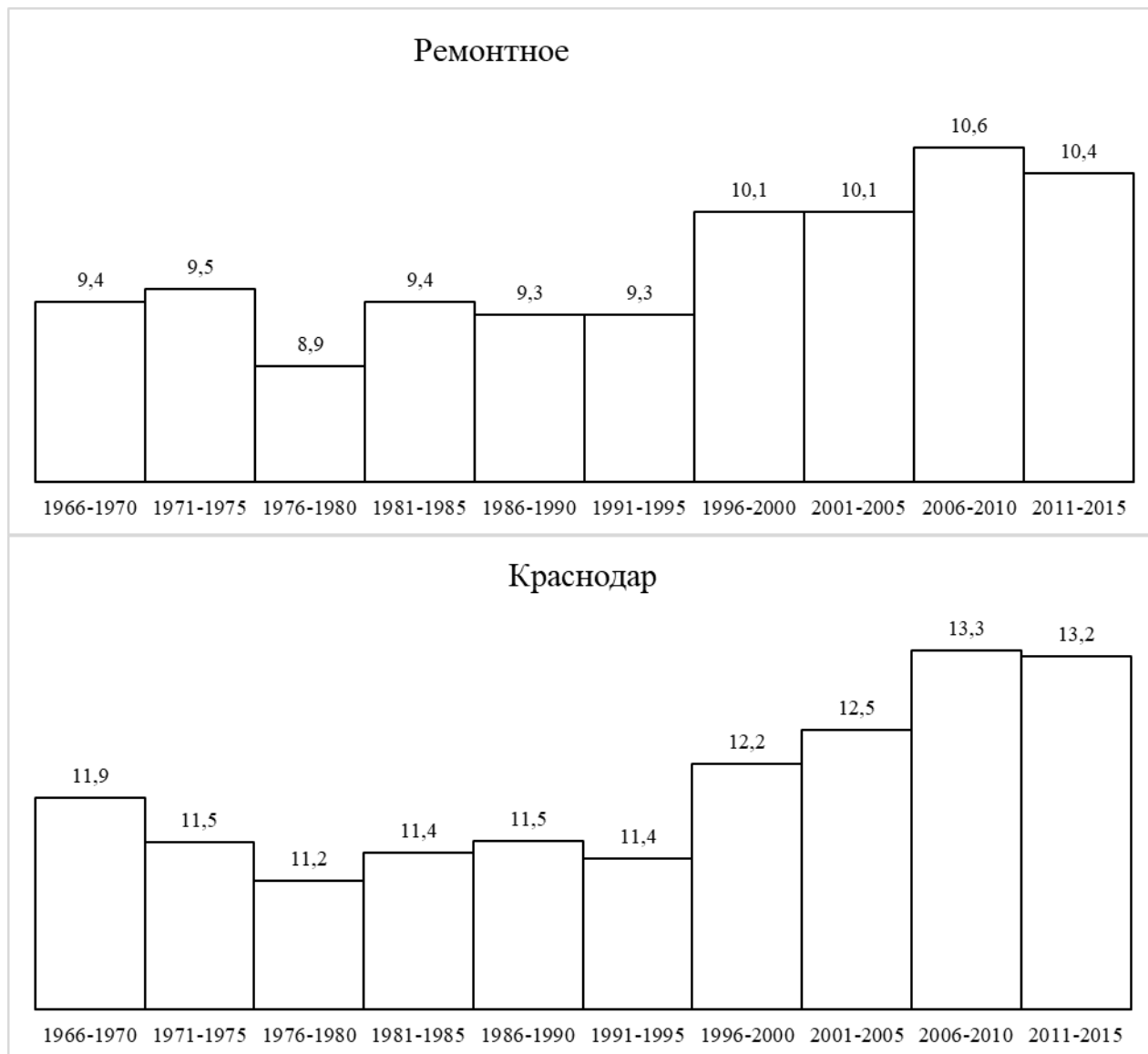


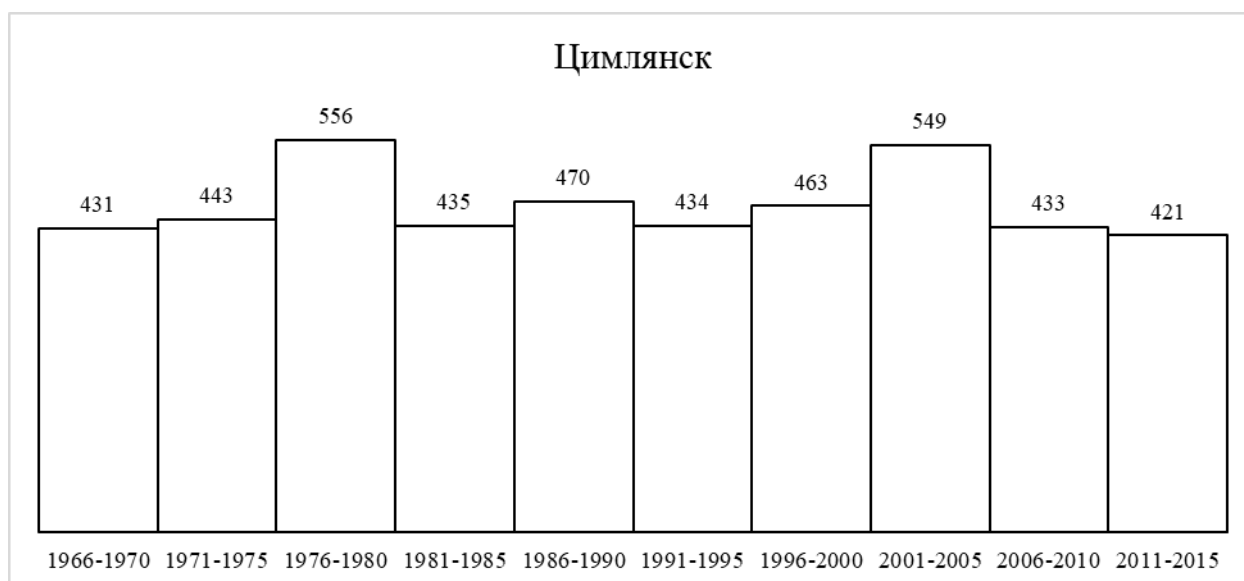
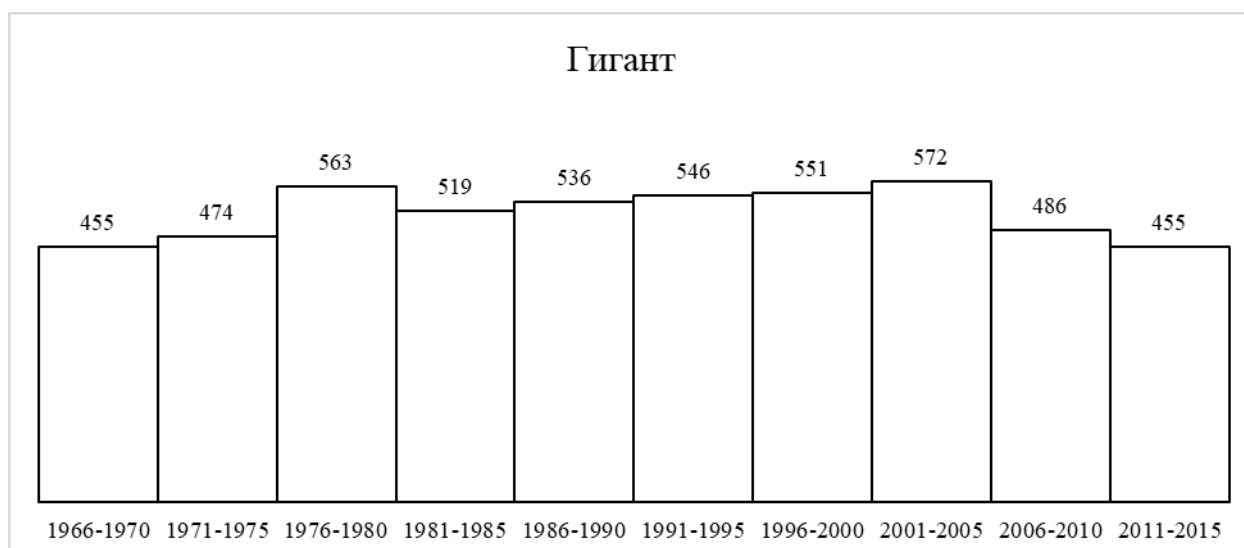
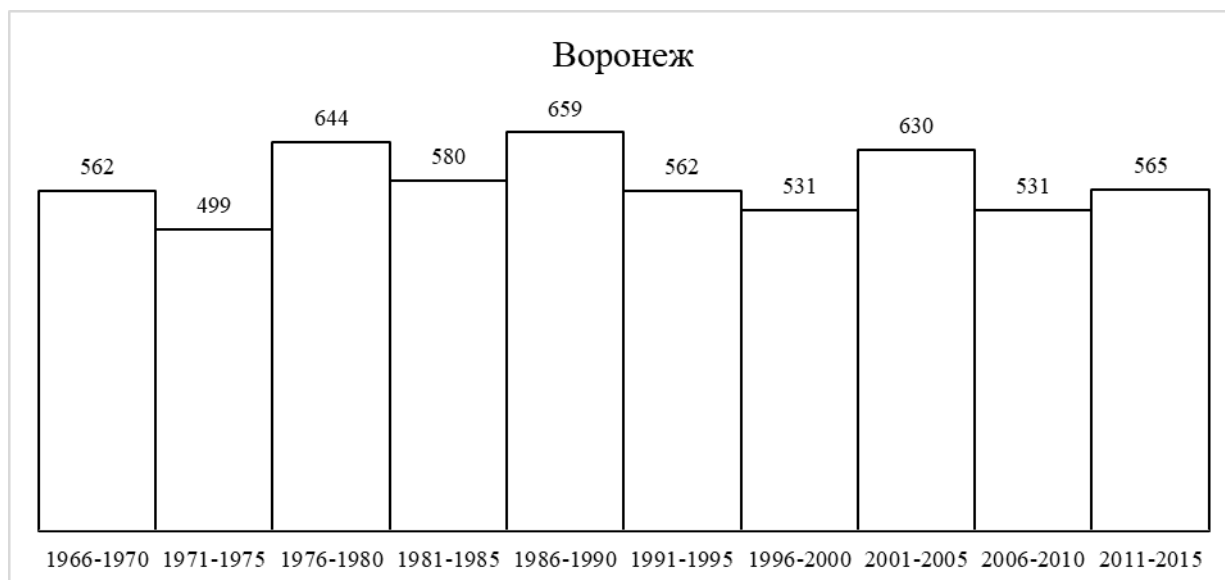
Рис. 1. Динамика изменения температуры за период с 1966 по 2015 г.
/ Fig. 1. Dynamics of average annual air temperature, 1966-2015

Анализ аномальных значений температуры воздуха в многолетнем срезе показал, что самыми теплыми были 2010 (64 % случаев), 2007 (27), 2015 гг. (9 %). Это подтверждает обзор [1], где отмечается, что эти года были либо рекордно теплыми, либо вторыми в ряду наблюдений. 2007 г. был экстремально теплым в течение зимы, весны и лета. Самые низкие температуры фиксировались в 1987 (64 %), 1976 (18), 1992–1993 гг. (18 %). Следующими по значимости самым холодным годом был 2003 г., и только для трех метеостанций – 2011 г. (Армавир, Фролово, Ремонтное).

По всем метеостанциям, за исключением Воронежа, отмечается постоянная положительная

динамика в изменении осадков (рис. 2). Отклонение осадков от нормы максимально проявилось в Краснодаре и составило 285 мм в 1996–2000 гг. Для остальных метеостанций наиболее значительное увеличение осадков пришлось на 2001–2005 гг. и варьировало от 76 (Воронеж) до 247 мм (Краснодар).

Распределение осадков варьировало в большей степени, для метеостанций не установлено достоверных трендов. Самым влажным годом был 2004 г. для большей части территории, однако картина распределения осадков более пестрая. Для Краснодара и Чертково самым влажным был 2001 г., Урюпинска – 2005 г., Фролово – 2007 г., Воронеж – 2012 г.



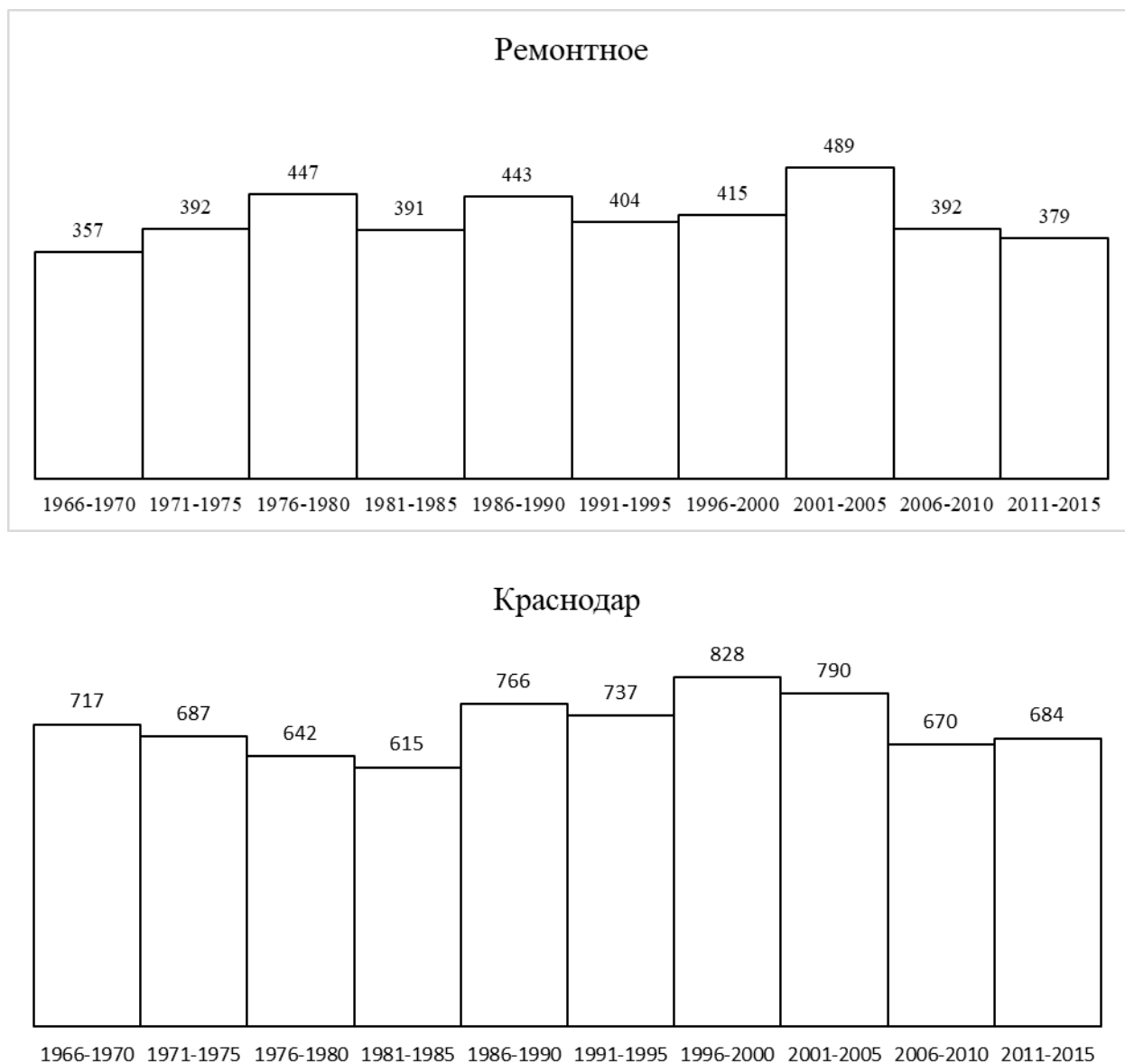


Рис. 2. Динамика изменения осадков за период 1966–2015 гг. / Fig.2. Dynamics of average precipitation (1966-2015)

В [1] отмечается, что в 2007 г. осадков выпало больше нормы, но они были распределены неравномерно. Исключением стал юг европейской части России. Самым сухим годом для Ростовской области был 2007 г. (и самым жарким), 2008 г. – для Урюпинска и Фролово, 2003 г. – Краснодара, 2011 г. – Воронежа, 2012 г. – Цимлянска, 2015 г. – Чертково.

Наиболее заметные изменения произошли в 2000-х гг., именно в этот период отмечаются наибольшие отклонения как в температуре воздуха, так и в количестве выпавших осадков (табл. 2). Значительные изменения произошли с температурой воздуха в зимний период. Отклонение от

многолетних данных составило от 2,7 до 3,3 °С, температура января в 2001–2015 гг. была выше средних многолетних данных. Температура июля также имеет положительную динамику, но значения ее ниже. Отклонение от многолетних данных составило 0,7 (Урюпинск) – 2,1 °С (Краснодар). Отмечается увеличение количества осадков, оно варьирует в широких пределах. Наибольшие значения отмечены для Урюпинска (136 мм), Ростова (113 мм), наименьшие – для Воронежа (24 мм).

На всех рассматриваемых в работе метеостанциях зафиксировано увеличение количества осадков как в теплый, так и холодный период. Исклю-

чением являются Воронеж, Таганрог и Фролово, где отмечено незначительное уменьшение (6–7 мм) в теплый период (апрель – октябрь). Сравнение многолетних данных и периода 2001–2015 гг. пока-

зало, что произошло уменьшение доли осадков, выпадающих в теплый период, на 2–5 %. Таким образом, отмечается положительная тенденция в изменении количества осадков.

Таблица 2

Основные метеозлементы на опорных станциях в 2001–2015 гг. и отклонение от многолетних величин
/ Temperature and precipitation at reference stations in 2001-2015 and deviations from long-term values

Метеостанция	Температура воздуха, °С						Осадки, мм	
	Год		Январь		Июль			
	2001–2015	Отклонение	2001–2015	Отклонение	2001–2015	Отклонение	2001–2015	Отклонение
Воронеж	7,7	2,8	–6,3	3,0	21,7	1,8	578	24
Чертково	8,6	1,9	–5,5	2,9	22,9	1,2	548	106
Краснодар	13,0	2,2	0,9	2,7	25,3	2,1	722	79
Армавир	11,7	1,8	–0,7	2,7	24,0	1,3	635	83
Среднее	11,1	2,0	–5,3	2,8	24,1	1,5	635	89
Матвеев Курган	10,4	1,9	–2,4	3,3	24,1	1,4	485	63
Таганрог	11,1	2,0	–2,5	2,9	25,1	1,6	545	59
Ростов	10,6	1,9	–3,1	2,6	24,4	1,5	596	113
Гигант	11,2	2,2	–2,7	2,8	25,1	1,6	504	54
Среднее	10,8	2,0	–2,7	2,9	24,7	1,5	532	72
Урюпинск	7,8	1,7	–6,9	2,9	22,3	0,7	519	136
Фролово	6,7	0,4	–6,7	3,3	23,5	0,9	434	40
Цимлянск	10,3	2,1	–3,9	3,1	24,9	1,5	472	81
Среднее	8,3	1,4	–5,8	3,1	23,6	1,0	475	86
Ремонтное	10,5	2,1	–3,8	2,8	25,0	1,4	423	101

Режим выпадения осадков также претерпел изменения. Все сезоны года, за исключением лета, характеризуются положительной динамикой. Отклонение осадков от нормы в зимний период составило от 2 (Армавир) до 50 мм (Ростов-на-Дону), в осенний – от 14 (Воронеж) до 50 мм (Чертково), весной – от 8 (Таганрог) до 45 мм (Армавир), исключением стали Воронеж и Чертково, где произошло уменьшение количества выпадающих осадков на 9 и 3 мм соответственно. Лето характеризуется большим разнообразием. Так, положительная динамика характерна для Ремонтного (2 мм), Армавира (7 мм), Гиганта (12 мм), Чертково (17 мм) и Урюпинска (38 мм), в то же время произошло уменьшение количества выпадающих осадков по станциям: Краснодар (–3 мм), Воронеж (–5 мм), Гигант (–17 мм), Цимлянск (–19 мм), Таганрог (–28 мм), Фролово (–41 мм). Таким образом, лето в данных населенных пунктах, начиная с 2001 г., характеризовалось большей засушливостью.

Заключение

Таким образом, динамика температуры и осадков изучалась по данным 12 метеостанций, расположенных преимущественно в степной зоне. Проведен сравнительный анализ многолетних данных

и периода с 2001 по 2015 г. Изменение метеорологических показателей коснулось каждого пункта в разной степени. Для исследуемой территории сохраняются тенденции повышения среднегодовой температуры и незначительное увеличение количества осадков.

Значительно увеличилась среднегодовая температура в Воронеже, где стало теплее на 2,8 °С, менее всего изменилась температура в Фролово (на 0,4 °С). Январь стал теплее в среднем на 2,6–3 °С везде. Июльская температура изменилась на 0,7 (Урюпинск) – 2,1 °С (Краснодар). Наиболее значительные изменения произошли в зимний период, когда температура отклонилась от нормы (стала выше) на 1,1–5,8 °С. Наименьшие коснулись лета (0,8–2,2 °С). Изменился режим выпадения осадков: увеличилось количество осадков в зимний период и уменьшилось в летний. Тенденции изменения метеорологических показателей сохраняются.

Литература

1. Обзор состояния и тенденций изменения климата России. М., 2008–2019. URL: <http://climatechange.igce.ru/> (дата обращения: 15.12.2019).
2. Семенов С.М., Анисимов О.А., Анохин Ю.А., Болтнева Л.И., Ваганов Е.А., Золотокрылин А.Н., Из-

разль Ю.А., Инсаров Г.Э., Кобышева Н.В., Костяной А.Г., Кренке А.Н., Оганесян В.В., Пчелкин А.В., Ревич Б.А., Семенов В.А., Сиротенко О.Д., Терзиев Ф.С., Фролов И.Е., Хон В.Ч., Цыбань А.В., Шерстюков Б.Г., Шикломанов И.А., Ясюкевич В.В., Абашина Е.В., Алексеев Г.В., Ананичева М.Д., Балоншишникова Ж.А., Барина С.П., Борзенкова И.И., Бuzин В.А., Величко А.А., Володкович Ю.Л., Гаврило М.В., Гельвер Е.С., Георгиевский В.Ю., Гинзбург А.И., Грингоф И.Г., Гронская Т.П., Гудкович З.М., Заклинский Г.В., Зойдзе Е.К., Карклин В.П., Колосов П.А., Коршунов А.А., Копалиани З.Д., Лебедев С.А., Лупачев Ю.В., Лурье П.М., Малевский-Малевич С.П., Марков М.Л., Минин А.А., Мяч Л.Т., Нaurzbaev M.M., Незлин Н.П., Павлова В.Н., Панов В.Д., Парфенова Е.И., Попова Е.Н., Романенков В.А., Романовская А.А., Сперанская Н.А., Умбрумянц И.О., Филиппов Ю.Г., Фролов С.В., Чебакова Н.М., Шашкин А.В., Шеремет Н.А., Шишов В.В., Шиятов С.Г., Шука Т.А., Харук В.И. Оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. М., 2008. Т. 2. 288 с. URL: <http://climate2008.igce.ru/v2008/htm/2.htm> (дата обращения: 10.11.2019).

3. Кузьмина Ж.В. Анализ многолетних метеорологических трендов на Юге России и Украины (от лесостепи до пустынь) // Аридные экосистемы. 2007. Т. 13, № 32. С. 47–60.

4. Дмитриева В.А., Маскайкина С.В. Изменчивость водного режима в верховье Донского бассейна в современный климатический период // Вестн. ВГУ. География. Геоэкология. 2013. № 1. С. 17–21.

5. Лурье П.М. Региональные особенности изменения климата на Юге России и их последствия (на примере Ростовской области) // Географические исследования Краснодарского края. Краснодар, 2010. С. 83–92.

6. Лурье П.М., Панов В.Д. Влияние изменений климата на гидрологический режим р. Дон в начале XXI столетия // Метеорология и гидрология. 1999. № 4. С. 90–97.

7. Панов В.Д., Лурье П.М., Ларионов Ю.А. Климат Ростовской области: вчера, сегодня, завтра. Ростов н/Д.: Донской издат. дом, 2006. 487 с.

8. Сухова М.Г., Журавлева О.В. Динамика изменения температуры воздуха и осадков в Чуйской котловине // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2017. № 1. С. 124–129.

9. Черенкова Е.А. Анализ особенностей обширных атмосферных засух на юге Европейской России // Аридные экосистемы. 2012. Т. 18, № 4 (53). С. 13–21.

10. Справочник по климату СССР. Л.: Гидрометеоиздат, 1966–1970. Вып. 13, ч. I–V.

11. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2015620394. Описание массива данных месячных сумм осадков на станциях России / О.Н. Булыгина, В.Н. Разуваев, Н.Н. Коршунова, Н.В. Швец. URL: [http://meteo.ru/data/158-total-](http://meteo.ru/data/158-total-precipitation#описание-массива-данных)

[precipitation#описание-массива-данных](http://meteo.ru/data/158-total-precipitation#описание-массива-данных) (дата обращения: 10.09.2019).

12. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2014621485. Описание массива данных среднемесячной температуры воздуха на станциях России / О.Н. Булыгина, В.Н. Разуваев, Л.Т. Трофименко, Н.В. Швец. URL: <http://meteo.ru/data/156-temperature#описание-массива-данных> (дата обращения: 01.05.2019).

13. Назаренко О.В. Изменение некоторых метеорологических показателей в условиях засушливой степи // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2019. № 4 (204). С. 84–90.

14. Назаренко О.В. Динамика изменения температуры воздуха и осадков в бассейне реки Средний Егорлык // Глобальные климатические изменения: региональные эффекты, модели, прогнозы. Воронеж: Цифровая полиграфия, 2019. Т. 1. С. 235–239.

15. Назаренко О.В. К вопросу о влиянии климатических факторов на грунтовые воды Доно-Донецкого бассейна во второй половине XX столетия // Водные ресурсы. 2006. Т. 33, № 4. С. 504–510.

16. Назаренко О.В. Оценка региональных изменений метеорологических показателей и их влияния на уровень грунтовых вод (на примере г. Ростова-на-Дону) // Современные проблемы науки и образования. 2013. № 5. 7 с.

References

1. *Overview of the state and trends of climate change in Russia (2008-2019)*. Moscow. Available at: <http://climatechange.igce.ru/> (accessed December 15, 2019). (in Russian).

2. Semenov S.M., Anisimov O.A., Anohin Yu.A., Boltneva L.I., Vaganov E.A., Zolotokrylin A.N., Izrael Yu.A., Insarov G.E., Kobysheva N.V., Kostyanoi A.G., Krenke A.N., Oganessian V.V., Pchelkin A.V., Revich B.A., Semenov V.A., Sirotenko O.D., Terziev F.S., Frolov I.E., Khon V.Ch., Tsyban A.V., Sherstyukov B.G., Shiklomanov I.A., Yasyukevich V.V., Abashina E.V., Alekseev G.V., Ananicheva M.D., Balonishnikova J.A., Barinova S.P., Borzenkova I.I., Buzin V.A., Velichko A.A., Volodkovich Yu.L., Gavrilo M.V., Gelfer E.S., Georgievsky V.Yu., Ginzburg A.I., Gringof I.G., Gronskaya T.P., Gudkovich Z.M., Zaklinsky G.V., Zoidze E.K., Karklin V.P., Kolosov P.A., Korshunov A.A., Kopaliani Z.D., Lebedev S.A., Lupachev Yu.V., Lurye P.M., Malevsky-Malevich S.P., Markov M.L., Minin A.A., Myach L.T., Naurzbaev M.M., Nezlin N.P., Pavlova V.N., Panov V.D., Parfenova E.I., Popova E.N., Romanenkov V.A., Romanovskaya A.A., Speranskaya N.A., Umbrumyants I.O., Filippov Yu.G., Frolov S.V., Chebakova N.M., Shashkin A.V., Sheremet N.A., Shishov V.V., Shiyatov S.G., Shchuka T.A., Haruk V.I. (2008). *Assessment report on climate change and its consequences on the territory of the Russian Federation*. Moscow, vol. 2, 288 p. Available at:

<http://climate2008.igce.ru/v2008/htm/2.htm> (accessed November 10, 2019). (in Russian).

3. Kuzmina Zh.V. (2007). Analysis of long-term meteorological trends in the South of Russia and Ukraine (from forest-steppe to deserts). *Aridnye ekosistemy*, vol. 13, no. 32, pp. 47-60. (in Russian).
4. Dmitrieva V.A., Maskaikina S.V. (2013). Variability of the water regime in the upper reaches of the don basin in the modern climatic period. *Vestn. VGU. Geografiya. Geoekologiya*, no.1, pp.17-21.(in Russian).
5. Lurie P.M. (2010). Regional features of climate change in the South of Russia and their consequences (on the example of the Rostov region). *Geograficheskie issledovaniya Krasnodarskogo kraja* [Geographical research of the Krasnodar territory]. Krasnodar, pp. 83-92. (in Russian).
6. Lurie P.M., Panov V.D. (1999). Influence of climate change on the hydrological regime of the Don river at the beginning of the 21st century. *Meteorologiya i gidrologiya*, no. 4, pp. 90-97. (in Russian).
7. Panov V.D., Lurie P.M., Larionov Yu.A. (2006). *Climate of the Rostov region: yesterday, today, tomorrow*. Rostov-on-Don, Don Publishing House, 487 p. (in Russian).
8. Sukhova M.G., Zhuravleva O.V. (2017). Dynamics of changes in air temperature and precipitation in the Chui basin. *Izv. vuzov. Sev.-Kavk. region. Estestv. nauki* (Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Sciences), no. 1, pp. 124-129. (in Russian).
9. Cherenkova E.A. (2012). Analysis of features of extensive atmospheric droughts in the South of European Russia. *Aridnye ekosistemy*, vol. 18, no. 4 (53), pp. 13-21. (in Russian).
10. *Reference book on the climate of the USSR* (1966-1970). Leningrad, Hydrometeoizdat Publ., vol. 13, ch. I-V. (in Russian).
11. *Certificate of State Registration of the Database No. 2015620394. Description of an array of data for monthly precipitation totals at stations in Russia*. O. N. Bulygina, V. N. Razuvaev, N. N. Korshunova, N. V. Shvets. Available at: <http://meteo.ru/data/158-total-precipitation#описание-массива-данных> (accessed September 10, 2019). (in Russian).
12. *Certificate of State Registration of the Database No. 2014621485. Description of an array of data on the average monthly air temperature at stations in Russia*. O. N. Bulygina, V. N. Razuvaev, L. T. Trofimenko, N. V. Shvets. Available at: <http://meteo.ru/data/156-temperature#description-of-the-data-array> (accessed May 1, 2019). (in Russian).
13. Nazarenko O.V. (2019). Change of some meteorological indicators in the conditions of arid steppe. *Izv. vuzov. Sev.-Kavk. region. Estestv. nauki* (Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science), no. 4 (204), pp. 84-90. (in Russian).
14. Nazarenko O.V. (2019). Dynamics of changes in air temperature and precipitation in the Sredny Yegorlyk river basin. *Global'nye klimaticheskie izmeneniya: regional'nye efekty, modeli, prognozy* [Global climate changes: regional effects, models, forecasts]. Voronezh, Tsifrovaya poligrafija Publ., vol. 1, pp. 235-239. (in Russian).
15. Nazarenko O.V. (2006). On the issue of the influence of climatic factors on the ground water of the Don-Donets basin in the second half of the 20th century. *Vodnye resursy*, vol. 33, no. 4, pp. 504-510. (in Russian).
16. Nazarenko O.V. (2013). Assessment of regional changes in meteorological indicators and their impact on the ground water level (on the example of Rostov-on-Don). *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya*, no. 5, p. 7. (in Russian).

УДК 551.46

DOI 10.18522/1026-2237-2020-1-71-77

РЕЗУЛЬТАТЫ МОНИТОРИНГА ТЕМПЕРАТУРНЫХ УСЛОВИЙ МИГРАЦИИ И ПРОМЫСЛА АЗОВСКОЙ ХАМСЫ

© 2020 г. **Б.Н. Панов¹, Е.О. Спиридонова², М.М. Пятинский¹, А.С. Арутюнян²**¹Азово-Черноморский филиал Всероссийского научно-исследовательского института
рыбного хозяйства и океанографии, Ростов-на-Дону, Россия,²Керченский государственный морской технологический университет, Керчь, Россия

RESULTS OF MONITORING OF TEMPERATURE CONDITIONS OF MIGRATION AND FISHING OF THE AZOV KHAMSA

B.N. Panov¹, E.O. Spiridonova², M.M. Pyatinskiy¹, A.S. Arutyunyan²¹Azov-Black Sea Branch, Russian Federal Research Institute of Fisheries and Oceanography, Rostov-on-Don, Russia,²Kerch State Maritime Technological University, Kerch, Russia

Панов Борис Николаевич – кандидат географических наук, доцент, ведущий научный сотрудник, Азово-Черноморский филиал Всероссийского научно-исследовательского института рыбного хозяйства и океанографии, ул. Береговая, 21, г. Ростов-на-Дону, 344002, Россия, e-mail: panov_bn@mail.ru

Boris N. Panov - Candidate of Geography, Associate Professor, Leading Researcher, Azov-Black Sea Branch, Russian Federal Research Institute of Fisheries and Oceanography, Beregovaya St., 21, Rostov-on-Don, 344002, Russia, e-mail: panov_bn@mail.ru

Спиридонова Елена Олеговна – кандидат географических наук, доцент, Керченский государственный морской технологический университет, ул. Орджоникидзе, 82, г. Керчь, Республика Крым, 298309, Россия, e-mail: helena.spyrydonova@gmail.com

Elena O. Spiridonova - Candidate of Geography, Associate Professor, Kerch State Maritime Technological University, Ordzhonikidze St., 82, Kerch, Republic of Crimea, 298309, Russia, e-mail: helena.spyrydonova@gmail.com

Пятинский Михаил Михайлович – научный сотрудник, Азово-Черноморский филиал Всероссийского научно-исследовательского института рыбного хозяйства и океанографии, ул. Береговая, 21, г. Ростов-на-Дону, 344002, Россия, 298310, e-mail: zenn1989@ya.ru

Michail M. Pyatinskiy - Senior Researcher, Azov-Black Sea, Branch Russian Federal Research Institute of Fisheries and Oceanography, Beregovaya St., 21, Rostov-on-Don, 344002, Russia, e-mail: zenn1989@ya.ru

Арутюнян Александр Сергеевич – магистр, Керченский государственный морской технологический университет, ул. Орджоникидзе, 82, г. Керчь, Республика Крым, 298309, Россия, e-mail: kgmtu@kgmtu.ru

Aleksandr S. Arutyunyan - Master, Kerch State Maritime Technological University, Ordzhonikidze St., 82, Kerch, Republic of Crimea, 298309, Russia, e-mail: kgmtu@kgmtu.ru

Представлены результаты мониторинга процесса миграции и промысла азовской хамсы в апреле – мае и октябре – ноябре 2019 г. В исследованиях использованы ежедневные карты температуры поверхности моря (ТПМ) Черного и Азовского морей, построенные в Гидрометцентре России по данным NCDC/NOAA (Оперативный модуль ЕСИМО – hmc.meteorf.ru/sea/black/sst/sst_black.htm), и ежедневная промысловая информация Центра системы мониторинга рыболовства и связи. Показано, что весной скопления хамсы начинают рассеиваться и перемещаться в места нагула после достижения температурой воды 11 °С, а при температуре воды 14–15 °С рыба становится значительно подвижнее и скопления окончательно рассеиваются. Осенью азовская хамса начала концентрироваться в предпроливной зоне Азовского моря при средней ТПМ 16–17 °С, при ТПМ 14–16 °С хамса выходила в Керченский пролив. Активный выход хамсы в Черное море начался при ТПМ предпроливной зоны 15 °С и практически прекратился при ТПМ около 13 °С. Средняя ТПМ в Керченском проливе опустилась в эти дни до 11 °С.

Ключевые слова: азовская хамса, промысел, мониторинг, температура поверхности моря, изменчивость, эффективность промысла.

The paper presents the results of monitoring the process of migration and fishing of the Azov khamsa in April-May and October-November, 2019. The research used daily maps of sea surface temperature (SST) of the Black and Azov seas, built in the hydrometeorological Center of Russia according to NCDC/NOAA (Operational module Yessim - hmc.meteorf.ru/sea/black/sst/sst_black.htm) and daily fishing information of the Center for Monitoring of Fisheries and Communications. It is shown that in the spring, khamsa clusters begin to disperse and move to feeding places after the water temperature reaches 11 °C, and at a water temperature of 14-15 °C, the fish becomes much more mobile and the clusters finally disperse. In autumn, the Azov khamsa began to concentrate in the pre-flood zone of the Sea of Azov at an average SST of 16-17 °C, with a SST of 14-16 °C, the khamsa went out into the Kerch Strait. The active output of the khamsa into the Black Sea began at the SST of the pre-flood zone of 15 °C and almost stopped at the SST of about 13 °C. The average SST in the Kerch Strait dropped to 11 °C these days.

Keywords: Azov hamsa, fishing, monitoring, sea surface temperature, variability, fishing efficiency.

Введение

Показатели миграции азовской хамсы являются важными параметрами состояния ее популяции, морских экосистем и перспектив промысла. Из литературных источников [1–3] следует, что азовская хамса *Engraulis encrasicolus maeoticus Pusanov* начинает осеннюю миграцию в места зимовки в Черном море при достижении определенного уровня жирности и упитанности, а также при понижении температуры воды. Чем ниже упитанность хамсы, тем более поздней и растянутой является миграция.

С 1966 по 1992 г. при устойчивой средней упитанности температура начала формирования скоплений и вылов хамсы в четвертом квартале имели отрицательные тренды.

До 1986 г. начало путины азовской хамсы варьировало в пределах с 4 октября (1970 г.) до 31 октября (1974 г.) при средней температуре воды за 5 предшествующих суток в п. Опасное от 12,6 (1977 г.) до 17,8 °C (1966 г.). С 1985 по 1988 г., в период катастрофически низкой трофности моря, обусловленной вспышкой численности гребневика мнемниопсиса, температура начала формирования миграционных косяков снизилась до зимовальных температур (10,5–11,0 °C) [4].

С 1992 г. соответствующие показатели были следующими: с 8 (1993 г.) до 26 октября (1994 г.) и от 11,7 (1994 г.) до 14,7 °C (1995 г.). В 1993–1998 гг. температура начала формирования миграционных косяков стала резко возрастать и к 1997 г. достигла 16 °C, т.е. уровня 70-х гг.

В 1998 г. хамса практически не создавала миграционных косяков и выходила из Азовского моря с июля. Сравнительно плотные косяки рыбы сформировались только 9 ноября в проливе, когда температура воды в предпроливной зоне Азовского моря уже снизилась до 9 °C [4].

В XXI в., в период стабилизации запаса азовской хамсы в условиях присутствия гребневика мнемниопсиса, сложились следующие представления о температурных критериях осенней миграции.

Осенью азовская хамса разного возраста при 14–16 °C собирается в косяки, при 14 °C первые косяки проходят Керченский пролив, при 12 °C начинается массовый ход хамсы через Керченский пролив в Черное море [5].

Распад промысловых скоплений и начало весенней миграции происходят в конце марта – начале апреля при повышении температуры воды на поверхности моря. Азовская хамса поднимается ближе к поверхности и еще достаточно долго остается в местах зимовки. В конце апреля она уже облавливается в Керченском проливе [5, 6].

Найти количественные оценки температурных условий в период весенней миграции азовской хамсы нам в литературных источниках не удалось.

В конце 2018 г. в Азово-Черноморском филиале (АЧФ) ВНИРО были созданы возможности оперативно использовать промысловую информацию и дистанционные данные о температуре поверхности моря (ТПМ) в целях изучения поведения хамсы в Черном море и разработки статистических моделей прогнозирования эффективности ее промысла с сезонной и синоптической заблаговременностью.

В связи с быстрыми трансформациями морских экосистем в Азово-Черноморском регионе эти исследования представляются нам актуальными.

Материалы и методы

В данной работе представлены результаты мониторинга, выполненного в апреле – мае и октябре – ноябре 2019 г., которые позволяют дать характеристику особенностей изменчивости ТПМ и поведения азовской хамсы в период весенней и осенней миграции 2019 г.

В работе были использованы ежедневные карты ТПМ Черного и Азовского морей, построенные в Гидрометцентре России по данным NCDC/NOAA (Оперативный модуль – hmc.meteorf.ru/sea/black/sst/sst_black.htm) на основе оперативных спутниковых и наземных наблюдений. Ежедневная средняя температура для промысловых участков определялась по этим картам визуально. Учитывая то, что

используемые карты представляют собой кумулятивные поля нескольких суточных карт ИСЗ и расчетных характеристик, визуальная оценка среднего значения небольшого участка поля для целей наших исследований представляется допустимой.

При анализе промысла использовалась ежедневная информация ФГБУ «Центр системы мониторинга рыболовства и связи», а также программное аналитическое обеспечение, разработанное сотрудниками АЧФ ВНИРО. Исследовались данные о промысловых нагрузках (суточный вылов) каждого судна и средние для промысла суточные судовые нагрузки, а также информация о районе работы каждого судна. Это позволило выделять для анализа относительно небольшие участки шельфа.

В работе для исследования особенностей динамики указанных параметров использовались преимущественно методы графического анализа (ПО Golden Software Grapher).

Результаты исследований

В конце марта 2019 г., в последние четыре дня хамсовой путины, несмотря на малоблагоприятные погодные условия, промысел велся практически по всему промысловому району (от Анапы до Адлера) с эффективностью, близкой к средней для текущей путины. ТПМ в пределах района промысла изменялась от 8,5 до 9,5 °С.

1 апреля промысловые суда вышли в Черное море на шпротовую путину. Среднетоннажные суда работали только у крымского побережья (в Каламитском заливе и на участке шельфа от Алушты до Судака), малотоннажные – преимущественно в районе Геленджик – Бетта. В процессе промысла до 6 мая в прилове присутствовала хамса.

В первую декаду промысла приловы хамсы малотоннажными судами на участке Геленджик – Бетта были сопоставимы со средними показателями вылова последних дней хамсовой путины. С 1 по 11 апреля на этом участке промысла находились от двух до восьми малотоннажных судов, суточный вылов которых изменялся в пределах 0,5–29 т хамсы на одно судно. Среднетоннажные суда в этот период на участке Алушта – Судак прилавливали от 0,2 до 1,8 т хамсы, в Каламитском заливе одно судно 2 апреля выловило 6 т хамсы. Общие суточные показатели прилова хамсы представлены на рис. 1. ТПМ в первые дни апреля во всех районах промысла находилась в пределах 9,2–10,0 °С (рис. 1), т.е. была близка к показателям последних дней хамсовой путины. Следовательно, можно предположить, что до 8 апреля хамса продолжала находиться в стадии зимовки. Плотность косяков оставалась высокой, а в Каламитском заливе была обловлена перезимовавшая у берегов Западного Крыма черноморская группировка хамсы (рис. 2а).

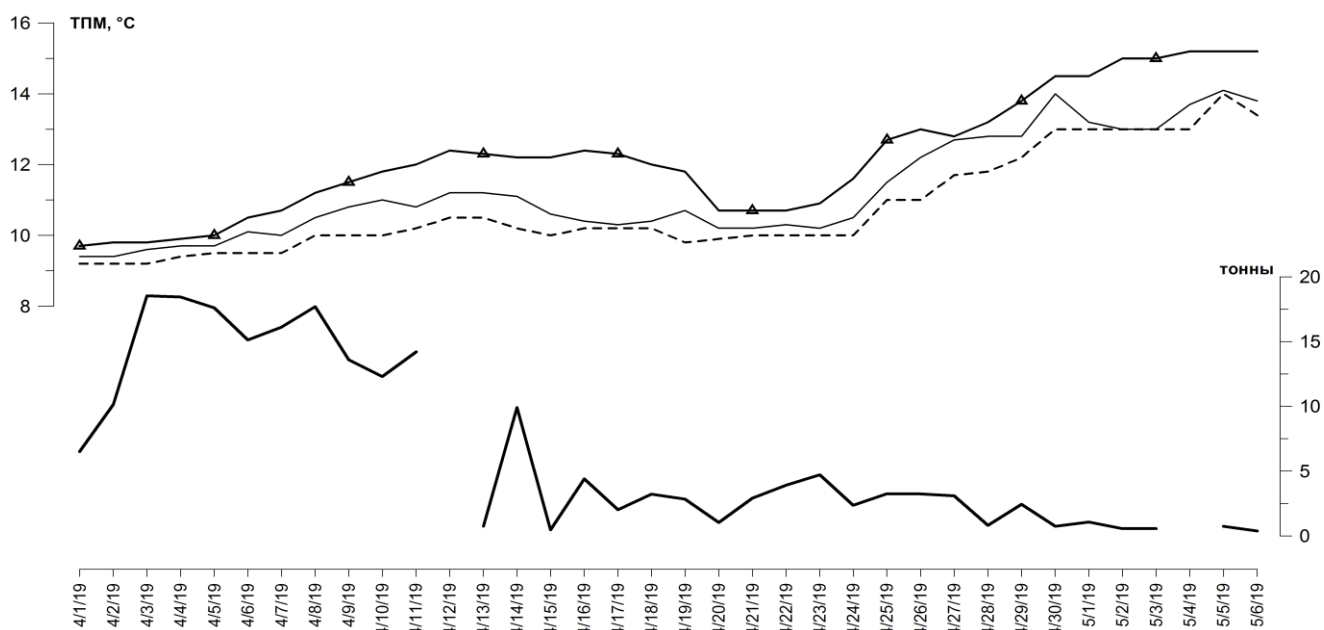


Рис. 1. Температура поверхности моря в основных районах промысла и прилов хамсы (средний суточный вылов на одно судно) при промысле шпрота с 1 апреля по 6 мая 2019 г.; ▲ – Геленджик – Бетта; ~ – Алушта – Судак; - - - - Каламитский залив / Fig. 1. Sea surface temperature in the main fishing areas and catch of khamsa (average daily catch per vessel) during sprat fishing from April 1 to May 6, 2019; ▲ - Gelendzhik - Betta; ~ - Alushta - Sudak; - - - - Calamite Bay

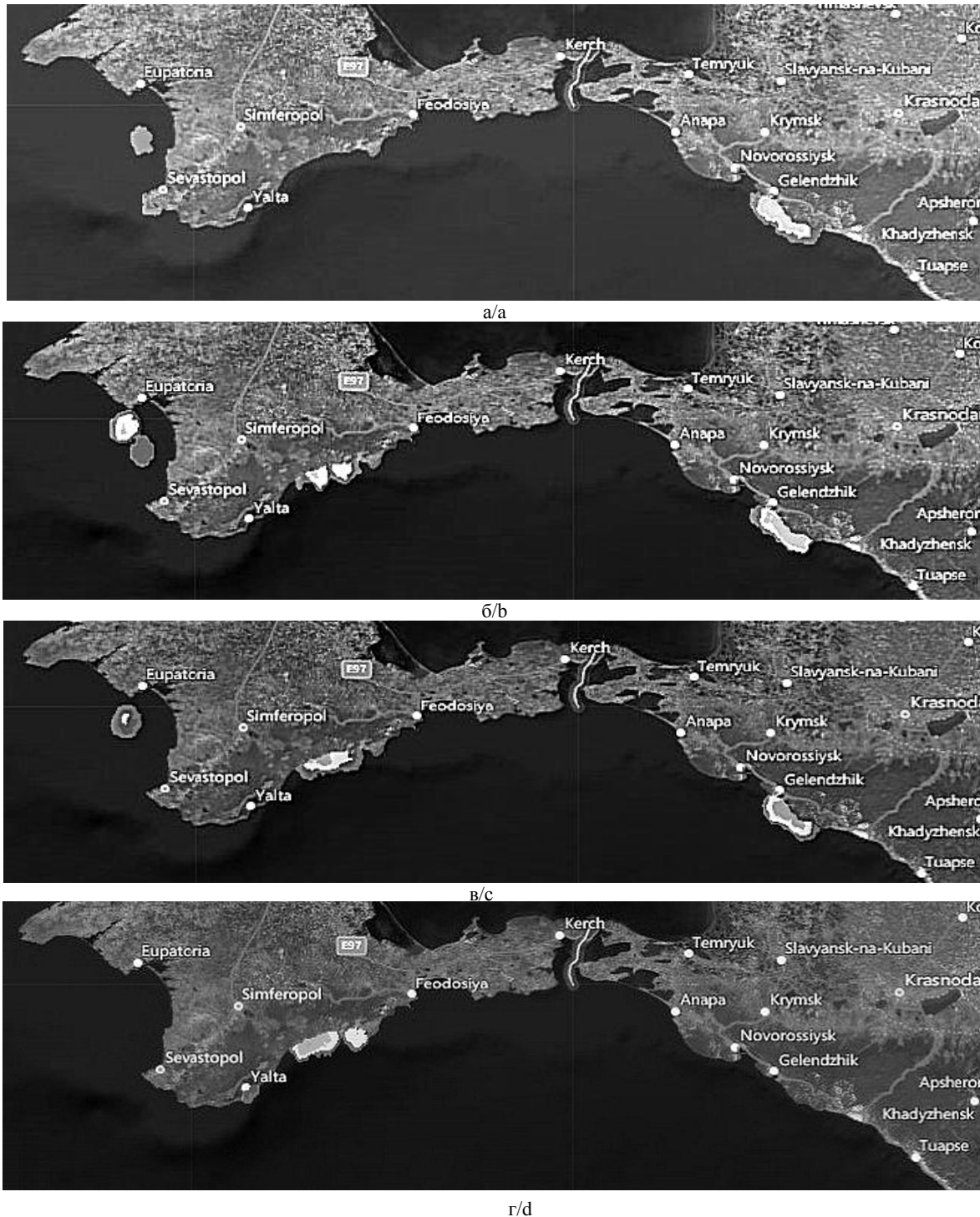


Рис. 2. Прилов хамсы (вылов за час траления) в районах промысла шпрота с 1 апреля по 6 мая 2019 г.; а – 1–11 апреля 2019 г. (градации от 60 кг до 10 т); б – 13–23 апреля 2019 г. (градации от 20 кг до 1 т); в – 24–29 апреля 2019 г. (градации от 10 до 200 кг); г – 30 апреля – 6 мая 2019 г. (градации от 3 до 50 кг) / Fig. 2. Catch of khamisa (catch per hour of trawling) in the areas of sprat fishing from April 1 to May 6, 2019; а - April 1 - April 11, 2019 (grades from 60 kg to 10 t); б - April 13 - April 23, 2019 (grades from 20 kg to 1 t); в - April 24 - April 29, 2019 (grades from 10 to 200 kg); д - April 30 - May 6, 2019 (grades from 3 to 50 kg)

После 8 апреля при ускорившемся повышении температуры воды плотность скоплений хамсы начала уменьшаться. Соответственно, снижались общий суточный прилов хамсы и нагрузка на одно судно (рис. 1). На участке Геленджик – Бетта

с 13 по 23 апреля в течение четырех суток с приловом хамсы работали от трех до пяти малотоннажных судов. Их суточные приловы снизились до 0,5–17 т хамсы на одно судно. В Каламитском заливе среднетоннажные суда прилавливали в

этот период от 3 до 5 т хамсы в сутки на одно судно.

Появилась хамса в прилове и на участке Алушта – Судак – от 0,5 до 8 т на одно судно. В этот период ТПМ повышалась до 10,5–12,5 °С, а затем понижалась до 10–11 °С (рис. 1). Это позволяет предположить, что скопления хамсы, зимовавшей у кавказского побережья, после увеличения ТПМ выше 11 °С начали распадаться и перемещаться на север и северо-запад, в результате чего косяки хамсы появились у Южного берега Крыма (ЮБК) (рис. 26). В Каламитском заливе, где температура воды до 11 °С не повышалась, зимовальные скопления хамсы сохранили свое положение и плотность до 23 апреля.

С 24 по 29 апреля на фоне очередного резкого повышения ТПМ (рис. 1) скопления хамсы у кавказского побережья, где температура воды увеличилась с 11 до 14 °С, продолжали распадаться. На участке Геленджик – Бетта в течение трех суток работали 4–5 малотоннажных судов, суточный прилов хамсы которых составил 1–6 т на одно судно, т.е. уменьшился почти в три раза. На участке Алушта – Судак приловы хамсы среднетоннажными судами находились в пределах 0,5–7 т, а температура воды повысилась от 10,2 до 12,8 °С. В Каламитском заливе при повышении температуры воды от 10 до 12 °С суточный прилов малотоннажного судна в течение двух суток составил 1,5 и 4 т. Из чего следует, что у крымских берегов плотность скоплений хамсы уменьшилась незначительно.

На основании этих данных можно предположить, что в третьей декаде апреля хамса продолжала смещаться от кавказского побережья к ЮБК, поддерживая там плотность скоплений даже при температуре воды, близкой к 13 °С, в Каламитском заливе повышение температуры воды до 12 °С еще не привело к распаду зимовальных скоплений.

С 30 апреля по 6 мая хамса встречалась в уловах промысловых судов только у ЮБК (рис. 2г) при температуре воды 13–14 °С (рис. 1) Ее суточный вылов находился в пределах 0,2–1,0 т на одно судно (рис. 1). Из этого следует, что в первой декаде мая у кавказского побережья при температуре воды 14–15 °С скопления хамсы полностью рассеялись, вдоль ЮБК – рассеянные скопления перемещались в западном направлении, а хамса Каламитского залива при температуре воды 13–14 °С рассеялась либо переместилась на запад.

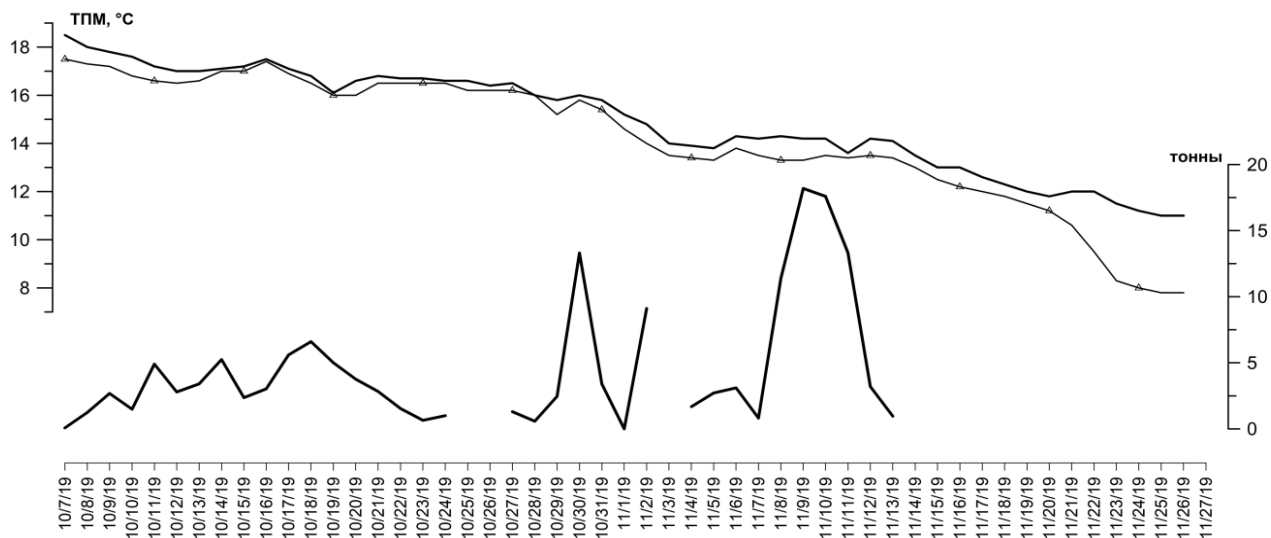
Осенью 2019 г. промысел азовской хамсы в предпроливной зоне Азовского моря начался 7–9 октября, когда температура поверхности моря в этом районе понизилась с 17–18 °С (7 октября) до 16–17 °С (9 октября) (рис. 3а). В эти дни в районе Кучугур промысел вело одно судно с суточным выловом 0,1, 2 и 4 т в сутки (рис. 3а).

Позднее, до 18 октября, при средней по району ТПМ 16,5–17,3 °С хамса постепенно концентрировалась в предпроливной зоне Азовского моря. В эти дни здесь работали от двух до пяти промысловых судов, средние промнагрузки увеличились до 6,5 т на одно судно. С 18–19 октября при очередном понижении средней ТПМ в азовском предпроливном районе до 16,0 °С хамса начала уходить в Керченский пролив и концентрироваться в южной его части.

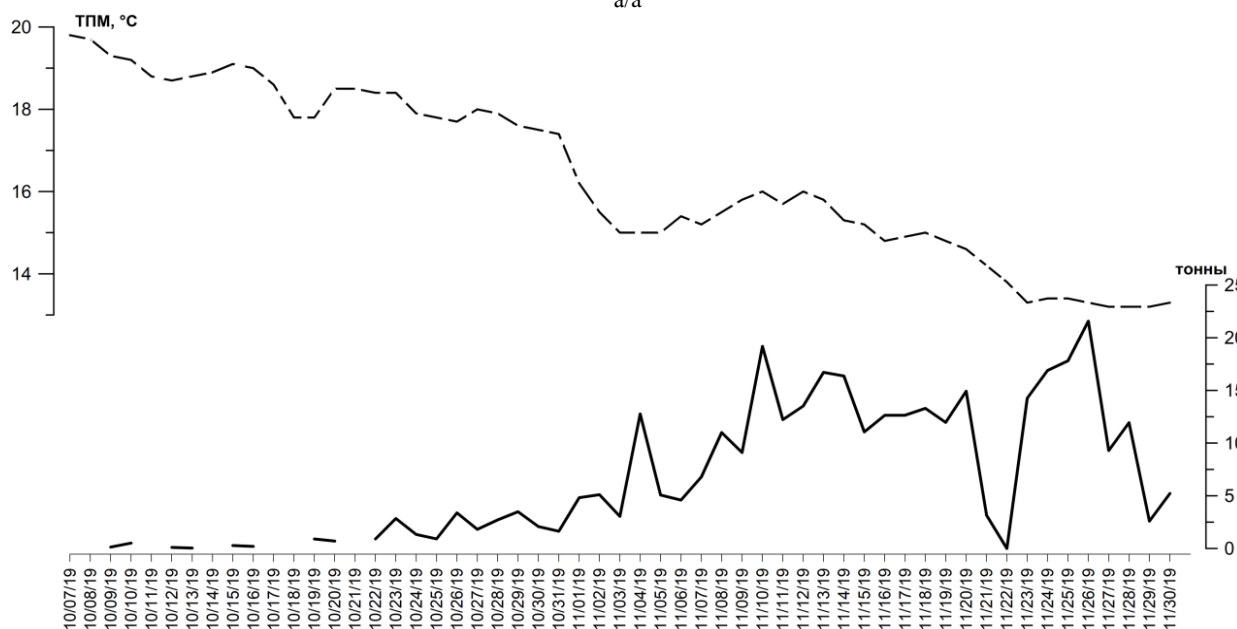
С 31 октября начался промысел хамсы и в южной части Керченского пролива при средней ТПМ в проливе 15,8 °С. Средняя промнагрузка на одно судно увеличилась до 13 т. Основная масса рыбы вышла из Азовского моря в пролив до 8–9 ноября, когда температура вод в предпроливной зоне Азовского моря понизилась до 13,3 °С и промысел хамсы в предпроливной зоне Азовского моря прекратился.

Промысел хамсы в южной части Керченского пролива продолжался до 13 ноября (рис. 3а). Позднее стабильный и эффективный промысел велся в предпроливной зоне Черного моря, где попытки ловить азовскую хамсу начались одним малотоннажным судном еще 9 октября при средней ТПМ 19,3 °С (рис. 3б). Но до 16 октября его суточный вылов не превышал 0,5 т (рис. 3б). С 19 октября при ТПМ предпроливной зоны Черного моря 17,8 °С начался рост промысловых нагрузок до 1 т, а с 23 по 31 октября на промысле находилось уже от одного до восьми малотоннажных судов, и их средний суточный вылов изменялся от 1 до 3,5 т. При этом ТПМ понижалась с 18,4 до 17,4 °С.

С 31 октября в Керченском предпроливе Черного моря на промысле азовской хамсы начали работать и среднетоннажные суда, рыба продолжала выходить из пролива и рассеивалась в предпроливной зоне. Средние промысловые нагрузки и общий суточный вылов начали расти 7 ноября при средней ТПМ 15 °С и стабилизировались после 10 ноября на уровне 15 т на одно судно при общем вылове порядка 200 т в сутки, когда в промысле участвовали ежедневно от пяти до двадцати одного судна, в том числе от трех до восьми среднетоннажных судов. Средняя ТПМ в предпроливной зоне Черного моря (от Феодосии до Новороссийска) к этому времени стабилизировалась на уровне 15–16 °С. Следует отметить некоторое снижение нагрузок и общего вылова с 10 по 15 ноября (рис. 3б), когда в предпроливной зоне в результате адвекции теплых вод с юго-востока средняя ТПМ повысилась до 16 °С (рис. 3б) и плотность скоплений уменьшилась. Видимо, температура воды 15 °С представляла определенный порог миграционной активности азовской хамсы в 2019 г., ниже которого хамса эту активность снижала.



a/a



б/б

Рис. 3. Средняя температура поверхности моря (ТПМ, °С) и средние промысловые нагрузки одного судна: – Азовское море; – Керченский пролив; – Черное море / Fig. 3. The average sea surface temperature (SST, °C) and average fishing load one vessel. - Sea of Azov; - Kerch Strait; - Black Sea

Из Керченского пролива хамса продолжала выходить до 25–26 ноября. В эти дни средняя ТПМ в Керченском проливе снизилась до 11 °С, а в черноморской предпроливной зоне – до 13,3 °С. Все это время промысел успешно развивался на участке шельфа от м. Чауда до Новороссийска с периодическими (6–7 сут) ухудшениями показателей в периоды штормовой погоды и 25–26 ноября достиг максимальных показателей (рис. 3б) при наиболее высокой концентрации рыбы у м. Такиль и у Анапы.

Заключение

Выполненный анализ позволяет заключить, что весной зимовальные скопления хамсы начинают рассеиваться и перемещаться в места нагула после достижения температурой воды 11 °С, а при температуре воды 14–15 °С рыба становится значительно подвижнее и скопления окончательно рассеиваются. Также очевидно, что значительная часть хамсы, зимовавшей у кавказского побережья весной 2019 г., ушла на нагул в северо-западную часть Черного моря.

Осенью 2019 г. азовская хамса начала создавать небольшие скопления в предпроливной зоне Азовского моря 8–9 октября при средней ТПМ 16–17 °С. При ТПМ 14–16 °С хамса уходила в Керченский пролив с 18–19 октября до 8–9 ноября и в южной его части создавала более плотные скопления, а в Черное море хамса начала выходить небольшими скоплениями после 19 октября при средней ТПМ в черноморской зоне предпроливья 18 °С, а в Керченском проливе – 16 °С. Более активный выход хамсы в Черное море начался 7 ноября при ТПМ 15 °С и практически прекратился 25–26 декабря при ТПМ в черноморской предпроливной зоне – около 13 °С. Средняя ТПМ в Керченском проливе опустилась в эти дни до 11 °С.

Следовательно, осенью 2019 г. ТПМ 16 °С можно считать температурой (или температурным показателем) начала активной миграции азовской хамсы из Азовского моря в Керченский пролив и из пролива в Черное море, 15 °С – температурой начала снижения миграционной активности, а 13 °С – температурой начала образования сравнительно плотных предзимовальных скоплений азовской хамсы в Черном море.

Обращает на себя внимание тот факт, что ТПМ 15 °С является порогом как увеличения миграционной активности весной, так и ее снижения осенью при очевидно разной упитанности рыбы.

Литература

1. Луц Г.И., Пряхин Ю.В. Закономерности миграций и зимовок пелагических рыб Азовского моря – хамсы и тюльки // Рациональное использование и охрана природных ресурсов бассейнов Черного и Азовского морей. Ростов н/Д.: Изд-во Рост. ун-та, 1988. С. 78–85.

2. Чащин А.К. Дифференциация промысловых стад анчоуса, оценка их запасов и перспективы использования в Черном море : дис. ... канд. биол. наук. М.; Керчь: ВНИРО, 1990. 183 с.

3. Rogov S.F. Влияние обеспеченности хамсы пищей на ее качественное состояние в период промысла // Проблемы изучения и рационального использования биологических ресурсов окраинных и внутренних морей СНГ: материалы II Межгосуд. конф. Ростов н/Д., 1992. С. 117–119.

4. Брянцев В.А., Панов Б.Н. Предпосылки снижения рыбопродуктивности Азовского моря // Законо-

мерности океанографических и биологических процессов в Азовском море. Апатиты: Кольский науч. центр, 2000. С. 259–276.

5. Александрова У.Н., Игнатенко А.С., Перевалов О.А., Поверенная А.А., Rogov S.V., Леонтьев С.Ю., Бондаренко М.В. Состояние сырьевой базы в Азово-Черноморском рыбохозяйственном бассейне в 2013 г. и её использование промыслом // Тр. ВНИРО. 2016. Т. 160. С. 12–25.

6. Попова В.П. Черноморский период жизни азовской хамсы // Тр. ВНИРО. 1954. Т. XXVIII. С. 65–74.

References

1. Luts G.I., Pryakhin Yu.V. (1988). Regularities of migrations and wintering of pelagic fish of the Azov sea - khamsa and tulka. *Ratsional'noe ispol'zovanie i okhrana prirodnikh resursov basseinov Chernogo i Azovskogo morei* [Rational use and protection of natural resources of the Black and Azov seas basins]. Rostov-on-Don, Rostov University Press, pp. 78-85. (in Russian).

2. Chashchin A.K. (1990). *Differentiation of commercial anchovy herds, assessment of their stocks and prospects for use in the Black sea*. Dissertation. Moscow, Kerch, Russian Federal Research Institute of Fisheries and Oceanography Press, 183 p. (in Russian).

3. Rogov S.F. (1992). Influence of khamsa food supply on its qualitative state during the fishing period. *Problemy izucheniya i ratsional'nogo ispol'zovaniya biologicheskikh resursov okrainnykh i vnutrennikh morei SNG* [Problems of studying and rational use of biological resources of the CIS marginal and inland seas]. Proceedings of the II Intergovernmental Conference. Rostov-on-Don, pp. 117-119. (in Russian).

4. Bryantsev V.A., Panov B.N. (2000). Prerequisites for reducing the fish productivity of the sea of Azov. *Zakonovernosti okeanograficheskikh i biologicheskikh protsessov v Azovskom more* [Regularities of oceanographic and biological processes in the sea of Azov]. Apatity, Kola Scientific Center Press, pp. 259-276. (in Russian).

5. Alexandrova U.N., Ignatenko A.S., Perevalov O.A., Poverennaya A.A., Rogov S.V., Leontiev S.Yu., Bondarenko M.V. (2016). The state of the raw material base in the Azov - Black sea fisheries basin in 2013 and its use by fishing. *Tr. VNIRO*, vol. 160, pp. 12-25. (in Russian).

6. Popova V.P. (1954). The Black sea period of the life of the Azov khamsa. *Tr. VNIRO*, vol. XXVIII, pp. 65-74. (in Russian).

УДК 532.517:532.545:551.213

DOI 10.18522/1026-2237-2020-1-78-84

О МАЛЫХ КОЛЕБАНИЯХ МАГМЫ В ПИТАЮЩЕЙ СИСТЕМЕ ВУЛКАНА

© 2020 г. А.А. Радионов¹¹Южный математический институт – филиал Владикавказского научного центра РАН, Владикавказ, Россия

ON SMALL OSCILLATIONS INSIDE A VOLCANO FEEDING SYSTEM

A.A. Radionoff¹¹Southern Mathematical Institute - Branch of Vladikavkaz Scientific Centre, Russian Academy of Sciences, Vladikavkaz, Russia

Радионов Анатолий Анатольевич – кандидат технических наук, научный сотрудник, отдел математического моделирования, Южный математический институт – филиал Владикавказского научного центра Российской академии наук, ул. Ватутина, 53, г. Владикавказ, Республика Северная Осетия – Алания, 362003, Россия, e-mail: aar200772@mail.ru

Anatoly A. Radionoff - Candidate of Technical Sciences, Researcher, Department of Mathematical Modeling, Southern Mathematical Institute - Branch of Vladikavkaz Scientific Centre, Russian Academy of Sciences, Vatulina St., 53, Vladikavkaz, Republic North Ossetia - Alania, 362003, Russia, e-mail: aar200772@mail.ru

Представлена математическая модель, показывающая один из возможных механизмов возникновения низкочастотных сейсмических колебаний в питающей системе вулканического центра. Математическая модель малых колебаний питающей системы вулкана построена для цилиндрического питающего канала вулкана, заполненного магмой с максвелловской реологией. Показано, что в канале вулкана могут возникать гармонические затухающие колебания скорости течения магмы, коэффициент затухания которых определяется временем релаксации магматического расплава. Дана зависимость собственной частоты колебаний от физических характеристик магматического расплава и геометрических размеров канала вулкана. Возникновение колебаний магмы может наблюдаться вблизи поверхности как вулканическая дрожь. Модель применяется к результатам измерений низкочастотных колебаний магматической камеры Эльбрусского вулканического центра.

Ключевые слова: извержение вулкана, питающая система вулкана, реология магматического расплава, вулканическая дрожь, низкочастотные колебания.

A simple analytical model representing one of the possible mechanisms for the occurrence of low-frequency oscillations in a feeding system of volcano has been developed. The model is presented for a cylindrical chamber filled with magma with Maxwell rheology. It is shown that damped harmonic oscillations in the magma flow velocity can occur in the volcanic chamber. These damped harmonic oscillations can appear as a reaction to remote seismic events or seismic events in the volcanic feeding system. The dependence of the oscillation frequency on the physical characteristics of the magmatic melt and the geometric dimensions of the volcano chamber is shown. The occurrence of magmatic oscillations can be observed near the surface as a volcanic tremor. The model is applied to the measurements result of low-frequency oscillations for the magma chamber of the Elbrus volcanic center.

Keywords: volcano chamber, volcano feeding system, rheology of magmatic melt, volcanic tremor, low-frequency events.

Введение

Под большинством действующих вулканов, на глубинах порядка пяти или более километров, геофизическими методами регистрируется магматический очаг – область, заполненная частично расплавленными породами, объемом несколько кубических километров [1]. Под верхним, периферий-

ным очагом часто находится другой магматический очаг или система таких очагов. Все вместе они называются питающей системой вулкана. Можно считать [2], что на глубинах порядка 100–150 км действует постоянный во времени источник магмы, создающий в нижней части питающей системы вулкана под действием геодинамических факторов некоторое превышение над литостатическим дав-

лением, вызывающее течение магматического расплава вверх по системе очагов вулкана. Имеющиеся математические модели извержения вулкана [3] связаны с рассмотрением подъема газонасыщенной магмы по верхнему каналу к кратеру вулкана, который называют кондуит.

Во многих вулканических центрах (в том числе Северо-Кавказском [4–9]) наблюдаются низкочастотные сейсмические события. Их еще называют длиннопериодными. Событие состоит в том, что при прохождении волны удаленного землетрясения или после слабого землетрясения под вулканом сейсмическими датчиками на поверхности регистрируется относительно медленно затухающий, практически гармонический сигнал с периодом от 0,1 до 100 с и более. Предполагается, что источником этих колебаний является некоторая полость, заполненная преимущественно газообразными компонентами расплава размерами порядка периферийной магматической камеры, которая резонирует с сейсмическими волнами [6–9].

В настоящей работе предпринимается попытка учесть динамические процессы, протекающие в питающей системе вулкана, которые могут при определенных условиях проявляться как колебания всего столба магмы относительно средней скорости течения по каналу.

Постановка задачи

Охарактеризуем в целом питающую систему – от периферийного очага до самых глубоких родительских очагов вулкана радиусом R , некоторыми изменениями которого, происходящими с увеличением глубины при переходе от периферийного очага к более глубоким, пренебрежем. Введем цилиндрическую систему координат (r, θ, z) . Ось z совместим с осью цилиндра, точку $r = 0$ – с осью канала. Время обозначим через t .

Экспериментально установлено, что магматический расплав имеет реологические свойства максвелловской жидкости [10]. Введем обозначения: p – давление; ρ, μ, E – плотность, вязкость, модуль упругости расплава; u, w – компоненты скорости; u направлена вдоль радиуса (радиальная); w – вдоль оси цилиндра (осевая), положительное значение w соответствует направлению вверх. Азимутальная компонента скорости, направленная перпендикулярно радиусу и оси, принимается далее нулевой. Её зависимость от угловой координаты θ не учитывается. Ускорение свободного падения считаем не зависящим от высоты и обозначим $(0, 0, -g)$. Время релаксации $\lambda = \mu/E$.

Для системы дифференциальных уравнений, описывающей течение расплава в питающей си-

стеме вулкана, примем следующие упрощающие предположения: 1) несжимаемость магматического расплава $\rho = \rho_0 = const$; 2) независимость течения от угловой координаты, т. е. $\partial f / \partial \theta \equiv 0$, где f – любая из зависимых переменных; 3) независимость осевой скорости течения от вертикальной координаты: $\partial w / \partial z = 0$; 4) независимость вязкости расплава от температуры и содержания летучих компонент расплава, что может быть справедливо для небольших промежутков времени в качестве первого приближения. Некоторым количеством тепла, выделяющегося при деформировании магматических расплавов [3], пренебрежем. Эти упрощающие предположения позволяют записать исходную систему нелинейных дифференциальных уравнений в виде, допускающем аналитическое решение.

Математическая модель

Рассмотрим питающую систему вулкана, взятую в модельной цилиндрической форме, заполненную магматическим расплавом с максвелловской реологией. Течение подчиняется уравнениям движения несжимаемой жидкости, реологическому, связывающему скорости деформации и возникающие в элементе объема напряжения, и неразрывности.

Уравнение неразрывности для несжимаемой жидкости:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial(ru)}{\partial r} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

Уравнение движения для радиальной компоненты скорости:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial r} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial r} + \frac{1}{\rho_0} \left(\frac{\partial \tau^{rr}}{\partial r} + \frac{\partial \tau^{rz}}{\partial z} + \frac{\tau^{rr} - \tau^{\theta\theta}}{r} \right). \quad (2)$$

Уравнение движения для осевой компоненты скорости:

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial r} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial z} - g + \frac{1}{\rho_0} \left(\frac{\partial \tau^{rz}}{\partial r} + \frac{\partial \tau^{zz}}{\partial z} + \frac{\tau^{rz}}{r} \right). \quad (3)$$

Здесь тензор напряжений представлен в виде суммы $(-p\delta^{ij} + \tau^{ij})$ девиаторной части τ^{ij} и изотропного давления p ; δ^{ij} – символ Кронекера ($\delta^{ij} = 1$ при $i = j$ и $\delta^{ij} = 0$ при $i \neq j$).

Реологическая модель Максвелла имеет вид [11]

$$\tau^{ij} + \lambda \frac{\partial \tau^{ij}}{\partial t} = 2\mu \varepsilon^{ij}, \quad (4)$$

где $(i, j) = (r, \theta, z)$; ε^{ij} – тензор скоростей деформаций. Реологическая модель (4) является наиболее простой, используемой для описания течений максвелловских жидкостей.

Компоненты тензора скоростей деформации выражаются через скорости течения жидкости в виде

$$\begin{aligned} \varepsilon^{rr} &= \frac{\partial u}{\partial r}, \varepsilon^{zz} = \frac{\partial w}{\partial z}, \\ \varepsilon^{\theta\theta} &= \frac{u}{r}, \varepsilon^{rz} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial r} \right). \end{aligned} \quad (5)$$

Система уравнений (1)–(5) решается при крайних условиях: ограниченность на оси цилиндра

$$w(r=0) < \infty, u(r=0) = 0; \quad (6)$$

условия прилипания к боковой поверхности цилиндра

$$w(r=R) = 0, u(r=R) = 0; \quad (7)$$

дополнительное условие $\partial w / \partial r (r=0) = 0$.

Учитывая условие $\partial w / \partial z = 0$ и ограниченность u на оси (6), из уравнения (1) получим $u(r, t) = 0$. Тогда уравнение (3) упрощается:

$$\frac{\partial w}{\partial t} = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial z} - g + \frac{1}{\rho_0} \left(\frac{\partial \tau^{rz}}{\partial r} + \frac{\partial \tau^{zz}}{\partial z} + \frac{\tau^{rz}}{r} \right). \quad (8)$$

Продифференцируем (8) по времени, умножим на λ , и полученное выражение сложим с (8). С учетом соотношений (4) будем иметь

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + \frac{1}{\lambda} \left(\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial z} + g \right) &= \\ = \frac{2\mu}{\lambda \rho_0} \left(\frac{\partial \varepsilon^{rz}}{\partial r} + \frac{\partial \varepsilon^{zz}}{\partial z} + \frac{\varepsilon^{rz}}{r} \right). \end{aligned} \quad (9)$$

С учетом (5) и условия $\partial w / \partial z = 0$ из (9) получим линейное уравнение второго порядка для осевой скорости течения жидкости:

$$\frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + \frac{1}{\lambda} \left(\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial z} + g \right) = \frac{\mu}{\lambda \rho_0} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial w}{\partial r} \right). \quad (10)$$

При выводе уравнения (10) пренебрегаем величиной $\partial^2 p / \partial z \partial t = 0$, описывающей изменения во времени градиента давления, вызывающего течение. Градиент $\partial p / \partial z$ является постоянным параметром модели, и его изменения во времени на промежутках, сопоставимых со временем жизни вулкана, не учитываются [2]. Выражение $(\partial p / \partial z + \rho_0 g)$, принимаемое далее постоянной величиной, является тем перепадом давления, под действием которого расплав поднимается к поверхности. Величина $(\partial p / \partial z + \rho_0 g) = const$ может быть оценена по расходу массы извергающегося вулкана. Для оценки примем объем выбрасываемого вулканом материала $0,1 \text{ км}^3$ в год, тогда для течения Пуазейля [12, с. 79] в цилиндре радиуса $R = 3000 \text{ м}$ при $\mu = 10^{10} \text{ Па}\cdot\text{с}$ получим $(\partial p / \partial z + \rho_0 g) \approx 10^{-3} \text{ Па}\cdot\text{м}^{-1}$.

Решение

Для решения уравнения (10) требуются два начальных условия, связанных с амплитудой и скоростью изменений вертикальной скорости течения магмы, которые точно неизвестны, но относительно которых можно строить предположения. При наблюдениях в активных вулканических районах отмечается, что возникновению низкочастотных сейсмических событий предшествует землетрясение

на некоторой глубине под вулканом или прохождение сейсмической волны от дальнего землетрясения. Связанные с сейсмической волной подвижки породы могут являться тем начальным условием, которое инициирует изменение осевой скорости. Примем начальный момент времени $t = 0$ непосредственно сразу после такого события, а смещения, вызываемые сейсмической волной, – за начальные условия задачи. Введем обозначения:

$$w(r, t=0) = \varphi(r); \quad \frac{\partial w}{\partial t}(r, t=0) = \psi(r). \quad (11)$$

Решение уравнения (10) ищется в виде суммы двух решений: неоднородного уравнения (10) с нулевыми начальными условиями и однородного уравнения (10) с начальными условиями (11). Решение неоднородного уравнения с нулевыми начальными условиями представлено в [12, с. 79] и описывает течение Пуазейля. Метод решения однородного уравнения с начальными (11) и граничными (6), (7) условиями показан в [13, с. 425].

$$\begin{aligned} w(r, t) &= -\frac{\partial p / \partial z + \rho_0 g}{4\mu} (R^2 - r^2) + \\ &+ \exp\left(-\frac{t}{2\lambda}\right) \sum_{n=1}^{\infty} J_0\left(\omega_{0,n} \frac{r}{R}\right) \times \\ &\times \left[(\varphi_n - w_{Pn}) \cos\left(t \frac{\gamma_n}{2\lambda\rho_0}\right) + \right. \\ &\left. + \left(\psi_n + \frac{\varphi_n - w_{Pn}}{2\lambda} \right) \frac{2\lambda\rho_0}{\gamma_n} \sin\left(t \frac{\gamma_n}{2\lambda\rho_0}\right) \right]. \end{aligned} \quad (12)$$

Здесь $J_0(x)$ – функция Бесселя нулевого порядка. Коэффициенты разложения величин $\varphi(r) - w_P$ и $\psi(r)$ в ряд по функциям $J_0(\omega_{0,n} r/R)$, $n = 1, 2, 3, \dots$ обозначены через $\varphi_n - w_{Pn}$ и ψ_n соответственно, где w_P – первое слагаемое в правой части (12). Введены обозначения: $\gamma_n^2 = \rho_0^2 - 4\lambda\mu\rho_0\omega_{0,n}^2 R^{-2}$, где $\omega_{0,n}$ – n -й корень уравнения $J_0(\omega) = 0$, $n = 1, 2, 3, \dots$ Выражение (12) записано для случая $\gamma_n^2 < 0$, для которого возможно осциллирующее поведение решения во времени. Отметим, что начальные условия (11) включают в себя среднюю скорость течения w_P . Похожая аналитическая модель представлена в работе [14, гл. 6].

Результаты и их обсуждение

Использование условия $\partial w / \partial z = 0$ позволяет найти и аналитически проанализировать решение задачи о течении максвелловской жидкости в питающей системе вулкана, однако приводит к тому, что уравнение (10) теряет зависимость от вертикальной координаты. Это означает, что уравнение (10) описывает бесконечное по оси Oz течение, соответственно, и начальные условия (11) задаются бесконечными по оси Oz .

Питающая система вулканов всегда ограничена по оси Oz . Верхнее окончание питающей системы

расположено на глубине кровли периферийного магматического очага (порядка 5 км), нижнее может достигать глубин порядка 100–150 км, расположенных в верхней мантии, как это наблюдается геофизическими методами для вулканов Камчатки [2]. Начальные условия всегда ограничены по оси Oz , например размером сейсмической волны, возмущающей питающую систему вулкана. Предлагаемая модель остается работоспособной, если начальные условия, вызванные сейсмической волной или землетрясением, одинаковы по всей длине питающей системы.

В модельном решении (12) внешние воздействия моделируются при помощи начальных условий (11) и применяются для магматических камер вулканов конечных размеров. Для целей описания низкочастотных колебаний перепад давления $(\partial p / \partial z + \rho_0 g)$ не играет роли, поскольку вызываемые им скорости течения на несколько порядков меньше регистрируемых скоростей колебаний. Высота и ориентация в пространстве модельного цилиндра также значения не имеют.

Решение (12) показывает, что сама питающая система вулкана является осциллятором, который может активизироваться под действием внешних или внутренних воздействий. Коэффициент затухания в (12) связан со временем релаксации $\lambda = \mu / E$. Величина модуля упругости $E \sim 10^9$ мало отличается для магматических расплавов различных композиций [3]. Следовательно, затухание колебаний определяется в основном вязкостью магмы. Например, если из записей сейсмических датчиков следует, что коэффициент затухания колебаний $\sim 10^{-4} \text{ с}^{-1}$, это означает, что колебательная система характеризуется вязкостью $\mu \sim 10^{13} \text{ Па} \cdot \text{с}$.

Колебания возникают в питающей системе вулкана, имеющей определенные геометрические формы и размеры. Решение (12) записано для модельного цилиндрически симметричного случая при условии $\gamma_n^2 = \rho_0^2 - 4\lambda\mu\rho_0\omega_{0,n}^2 R^2 < 0$. Оценим значения радиуса канала R_0 , при котором происходит смена знака величины γ_n^2 . Из выражения $\gamma_n^2 \approx 0$ при $n = 1$ получаем $R_0^2 \approx 4\lambda\mu\rho_0^{-1}\omega_{0,1}^2$; при $\lambda = 1 \text{ с}$ и $\mu = 10^9 \text{ Па} \cdot \text{с}$ – $R_0 = 2927 \text{ м}$; при $\lambda = 10^2 \text{ с}$ и $\mu = 10^{11} \text{ Па} \cdot \text{с}$ – $R_0 = 292 \text{ км}$; R_0 увеличивается с ростом времени релаксации и вязкости. В каналах радиуса, большего R_0 , не возникает колебаний, меньшего R_0 – колебания возможны. Для кислых магматических расплавов величина γ_n^2 отрицательна для наблюдаемых размеров каналов вулканов.

Чтобы проиллюстрировать возможные радиальные распределения осевой скорости, рассмотрим

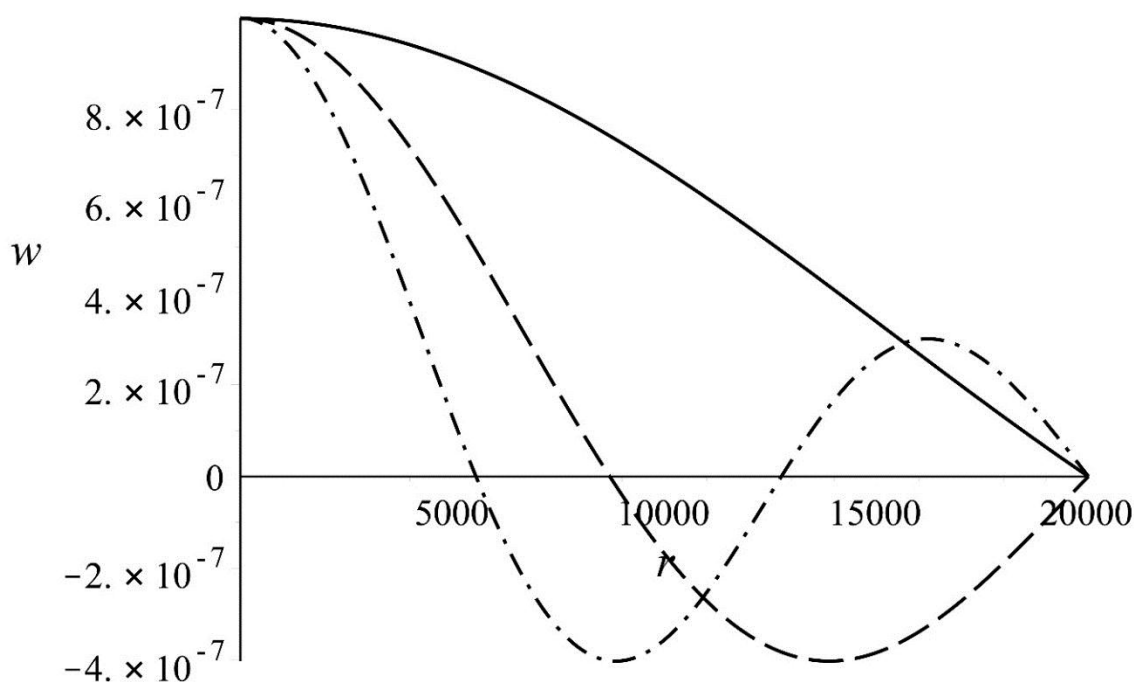
отдельные гармоники (12). Для этого выберем начальные условия в специальном виде, чтобы коэффициенты разложения равнялись $\varphi_n = \psi_n = 0$, $n \neq k$ и $\varphi_k = a$, $\psi_k = 0$, где k фиксировано; a – произвольное число. Соответствующие гармоники изображены на рисунке для трех первых значений k при фиксированных прочих постоянных. Для каждого k показана осевая скорость (12) в различные моменты времени, соответствующие максимуму амплитуды k -й гармоники при $r = 0$. Вычисленная при тех же значениях параметров скорость течения Пуазейля составляет 10^{-16} м/с и на рисунке не показана.

Изображенные на рисунке графики показывают особенность возникающих колебаний. Для ее описания предположим, что на поверхности имеется сеть сейсмических датчиков, плотно покрывающих склоны вулкана. На основании решения (12) можно ожидать, что колебания будут регистрироваться сетью сейсмических датчиков с разной амплитудой на различных расстояниях от оси питающей системы вулкана. При возбуждении первой моды максимальная амплитуда этих колебаний достигается над осью цилиндрической питающей системы, а минимальная – вблизи наружной границы. При возбуждении более высоких мод на склонах вулкана будут зарегистрированы вложенные кольца с максимальными амплитудами, чередующиеся кольцами с минимальными амплитудами колебаний. При этом смещения в соседних кольцах, характеризующихся максимальными амплитудами, направлены противофазно. В реальности эти колебания осложняются верхним участком коры и сложной геометрической формой магматической камеры.

С увеличением радиуса канала частота колебаний уменьшается, с уменьшением – возрастает. Период первой моды колебаний для значений параметров, указанных в подписи к рисунку, составляет около 86 с при $R = 20000$, при $R = 10000 \text{ м}$ – 43 с, при $R = 3000$ – 13 с.

Периодические колебания осевой скорости (12) приводят к периодическим вертикальным смещениям по всей осевой протяженности канала и могут быть измерены на земной поверхности склонов вулкана. Вблизи извергающегося вулкана и на начальных стадиях извержения наблюдается вулканическая дрожь – длительные во времени колебания земной поверхности. Можно предположить, что решение (12) может описывать это явление при $\lambda > 1 \text{ с}$.

Применим полученные формулы для описания колебаний питающей системы Эльбрусского вулканического центра. Проведенные измерения представлены в [1, с. 452; 4, с. 123; 5].



Зависимость гармоник решения (12) от радиальной координаты. Сплошная кривая соответствует первой ($k=1$), пунктирная – второй ($k=2$), штрихпунктирная – третьей ($k=3$) гармоникам, параметры: $\rho_0 = 2700 \text{ кг/м}^3$, $\lambda = 10^4 \text{ с}$, $\mu = 10^{13} \text{ Па}\cdot\text{с}$, $R = 20 \text{ км}$. Амплитуда колебаний подбиралась так, чтобы скорости составляли 10^{-6} м/с
 / Dependence of the solution (12) on the radial coordinate for different values of wave number k at different time, with parameters $\rho_0 = 2700 \text{ кг/м}^3$, $\lambda = 10^4 \text{ с}$, $\mu = 10^{13} \text{ Па}\cdot\text{с}$, $R = 20 \text{ км}$. The magnitude of the oscillations was chosen to match 10^{-6} м/с

На основании геоэлектрического разреза, отражающего полученные методом магнитотеллурического зондирования данные, можно оценить диаметр структуры, расположенной под Эльбрусом (30–40 км), имеющей сложную геометрическую форму. Анализ, проведенный для случая возбуждения магматических структур под вулканом Эльбрус сильными сейсмическими событиями с магнитудами $6\div 7$ и более, показывает следующие периоды и добротности резонансных мод, наблюдаемых во время сильных землетрясений: мода Р, период Т, с = 100, 92, 83, 76, 62, 58, 52, 50; добротность Q = 100, 120, 140, 140, 170, 180, 140, 200 [4, с. 123]. В этих измерениях можно отметить повторяющееся соотношение: с уменьшением периода увеличивается добротность, а произведение периода на добротность имеет порядок приблизительно 10^4 (кроме значения для периода 52 с). Таким образом, из измерений известны частота колебаний, их добротность и общие размеры питающей системы вулкана.

Запишем частоту возникающих колебаний (12):

$$\vartheta_n = \frac{(4\lambda\mu\rho_0\omega_{0,n}^2 R^{-2} - \rho_0^2)^{1/2}}{2\lambda\rho_0}$$

Примем для оценок значение плотности магматического расплава $\rho_0 = 2700 \text{ кг/м}^3$ и радиус магматического тела под вулканом $R = 20000 \text{ м}$.

Произведение добротности на период колебаний обратно пропорционально коэффициенту затухания. Из (12) $\lambda \approx QT/(4\pi)$. Экспериментальные данные дают $\lambda \approx 800 \div 900 \text{ с}$. Отсюда следует оценка для вязкости расплава в среднем по всему магматическому очагу вулкана: $\mu \approx 8 \cdot 10^{11} \div 10^{12} \text{ Па}\cdot\text{с}$ при $E \approx 10^9$.

Из имеющихся данных можно вычислить частоту колебаний $\vartheta_1 \approx 0,0732$, или период 86 с для возбужденной первой моды. Вычисленные по (12) и измеренные периоды колебаний совпадают удовлетворительно, и можно увеличить или уменьшить радиус R так, чтобы совпадение было точным. Возможно, некоторый разброс измерительных данных возникает как результат различного угла падения удаленной сейсмической волны на магматическую камеру сложной геометрической формы.

Для возбужденной второй моды $\vartheta_2 \approx 0,16797$, или T = 37 с. Сомнительно, что от сейсмической волны удаленного землетрясения возникает вторая и более высокие моды колебаний (12). Однако колебания с периодом T = 52 с и добротностью Q = 140, возможно, представляют собой вторую моду.

Кроме оценки частоты колебаний, выражение (12) дает представление о значениях вязкости в питающей системе вулкана. В [5] указывается, что

добротность наблюдающихся колебаний имеет динамику к уменьшению со скоростью 4–8 единиц в год (2004–2009 гг.), а с 2010 г. такие изменения не наблюдаются или происходят медленнее. Если принять изложенный в данной работе подход, можно утверждать, что уменьшение добротности обуславливается уменьшением вязкости магматической питающей системы Эльбруса во времени. Вязкость магматического расплава уменьшается с увеличением температуры и концентрации летучих компонент расплава [3]. Увеличение этих характеристик магмы в очаге может указывать на подготовку к активизации вулкана.

Заключение

Представленная простая аналитическая модель показывает, что низкочастотные сейсмические события могут быть колебаниями самой магматической питающей системы вулкана. Модель позволяет оценить вязкость магмы в питающей системе вулкана и может быть использована для оценки геометрических размеров магматической камеры. Модель также может оказаться полезной при тестировании более сложных математических моделей, поскольку дает представление о возможных режимах течения магматического расплава в питающей системе вулкана.

Литература

1. Новейший и современный вулканизм на территории России / отв. ред. Н.П. Лаверов; Ин-т физики Земли им. О.Ю. Шмидта. М.: Наука, 2005. 604 с.
2. Федотов С.А. Магматические питающие системы и механизм извержений вулканов / Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН. М.: Наука, 2006. 455 с.
3. Gonnermann H.M., Manga M. The fluid mechanics inside a volcano // *Annu. Rev. Fluid Mech.* 2007. Vol. 39. P. 321–356.
4. Собисевич А.Л. Избранные задачи математической геофизики, вулканологии и геоэкологии. Т. 2: Северо-Кавказская геофизическая обсерватория ИФЗ РАН (Создание, результаты наблюдений). М.: Ин-т физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, 2013. 288 с.
5. Мясников А.В., Милуков В.К. Состояние и динамика магматических камер вулкана Эльбрус по результатам деформографических наблюдений // Геодинамика, вулканизм, сейсмичность и экзогенные геологические процессы природного и техногенного характера на Кавказе: материалы Междунар. науч. конф. Владикавказ: ВИЦ РАН, 2015. С. 137–144.

6. Crosson R.S., Bame D.A. A spherical source model for low frequency volcanic earthquakes // *J. of Geophysical Research: Solid Earth.* 1985. Vol. 90, iss. B12. P. 10237–10247. DOI: 10.1029/JB090iB12p10237.

7. Fujita E., Ida Y., Oikawa J. Eigen oscillation of a fluid sphere and source mechanism of harmonic volcanic tremor // *J. of Volcanology and Geothermal Research.* 1995. Vol. 69, iss. 3–4. P. 365–378. DOI: 10.1016/0377-0273(95)00027-5.

8. Kumagai H., Chouet B.A. The complex frequencies of long-period seismic events as probes of fluid composition beneath volcanoes // *Geophysical J. International.* 1999. Vol. 138, iss. 2. P. F7–F12. DOI: 10.1046/j.1365-246X.1999.00911.x.

9. Kumagai H., Chouet B.A. The dependence of acoustic properties of a crack on the resonance mode and Geometry // *Geophysical Research Letters.* 2001. Vol. 28, iss. 17. P. 3325–3328. DOI: 10.1029/2001GL013025.

10. Жариков В.А. Основы физической геохимии. М.: Изд-во Моск. ун-та; Наука, 2005. 654 с.

11. Бартнев Г.М., Френкель С.Я. Физика полимеров / под ред. А.М. Ельяшевича. Л.: Химия, 1990. 432 с.

12. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. Т. VI: Гидродинамика: учеб. пособие. М.: Наука, 1988. 736 с.

13. Тихонов А.Н., Самарский А.А. Уравнения математической физики. М.: Наука, 1966. 724 с.

14. Янков В.И., Глот И.О., Труфанова Н.М., Шакиров Н.В. Течение полимеров в отверстиях фильер. М.; Ижевск: НИЦ. Регулярная и хаотическая динамика, Ин-т компьютерных исследований, 2010. 386 с.

References

1. *Newest and modern volcanism on the territory of Russia.* (2005). N.P. Laverov (Ed.), Schmidt Institute of Physics of the Earth. Moscow, Nauka Publ., 604 p. (in Russian).
2. Fedotov S.A. (2006). *Magmatic feeding systems and mechanism of volcanic eruptions.* Institute of Volcanology and Seismology, Far Eastern Scientific Center, Russian Academy of Sciences. Moscow, Nauka Publ., 455 p. (in Russian).
3. Gonnermann H.M., Manga M. (2007). The fluid mechanics inside a volcano. *Annu. Rev. Fluid Mech.*, vol. 39, pp. 321–356.
4. Sobisevich A.L. (2013). *Selected problems of mathematical geophysics, volcanology and geoecology.* Vol. 2: North Caucasus Geophysical Observatory of the IFZ RAS (Creation, results of observations). Moscow, Schmidt Institute of Physics of the Earth Press, RAS, 288 p. (in Russian).
5. Myasnikov A.V., Milyukov V.K. (2015). State and dynamics of magmatic chambers of the Elbrus volcano based on the results of deformedographic observations. *Geodinamika, vulkanizm, seismichnost' i ekzogennye geologicheskie protsessy prirodno i tekhnogenno kharaktera*

tera na Kavkaze [Geodynamics, volcanism, seismicity and exogenous geological processes of natural and tectonic character in the Caucasus]. Proceedings of the International Scientific Conference. Vladikavkaz, Vladikavkaz Scientific Center Press, Russian Academy of Sciences, pp. 137-144. (in Russian).

6. Crosson R.S., Bame D.A. (1985). A spherical source model for low frequency volcanic earthquakes. *J. of Geophysical Research: Solid Earth*, vol. 90, iss. B12, pp. 10237-10247. DOI: 10.1029/JB090iB12p10237.

7. Fujita E., Ida Y., Oikawa J. (1995). Eigen oscillation of a fluid sphere and source mechanism of harmonic volcanic tremor. *J. of Volcanology and Geothermal Research*, vol. 69, iss. 3-4, pp. 365-378. DOI: 10.1016/0377-0273(95)00027-5.

8. Kumagai H., Chouet B.A. (1999). The complex frequencies of long-period seismic events as probes of fluid composition beneath volcanoes. *Geophysical J. International*, vol. 138, iss. 2, pp. F7-F12. DOI: 10.1046/j.1365-246X.1999.00911.x.

9. Kumagai H., Chouet B.A. (2001). The dependence of acoustic properties of a crack on the resonance mode and geometry. *Geophysical Research Letters*, vol. 28, iss. 17, pp. 3325-3328. DOI: 10.1029/2001GL013025.

10. Zharikov V.A. (2005). *Fundamentals of physical geochemistry*. Moscow, Moscow State University Press, Nauka Publ., 654 p. (in Russian).

11. Bartenev G.M., Frenkel S.Ya. (1990). *Physics of polymers*. A.M. Elyashevich (Ed.). Leningrad, Khimiya Publ., 432 p. (in Russian).

12. Landau L.D., Lifshits E.M. (1988). *Theoretical physics*. Vol. VI: Hydrodynamics. Textbook. Moscow, Nauka Publ., 736 p. (in Russian).

13. Tikhonov A.N., Samarsky A.A. (1966). *Equations of mathematical physics*. Moscow, Nauka Publ., 724 p. (in Russian).

14. Yankov V.I., Glot I.O., Trufanova N.M., Shakirov N.V. (2010). *The flow of polymers in the holes of spinners*. Moscow, Izhevsk, Regular and Chaotic Dynamics Center, Computer Research Institute Press, 386 p. (in Russian).

Поступила в редакцию / Received

25 октября 2019 г. / October 25, 2019

УДК 332.6

DOI 10.18522/1026-2237-2020-1-85-88

АНАЛИЗ КАДАСТРОВОЙ ОЦЕНКИ ЗЕМЕЛЬ С УЧЕТОМ ЗОНИРОВАНИЯ ЗЕМЕЛЬ ПО ПРЕСТИЖНОСТИ В ГОРОДЕ КРАСНОЯРСКЕ

© 2020 г. Р.В. Романов¹, Г.С. Вараксин²

¹Красноярский государственный аграрный университет, Красноярск, Россия,

²Институт леса им. В.Н. Сукачева СО РАН, Красноярск, Россия

ANALYSIS OF THE CADASTRAL ASSESSMENT OF LANDS, TAKING INTO ACCOUNT ZONING OF LANDS AT A PRESTIGE IN KRASNOYARSK

R.V. Romanov¹, G.S. Varaksin²

¹Krasnoyarsk State Agrarian University, Krasnoyarsk, Russia,

²Sukachev Forest Institute, SB RAS, Krasnoyarsk, Russia

Романов Руслан Вячеславович – аспирант, Институт землеустройства, кадастров и природообустройства, Красноярский государственный аграрный университет, пр. Свободный, 70, г. Красноярск, 660041, Россия, e-mail: romanovrv96@mail.ru

Ruslan V. Romanov - Postgraduate, Institute of Land Management, Cadastre and Environmental Management, Krasnoyarsk State Agrarian University, Svobodnyi Ave., 70, Krasnoyarsk, 660041, Russia, e-mail: romanovrv96@mail.ru

Вараксин Геннадий Сергеевич – доктор сельскохозяйственных наук, профессор, старший научный сотрудник, Институт леса им. В.Н. Сукачева СО РАН, Академгородок, 50, стр. 28, г. Красноярск, 660036, Россия, e-mail: var@ksc.krasn.ru

Gennady S. Varaksin - Doctor of Agricultural Sciences, Professor, Senior Researcher, Sukachev Forest Institute, SB RAS, Akademgorodok, 50, build. 28, Krasnoyarsk, 660036, Russia, e-mail: var@ksc.krasn.ru

Приведен анализ государственной кадастровой оценки земель с учетом данных зонирования их престижности в г. Красноярск. Изложена необходимость оценки территорий населенных пунктов. На территории Красноярска условно были выделены 3 зоны в разных районах города, где располагаются участки, предназначенные для строительства индивидуальных жилых строений. Рассмотрены главные параметры кадастровой оценки земель таких территорий, изложен перечень параметров. Определена престижность каждой зоны. Выделены четыре показателя, которые формируют престижность зон при кадастровой оценке земель. Выявлены параметры, которые определяют уровень стоимости земель. Установлена тенденция определения престижности зон в результате классификации населения этих зон по уровню дохода и стремлению проживать на этой территории людей, равных по социальному статусу. Территорию городского пространства необходимо разделять на зоны согласно критериям престижности. Проведено сравнение между рыночной и кадастровой стоимостью земельных участков. Методом сравнительного анализа была выявлено, что в наиболее престижных зонах территории городского пространства рыночная стоимость участков индивидуального жилищного строительства превышает кадастровую стоимость в несколько раз. Сделаны выводы о зависимости цены на земельные участки под индивидуальное жилищное строительство от уровня престижности территории городского пространства и расположения.

Ключевые слова: кадастровая оценка, кадастровая стоимость, земельные участки, недвижимость, налогообложение, престижность территории, земли населенных пунктов, зонирование территории.

The analysis of the state cadastral assessment of land based on the data of zoning of lands according to their prestige in the city of Krasnoyarsk. The need for assessing the prestige of territories of settlements is stated. On the territory of Krasnoyarsk, 3 zones were conditionally allocated in different districts of the city, where plots intended for the construction of individual residential buildings are located. The main parameters of the cadastral assessment of the lands of such territories are considered. A list of parameters is outlined by which the prestige of individual housing construction lands is estimated. The prestige of each zone is determined. Four indicators are identified that form the prestige of the zones in the cadastral assess-

ment of land. The parameters that determine the level of land value depending on their prestige are identified. A tendency has been established to determine the prestige of zones as a result of the classification of the population of these zones by income level and the desire to live on this territory of people of equal social status. The territory of urban space must be divided into zones, according to the criteria of prestige. A comparison is made between the market and cadastral value of land plots. The comparative analysis method revealed that in the most prestigious areas of urban space, the market value of individual housing construction sites exceeds the cadastral value several times. Conclusions are drawn about the dependence of the price of land for individual housing construction on the level of prestige of the territory of urban space and location.

Keywords: cadastral assessment, cadastral value, land plots, real estate, taxation, prestige of the territory, land of settlements, zoning of the territory.

Введение

В настоящее время государственная кадастровая оценка земель для индивидуального жилищного строительства (ИЖС) не имеет полноты сведений, учитывающих определение кадастровой стоимости объекта недвижимости. Из-за этого возникают проблемы, связанные с социальной несправедливостью в налогообложении. С целью восстановить полноту сведений при проведении кадастровой оценки осуществлен анализ иерархий с учетом зонирования территорий населенного пункта по престижности. Прежде всего, определение престижности территорий необходимо для увеличения уровня объективности и справедливости оценочных и земельных работ, а также для выявления территорий, которые нуждаются в дополнительном финансировании, привлечения инвестирования и повышения их ликвидности. Такие действия способствуют развитию отдельных территорий внутри населенных пунктов и увеличению поступлений в бюджет [1].

Учитывая критерии социального расслоения общества и разнородности организации территорий населенных пунктов, расчет кадастровой стоимости земельных участков, которые предназначены для ИЖС, следует проводить раздельно в отношении каждой зоны земельных участков, основанной на зонировании территорий населенных пунктов по престижности [2].

Формулировка проблемы

На стоимость объектов недвижимости и факторы ценообразования влияют разные критерии их характеристик, в том числе критерий престижности территории при оценке кадастровой стоимости. Так, кадастровая стоимость земельных участков для ИЖС в Красноярске в пределах от 280 до 800 р/м². Сегодня действующая методическая база, по которой проводится государственная кадастровая оценка земель городских территорий, не учитывает такой разброс цен, что влечет установление экономического неравенства в размере зе-

мельного налога. В том числе снижение кадастровой стоимости территорий престижных районов и необъективность в оценке земельных участков непрестижных районов в отношении к их рыночной стоимости. В результате отмены списка критериев стоимости земельных участков из технических рекомендаций по государственной кадастровой оценке земель населенных пунктов оценочные организации не в полной мере могут субъективно установить параметры для оценки городских территорий [3].

Анализ территории

На территории Красноярска были выделены 3 зоны земельных участков, которые предназначены для ИЖС и ранжированы по престижности. Первая зона – микрорайон Удачный. Вторая зона – микрорайон Солонцы. Третья зона – микрорайон Мясокомбинат (рисунок).

Особенностью выбранных зон являются их равная отдаленность от центра города и транспортная доступность, однако каждая зона выделяется уникальным местоположением, которое влияет на ее экологичность. Первая зона – микрорайон Удачный – выделяется близостью к реке и рекреационной зоне. Вторая зона – микрорайон Солонцы – отличается своим ландшафтом, так как находится в низменной части территории между двух возвышенностей. Третья зона – микрорайон Мясокомбинат – выделяется своей отдаленностью от промышленных зон города и транспортной развязкой [4].

Таким образом, к критериям определения престижности зон можно отнести отдаленность от центра, транспортную доступность, близость к водным объектам, соседство с рекреационной зоной, ландшафтные особенности, отсутствие промышленных объектов вблизи территорий.

Помимо выделенных характеристик, каждую зону следует рассмотреть по социальному классу населения. В первой зоне проживает население с высоким уровнем доходов: представители среднего и крупного

бизнеса, чиновники и люди, занимающие высокие должности. Во второй зоне население относится к социальному уровню с доходом выше среднего: мелкие и средние предприниматели, высокодолжностные

лица, госслужащие. В третьей зоне – средний класс, со средним уровнем заработка. Таким образом, к критериям определения престижности можно также отнести социальный статус населения [5].

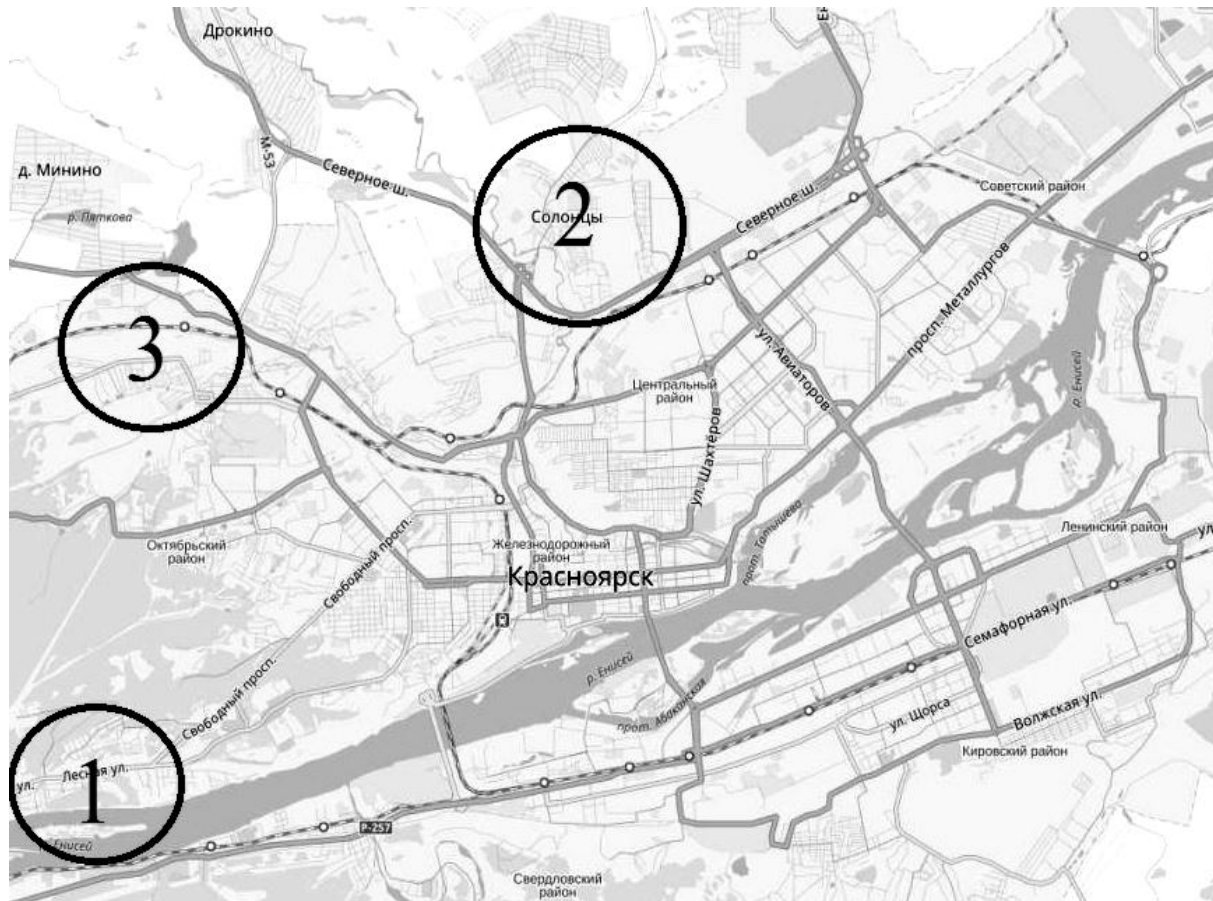


Схема расположения исследуемых зон / Scheme of location of the studied area

Результаты анализа

В результате анализа был сделан вывод, что престижность городских территорий создается на основе критериев, которые характеризуют местоположение земельного участка, социального уровня населения и экологической обстановки [6].

В рассматриваемых зонах уровень указанных критериев при оценке участков внутри зоны имеет разное значение. Например, когда в одной зоне есть 2 участка, равных по площади, но один участок расположен возле железной дороги, а другой –

ближе к лесу. Либо если внутри зоны создаются обособленные территории с населением, уровень жизни которых значительно выше других. В этом случае, при неоднородности территории зоны, необходимо проводить кадастровую оценку земель для ИЖС для каждого участка отдельно [7]. В то же время в разных частях зон существуют обширные территории с одинаковым ценообразованием и уровнем престижности, но значение среднего уровня цен в таких зонах различно.

Также был проведен сравнительный анализ кадастровой и рыночной цены земельных участков (таблица).

Средний уровень кадастровой и рыночной стоимости земельных участков
/ Average level of cadastral and market value of land

Зона	Название микрорайона	Рыночная стоимость, р/м ²	Кадастровая стоимость, р/м ²
1	Удачный	3 300	800
2	Солонцы	2 000	630
3	Мясокомбинат	1 000	280

Так, средняя рыночная цена земельного участка – 2100 р/м², средняя кадастровая стоимость – 570 р/м².

Зоны престижности городских территорий формируются с течением времени и влияют как на социальную сферу жизни людей, так и на распределение местного бюджета (строительство социальных и культурных объектов, благоустройство, транспортная логистика, определение ценовой политики и др.) [8].

Вывод

Из вышеизложенного следует, что конечная стоимость земельных участков для ИЖС рассчитывается не только из значений факторов стоимости, но и критерия уровня престижности территории, качества окружающей среды и населения. Таким образом, цена на земельный участок – это отражение совокупности характеристик и качеств территории. Учет критерия престижности территории при государственной кадастровой оценке земель, помимо базовых параметров, играет немаловажную роль.

Литература

1. Ковязин В.Ф., Романчиков А.Ю. Проблема определения кадастровой стоимости земель // Записки Горного ин-та. 2015. Т. 216. С. 50–56.
2. Лепихина О.Ю., Сапожникова Ю.И. Определение кадастровой стоимости земельных участков индивидуальной застройки // Отраслевые аспекты технических наук. 2012. № 12. С. 43–47.
3. Дубовик Б.И., Павлова Е.Б. Некоторые вопросы совершенствования методики кадастровой оценки земли // Имущественные отношения в Российской Федерации. 2015. № 8. С. 67–72.
4. Тесаловский А.А. Методика кадастровой оценки земель // Изв. С.-Петербург. гос. аграрн. ун-та. 2011. № 23. С. 337–341.
5. Об утверждении методических указаний по государственной кадастровой оценке земель населенных пунктов: Приказ Минэкономразвития РФ от 15.02.2007 № 39 // Российская газета. 2007. № 100.

6. Шабаетова Ю.И. Кадастровая оценка земель индивидуальной жилой застройки с учетом дифференциации городской территории по престижности: дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2015. 159 с.

7. Чернецкая Ю.В. Кадастровая оценка земельных участков индивидуальной жилой застройки земель населенных пунктов с учетом обременений и ограничений: дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2014. 143 с.

8. Волович Н.В. Кадастровая оценка недвижимости: тупик или новые перспективы // Имущественные отношения в Российской Федерации. 2016. № 1. С. 30–38.

References

1. Kovyazin V.F., Romanchikov A.Yu. (2015). Problem of determining the cadastral value of the land. *Zapiski Gornogo in-ta*, vol. 216, pp. 50-56. (in Russian).
2. Lepikhina O.Yu., Sapozhnikova Yu.I. (2012). Determining the cadastral value of land plots of individual development. *Otraslevye aspekty tekhnicheskikh nauk*, no. 12, pp. 43-47. (in Russian).
3. Dubovik B.I., Pavlova E.B. (2015). Some issues of improving the methods of cadastral land assessment. *Imushchestvennye otnosheniya v Rossiiskoi Federatsii*, no. 8, pp. 67-72. (in Russian).
4. Tesalovsky A.A. (2011). Methods of cadastral land assessment. *Izv. S.-Peterb. gos. agrarn. un-ta*, no. 23, pp. 337-341. (in Russian).
5. About the approval of methodical instructions on the state cadastral assessment of lands of settlements (2007) : Order of the Ministry of Economic Development of the Russian Federation of 15.02.2007 No. 39. *Rossiyskaya gazeta*, no. 100. (in Russian).
6. Shabaeva Yu.I. (2015). *Cadastral assessment of land of individual residential development taking into account the differentiation of urban territory by prestige*. Dissertation. Saint Petersburg, 159 p. (in Russian).
7. Chernetskaya Yu.V. (2014). *Cadastral assessment of land plots of individual residential development of land settlements with regard to encumbrances and restrictions*. Dissertation. Saint Petersburg, 143 p. (in Russian).
8. Volovich N.V. (2016). Cadastral valuation of real estate: impasse or new prospects. *Imushchestvennye otnosheniya v Rossiiskoi Federatsii*, no. 1, pp. 30-38. (in Russian).

БИОЛОГИЧЕСКИЕ НАУКИ**BIOLOGICAL SCIENCES**

УДК 615.28:579.84-001.8

DOI 10.18522/1026-2237-2020-1-89-94

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ДЕЗИНФИЦИРУЮЩИХ СРЕДСТВ
НА БИОПЛЕНКООБРАЗУЮЩИЕ НЕФЕРМЕНТИРУЮЩИЕ БАКТЕРИИ**© 2020 г. *А.В. Алешукина¹, Е.В. Голошва¹, Т.И. Твердохлебова¹*¹*Ростовский научно-исследовательский институт микробиологии и паразитологии Роспотребнадзора,
Ростов-на-Дону, Россия***INVESTIGATION OF THE EFFECT OF DISINFECTANTS
ON BIOFILM FORMING NON-FERMENTING BACTERIA***A.V. Aleshukina¹, E.V. Goloshva¹, T.I. Tverdokhlebova¹*¹*Rostov Research Institute of Microbiology and Parasitology, Rospotrebnadzor, Rostov-on-Don, Russia*

Алешукина Анна Валентиновна – доктор медицинских наук, руководитель лаборатории вирусологии, микробиологии и молекулярно-биологических методов исследования, Ростовский научно-исследовательский институт микробиологии и паразитологии Роспотребнадзора, пер. Газетный, 119, г. Ростов-на-Дону, 344000, Россия, e-mail: aaleshukina@mail.ru

Anna V. Aleshukina - Doctor of Medicine, Head of the Laboratory of Virology, Microbiology and Molecular Biological Studies, Rostov Research Institute of Microbiology and Parasitology, Rospotrebnadzor, Gazetny Lane, 119, Rostov-on-Don, 344000, Russia, e-mail: aaleshukina@mail.ru

Голошва Елена Владимировна – кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник, лаборатория вирусологии, микробиологии и молекулярно-биологических методов исследования, Ростовский научно-исследовательский институт микробиологии и паразитологии Роспотребнадзора, пер. Газетный, 119, г. Ростов-на-Дону, 344000, Россия, e-mail: lab.microb5e@yandex.ru

Elena V. Goloshva – Candidate of Biological Sciences, Leading Researcher, Laboratory of Virology, Microbiology and Molecular Biological Studies, Rostov Research Institute of Microbiology and Parasitology, Rospotrebnadzor, Gazetny Lane, 119, Rostov-on-Don, 344000, Russia, e-mail: lab.microb5e@yandex.ru

Твердохлебова Татьяна Ивановна – доктор медицинских наук, директор Ростовского научно-исследовательского института микробиологии и паразитологии Роспотребнадзора, пер. Газетный, 119, г. Ростов-на-Дону, 344000, Россия, e-mail: rostovniimp@mail.ru

Tatyana I. Tverdokhlebova - Doctor of Medicine, Director of the Rostov Research Institute of Microbiology and Parasitology, Rospotrebnadzor, Gazetny Lane, 119, Rostov-on-Don, 344000, Russia, e-mail: rostovniimp@mail.ru

Исследуется влияние дезинфицирующих средств на биопленкообразующие неферментирующие бактерии. Актуальность определяется широкой распространенностью в медицинской практике биопленочных инфекций, обусловленных, в частности, неферментирующими грамотрицательными бактериями, обладающими повышенной устойчивостью к антибиотикам и дезинфектантам.

Цель данного исследования – изучение влияния дезинфицирующих средств на пленкообразование неферментирующих бактерий и оценка возможности использования масс-спектрометрического метода для оптимизации подбора дезинфицирующих средств, воздействующих на процесс биопленкообразования у неферментирующих бактерий.

Результаты и выводы. Препараты выбора для надежной элиминации неферментирующих бактерий – перекись водорода и «Ультрадон», оказавшие микробицидный эффект, близкий к 100 %. Использованные растворы дезинфи-

цирующих средств показали однотипный эффект воздействия на способность неферментирующих бактерий к биопленкообразованию: применение сублетальных концентраций данных дезинфицирующих средств приводило к синхронному снижению пленкообразования. Преимущество масс-спектрометрического метода исследования чувствительности неферментирующих бактерий к дезинфицирующим средствам – его объективность, быстрота и простота исполнения. Способ дает экономический эффект по времени, трудозатратам и расходным материалам по сравнению с традиционно используемым методом серийных разведений и определением жизнеспособных клонов бактерий, позволяет исследовать одновременно чувствительность культур к разным дезинфекционным средствам по оценке денатурации белков с последующим изменением масс-спектрометрических профилей.

Ключевые слова: грамотрицательные неферментирующие бактерии, биопленки, пленкообразование, дезинфицирующие средства, масс-спектрометрия.

The relevance of this study is determined by the wide prevalence in medical practice of biofilm infections caused, in particular, non-fermenting gram-negative bacteria with increased resistance to antibiotics and disinfectants.

The aim of this study was to study the effect of disinfectants on biofilm formation of non-fermenting bacteria and to assess the possibility of using a mass spectrometric method to optimize the selection of disinfectants that affect the process of biofilm formation in non-fermenting bacteria.

Results and conclusions. The drugs of choice for the reliable elimination of non-fermenting bacteria was hydrogen peroxide and Ultradon, which microbially effect close to 100 %. The used solutions of disinfectants showed the same effect on the ability of non-fermenting bacteria to biofilm formation: the use of sublethal concentrations of these disinfectants led to a synchronous decrease in biofilm formation. The advantage of the mass spectrometric method of studying the sensitivity of non-fermenting bacteria to disinfectants is its objectivity, speed and ease of execution. The method gives an economic effect on time, labor and consumables compared to the traditionally used method of serial dilutions and the determination of viable clones of bacteria. Allows to investigate simultaneously sensitivity of cultures to different disinfectants on an assessment of denaturation of proteins with the subsequent change of mass spectrometric profiles.

Keywords: gram-negative non-fermenting bacteria, biofilms, biofilm formation, disinfectants, mass spectrometry.

Создание микроорганизмами пленок на любых поверхностях является большой проблемой в медицинской практике и в различных областях человеческой жизнедеятельности. Установлено, что в 80 % случаев инфекционные заболевания у людей проходят в форме биопленочной инфекции. Среди возбудителей, образующих биопленки, наибольшее клиническое значение имеют *P. aeruginosa*, *S. aureus*, *K. pneumoniae*, *Enterococcus spp.*, *Candida spp.*

Среди неферментирующих грамотрицательных бактерий интерес представляют *Burkholderia ceracia* [1]. В первую очередь это касается использования имплантируемых устройств (катетеры, протезы, искусственные клапаны сердца, стенты, шовный материал и т.п.), подверженных образованию на их поверхности биопленок [2]. С другой стороны, интересны биопленки, которые появляются при типичных инфекционных процессах на биологических поверхностях, таких как слизистые оболочки или эпителиальные выстилки внутренних полостей (отит, перитонит, плеврит), поверхностные или глубокие ткани организма (нагноившаяся рана) [3]. Микробы, находящиеся в биопленках, обладают устойчивостью к эффекторам иммунной системы, антибиотикам и дезинфектантам. Биопленкообразующие бактерии способны к выживанию под действием высоких концентраций антибиотиков [4]. Известны факты усиления биопленкообразования *S. caritidis* при максимальных терапевтических концен-

трациях оксациллина [5], под воздействием ципрофлоксацина у штаммов *S. aureus* [6].

Микробы в биопленках могут быть устойчивыми одновременно к разным группам антибиотиков. При этом формируются панрезистентные клоны бактерий, которые быстро распространяются на обширных территориях и могут вызывать инфекции, не поддающиеся терапии. Высокая выживаемость в клинике биопленкообразующих микробов приводит к хроническому течению инфекционного процесса. Отсюда возникает актуальность поиска эффективных методов разрушения бактериальных биопленок на объектах и в организме человека. Направлением борьбы с биопленками на биологических поверхностях является использование веществ, воздействующих на механизмы адгезии бактерий к биологическим мембранам, блокирование синтеза полимерного матрикса или его разрушение, прерывание межклеточного обмена информацией [7].

На поверхностях имплантируемых устройств, поверхностях медицинского оборудования и т.д. с целью уничтожения биопленок чаще всего в медицинской практике применяют биоциды. Антисептики в этом смысле являются идеальными агентами. Они обладают преимуществами перед антибиотиками: неспецифическим механизмом действия; отсутствием риска развития истинной устойчивости возбудителей; прогнозируемой фармакокинетикой [8].

В литературе приведены данные об обнаружении устойчивых к антисептикам вариантов бактерий из объектов больничной среды и от больных. Есть наблюдения о полном отсутствии или снижении терапевтического эффекта при применении антисептиков.

Значительное место среди возбудителей инфекций, связанных с оказанием медицинской помощи (ИСМП), занимают грамотрицательные неферментирующие бактерии (НГОБ), характеризующиеся природной устойчивостью ко многим антибиотикам, высокой резистентностью к дезинфицирующим средствам (ДС) и распространением в стационарах от пациента к пациенту. Среди этой группы микроорганизмов доминируют представители родов: *Pseudomonas*, *Acinetobacter*, *Chryseobacterium*, *Stenotrophomonas*, *Burkholderia* [9]. Частота выделения НГОБ достигает 15 % от всех факультативно-анаэробных грамотрицательных бактерий. Из них около 70 % приходится на долю *P. aeruginosa*, *Acinetobacter* spp. и *S. maltophilia*. Среди наиболее распространенных НГОБ – возбудителей госпитальных инфекций – особое место занимает *P. aeruginosa*. Этот микроорганизм в 16 % случаев вызывает нозокомиальные пневмонии, в 12 – госпитальные мочеполовые инфекции, в 8 – гнойно-воспалительные заболевания в хирургии, в 5–10 – генерализованные септические инфекции. У пациентов при иммунодефицитном состоянии (нейтропения, пересадка костного мозга и т.д.) летальность при пневмонии и септицемии с выявлением *P. aeruginosa* достигает 30÷50 %. Имеются данные о роли в этиологической структуре ИСМП группы бактерий *B. cereus*, которая наравне с *P. aeruginosa* поражает бронхолегочный тракт при муковисцидозе [10].

Оценка устойчивости НГОБ к дезинфицирующим средствам позволит осуществлять мониторинг и профилактику распространения резистентных к антибиотикам и ДС штаммов в медицинских учреждениях и во внебольничной среде. Данные мониторинга могут использоваться для подбора селективных компонентов питательных сред, выбора оптимальных терапевтических схем лечения больных и эффективных дезинфицирующих средств.

Однако изучение устойчивости бактерий к ДС в практике тормозится, прежде всего, отсутствием унифицированных методов определения и несовершенством показателей оценки чувствительности – устойчивости бактерий к этой группе препаратов, особенно отсутствием критерия клинической устойчивости микроорганизмов.

Цель исследования в связи с актуальностью данной проблемы – изучение влияния ДС на пленкообразование НГОБ и оценка возможности ис-

пользования масс-спектрометрического метода для оптимизации их подбора.

Материалы и методы

В работе использованы 689 штаммов грамотрицательных неферментирующих бактерий, полученных из бактериологической лаборатории детской областной больницы. Идентификация микроорганизмов проводилась с использованием бактериологического анализатора VITEK 2 COMPACT и с помощью масс-спектрометрического анализа MALDI-TOF (Bruker, Германия). В качестве тестируемых ДС использовались 6%-я перекись водорода, 70%-й этанол, «Ультрадон» (действующее вещество – четвертичное аммониевое соединение – дидецилметилпропионат (оксиэтил) аммоний пропионат – 7 %) (Россия), препарат «Сульфохлорантин Д» (действующее вещество – 1,3-дихлор 5,5 диметилгидантоин – 21,5 %) (Россия).

Способность к пленкообразованию исследована по методике М.Ю. Чернуха (2009).

Масс-спектрометрические исследования производились на приборе Bruker (MALDI-TOF MS Biotyper (Microflex LT)) в соответствии с инструкцией. Уровень идентификации бактерий трактовали по критериям, указанным в инструкции: 2,300–3,000 – высокая вероятность идентификации вида; 2,000–2,299 – надежная идентификация рода, вероятная идентификация вида; 1,700–1,999 – вероятная идентификация рода; 0,00–1,699 – ненадежная идентификация.

Изучены масс-спектры с оценкой варьирования пиков различной длины пролета. Пики в соответствии с этим параметром были условно разделены на группы: $\frac{m}{z} \geq 5000$ – высоко-пролетные (мажор-

ные) пики; $2500 < \frac{m}{z} < 5000$ – средне-пролетные;

$\frac{m}{z} \leq 2500$ – низко-пролетные (минорные), где m – масса иона; z – заряд.

Результаты

Частота выделения неферментирующих бактерий от детей, находившихся на лечении в отделениях детской областной больницы, среди прочих условно-патогенных микроорганизмов варьировала по годам наблюдений и составила от 5,5 до 9,6 % случаев. Препараты выбора для лечения осложнений, обусловленных НГОБ, в порядке убывания: «Амикацин», «Меропенем», «Цефоперазон» и «Цефтазидим». Чаще всего НГОБ выделялись от детей в от-

делениях: пульмонологическом (55,7 %), реанимации и интенсивной терапии (52,1), нефрологическом (24,8 %). Все выделенные культуры неферментирующих бактерий были полиантибиотикорезистентны и слабочувствительны к бактериофагам.

Все изученные штаммы НГОБ обладали способностью образовывать биопленку. Степень выраженности этого признака у 78,4 % штаммов была высокой и средней, у 21,6 % – низкой.

Изучение влияния рабочих растворов ДС на культуры псевдомонад показало, что максимальное микробицидное действие (гибель микробов) оказывали 6%-й раствор перекиси водорода (97,3 %), 0,5%-й раствор «Ультрадона» (94,6 %). Далее в соответствии с уменьшением гибели микроорганизмов идут 0,2%-й раствор «Сульфохлорантина Д» (70,3 %) и 70%-й этанол (13,5 %).

Проведены исследования влияния сублетальных концентраций данных ДС (1:10 и 1:100 рабочих растворов) на штаммы псевдомонад. Ряд снижения антибактериального действия для растворов рабочих препаратов, разведенных в 10 раз, сформировался следующим образом: 0,05%-й раствор «Ультрадона» – (83,8 %), 0,02%-й раствор «Сульфохлорантина Д» (62,2 %), 0,6%-я перекись водорода (29,7 %), 7%-й этанол (18,5 %). Соответствующий ряд для растворов рабочих препаратов, разведенных в 100 раз: 0,005%-й «Ультрадон» (75 %), 0,002%-й «Сульфохлорантин Д» (50 %), 0,06%-я перекись водорода (10,7 %), 0,7%-й этанол (0).

Исследовано влияние сублетальных концентраций ДС на способность к пленкообразованию у штаммов *P. aeruginosa*.

Действие сублетальных концентраций этанола (7 и 0,7 %) носило разнонаправленный характер: 7%-й раствор этанола приводил к увеличению способности к пленкообразованию у 72,2 % исследованных штаммов псевдомонад и, соответственно, у 27,3 % штаммов снижалась их способность к формированию биопленок; 0,7%-й раствор этанола снижал способность к формированию биопленок у 81,8 % исследованных штаммов *P. aeruginosa* и лишь у 18,2 % увеличивалась способность биопленкообразования. Таким образом, наблюдалась парадоксальная ситуация: использование минимальной сублетальной концентрации этанола в 81,8 % случаев приводило к снижению способности к пленкообразованию у *Pseudomonas*.

Воздействие сублетальных концентраций перекиси водорода на способность штаммов псевдомонад образовывать биопленки, как и в случае с этанолом, носило разнонаправленный характер. Обработка штаммов 0,6%-м раствором перекиси водорода в 37,5 % случаев приводило к снижению выраженности этого признака, а у 62,5 % штаммов

оказывало стимулирующий эффект. Предварительная обработка штаммов 0,06%-м раствором перекиси водорода вызывала снижение способности к пленкообразованию у 75 % штаммов (против 25 % увеличивших эту способность).

Использование сублетальных концентраций «Сульфохлорантина Д» (0,02 и 0,002 %) приводило к снижению способности к пленкообразованию у 75 % исследованных штаммов псевдомонад, при этом у 25 % штаммов этот признак становился более выраженным.

Обработка штаммов растворами «Ультрадона» 0,05 и 0,005 % приводило к снижению пленкообразования у 50 и 75 % штаммов соответственно.

Этот же эффект наблюдался чаще при применении более разбавленных рабочих растворов 1/100 (от 62,5 до 81,8 %), 1/10 (27,3–75 %).

Можно предположить, что в данном случае ДС действует как раздражитель, стимулирующий образование биопленок микроорганизмами. Следовательно, уменьшение его концентрации приводит к снижению необходимости формировать биопленку в качестве защитного механизма.

При обобщении данных по воздействию различных ДС на культуру *P. aeruginosa* было показано, что препаратами выбора для надежного обеззараживания являлись перекись водорода и «Ультрадон». Их рабочие концентрации оказывали микробицидный эффект, близкий к 100 % (97,3 и 94,6 % соответственно). Эти же препараты снижали способность бактерий к пленкообразованию более чем на 50 %.

Для повышения объективности методики исследования эффективности воздействия ДС на НГОБ с пленкообразующей способностью был предложен способ определения чувствительности неферментирующих бактерий к ДС с применением масс-спектрометрии (приоритетная справка, рег. № 2018124174 от 02.07.2018, получено положительное решение о выдаче Патента РФ 29.07.2019).

Предлагаемый способ, помимо объективной оценки результатов, дает экономический эффект:

– по времени проведения исследования (двое суток с использованием нового способа против 3 сут в соответствии с Р.4.2.2643-10);

– трудозатратам (6 ч рабочего времени оператора-масс-спектрометриста против 72 ч лаборанта-исследователя);

– расходным материалам (затраты на одно исследование с помощью масс-спектрометрии с учетом повторностей – в пределах 40 р. на 1 культуру).

Этот способ позволяет исследовать одновременно чувствительность культур к разным ДС по оценке денатурации белков с последующим изменением масс-спектрометрических профилей.

Подготовку к исследованию чистых суточных культур штаммов на плотных питательных средах и проведение масс-спектрометрического анализа осуществляли в соответствии с инструкцией. Штамм НГОБ наносили на стальную пластину (Bruker Daltonics) в двух повторностях. Мишень сушили в течение нескольких минут (5–15) при комнатной температуре. Затем на каждый образец наносили 1 мл матрицы СНСА (α -Cyano-4-hydroxycinnamic acid), просушивали и помещали в масс-спектрометр для анализа (исходный фон).

Суточные бульонные культуры НГОБ подвергались действию разных ДС: 6%-я перекись водорода, 70%-й этанол; препараты «Ультрадон» (Россия) и «Сульфаклорантин Д» (Россия). Кроме рабочих концентраций препаратов, использовали в качестве сублетальной дозы 10-кратное и 100-кратное разведение рабочей концентрации дезсредств. Тестируемые культуры выдерживали в растворах препаратов при экспозициях, рекомендованных соответствующими инструкциями. Действие ДС (кроме ДС «Ультрадон») останавливали 0,5%-м раствором тиосульфата натрия (10 мкл 0,5%-го раствора тиосульфата натрия + 90 мкл взвеси культуры в ДС) в течение 15 мин при 20 °С. Затем подращивали 3 ч при 37 °С в питательном бульоне (НПО «Микроген») в соотношении 1 мл взвеси микроорганизма с ДС + 1 мл питательного бульона и центрифугировали (3000 об/мин, 15 мин). Осадок микроорганизмов наносили на мишень (10 мкл) и анализировали методом масс-спектрометрии (Bruker Daltonik MALDI Biotyper) по схеме, описанной выше.

Параллельно из растворов культур с ДС проводили дозированные посева на микробиологический агар (НПО «Микроген») для подсчета жизнеспособных бактериальных клеток.

Изучено *P. aeruginosa* (35 культур), *Acinetobacter lwoffii* (1), *Acinetobacter baumannii* (2), *Stenotrophomonas maltophilia* (2).

Так как масс-спектрометрическая идентификация осуществляется по спектру белков микроорганизмов, то по увеличению пиков амплитуды белкового профиля после воздействия на штамм ДС можно судить об их подверженности данным средствам. В качестве контроля использовали MS-профили, где вместо ДС применяли изотонический раствор хлорида натрия.

После применения всех тестируемых ДС протеомные профили культур характеризовались нарастанием минорных и мажорных MS-пиков в 2–3 раза по сравнению с исходными и профилями в присутствии изотонического раствора хлорида

натрия, что свидетельствует о денатурации протеинов и эффективности ДС. Подобное действие приводило у некоторых штаммов к полному изменению профиля и нераспознаванию культур при биотипировании.

Выводы

1. Препараты выбора для надежного обеззараживания – перекись водорода и «Ультрадон». Их рабочие концентрации оказывают микробицидный эффект, близкий к 100 % (97,3 и 94,6 % соответственно). Эти же препараты снижают способность бактерий к пленкообразованию более чем на 50 %.

2. Преимуществом масс-спектрометрического метода исследования чувствительности неферментирующих бактерий к ДС являются его объективность, быстрота и простота исполнения. Способ дает экономический эффект по времени, трудозатратам и расходным материалам по сравнению с традиционно используемым методом серийных разведений и определением жизнеспособных клонов бактерий, позволяет исследовать одновременно чувствительность культур к разным ДС по оценке денатурации белков с последующим изменением масс-спектрометрических профилей.

3. Используемые растворы ДС показали однотипный эффект воздействия на способность неферментирующих бактерий к пленкообразованию: применение сублетальных концентраций данных дезинфектантов приводило к снижению биопленкообразования.

Литература

1. Смирнова Т.А., Диденко Л.В., Азизбекян Р.Р., Романова Ю.М. Структурно-функциональная характеристика бактериальных биопленок // Микробиология. 2010. Т. 79, № 4. С. 435–436.
2. Туркутюков В.Б., Ибрагимова Т.Д., Фомин Д.В. Молекулярные особенности морфологии биопленок, формируемых штаммами неферментирующих грамотрицательных бактерий // Тихоокеанский мед. журнал. 2013. № 4 (54). С. 44–47.
3. Афиногенова А.Г., Даровская Е.Н. Микробные биопленки ран: состояние вопроса // Травматология и ортопедия России. 2011. № 3 (61). С. 119–125.
4. Чеботарь И.В., Маянский А.Н., Кончакова Е.Д., Лазарева А.В., Чистякова В.П. Антибиотикорезистентность биопленочных бактерий // Клиническая микробиология и антимикробная химиотерапия. 2012. Т. 14, № 1. С. 51–58.
5. Qu Y., Daley A.J., Istivan T.S., Garland S.M., Deighton M.A. Antibiotic susceptibility of coagulase-

negative staphylococci isolated from very low birth weight babies: comprehensive comparisons of bacteria at different stages of biofilm formation // *Ann. Clin. Microbiol. Antimicrob.* 2010. № 27. P. 9–16.

6. Горовиц Э.С., Гордина Е.М., Поспелова С.В., Алиева Л.О., Щукина В.П. Влияние ципрофлоксацина на 24-часовые биопленки *Staphylococcus aureus* // Проблемы мед. микологии. 2016. Т. 18, № 2. С. 57.

7. Хренов П.А., Честнова Т.В. Обзор методов борьбы с микробными биопленками при воспалительных заболеваниях // Вестн. новых медицинских технологий. 2013. № 1.

8. Ерошенко Д.В. Влияние факторов внешней среды на первые этапы образования биопленок бактериями *Staphylococcus epidermidis*: автореф. дис. ... канд. биол. наук. Пермь, 2015. 24 с.

9. Чернявский В.И., Бiryukova С.В., Гришина Е.И. Неферментирующие грамотрицательные бактерии в этиологии нозокомиальных инфекций и проблемы антибиотикорезистентности // *Annals of Mechnikov Institute*. 2010. № 4. URL: www.imiamn.org.ua/journal.htm (дата обращения: 02.02.2019).

10. Чернуха М.Ю., Шагинян И.А., Капранов Н.И. Персистенция *Burkholderia cepacia* у больных муковисцидозом // Журн. микробиологии и эпидемиологии. 2012. № 4. С. 93–98.

References

1. Smirnova T.A., Didenko L.V., Azizbekyan R.R., Romanova Yu.M. (2010). Structural and functional characteristics of bacterial biofilms. *Mikrobiologiya*, vol. 79, no. 4, pp. 435-436. (in Russian).

2. Turkutyukov V.B., Ibragimova T.D., Fomin D. V. (2013). Molecular morphology of biofilms formed by strains non-fermentative gram negative bacteria. *Tykhookeanskii meditsinskii zhurnal*, no. 4(54), pp. 44-47. (in Russian).

3. Afinogenova A.G., Darovskaya E.N. (2011). Microbial biofilm wounds: state of issue. *Travmatologiya i ortopediya Rossii*, no. 3 (61), pp. 119-125. (in Russian).

4. Chebotar I.V., Mayansky A.N., Konchakova E.D., Lazareva AV., Chistyakova V.P. (2012). Antibiotic resistance of biofilm bacteria. *Klinicheskaya mikrobiologiya i antimikrobnaya khimioterapiya*, vol. 14, no. 1, pp. 51-58. (in Russian).

5. Qu Y., Daley A.J., Istivan T.S., Garland S.M., Deighton M.A. (2010). Antibiotic susceptibility of coagulase-negative staphylococci isolated from very low birth weight babies: comprehensive comparisons of bacteria at different stages of biofilm formation. *Ann. Clin. Microbiol. Antimicrob.*, no. 27, pp. 9-16.

6. Horowitz E.C., Gordina E.M., Pospelova S.V., Alieva L.A., Shchukina V.P. (2016). Influence of ciprofloxacin on the 24-hour biofilms of *Staphylococcus aureus*. *Problemy meditsinskoi mikologii*, vol. 18, no. 2, p. 57. (in Russian).

7. Khrenov P.A., Chestnova T.V. (2013). Review of methods of struggle with microbial biofilms in inflammatory diseases. *Vestnik novykh meditsinskikh tekhnologii*, no. 1. (in Russian).

8. Eroshenko D.V. (2015). Influence of environmental factors on the first stages of biofilm formation by bacteria *Staphylococcus epidermidis*. Dissertation Thesis. Perm, 24 p. (in Russian).

9. Chernyavsky V.I., Biryukova S.V., Grishina E.I. (2010). Non-fermenting gram-negative bacteria in the etiology of nosocomial infections and antibiotic resistance problems. *Annals of Mechnikov Institute*, no. 4. Available at: www.imiamn.org.ua/journal.htm (accessed February 2, 2019).

10. Chernukha M.Yu., Shaginyan I.A., Kapranov N.I. (2012). Persistence of *Burkholderia cepacia* in patients with cystic fibrosis. *Zhurnal mikrobiologii i epidemiologii*, no. 4, pp. 93-98. (in Russian).

УДК 663.125/663.252.4

DOI 10.18522/1026-2237-2020-1-95-101

МОРФОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ДРОЖЖЕЙ РОДА *SACCHAROMYCES* В ПРОЦЕССЕ АДАПТАЦИИ К ЭКСТРЕМАЛЬНЫМ ЗНАЧЕНИЯМ ГЛЮКОЗЫ И ЭТАНОЛА

© 2020 г. Э.А. Исламмагомедова¹, Э.А. Халилова¹, С.Ц. Котенко¹, А.А. Абакарова¹, Д.А. Аливердиева¹
¹Прикаспийский институт биологических ресурсов ДФИЦ РАН, Махачкала, Россия

THE MORPHOLOGICAL FEATURES OF ADAPTATION OF THE YEAST OF THE GENUS *SACCHAROMYCES* TO EXTREME VALUES OF GLUCOSE AND ETHANOL

E.A. Islammagomedova¹, E.A. Khalilova¹, S.Ts. Kotenko¹, A.A. Abakarova¹, D.A. Aliverdieva¹
¹Caspian Institute of Biological Resources DFRC RAS, Makhachkala, Russia

Исламмагомедова Эльвира Ахмедовна – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, лаборатория биохимии и биотехнологии, Прикаспийский институт биологических ресурсов ДФИЦ РАН, ул. М. Гаджиева, 45, г. Махачкала, Республика Дагестан, 367000, Россия, e-mail: islammagomedova@mail.ru

Elvira A. Islammagomedova - Candidate of Biological Sciences, Senior Researcher, Laboratory of Biochemistry and Biotechnology, Caspian Institute of Biological Resources DFRC RAS, M. Gadzhieva St., 45, Makhachkala, Republic of Dagestan, 367000, Russia, e-mail: islammagomedova@mail.ru

Халилова Эсланда Абдурахмановна – кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник, лаборатория биохимии и биотехнологии, Прикаспийский институт биологических ресурсов ДФИЦ РАН, ул. М. Гаджиева, 45, г. Махачкала, Республика Дагестан, 367000, Россия, e-mail: eslanda61@mail.ru

Eslanda A. Khalilova - Candidate of Biological Sciences, Leading Researcher, Laboratory of Biochemistry and Biotechnology, Caspian Institute of Biological Resources DFRC RAS, M. Gadzhieva St., 45, Makhachkala, Republic of Dagestan, 367000, Russia, e-mail: eslanda61@mail.ru

Котенко Светлана Цалистиновна – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, ведущий научный сотрудник, лаборатория биохимии и биотехнологии, Прикаспийский институт биологических ресурсов ДФИЦ РАН, ул. М. Гаджиева, 45, г. Махачкала, Республика Дагестан, 367000, Россия

Svetlana Ts. Kotenko - Candidate of Biological Sciences, Senior Researcher, Leading Researcher, Laboratory of Biochemistry and Biotechnology, Caspian Institute of Biological Resources DFRC RAS, M. Gadzhieva St., 45, Makhachkala, Republic of Dagestan, 367000, Russia

Абакарова Аида Алевдиновна – старший лаборант, лаборатория биохимии и биотехнологии, Прикаспийский институт биологических ресурсов ДФИЦ РАН, ул. М. Гаджиева, 45, г. Махачкала, Республика Дагестан, 367000, Россия, e-mail: aida.abacarva@rambler.ru

Aida A. Abakarova - Senior Laboratory Assistant, Laboratory of Biochemistry and Biotechnology, Caspian Institute of Biological Resources DFRC RAS, M. Gadzhieva St., 45, Makhachkala, Republic of Dagestan, 367000, Russia, e-mail: aida.abacarva@rambler.ru

Аливердиева Динара Алиевна – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, заведующий лабораторией биохимии и биотехнологии, Прикаспийский институт биологических ресурсов ДФИЦ РАН, ул. М. Гаджиева, 45, г. Махачкала, Республика Дагестан, 367000, Россия, e-mail: aliverdieva_d@mail.ru

Dinara A. Aliverdieva - Candidate of Biological Sciences, Senior Researcher, Head of the Laboratory of Biochemistry and Biotechnology, Caspian Institute of Biological Resources DFRC RAS, M. Gadzhieva St., 45, Makhachkala, Republic of Dagestan, 367000, Russia, e-mail: aliverdieva_d@mail.ru

Изучено влияние экстремальных значений глюкозы и этанола на морфологические свойства дрожжей рода *Saccharomyces*. Обнаружена способность штаммов *S. cerevisiae* Y-503, *S. cerevisiae* DAW-3a и *S. oviformis* M-12X адаптироваться в условиях стресса. Показана зависимость функционального состояния и морфологических свойств исследуемых штаммов от пloidности. Установлено, что формы клеток *S. cerevisiae* Y-503 и *S. oviformis* M-12X отличались разнообразием. Для клеток гаплоидного штамма *S. cerevisiae* DAW-3a характерны округлая форма и меньшие

размеры по сравнению с полиплоидным штаммом Y-503 и диплоидом M-12X. Адаптация к различным концентрациям глюкозы сопровождалась изменением формы клеток Y-503 и DAW-3a, при этом их размеры практически не изменялись. В условиях одновременного осмотического и этанольного стресса в клетках исследуемых штаммов выявлено наличие зернистой цитоплазмы, что связано с накоплением запасных питательных веществ. Обнаружено изменение формы клеток, формы, поверхности, профиля, цвета, размера колоний. Исследования свойств дрожжей рода *Saccharomyces* в процессе адаптации к экстремальным условиям могут послужить основой для селекции штаммов, перспективных для использования в пищевых биотехнологиях.

Ключевые слова: глюкоза, этанол, стресс, *Saccharomyces*, морфология, клетки, гигантские колонии.

The influence of extreme values of glucose and ethanol on the morphological properties of the yeast of the genus Saccharomyces was studied. The ability of strains S. cerevisiae Y-503, S. cerevisiae DAW-3a, and S. oviformis M-12X to adapt to stress was found. The dependence of the functional state and morphological properties of the studied strains on ploidy was shown. It was established that the cell forms of S. cerevisiae Y-503 and S. oviformis M-12X were diverse, the cells of the haploid strain S. cerevisiae DAW-3a were characterized by a round shape and smaller sizes compared to the polyploid strain Y-503 and diploid M-12X. Adaptation to different concentrations of glucose was accompanied by a change in the shape of the cells Y-503 and DAW-3a, while the sizes of cells were practically unchanged. Under conditions of simultaneous osmotic and ethanol stress in the cells of the studied strains, the presence of granular cytoplasm was revealed, which is associated with the accumulation of reserve nutrients. A change in the shape of the cells, form, surface, profile, color, size of colonies was detected. The study of the properties of the yeast of the genus Saccharomyces in the process of adaptation to extreme conditions may serve as the basis for the selection of strains that are promising for use in food biotechnology.

Keywords: glucose, ethanol, stress, *Saccharomyces*, morphology, cells, giant colonies.

Способность дрожжей *Saccharomyces cerevisiae* к росту на разнообразных субстратах, адаптации к экстремальным условиям, к синтезу полезных продуктов делает их перспективными для использования в биотехнологических процессах [1]. В спиртовой промышленности в настоящее время актуально применение технологии сбраживания высококонцентрированного сусла, однако при этом дрожжи испытывают повышенные уровни осмотического и этанольного стрессов [2]. Механизмы адаптации дрожжей к стрессу, зависящие от свойств клеток и состава среды культивирования [3], включают широкий спектр морфологических и физиологических изменений: увеличение размеров митохондрий, повышение численности и размеров пероксисом, накопление полифосфатных гранул [4], синтез белков, изменение липидного состава плазматической мембраны [5, 6]. Защитная роль резервных углеводов, обусловленная взаимодействием между реакциями аккумуляции и утилизации трегалозы и гликогена при различных стрессовых состояниях клетки [7], заключается в выравнивании осмотического давления внутри и вне клеток и поддержании тургора цитоплазмы [8]. Гиперосмотический стресс вызывает быстрое сокращение размера клеток и замедление клеточных диффузионных процессов. Во время адаптации объем клеток восстанавливается [3, 9]. В производстве этанола применяются осмофильные и термотолерантные дрожжи [5]. Адаптация различных штаммов к экстремальным условиям предопределяется их генетическими различиями, в том числе плоидностью, обеспечивающей пре-

имущество определенного фенотипа [10]. Полиплоидные штаммы дрожжей, выделенные из природной среды, как и дрожжи, используемые в биотехнологических процессах, демонстрируют высокую физиологическую активность [11]. Происходящие в экстремальных условиях биохимические изменения оказывают влияние и на морфологию дрожжей [12]. Формирование гигантской колонии *S. cerevisiae* является результатом скоординированного действия клеток и зависит от множества факторов: среды культивирования, метаболизма, доступности питательных веществ и плоидности штамма [13]. Изучение процесса адаптации штаммов с различной плоидностью к экстремальным условиям представляет интерес для дальнейших научных и прикладных исследований.

Цель работы – изучение морфологических особенностей штаммов *S. cerevisiae* Y-503, *S. cerevisiae* DAW-3a и *S. oviformis* M-12X в процессе адаптации дрожжей к экстремальным условиям в широком диапазоне значений глюкозы и этанола в среде культивирования.

В работе использованы штаммы *S. cerevisiae* Y-503, *S. cerevisiae* DAW-3a и *S. oviformis* M-12X из коллекции лаборатории биохимии и биотехнологии Прикаспийского института биологических ресурсов ДФИЦ РАН. Штамм M-12X получен в результате применения холода сверхнизких температур на штамм дрожжей Махачкалинская 12 [14]; Y-503 – в результате воздействия азотного лазера на промышленный штамм *S. cerevisiae* 73 [15], DAW-3a – молекулярно-биологическими методами (является потомком линии штамма Y-503 [8]). Принадлеж-

ность к таксону *S. cerevisiae* штаммов гетерозиготного тетраплоида Y-503 и гетероталличного гаплоида DAW-3a подтверждена молекулярно-генетическими методами [8].

Культивирование гигантских колоний дрожжей проводилось на чашках Петри в течение 10 сут при температуре 30 °С. Твердая среда YPD содержала дрожжевой экстракт – 0,5 % (BD, США), пептон – 0,5 (BD, США), агар-агар – 2,5 (Difco, Нидерланды), различные концентрации глюкозы (D-глюкоза) – 2,0; 10,0; 20,0 % (Merk, Германия) и этанола – 6,0; 12,0; 18,0 % (Россия). Изучались морфологические свойства клеток: форма, величина, способ вегетативного размножения; параметры гигантских колоний: форма, размер, структура, цвет, поверхность, край, профиль. В данных исследованиях использовали приборы: микроскоп CX21 (Olympus, Япония), микробиологический инкубатор BINDER BF 115 (Германия), ламинарный бокс ВЛ-12 1000 (Россия), рН-метр «Анион 4100» («Анион», Россия); весы аналитические DV215CD (Ohaus Discovery, Швейцария), сушильный шкаф SNOL 67/350 (Utenos, Литва).

В результате исследований установлено, что характерной особенностью клеток DAW-3a являлась округлая форма, однако при увеличении концентрации глюкозы появлялись округло-овальные и овальные клетки. Форма клеток Y-503 отличалась разнообразием: в основном обнаружены овальная и овально-округлая, количество удлинённых клеток незначительно. Известно, что форма полиплоидных дрожжевых клеток является более эллиптической благодаря пloidно зависимой организации цитоскелета [11]. С увеличением концентрации глюкозы увеличивается количество округлых клеток Y-503. Форма клеток M-12X также разнообразна: овальная, овально-округлая, округлая; в процессе адаптации форма не изменяется. Таким образом, адаптация к широкому диапазону концентраций глюкозы сопровождалась изменением формы клеток DAW-3a и Y-503. Размеры клеток DAW-3a значительно меньше по сравнению с Y-503 и M-12X, мкм (DAW-3a (6×6); Y-503 (9×11); M-12X (9×11)). В процессе адаптации к осмотическому стрессу размеры клеток исследуемых штаммов практически не изменялись (рис. 1).

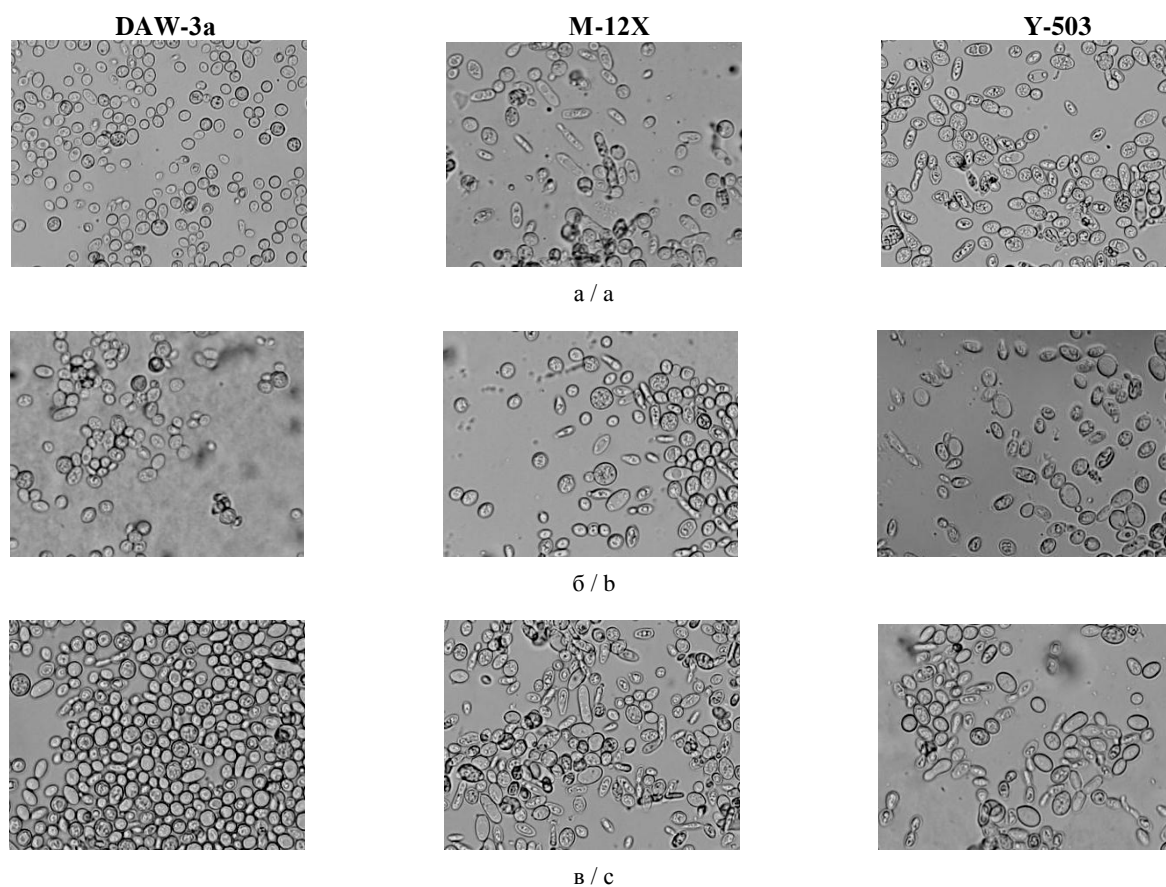


Рис. 1. Влияние глюкозы в составе твердой среды на морфологические параметры клеток дрожжей DAW-3a, M-12X и Y-503. Концентрация глюкозы, %: а – 2; б – 10; в – 20 / Fig. 1. The influence of glucose in the composition of the solid medium on the morphological parameters of cells of yeast DAW-3a, M-12X and Y-503. Concentration of glucose, %: a - 2; b - 10; c - 20

Известно, что формирование колоний определяется индивидуальными свойствами клеток, при этом колонии также способны адаптировать свою внутреннюю организацию к осмотическому стрессу [16]. Различное содержание глюкозы в среде влияет на формирование колоний: увеличение концентрации глюкозы способствует росту колонии, при этом экспрессия генов, участвующих в метаболизме углеводов, зависит от источника и концентрации глюкозы [16]. Параметры гигантских коло-

ний в зависимости от концентрации глюкозы менялись незначительно, для всех вариантов опытов характерна округлая, в виде цветка, форма; радиально исчерченная поверхность; плоский, с приподнятым центром профиль; пастообразная структура; размеры варьировали в пределах 1,0·1,10÷1,10·1,30 см. При этом выявлено изменение молочно-кремового цвета на темно-бежевый, матовые колонии приобретали легкий блеск (рис. 2).

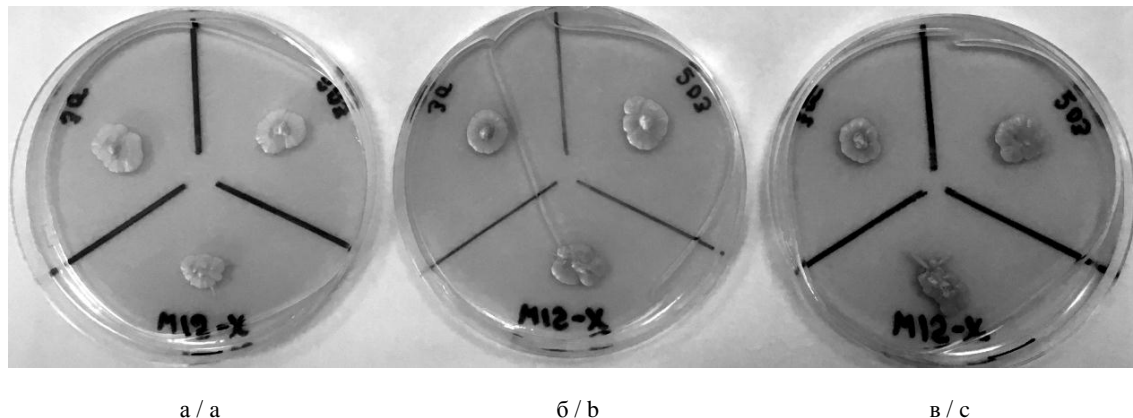


Рис. 2. Морфологические параметры гигантских колоний штаммов Y-503, DAW-3a и M-12X (10 сут) при выращивании на твердых средах, содержащих глюкозу различной концентрации, %: а – 2; б – 10; в – 20 / Fig. 2. The morphological parameters of the giant colonies of strains Y-503, DAW-3a and M-12X (10 days) when grown on solid mediums, containing glucose of various concentrations, %: a - 2; b - 10; c - 20

Так как в технологии получения этанола используются штаммы с осмофильными свойствами, представляло интерес изучение морфологических свойств дрожжей в условиях одновременного влияния 20%-й глюкозы и этанола различной концентрации в среде культивирования. Показано, что форма клеток в данных условиях отличалась от контрольного варианта, содержащего 2 % глюкозы. Среди характерных для DAW-3a округлых клеток появлялись овальные (до 20 % в среде с наибольшим количеством этанола). Напротив, количество округлых клеток M-12X и Y-503 увеличивалось. Удлиненная форма, присущая клеткам Y-503 на твердой среде, полностью отсутствовала. Размеры клеток, мкм, в среднем почти не менялись по сравнению с контрольным вариантом: DAW-3a (6×6), M-12X (8×9), Y-503 (9×11). В условиях одновременно осмотического и этанольного стрессов в клетках выявлено наличие зернистой цитоплазмы, что предполагает накопление запасных питательных веществ.

Происходящие в условиях стресса изменения клеток оказали влияние и на параметры колоний. Известно, что состав среды культивирования и изменения в клеточном метаболизме отражаются на формировании морфологических особенностей ги-

гантских колоний [12, 17]. Обнаружено, что адаптация к 20%-й глюкозе в среде с наибольшей концентрацией этанола сопровождалась изменением формы (неправильная), поверхности (слабо радиально исчерченная), профиля (кратерообразный), цвета (темно-бежевый), уменьшением размера колоний (таблица). По сравнению с дрожжами, выращенными на 20%-й глюкозе, размер колоний Y-503 и DAW-3a уменьшался в 1,3; M-12X – в 2,4 раза соответственно. При этом размер колоний M-12X был меньше в 2,5 по сравнению с Y-503 и в 3,1 раза по сравнению с DAW-3a.

Как известно, штаммы *S. cerevisiae* применяют в производстве хлебопекарных дрожжей и этанола, при этом традиционной средой для их выращивания является мелассная питательная среда с высоким содержанием углеводов. Ранее нами была разработана ресурсосберегающая технология биосинтеза этанола, основанная на использовании многофункциональных компонентов геотермальной воды в составе среды культивирования дрожжей *S. cerevisiae* Y-503. Благодаря адаптации штамма Y-503 к высокому содержанию сахара, примесям мелассы и геотермальной воде повышаются качество образуемого спирта и его концентрация [18].

Размеры гигантских колоний дрожжей, см², в зависимости от состава твердых сред, содержащих глюкозу (20 %) и этанол различной концентрации / The size of giant yeast colonies, cm², depending on the composition of solid medium, containing glucose (20 %) and ethanol of various concentrations

Этанол, %	Штаммы		
	<i>S. cerevisiae</i> Y-503	<i>S. cerevisiae</i> DAW-3a	<i>S. oviformis</i> M-12X
–	0,94±0,08	1,12±0,10	0,69±0,07
6	1,02±0,09	0,85±0,08	0,73±0,07
12	0,85±0,08	0,84±0,08	0,82±0,08
18	0,69±0,07	0,86±0,08	0,28±0,03

S. oviformis широко применяются в винодельческой промышленности в анаэробных технологических процессах, при этом винные дрожжи подвергаются стрессовым воздействиям (гиперосмотический шок и токсичность этанола в высоких концентрациях) [19]. В настоящее время *S. oviformis* M-12X используется для производства шампанских виноматериалов и столовых вин [20]. Проведенными нами ранее исследованиями установлена устойчивость дрожжей *S. cerevisiae* к гипертермии (37

°С), что также имеет важное значение в процессе производства этанола [21].

В результате изучения жизнеспособности клеток DAW-3a, M-12X и Y-503 на твердых средах, содержащих различные концентрации глюкозы и этанола, обнаружено, что все штаммы характеризовались стрессоустойчивостью. В условиях повышенного содержания этанола исследованные штаммы проявили сходную толерантность, кроме M-12X, что коррелирует с размерами гигантских колоний (рис. 3).

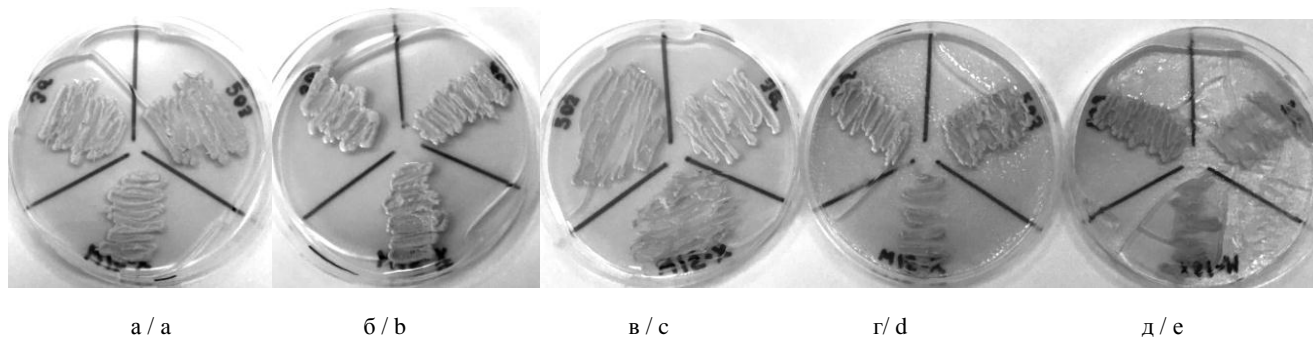


Рис. 3. Жизнеспособность штаммов DAW-3a, M-12X и Y-503 на твердых средах, содержащих в %: а – глюкозу – 10; б – глюкозу – 20; в – глюкозу – 20+ этанол – 6; г – глюкозу – 20+ этанол – 12; д – глюкозу – 20 + этанол – 18 / Fig. 3. Vitality of strains DAW-3a, M-12X and Y-503 on solid medium, containing, %: a - glucose - 10; b - glucose - 20; c - glucose - 20 + ethanol - 6; d - glucose - 20 + ethanol - 12; e - glucose - 20 + ethanol - 18

Таким образом, в результате исследования одновременного влияния осмотического и этанольного стрессов выявлено изменение морфологических свойств клеток и гигантских колоний *S. cerevisiae* Y-503, DAW-3a и *S. oviformis* M-12X. Обнаружена физиологическая активность исследуемых дрожжей, способность адаптироваться в условиях стресса. В клетках установлено наличие зернистой цитоплазмы, что предполагает накопление запасных питательных веществ. Показано, что морфологические особенности исследуемых штаммов были связаны с плоидностью; Y-503, DAW-3a и M-12X обладали различными размерами и формой клеток, параметрами колоний. Дальнейшие исследования биохимических и морфофизиологических свойств дрожжей рода *Saccharomyces* направлены на отбор штаммов, устойчивых к высоким концентрациям глюкозы и этанола и перспективных для использования в пищевых биотехнологиях.

Литература

1. Секова В.Ю., Исакова Е.П., Дерябина Ю.И. Применение экстремофильных дрожжей *Yarrowia lipolytica* в биотехнологии (обзор) // Прикладная биохимия и микробиология. 2015. Т. 51, № 3. С. 290–304.
2. Balakumar S., Arasaratnam V. Osmo-, thermo- and ethanol-tolerances of *Saccharomyces cerevisiae* SI // Braz. J. Microbiol. 2012. Vol. 43 (1). P. 157–166.
3. Babazadeh R., Lahtvee P.-J., Adiels C.B., Goksor M., Jens B., Nielsen J.B., Hohmann S. The yeast osmotic stress response is carbon source dependent // Scientific Reports. 2017. Vol. 7. P. 990. DOI: 10.1038/s41598-017-01141-4.
4. Аринбасарова А.Ю., Бирюкова Е.Н., Меденцев А.Г. Антистрессовые системы дрожжей *Yarrowia lipolytica* (обзор) // Прикладная биохимия и микробиология. 2015. Т. 51 (2). С. 122–131. DOI: 10.7868/S0555109915020026.

5. Techaparin A., Thanonkeo P., Klanrit P. High-temperature ethanol production using thermotolerant yeast newly isolated from Greater Mekong Subregion // *Braz. J. Microbiol.* 2017. Vol. 48 (3). P. 461–475. DOI: 10.1016/j.bjm.2017.01.006.

6. Ishmayana S., Kennedy U.J., Learmonth R.P. Further investigation of relationships between membrane fluidity and ethanol tolerance in *Saccharomyces cerevisiae* // *World J. Microbiol. Biotechnol.* 2017. Vol. 33 (12). P. 218. DOI: 10.1007/s11274-017-2380-9.

7. Аливердиева Д.А., Мамаев Д.В., Лагутина Л.С. Измерение параметров транспорта сукцината в клетке *Saccharomyces cerevisiae* после продолжительной холодной прейнкубации // *Прикладная биохимия и микробиология.* 2009. Т. 45, № 5. С. 577–585.

8. Меледина Т.В., Давыденко С.Г., Васильева Л.М. Физиологическое состояние дрожжей: учеб. пособие. СПб.: НИУ ИТМО; ИХ и БТ, 2013. С. 34–39.

9. Caspeta L., Castillo T., Nielsen J. Modifying Yeast Tolerance to Inhibitory Conditions of Ethanol Production Processes. Review // *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology.* 2015. Vol. 3. P. 184–195. DOI: org/10.3389/fbioe.2015.00184.

10. Anderson C.A., Roberts S., Zhang H., Kelly C.M., Kendall A., Lee C., Gerstenberger J., Koenig A.B., Kabeche R., Gladfelter A.S. Ploidy variation in multinucleate cells changes under stress // *Mol. Biol. Cell.* 2015. Vol. 26 (6). P. 1129–1140. DOI: 10.1091/mbc.E14-09-1375.

11. Zadrąg-Tecza R., Kwolek-Mirek M., Alabrudzińska M., Skoneczna A. Cell size influences the reproductive potential and total lifespan of the *Saccharomyces cerevisiae* yeast as revealed by the analysis of polyploid strains // *Oxidative Medicine and Cellular Longevity.* 2018. Vol. 2018. P. 1–17. DOI: 10.1155/2018/1898421.

12. Ruusuvaara P., Lin J., Scott A., Tan Z., Sorsa S., Kallio A., Nykter M., Yli-Harja O., Shmulevich I., Dudley A. Quantitative analysis of colony morphology in yeast // *Biotechniques.* 2014. Vol. 56 (1). P. 18–27. DOI: 10.2144/000114123.

13. Vopálenská I., Hulková M., Janderová B., Palková Z. The morphology of *Saccharomyces cerevisiae* colonies is affected by cell adhesion and the budding pattern // *Research in Microbiology.* 2005. Vol. 156 (9). P. 921–931. DOI: 10.1016/j.resmic.2005.05.012.

14. А.с. 1104149 СССР. МПК С 12 G 1/02, С 12 N 15/00. Штамм дрожжей *Saccharomyces oviformis* М-12Х, используемый для производства шампанских виноматериалов и столовых вин. 1984.

15. Пат. 1284998 СССР. МПК С 12 N 1/18// (С 12 N 1/18, С 12 R 1:865). Штамм дрожжей *Saccharomyces cerevisiae* Y-503, используемый в производстве хлебобулочных изделий. 1987.

16. Marinkovic Z.S., Vulin C., Acman M., Song M., Meglio J.-M. D., Lindner A. B., Hersen P. A microfluidic device for inferring metabolic landscapes in yeast monolayer colonies // *eLife.* 2019. Vol. 8. P. 1–21. DOI: 10.7554/eLife.47951.

17. Viana N.C., Portugal C., Cruz S.H. Morphophysiological and molecular characterization of wild yeast isolates from industrial ethanol process // *African J. of Microbiology Research.* 2017. Vol. 11 (37). P. 1422–1430. DOI: 10.5897/AJMR2017.8691.

18. Пат. 2492229 РФ. МПК С 12N 1/16, С 12P 7/06, С 12R 1/865. Штамм дрожжей *Saccharomyces cerevisiae*, используемый для получения спирта. 2013.

19. Matallana E., Aranda A. Biotechnological impact of stress response on wine yeast // *Lett. Appl. Microbiol.* 2017. Vol. 64 (2). P. 103–110.

20. Магомедова Е.С., Абдуллабекова Д.А., Качалкин А.В., Магомедов Г.Г. Дрожжевые грибы на ягодах винограда Дагестана // *Виноделие и виноградарство.* 2012. № 6. С. 44–47.

21. Исламмагомедова Э.А., Халилова Э.А., Котенко С.Ц., Гасанов Р.З., Абакарова А.А., Аливердиева Д.А. Изменение морфологических свойств дрожжей *S. cerevisiae* в условиях стресса // *Известия Самарского научного центра РАН.* 2019. Т. 21, № 2 (2). С. 101–107.

References

1. Sekova V.Yu., Isakova E.P., Deryabina Yu.I. (2015). The use of extremophilic yeast *Yarrowia lipolytica* in biotechnology (review). *Prikladnaya biokhimiya i mikrobiologiya*, vol. 51, no. 3, pp. 290-304. (in Russian).

2. Balakumar S., Arasaratnam V. (2012). Osmo-, thermo- and ethanol-tolerances of *Saccharomyces cerevisiae* S1. *Brazilian Journal of Microbiology*, vol. 43 (1), pp. 157-166.

3. Babazadeh R., Lahtvee P.-J., Adiels C.B., Goksor M., Jens B., Nielsen J.B., Hohmann S. (2017). The yeast osmotic stress response is carbon source dependent. *Scientific Reports*, vol. 7, p. 990. DOI: 10.1038/s41598-017-01141-4.

4. Arinbasarova A.Y., Biryukova E.N., Medencev A.G. (2015). The anti-stress systems of yeast *Yarrowia lipolytica* (review). *Prikladnaya biokhimiya i mikrobiologiya*, vol. 51 (2), pp. 122-131. DOI: 10.7868/S0555109915020026. (in Russian).

5. Techaparin A., Thanonkeo P., Klanrit P. (2017). High-temperature ethanol production using thermotolerant yeast newly isolated from Greater Mekong Subregion. *Braz. J. Microbiol.*, vol. 48 (3), pp. 461-475. DOI: 10.1016/j.bjm.2017.01.006.

6. Ishmayana S., Kennedy U.J., Learmonth R.P. (2017). Further investigation of relationships between membrane fluidity and ethanol tolerance in *Saccharomyces cerevisiae*. *World J. Microbiol. Biotechnol.*, vol. 33 (12), p. 218. DOI: 10.1007/s11274-017-2380-9.

7. Aliverdieva D.A., Mamaev D.V., Lagutina L.S. (2009). Measurement of parameters of transport of succinate into cells of *Saccharomyces cerevisiae* after prolonged cold pre-incubation. *Prikladnaya biokhimiya i mikrobiologiya*, vol. 45, no. 5, pp. 577-585. DOI: 10.1134/S0003683809050111. (in Russian).

8. Meledina T.V., Davydenko S.G., Vasilieva L.M. (2013). *The physiological state of yeast*. Studies allowance. Saint Petersburg, Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics Press, pp. 34-39. (in Russian).
9. Caspeta L., Castillo T., Nielsen J. (2015). Modifying Yeast Tolerance to Inhibitory Conditions of Ethanol Production Processes. Review. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, vol. 3, pp. 184-195. DOI: [10.3389/fbioe.2015.00184](https://doi.org/10.3389/fbioe.2015.00184).
10. Anderson C.A., Roberts S., Zhang H., Kelly C.M., Kendall A., Lee C., Gerstenberger J., Koenig A.B., Kabeche R., Gladfelter A.S. (2015). Ploidy variation in multinucleate cells changes under stress. *Mol. Biol. Cell*, vol. 26 (6), pp. 1129-1140. DOI: [10.1091/mbc.E14-09-1375](https://doi.org/10.1091/mbc.E14-09-1375).
11. Zdrag-Tecza R., Kwolek-Mirek M., Alabrudzińska M., Skoneczna A. (2018). Cell size influences the reproductive potential and total lifespan of the *Saccharomyces cerevisiae* yeast as revealed by the analysis of polyploid strains. *Oxidative Medicine and Cellular Longevity*, vol. 2018, pp. 1-17. DOI: [10.1155/2018/1898421](https://doi.org/10.1155/2018/1898421).
12. Ruusuvoori P., Lin J., Scott A., Tan Z., Sorsa S., Kallio A., Nykter M., Yli-Harja O., Shmulevich I., Dudley A. (2014). Quantitative analysis of colony morphology in yeast. *Biotechniques*, vol. 56 (1), pp. 18-27. DOI: [10.2144/000114123](https://doi.org/10.2144/000114123).
13. Vopálenská I., Hulková M., Janderová B., Palkova Z. (2005). The morphology of *Saccharomyces cerevisiae* colonies is affected by cell adhesion and the budding pattern. *Research in Microbiology*, vol. 156 (9), pp. 921-931. DOI: [10.1016/j.resmic.2005.05.012](https://doi.org/10.1016/j.resmic.2005.05.012).
14. Certificate 1104149 SSSR. (1984). MPK C 12 G 1/02, C 12 N 15/00. The strain of yeast *Saccharomyces oviformis* M-12X, used for the production of champagne wine materials and table wines. (in Russian).
15. Certificate 1284998 SSSR. (1987). MPK C 12 N 1/18// (C 12 N 1/18, C 12 R 1:865). The strain of yeast of *Saccharomyces cerevisiae* Y-503, used in the manufacture of bakery products. (in Russian).
16. Marinkovic Z.S., Vulin C., Acman M., Song M., Meglio J.-M. D., Lindner A. B., Hersen P. (2019). A microfluidic device for inferring metabolic landscapes in yeast monolayer colonies. *eLife*, vol. 8, pp. 1-21. DOI: [10.7554/eLife.47951](https://doi.org/10.7554/eLife.47951).
17. Viana N.C., Portugal C., Cruz S.H. (2017). Morphophysiological and molecular characterization of wild yeast isolates from industrial ethanol process. *African Journal of Microbiology Research*, vol. 11(37), pp. 1422-1430. DOI: [10.5897/AJMR2017.8691](https://doi.org/10.5897/AJMR2017.8691).
18. Certificate 2492229 RF. (2013). MPK C 12N 1/16, C 12P 7/06, C 12R 1/865. The strain of yeast *Saccharomyces cerevisiae*, used to produce of alcohol. (in Russian).
19. Matallana E., Aranda A. (2017). Biotechnological impact of stress response on wine yeast. *Lett. Appl. Microbiol*, vol. 64(2), pp. 103-110.
20. Magomedova E.S., Abdullabekova D.A., Kachalkin A.V., Magomedov G.G. (2012). The yeast mushrooms on berries of grapes of Dagestan. *Vinodelie i vinogradarstvo*, no. 6, pp. 44-47. (in Russian).
21. Islammagomedova E.A., Halilova E.A., Kotenko S.C., Gasanov R.Z., Abakarova A.A., Aliverdieva D.A. (2019). The changes of morphological properties of yeast *S. cerevisiae* under conditions of stress. *Izvestiya Samar-skogo nauchnogo centra Rossiiskoi akademii nauk*, vol. 21, no. 2 (2), pp. 101-107. (in Russian).

УДК 581: 633.2.032.3 (235.223)

DOI 10.185223/1026-2237-2020-1-102-110

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАПАСОВ ФИТОМАССЫ КУСТАРНИКОВЫХ ТУНДР АЛТАЕ-САЯНСКОЙ ГОРНОЙ ОБЛАСТИ В СВЯЗИ С ЭКСПОЗИЦИЕЙ СКЛОНОВ

© 2020 г. Ч.Н. Самбыла¹¹Тувинский научный центр, Кызыл, Россия

DISTRIBUTION OF ALTAY-SAYAN MOUNTAIN REGION SHRUB TUNDRA PHYTOMASS RESERVES IN CONNECTION WITH SLOPE EXPOSURE

Ch.N. Sambyla¹¹Tuvan Scientific Center, Kyzyl, Russia

Самбыла Чойган Николаевна – доктор биологических наук, доцент, директор Тувинского научного центра, ул. Интернациональная, 117а, г. Кызыл, Республика Тыва, 667007, Россия, e-mail: choigansam@mail.ru

Choygan N. Sambyla - Doctor of Biological Sciences, Associate Professor, Director of Tuvan Scientific Center, , Internatsionalnaya St., 117A, Kyzyl, Tyva Republic, 667007, Russia, e-mail: choigansam@mail.ru

Кустарниковые тундры – неотъемлемый компонент высокогорий Алтае-Саянской горной области (АСГО). Запасы фитомассы были определены в 42 кустарниковых сообществах, расположенных в 24 горных системах и 3 биоклиматических секторах АСГО (2002–2017 гг.). Учет надземной фитомассы (НФМ) сообществ проводился методом укосов в 10-кратной повторности, подземной фитомассы (ПФМ) – методом монолитов в 5-кратной повторности на площадках площадью 0,25 м². В исследованных тундрах запасы НФМ варьируют от 874 до 6815 г/м² на склонах и от 1419 до 2352 г/м² на вершинах хребтов. Область высоких показателей НФМ прослеживается на южных склонах в гумидном и семиаридном секторах (2768–6815 г/м²) и смещается к склонам северных экспозиций в аридном (2338 г/м²). В структуре НФМ живая масса сообществ на склонах находится на уровне 197–1727 г/м², а на выровненных участках – 358–1037 г/м². Установлено, что на северных склонах в живой массе сообществ преобладают кустарники (421–899 г/м², 53–77 %). При переходе к южным склонам в ботаническом составе сообществ масса кустарников остается высокой в сообществах гумидных высокогорий (660 г/м²), тогда как в семиаридных и аридных высокогорьях они замещаются соответственно лишайниками (367–461 г/м²) и осоковыми (33–53 г/м²). ПФМ кустарниковых тундр на разных элементах мезорельефа находится в диапазоне 2181–10 829 г/м². На склонах и выровненных участках горных систем различных биоклиматических секторов АСГО между запасами НФМ и ПФМ выявлены значимые связи ($r = -0,93-0,97$; $n=6$).

Ключевые слова: запасы фитомассы, кустарниковые тундры, экспозиция склонов, Алтае-Саянская горная область, Россия.

Shrub tundra is an integral component of the high mountains of the Altai-Sayan mountain region (ASMR). Phytomass reserves were identified in 42 shrub communities located in 24 mountain systems and 3 bioclimatic sectors of the ASMR. Accounting of AGP communities was carried out by the method of mowing in 10-fold repetition, UGP - by the monoliths method in 5-fold repetition on sites with an area 0.25 m². In the studied tundra, the AGP reserves vary from 874 to 6815 g/m² on the slopes and from 1419 to 2352 g/m² on the tops of the ranges. A region of aboveground mass high index is traced on the Southern slopes in the humid and semiarid sectors (2768-6815 g/m²) and it becomes displaced to the Northern slopes in the arid sector (2338 g/m²). In the structure of the AGP, the live mass of communities on the slopes is at the level of 197-1727 g/m², and in the aligned areas - 358-1037 g/m². It has been established that on the Northern slopes the shrubs prevail in the live weight of the communities (421-899 g/m², 53-77 %). During the transition to the Southern slopes in the botanical composition of the communities, the mass of shrubs remains high in the humid highland communities (660 g/m²), while in the semi-arid and arid highlands they are replaced by lichens (367-461 g/m²) and sedges, respectively (33-53 g/m²). UGP of shrub tundra on different elements of the mesorelief is within the range of 2181-10 829 g/m². On the slopes and aligned areas of mountain systems of ASMR various bioclimatic sectors, significant relationships were found between the aboveground and underground phytomass reserves ($r = -0.93-0.97$; $n = 6$).

Keywords: phytomass reserves, shrub tundra, slope exposure, Altai-Sayan mountain region, Russia.

Введение

Одним из важных экологических факторов, контролирующих распределение растений и их сообществ в высокогорьях, является экспозиция склонов [1]. Неодинаковое соотношение тепла и влаги на склонах разных экспозиций служит главной причиной неравномерного распределения фитомассы высокогорных сообществ [2].

Фитомасса – масса живых и отмерших, но сохранивших анатомическую структуру растений к данному моменту на любой площади. В ее структуре рассматривается надземная (НФМ) и подземная фитомасса (ПФМ). НФМ – часть растений, которая находится до уровня почвы, а в случае развития мохово-лишайникового яруса – та часть, которая возвышается над моховой дерниной и находится в живом зеленом слое мха, а также сам мох. В НФМ выделяются 2 компонента: живая (живая НФМ) и отмершая масса (НММ). Живая НФМ представляет собой массу живых надземных органов однолетних и многолетних растений, которая находится на единице площади в момент измерения [3]. В структуре живой НФМ выделены кустарники, кустарнички, злаки, осоки, разнотравье, мхи и лишайники (ботанические группы). НММ не разделялась на фракции. ПФМ – масса подземных органов растений в слое почвы 0–20 см. Общая фитомасса (ОФМ) – эта суммарный показатель запасов НФМ и ПФМ.

Кустарниковые тундры на территории Алтае-Саянской горной области (АСГО) имеют широкое распространение. Они используются в основном в качестве кормовой базы в животноводстве и являются источником ценных полезных растений. Однако распределению запасов фитомассы кустарниковых тундр в связи с экспозицией склонов практически не уделялось внимание. Полученные результаты имеют не только особо важное фундаментальное, но и огромное прикладное значение для разработки основ хозяйствования в условиях азиатских высокогорий.

Характеристика района исследования

АСГО занимает обширную территорию в центре Евразийского континента, находится на границе двух природных зон Северного полушария – гумидной бореальной и аридной степной. Встречаются альпийский и гольцовый типы рельефа [4]. Оледенение оказывает большое влияние на распределение высокогорных сообществ горных систем, имеющих альпийские формы рельефа [5]. Основная гидрографическая сеть АСГО принадлежит бассейнам р. Обь и Енисей, меньшая ее

часть – бассейнам бессточных впадин Центральной Азии. Удельная водоносность высокогорных рек составляет 3–30 л/с. Основное грунтовое питание наибольших значений достигает на реках со средней высотой водосбора 600–2000 м. Режим рек характеризуется весенне-летним половодьем, дождевыми паводками и низкой летне-осенней и зимней меженью. Бурно проходящие половодья и летние паводки обеспечивают обводнение сенокосов и пастбищ [6]. Климат высокогорий АСГО определяется ее географическим положением и особенностями орографии отдельных районов [7]. На обширной территории области наблюдается возрастание континентальности климата к югу и востоку (рис. 1), что связано со снижением годовой суммы осадков и увеличением годовой амплитуды среднемесячных температур [8].

В итоге горные системы на территории АСГО характеризуются различными биоклиматическими условиями [9]. В тепловом режиме высокогорий АСГО преобладают отрицательные температуры. Сумма температур выше 10 °С составляет 700° в наиболее теплых и гумидных северных высокогорьях и снижается до 250° на юге. Активный вегетационный период продолжается до 50–60 дней. Сложные сочетания факторов почвообразования высокогорий АСГО влияют на распространение горно-тундровых, горно-луговых почв [10].

Растительность высокогорного пояса АСГО характеризуется большим разнообразием [11, 12]. В гумидном секторе высокогорная растительность контактирует с редколесьями из *Abies sibirica* и *Pinus sibirica*. При избыточном увлажнении формируются заросли кустарников из *Betula rotundifolia* и *Salix glauca*. Горно-тундровый пояс занимает верхние уровни гор. Его нижняя граница образована альпийскими лугами с *Aquilegia glandulosa*, *Carex aterrima*, *Doronicum altaicum*, *Vaccinium myrtillus* с *Cetraria islandica*. По мере увеличения аридности климата появляются сообщества с *Empetrum nigrum*, *Rhododendron aureum* и *Vaccinium uliginosum*. Для гумидного биоклиматического сектора (ГБС) характерен гумидный горно-тундрово-субальпийский тип поясности.

В семиаридном секторе горно-таежный пояс представлен кедровыми, пихтово-кедровыми, лиственничными лесами. Верхнюю границу леса образуют *Larix sibirica* и *Pinus sibirica* [13]. В горно-тундровом поясе типичны сообщества с *Betula rotundifolia* и *Salix glauca*, выше которых формируются сообщества с преобладанием видов рода *Alectoria* и *Cladonia*, а также *Festuca kryloviana*, *F. sphagnicola* и *Dryas oxyodonta*. Для большей части СБС характерен семиаридный горно-тундрово-светлохвойно-таежный тип поясности.

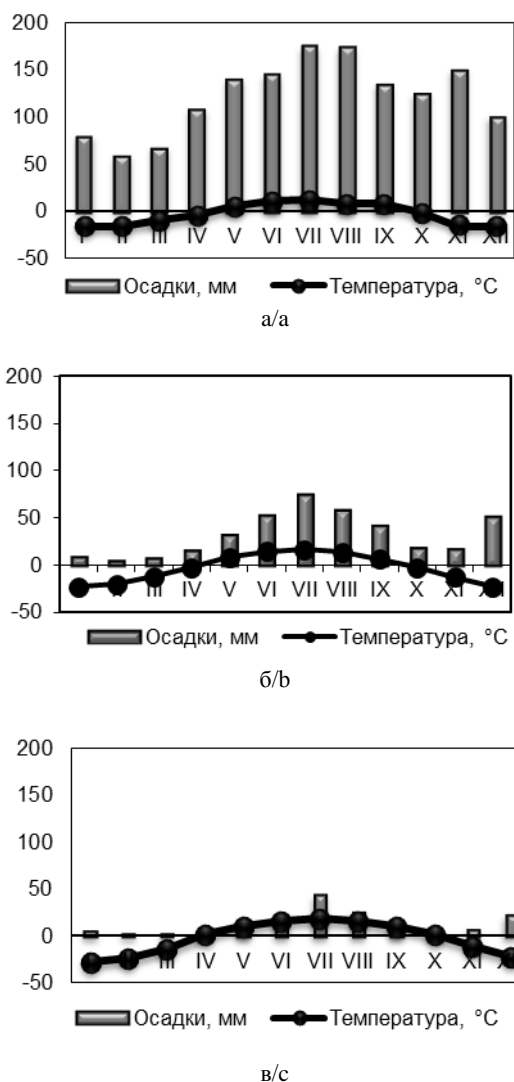


Рис. 1. Климатограммы метеостанций: а – Оленья Речка (Западный Саян); б – Сарыг-Сеп (Академика Обручева); в – Мугур-Аксы (массив Монгун-Тайга)

/ Fig. 1. Climatograms of meteorological stations: а - Olenya Rechka (Western Sayan); б - Saryg-Sep (Academician Obruchev's); в - Mugur-Aksy (Mongun-Taiga massif)

В аридном секторе лесной пояс отсутствует, лиственничные группировки встречаются по узким долинам рек или приурочены только к северным склонам хребтов, а по южным склонам формируются степные комплексы. Высокогорная растительность контактирует с горными степями, частично лиственничными группировками. Нижняя граница горно-тундрового пояса (2200–2300 м) представлена сообществами с *Betula rotundifolia*, *Juniperus pseudosabina* и *J. sibirica*, *Rhododendron adamsii*, *Caragana jubata*, а также *Kobresia myosuroides*, *Salix berberifolia*, *S. caesia*, верхняя – с *Alectoria ochroleuca*, *A. nigricans*, видами рода *Cladonia* и др. [14]. Верхняя граница высокогорной

растительности зависит от высоты горной системы и образована сообществами с *Festuca altaica*, *F. kryloviana*, *F. sphagnicola* и *Dryas oxyodonta*. Для аридных высокогорий характерен аридный горно-тундрово-горно-степной тип пояса.

Материал и методы исследований

В ходе проведенных полевых и лабораторных исследований (2002–2017 гг.) были определены запасы фитомассы в 42 кустарниковых сообществах, соответствующих 8 формациям и одноименной группе формации, расположенных в 24 горных системах и 3 биоклиматических секторах (БС) АСГО. Учет НФМ сообществ проводился методом укосов в 10-кратной повторности; ПФМ – методом монолитов в 5-кратной повторности на площадках площадью 0,25 м² [15]. Заложены 420 учетных площадок, представляющих НФМ и 210 – ПФМ. Сообщества, растительные формации и группы формаций были выделены в [16, 17]. Названия высших сосудистых растений с дополнениями даны по С.К. Черепанову [18], лишайников – по Н.В. Седельниковой [14]. При выделении БС за основу с небольшими изменениями были взяты подходы из [9]. Для пространственной вариативности величины фитомассы сообществ определены среднее арифметическое и стандартная ошибка. Распределение запасов фитомассы по экспозициям склонов проводилось согласно [19]: 1 – северный склон (0°); 2 – северо-восточный и северо-западный (45°); 3 – западный и восточный (90°); 4 – юго-западный и юго-восточный (135°); 5 – южный (180°). Наряду с ними анализировалась фитомасса сообществ выровненных участков (0°). На основе непараметрического двухфакторного дисперсионного анализа (Kruskal-Wallis ANOVA) Mann-Whitney U Test в пакете программ **Statistica 6.0** определено наличие значимых различий между живой НФМ ботанических групп и экспозицией склонов. Приведенные различия в большинстве случаев значимы при $p < 0,05$. Запасы фитомассы высокогорных сообществ АСГО анализируются в г/м² абсолютно сухой массы.

Результаты и их обсуждение

Кустарниковые тундры АСГО приурочены к самым различным элементам мезорельефа. В этих тундрах запасы НФМ на склонах варьируют от 874 до 6815 г/м², а на вершинах хребтов – от 1419 до 2352 г/м² (рис. 2, табл. 1).

В гумидном и семиаридном секторах наибольшие запасы НФМ кустарниковых тундр формируются на южных склонах (2768–6815 г/м²).

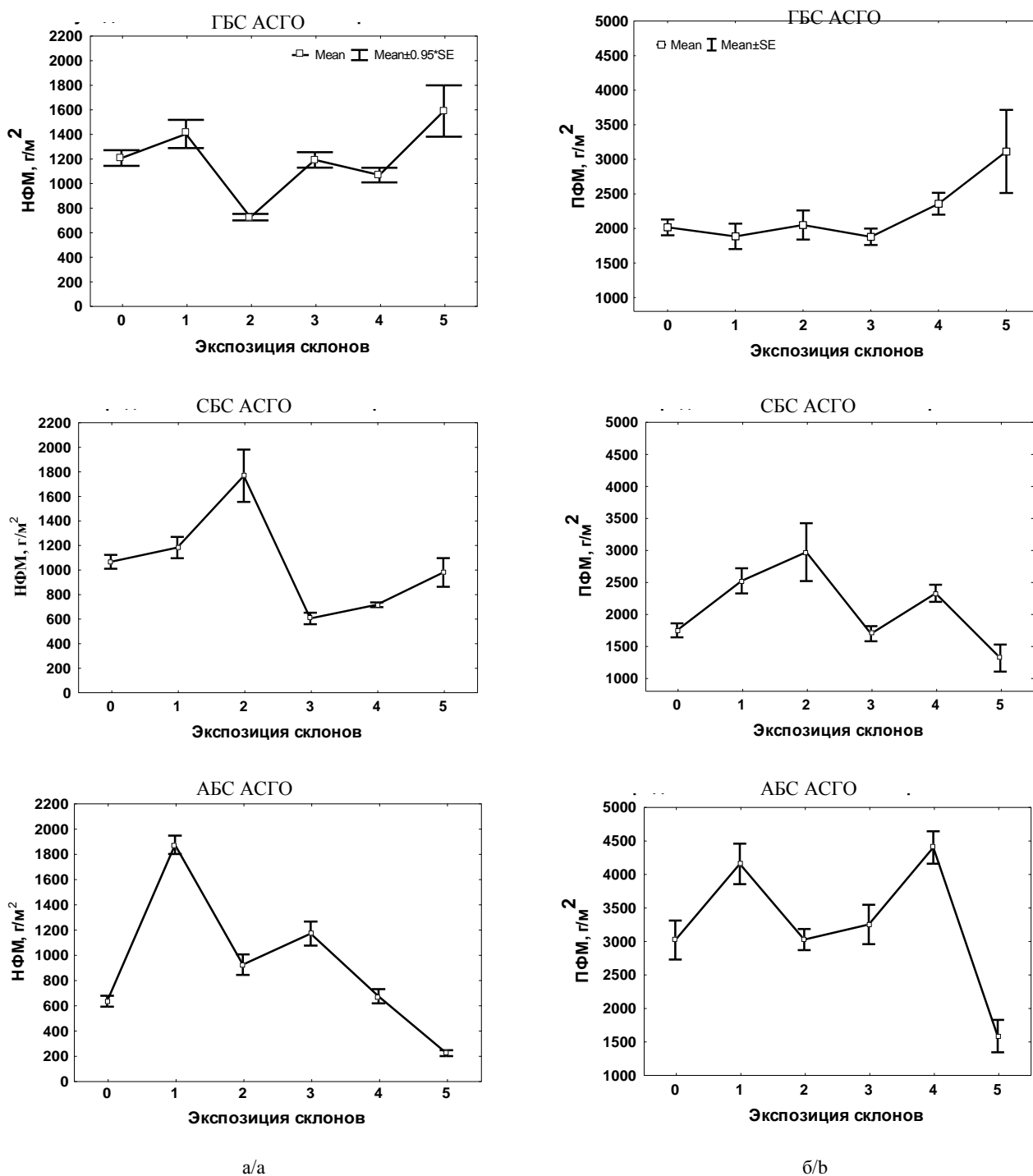


Рис. 2. Распределение НФМ (а) и ПФМ (б) на экспозициях склонов различных БС АСГО, г/м² абс. сух. массы. Положение в рельефе: 0 – выровненные участки (вершины, межгорные депрессии, террасы рек); 1 – северная (0°); 2 – северо-восточная, северо-западная (45°); 3 – западная, восточная (90°); 4 – юго-западная, юго-восточная (135°); 5 – южная (180°) / Fig. 2. Distribution of aboveground (a) and underground (b) phytomass on the expositions of the slopes of various bioclimatic sectors of the ASMR, g / m² absolute dry masses. Position in the relief: 0 - aligned areas (peaks, intermountain depressions, river terraces), 1 - northern (0 °), 2 - north-heastern, north-western (45 °), 3 - western, eastern (90 °), 4 - south-western, sout-heastern (135 °), 5 - southern (180 °)

К югу АСГО область высоких показателей надземной массы смещается к склонам северных экспозиций (2338 г/м²). В большинстве случаев низ-

кие показатели НФМ присущи кустарниковым тундрам выровненных вершин хребтов и нагорий (1419–1679 г/м²), что связано с нивелированными

надземными побегами кустарников высотой не более 60 см, которые индуцируют уровень снегового покрова. На остальных склонах запасы НФМ кустарниковых тундр находятся в интервале 1678–2699 г/м². Предельные их значения соответствуют кустарниковым тундрам аридного и гумидного секторов АСГО соответственно.

В структуре НФМ живая масса сообществ на склонах находится на уровне 197–1727 г/м², а на выровненных участках – 358–1037 г/м². Установлено, что в гумидном секторе в живую НФМ наибольший вклад вносит масса кустарников (300–400 г/м²,

37 %), в семиаридном и аридном – масса лишайников (480–533 г/м², 59 %) и кустарничков (138–158 г/м², 39 %) соответственно (табл. 2, рис. 3).

Вместе с тем на северных склонах в живой НФМ сообществ преобладают кустарники (421–899 г/м², 53–77 %); при переходе к южным склонам в ботаническом составе сообществ масса кустарников остается высокой в сообществах гумидных высокогорий (660 г/м²), тогда как в семиаридных и аридных высокогорьях они замещаются соответственно лишайниками (367–461 г/м²) и осоковыми (33–53 г/м²).

Таблица 1

Распределение запасов фитомассы кустарниковых тундр на элементах рельефа горных систем АСГО, г/м²
/ **Distribution of phytomass of shrub tundra reserves on the terrain elements of mountain systems ASMR**
(Altay-Sayan mountain region), g/m²

Элемент рельефа	БС		
	Гумидный*	Семиаридный	Аридный
Общее число площадок (n)	140/70	120/60	160/80
Выровненный участок (0)	1766±87	2229±123	1604±185
	3069±158	3371±133	6386±634
Северный склон (1)	2439±67	2247±166	2276±62
	3873±286	3904±134	4632±249
Северо-западный и северо-восточный склоны (2)	–	–	1876±65 5253±70
Западный и восточный склоны (3)	2273±205	997±123	1889±163
	2696±188	3718±118	3287±291
Юго-западный и юго-восточный склоны (4)	2629±70	–	1705±27
	4359±407	–	5729±99
Южный склон (5)	6611±204	2699±69	–
	10483±346	2315±134	–

Примечание: гумидный – Кузнецкий Алатау, Восточный Саян: хр. Крыжина; Западный Саян, в том числе хребты Ергаки, Кулу-мыс, Ойский, Куртушибинский; Рудный Алтай: хр. Ивановский, хр. Семинский; семиаридный – в т.ч. хребты Сайлыг-Хем Тайгазы (Западный Саян), Акад. Обручева: верх. р. Унжей и Дерзиг (Тумат-Тайга), Улан-Тайга (Улин-Хан); аридный – массив Монгун-Тайга: район оз. Хиндиктиг-Холь, верх. р. Балыктыг-Хем, верх. р. Мугур; хр. Цаган-Шибэту: пер. Нарин-Даба, верх. р. Шуй, хр. Сайлыг-Хем Тайгазы; Западный Танну-Ола: верх. р. Тээли; верх. р. Ортаа-Хадын; хр. Восточный Танну-Ола: окрестности оз. Кара-Холь; верх. р. Шивилиг-Хем; хр. Хорумнуг-Тайга; нагорье Сангилен: среднее течение р. Нарын (аржаан Алдын-Уургай), верх. р. Балыктыг-Хем, верх. р. Тарыс хр. Аршан Дабаны-Нуру. В числителе – запасы НФМ, в знаменателе – ПФМ, прочерк – отсутствие данных

Таблица 2

Распределение живой НФМ ботанических групп на экспозициях склонов различных биоклиматических секторов АСГО, г/м² абс. сух. массы / Distribution of living aboveground phytomass of the botanical groups on the expositions of the slopes of various bioclimatic sectors of the ASGO, g/m² abs. dry masses

БС АСГО	Экспозиция склонов			
	Северная (0°)	Южная (180°)	СЗ-СВ (90°)	ЮЗ-ЮВ (135°)
Гумидный	К 603±83 (54)	К 660±136 (67)	Кч 182±18 (31)	К 293±46 (41)
	Зл 5±1 (0,4)	Ос 1±0 (0,1)	Ос 9±2 (1,5)	Ос 5±1 (0,4)
Семиаридный	К 474±53 (53)	Л 414±47 (63)	К 579±154 (38)	Кч 450±14 (74)
	Зл 7±1 (1)	Ос 3±0 (0,4)	Ос, Рн 8±1 (0,5)	Ос 3±0 (0,4)
Аридный	К 960±61 (77)	Ос 43±10 (46)	К 405±65 (57)	М 135±39 (31)
	Зл 15±1 (1)	Зл 3±1 (3)	М 21±2 (3)	Кч 8±1 (2)

Примечание. СЗ-СВ – северо-западная и северо-восточная, ЮЗ-ЮВ – юго-западная и юго-восточная; К – кустарники; Кч – кустарнички; Л – лишайники; Зл – злаки; Ос – осоки; М – мхи. В скобках – % от живой НФМ; в числителе – наибольшая масса, в знаменателе – наименьшая масса.

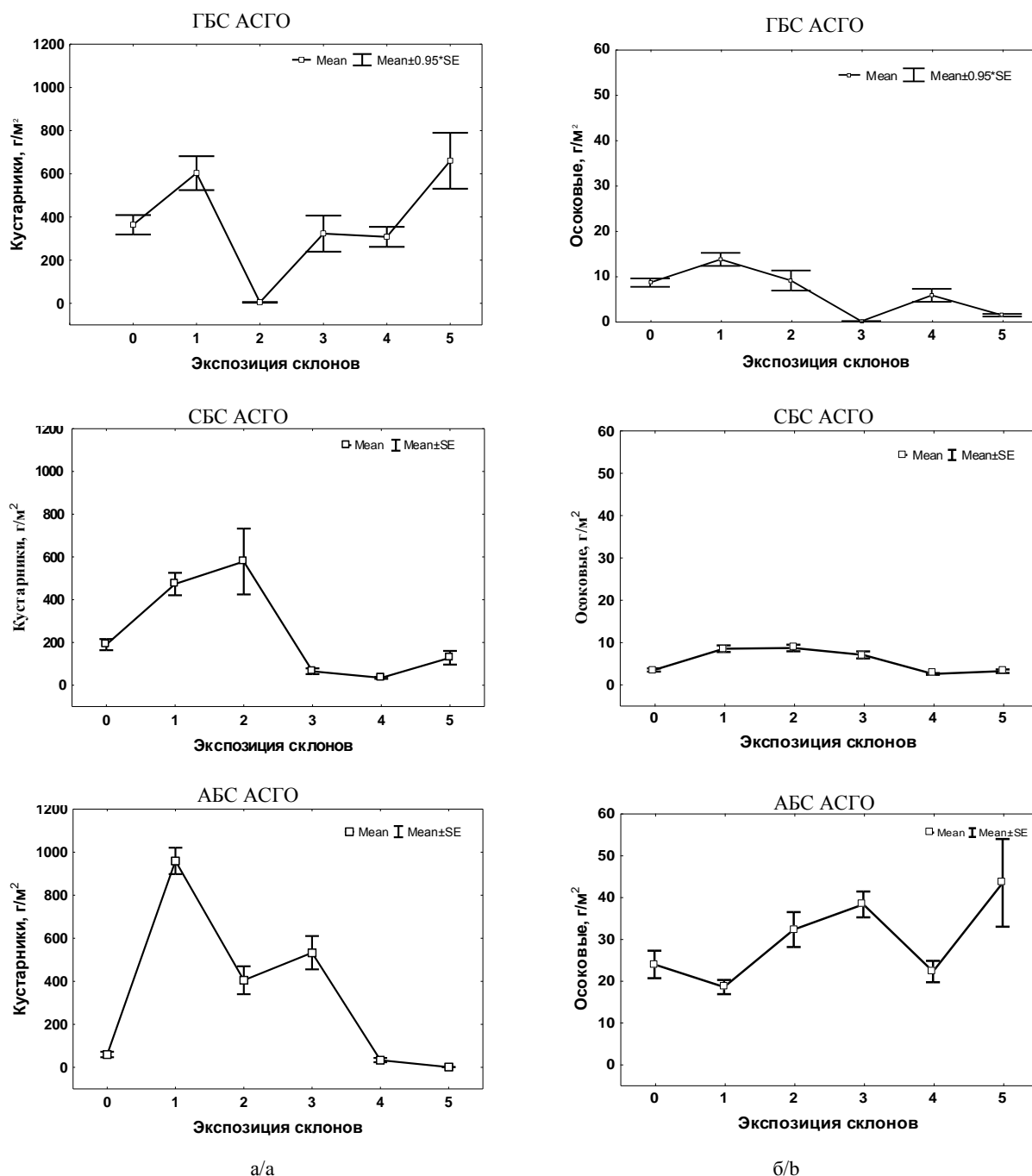


Рис. 3. Распределение живой НФМ кустарников и осоковых кустарничков на склонах разных экспозиций и выровненных участках хребтов различных секторов АСГО (усл. обозн. см. рис. 1) / Fig. 3. Distribution of live AGP shrubs and sedge subshrub on the slopes of various exposures and aligned areas of the ridges of various sectors of the ASMR

Как видно, структура живой НФМ сообществ различных секторов достаточно полно отражает комплекс условий на склонах северо-западной, северо-восточной и юго-западной, юго-восточной экспозиций. В гумидном секторе масса кустарников остается высокой в сообществах, приуроченных к юго-западным и юго-восточным склонам (247–339 г/м²), тогда как на северо-западных и северо-восточных склонах ценообразующая роль ку-

старников переходит к кустарничкам (164–200 г/м²). В семиаридном секторе кустарники вносят существенный вклад в запасы живой НФМ сообществ северо-западных и северо-восточных склонов и начинают уступать кустарничкам в сообществах, сформированных на юго-западных и юго-восточных склонах. В аридном секторе по направлению от северо-западных и северо-восточных склонов к юго-западным и юго-восточным

масса кустарников снижается от 470 до 24 г/м², в то время как масса мхов увеличивается с 19 до 174 г/м². Запасы остальных ботанических групп не превышает 2 % от живой НФМ.

Распределение НММ высокогорных сообществ различается на выровненных участках (180–265 г/м²) и на склонах (85–652 г/м²) хребтов АСГО. В гумидном и семиаридном секторах высокие запасы НММ наблюдаются в сообществах, расположенных на склонах южной экспозиции. С продвижением к югу области накопление отмершей массы прослеживается в сообществах склонов северной экспозиции, что совпадает с областью распространения кустарниковых тундр. На остальных элементах мезорельефа значения НММ тундр не превышают 340 г/м². Отношение живой НФМ к НММ на выровненных участках составляет 4:1 (гумидный, семиаридный) и 2:1 (аридный сектор). Этот показатель по направлению от северных к южным склонам варьирует от 4:1 до 1:1.

В сообществах гумидного сектора по направлению от выровненных вершин до южных склонов хребтов величина ПФМ плавно увеличивается к южным склонам от 2368 до 3114 г/м² (рис. 2). Область формирования значительных запасов ПФМ сообществ семиаридного сектора находится в пределах северных, западных и восточных склонов и в переходных между ними (более 2000 г/м²). ПФМ в аридном секторе мала в сообществах, расположенных на южных склонах. В распределении ПФМ сообществ роль склонов усиливается с увеличением аридности климата. Наибольшие соответствуют сообществам, приуроченным к северным склонам (более 4000 г/м²), а на остальных склонах этот показатель находится в узких диапазонах варьирования (3143–3469 г/м²). В частности, ПФМ кустарниковых тундр на разных элементах мезорельефа находится в диапазоне 2181–10 829 г/м². В гумидном секторе область высоких показателей ПФМ следует связать с южными склонами (более 10 000 г/м²), а в условиях аридного сектора эта область смещается к выровненным участкам (5752–7020 г/м²) и может быть связана с экстремальными условиями наземной среды, в результате действия которых фитомасса этих тундр стремится сохранить жизнедеятельность в глубине почвы.

На склонах и выровненных участках горных систем различных БС АСГО между запасами НФМ и ПФМ выявлены значимые связи ($r = -0,93-0,97$; $n = 6$). Для более конкретного анализа влияния склонов на распределение фитомассы кустарниковых тундр нами рассматриваются широко распространенные травяно-ерниковые и кладониево-ерниковые сообщества (рис. 4а, б).

Общие закономерности распределения фитомассы травяно-ерниковых сообществ по экспозициям склонов достаточно хорошо прослеживаются в гумидном и аридном секторах. В гумидном секторе живая НФМ кустарников в 3 и 12 раз больше, чем в тундрах аридного и семиаридного секторов соответственно. По запасам НММ травяно-ерниковые сообщества аридного сектора заметно отличаются от тех же сообществ гумидного и семиаридного. С продвижением от гумидного сектора к ариднему в анализируемых тундрах подземная масса увеличивается от 2696 до 5269 г/м² (от 60 до 80 % от общей массы). Высокими запасами ОФМ характеризуются кладониево-ерниковые сообщества выровненных вершин хребтов аридного сектора, что в 2 раза превосходит общую массу аналогичных сообществ семиаридного и гумидного секторов (рис. 4б). Резкие отличия между анализируемыми тундрами наблюдаются и в накоплении отмершей массы, наибольшие запасы которой формируются в кладониево-ерниковых сообществах аридного сектора и связаны с наличием значительного количества сухостоя и листового опада ценообразователя (*Betula rotundifolia*).

Таким образом, полученные результаты позволили выявить влияние экспозиций склонов на распределение величины запасов и структуру фитомассы кустарниковых тундр. Тем самым продемонстрированы наиболее важные закономерности пространственной организации высокогорной растительности АСГО. Влияние склонов на дифференциацию фитомассы исследованных тундр усиливается в ряду от гумидного к ариднему сектору. На северных склонах хребтов в живой наземной массе сообществ преобладают кустарники (421–899 г/м², 53–77 %), при переходе к южным склонам их масса остается высокой в сообществах гумидного сектора (660 г/м²), они замещаются лишайниками и осоковыми в сообществах семиаридного и аридного секторов. Запасы НММ находятся в соответствии с запасами НФМ.

Накопление отмершей массы характерно для кустарниковых сообществ южных склонов гумидного и семиаридного БС, а на юге – для кустарниковых тундр, приуроченных к склонам хребтов северной экспозиции. Отношение между живой НФМ и НММ на выровненных участках составляет 4:1 (гумидный, семиаридный) и 2:1 (аридный сектор). Этот показатель по направлению от северных склонов к южным варьирует от 4:1 до 1:1. Роль склонов в распределении фитомассы высокогорных сообществ близких местообитаний снижается, вместе с тем влияние показателей фитомассы усиливается.

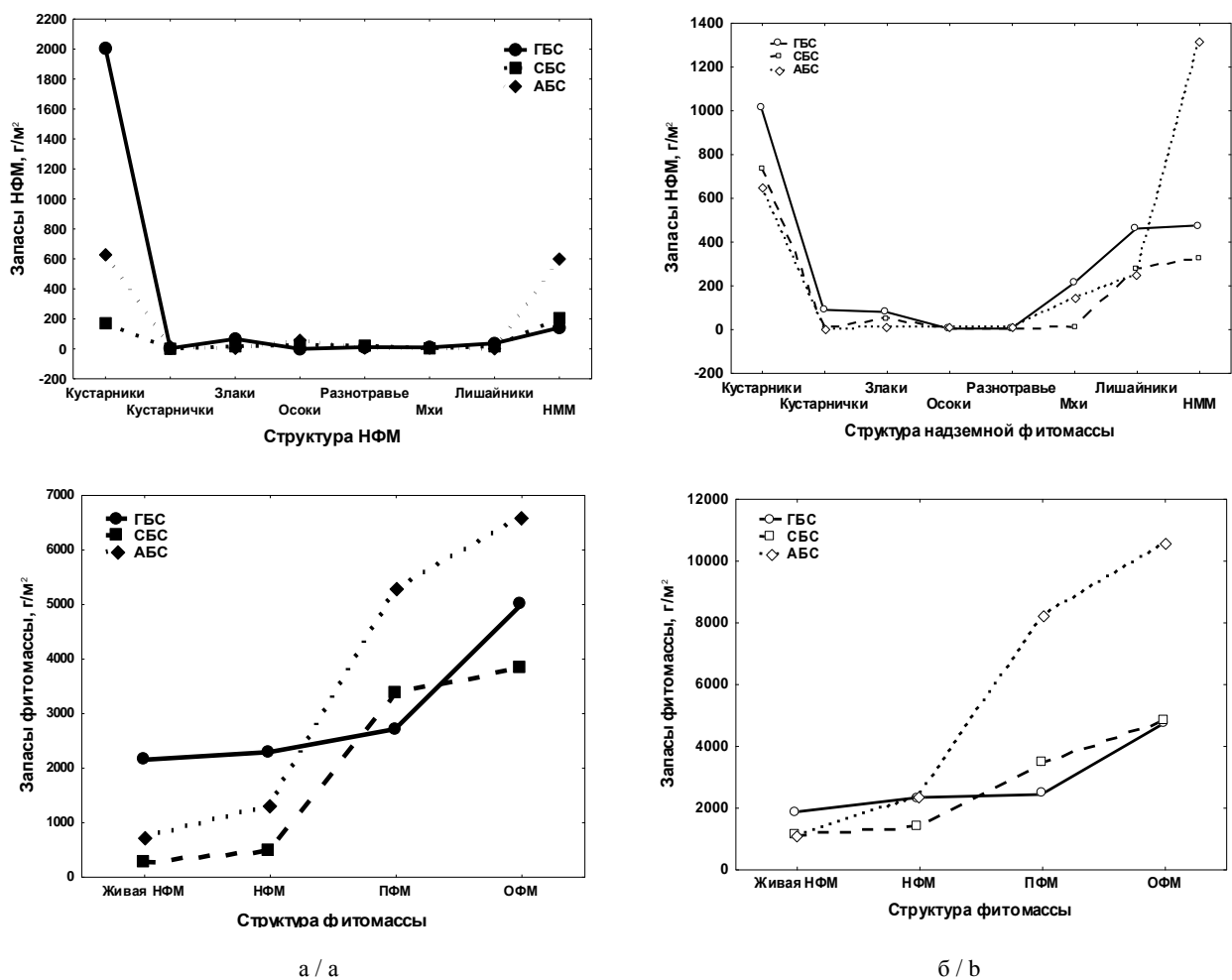


Рис. 4. Запасы и структура фитомассы травяно-ерниковых (а), кладониево-ерниковых сообществ (б) хребтов АСГО, г/м² abs. сух. массы / Fig. 4. Reserves and phytomass structure of grass-crowberry (a), cladonia-crowberry (b) ridges of ASMR, g/m² abs. dry masses

Величина запасов фитомассы сообществ определяется надземной массой в гумидном секторе и подземной в аридном секторе области. На склонах хребтов установлены значимые и тесные связи между запасами НФМ и ПФМ сообществ ($r = -0,93-0,97$; $n = 6$).

Литература

1. Galen C., Stanton M.L. Responses of snowbed plant species to changes in growing-season length // *Ecology*. 1995. Vol. 74. P. 1546–1557.
2. Zhang Y.P., Ge Z.W., Liu Y.H., Dou J.X., He Y.L., Guo P. A comparative study on difference of microclimate between south facing and north facing slope of the upper reaches of Mingjiang River in rainy season // *J. of Mountain Science*. 2000. Vol. 20. P. 680–686.
3. Титлянова А.А., Миронычева-Токарева Н.П., Романова И.П., Косых Н.П., Кыргыз Ч.С., Самбуу А.Д. Продуктивность степей // *Степи Центральной Азии*. Новосибирск: Изд-во СО РАН. 2002. С. 95–154.

4. Воскресенский С.С. Геоморфология Сибири. М.: МГУ, 1962. 348 с.
5. Олюнин В.Н. Горы Южной Сибири // *Равнины и горы Сибири*. М.: Наука, 1975. С. 245–328.
6. Клопова А.С. Реки. Природные условия Тувинской автономной области. М.: АН СССР, 1957. С. 66–105.
7. Севастьянов В.В. Климат высокогорных районов Алтая и Саян. Томск: ТГУ, 1998. 201 с.
8. Бахтин Н.П. Климатические особенности и агроклиматические ресурсы Тувинской АССР // *Сб. работ Красноярской гидрометеорологической обсерватории*. Красноярск, 1968. № 1. С. 26–68.
9. Поликарпов Н.П., Чебакова Н.М., Назимова Д.И. Климат и горные леса Южной Сибири. Новосибирск: Наука, 1986. 225 с.
10. Носин В.А. Почвы Тувы. М.: Изд-во АН СССР, 1963. 342 с.
11. Седельников В.П. Высокогорная растительность Алтае-Саянской горной области. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1988. 223 с.

12. Зибзеев Е.Г., Игай Н.В., Басаргин Е.А. Высокогорная растительность нагорья Сангилен: кобрезиевники, кустарничковые и кустарниковые тундры // *Turczaninowia*. 2018. Т. 21, № 1. С. 81–112.

13. Макунина Н.В., Мальцева Т.В., Зибзеев Е.Г. Высотная поясность южного макросклона хребта Академика Обручева // *География и природные ресурсы*. 2007. № 2. С. 86–96.

14. Седельникова Н.В. Видовое разнообразие лишенобиоты Западной Сибири и оценка участия видов лишайников в основных ее горных и равнинных фитоценозах. Новосибирск: Гео, 2017. 611 с.

15. Александрова В.Д. Опыт определения надземной и подземной массы растительности в арктической тундре // *Ботан. журн.* 1958. Т. 43, № 12. С. 130–147.

16. Куминова А.В. Растительный покров Алтая. Новосибирск, 1960. 450 с.

17. Седельников В.П. Флора и растительность высокогорий Кузнецкого Алатау. Новосибирск: Изд-во АН СССР, Наука, Сиб. отд-ние, 1979. 167 с.

18. Черепанов С.К. Сосудистые растения России и сопредельных государств. СПб.: Мир и семья-95, 1995. 992 с.

19. Chang C., Lee P., Bai M., Lin T. Identifying the scale thresholds for field-data extrapolation via spatial analysis of landscape gradients // *Ecosystems*. 2006. Vol. 9. P. 200–214.

References

1. Galen C., Stanton M.L. (1995). Responses of snowbed plant species to changes in growing-season length. *Ecology*, vol. 74, pp. 1546-1557.

2. Zhang Y.P., Ge Z.W., Liu Y.H., Dou J.X., He Y.L., Guo P. (2000). A comparative study on difference of microclimate between south facing and north facing slope of the upper reaches of Mingjiang River in rainy season. *Journal of Mountain Science*, vol. 20, pp. 680-686.

3. Titlyanova A.A., Mironycheva-Tokareva N.P., Romanova I.P., Kosykh N.P., Kyrgyz Ch.S., Sambuu A.D. (2002). Productivity of steppes. *Stepi Tsentral'noi Azii* [Steppes of Central Asia]. Novosibirsk, Siberian Branch Press, Russian Academy of Sciences, pp. 95-154. (in Russian).

4. Voskresenskiy S.S. (1962). *Geomorphology of Siberia*. Moscow, Moscow State University Press, 348 p. (in Russian).

5. Olyunin V.N. (1975). Mountains of Southern Siberia. *Ravniny i gory Sibiri* [Plains and mountains of Siberia]. Moscow, Nauka Publ., pp. 245-328. (in Russian).

6. Klopova A.S. (1957). *Rivers. Natural conditions of the Tuva Autonomous region*. Moscow, USSR Academy of Sciences Press, pp. 66-105. (in Russian).

7. Sevastyanov V.V. (1998). *Climate of high-altitude regions of Altai and Sayan*. Tomsk, Tomsk State University Press, 201 p. (in Russian).

8. Bakhtin N.P. (1968). Climatic features and agrometeorological resources of the Tuva ASSR. *Sb. rabot Krasnoyarskoi gidrometeorologicheskoi observatorii* [Collection of works of the Krasnoyarsk Hydrometeorological Observatory]. Krasnoyarsk, no. 1, pp. 26-68. (in Russian).

9. Polikarpov N.P., Chebakova N.M., Nazimova D.I. (1986). *Climate and mountain forests of Southern Siberia*. Novosibirsk, Nauka Publ., 225 p. (in Russian).

10. Nosin V.A. (1963). *Soil of Tuva*. Moscow, USSR Academy of Sciences Press, 342 p. (in Russian).

11. Sedelnikov V.P. (1988). *High-altitude vegetation of the Altai-Sayan mountain region*. Novosibirsk, Nauka Publ., Siberian Branch Press, Russian Academy of Sciences, 223 p. (in Russian).

12. Zibzeev E.G., Igay N.V., Basargin E.A. (2018). High-altitude vegetation of the Sangilen highlands: kobrezievniki, shrubby and shrubby tundras. *Turczaninowia*, vol. 21, no. 1, pp. 81-112. (in Russian).

13. Makunina N.V., Maltseva T.V., Zibzeev E.G. (2007). High-altitude zone of the Southern macro-slope of the Akademika Obrucheva ridge. *Geografiya i prirodnye resursy*, no. 2, pp. 86-96. (in Russian).

14. Sedelnikova N.V. (2017). *Species diversity of lichen biota of West Siberia and assess the involvement of lichen species in major mountain and lowland communities*. Novosibirsk, Geo Publ., 611 p. (in Russian).

15. Alexandrova V.D. (1958). Experience in determining the above-ground and underground vegetation mass in the Arctic tundra. *Botanicheskii zhurnal*, vol. 43, no. 12, pp. 130-147. (in Russian).

16. Kuminova A.V. (1960). *Vegetation cover of the Altai*. Novosibirsk, 450 p. (in Russian).

17. Sedelnikov V.P. (1979). *Flora and vegetation of the high mountains of the Kuznetsk Alatau*. Novosibirsk, Nauka Publ., Siberian Branch Press, Russian Academy of Sciences, 167 p. (in Russian).

18. Cherepanov S.K. (1995). *Vascular plants of Russia and neighboring states*. Saint Petersburg, Mir i sem'ya - 95 Publ., 992 p. (in Russian).

19. Chang C., Lee P., Bai M., Lin T. (2006). Identifying the scale thresholds for field-data extrapolation via spatial analysis of landscape gradients. *Ecosystems*, vol. 9, pp. 200-214.

УДК 581.552, 581.93

DOI 10.18522/1026-2237-2020-1-111-121

РЕДКИЕ ВИДЫ РАСТЕНИЙ ЕСТЕСТВЕННЫХ ЛЕСОВ РОСТОВСКОЙ ОБЛАСТИ*© 2020 г. Т.А. Соколова¹, О.Ю. Ермолаева²¹Южный научный центр Российской академии наук, Ростов-на-Дону, Россия,²Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, Россия**RARE PLANT SPECIES OF NATURAL FORESTS OF ROSTOV REGION**Т.А. Sokolova¹, О.Ю. Ermolaeva²¹Southern Scientific Centre, Russian Academy of Sciences, Rostov-on-Don, Russia,²Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia

Соколова Татьяна Александровна – кандидат биологических наук, научный сотрудник, отдел аридной экологии, Южный научный центр Российской академии наук, пр. Чехова, 41, г. Ростов-на-Дону, 344006, Россия, e-mail: Sta1562@yandex.ru

Tatyana A. Sokolova - Candidate of Biological Sciences, Researcher, Department of Arid Ecology, Southern Scientific Centre, Russian Academy of Sciences, Chekhova Ave., 41, Rostov-on-Don, 344006, Russia, e-mail: Sta1562@yandex.ru

Ермолаева Ольга Юрьевна – кандидат биологических наук, доцент, кафедра ботаники, Южный федеральный университет, пер. Ботанический спуск, 7, г. Ростов-на-Дону, 344041, Россия, e-mail: Ermolaeva@mail.ru

Olga Yu. Ermolaeva - Candidate of Biological Sciences, Associate Professor, Department of Botany, Southern Federal University, Botanichesky Spusk Lane, 7, Rostov-on-Don, 344041, Russia, e-mail: Ermolaeva@mail.ru

В результате многолетних исследований естественных лесов Ростовской области выполнены более 450 геоботанических описаний естественной лесной растительности, проведены инвентаризация флоры лесов и эколого-флористическая классификация растительности. Описаны лесные сообщества, представленные 6 классами (*Carpino – Fagetea*, *Quercetea pubescentis*, *Alno glutinosae-Populetea albae*, *Alnetea glutinosae*, *Salicetea purpureae* и *Crataego – Prunetea*), 7 союдами (*Scillo sibericae – Quercion roboris*, *Aceri tatarici – Quercion*, *Alnion incanae*, *Alnion glutinosae*, *Salicion albae*, *Berberidion vulgaris*, *Prunion fruticosae*) и 18 ассоциациями, 9 субассоциациями и более чем 40 вариантами, 10 безранговыми сообществами. Отмечены виды растений, занесенные в Красную книгу Ростовской области (2014), в том числе 9 видов федерального статуса охраны, 8 видов, занесенных в Красный список МСОП (2014), 11 видов, внесенных в Европейский красный список (2011). В естественных лесах области обнаружены 75 редких видов растений. После анализа геоботанических описаний редкие виды были разделены на 6 групп относительно топографической и исторической характеристики лесного массива. Предложены и обоснованы ключевые участки на территориях лесничеств для ведения мониторинга редких видов растений. Составлен список видов, рекомендованных для занесения в новое издание Красной книги Ростовской области.

Ключевые слова: Ростовская область, естественные леса, редкие виды растений, Красная книга.

As a result of long-term studies of natural forests in the Rostov region, more than 450 geobotanical descriptions of natural forest vegetation were performed, an inventory of forest flora and an ecological and floral classification of vegetation was carried out. Forest communities are described, represented by 6 classes (*Carpino-Fagetea*, *Quercetea pubescentis*, *Alno glutinosae-Populetea albae*, *Alnetea glutinosae*, *Salicetea purpureae* and *Crataego-Prunetea*), 7 unions (*Scillo siberica-Quercion roboris*, *Aceri tatarici-Quercion*, *Alnion incanae*, *Alnion glutinosae*, *Salicion albae*, *berberidion vulgaris*, *Prunion Fruticosae*) and 18 associations, 9 sub-associations and more than 40 variants, 10 unranked communities. Plant species listed in the Red Book of the Rostov region (2014) were noted, including 9 species of Federal protection status, 8 species listed in the IUCN Red List (2014), and 11 species listed in the European Red List (2011). 75 rare species of plants were found in the natural forests of the region. After analyzing the geobotanical descriptions, the rare species were divided into 6 groups, relative to the topographical and historical characteristics of the forest. Key areas in forest areas for monitoring rare plant species are proposed and justified. A list of species recommended for inclusion in the new edition of the Red Book of the Rostov region has been compiled.

Keywords: Rostov region, natural forests, rare plant species, Red Book.

* Публикация подготовлена в рамках реализации ГЗ ЮНЦ РАН, № гр. проекта АААА-А19-119011190176-7. Исследования проводились при финансовой поддержке министерства природы Ростовской области (гос. контр. № Ф. 2019.215047 от 29.04.2019 г.).

Леса – классический объект природоохранной деятельности человека, поскольку это один из наиболее уязвимых компонентов растительного покрова и один из самых востребованных ресурсов, особенно в малолесных регионах. В связи с этим возрастает потребность в инвентаризации и эффективной оценке состояния лесов. Ростовская область (РО) относится к лесодефицитным регионам страны. Имеющиеся леса представляют большую как научную, так и практическую ценность. Исследования многих лет сообщают о флористическом богатстве и уникальности донских лесов [1–6].

Подъем интереса к проблемам охраны растительного мира усилился в 60-е г., когда начались глобальные исследования флоры на предмет редких и исчезающих видов. Сведения о редких видах были освещены во многих работах [7–10]. В них приведены новые и редкие виды растений в бассейне реки Дон и определены их группы в зависимости от местообитания. Инвентаризацию флоры завершает издание определителя «Флора Нижнего Дона» [11, 12].

Важной природоохранной задачей является сохранение редких видов растений, так как каждый вид может быть перспективно полезен для человека [8]. Обобщение сведений о редких и исчезающих видах растений, грибов и лишайников РО дано в [13–15].

Решение проблемы сохранения редких и исчезающих видов невозможно без охраны растительных сообществ, компонентом которых они являются. Поэтому в настоящее время преобладает концепция сохранения не отдельных видов растений, а растительных сообществ как естественной среды их обитания. Настоящие исследования призваны показать раритетность и уникальность флоры лесов РО. Для всех редких видов указаны приуроченность к топогруппам лесов, их синтаксономическая привязанность, а также встречаемость и обилие.

Материалом для настоящей работы послужили 478 геоботанических описаний, выполненных авторами в 2008–2019 гг. в ходе полевых экспедиций в разных районах РО. В анализ включены более 700 геоботанических описаний лесной растительности, выполненных Г.М. Зозулиным (1960–1980 гг.). Размеры пробных площадей варьировали от 400 до 625 м² в зависимости от размеров однородного участка растительности. Обилие/покрытие видов дано по комбинированной шкале J. Braun-Blanquet [16]: r – вид на площадке встречен в единичных экземплярах; + – вид имеет проективное покрытие до 1 %; 1 – от 1 до 5; 2 – от 5 до 25; 3 – от 25 до 50; 4 – от 50 до 75, 5 – выше 75 %. Названия высших сосудистых растений приводятся по С.К. Черепанову [17].

Специфика раритетного компонента флоры РО заключается в том, что он содержит большое число погранично-ареальных видов. Степная часть дон-

ского бассейна – это зона контакта и взаимопроникновения видов северных гумидных (неморальных и бореальных лесных) и южных аридных (древнесредиземноморских нагорно-степных и пустынных) флорогенетических центров [18]. Большая часть видов северных гумидных флорогенетических комплексов встречается в области в изолированных островных местах на границе или вне границ своего основного ареала. Места обитания данной группы видов связаны в области по большей части с естественными лесами и их кустарниковыми дериватами, в основном байрачными и аренными. Ареннные леса являются местом консервации голарктических и бореальных (в меньшей степени неморальных) реликтов различных фаз плейстоцена, связанных с неоднократными смещениями природных зон и широкими миграциями растительных сообществ под влиянием оледенений [3].

По топографическому признаку в области различают байрачные (произрастающие в больших балках), пойменные (в поймах крупных и средних рек) и аренные (на песчаных массивах) леса (рис. 1).

На основе геоботанических описаний по методу Браун-Бланке [14, 19] проведена классификация растительности естественных лесов РО. Описаны лесные сообщества, представленные 6 классами (*Carpino – Fagetea*, *Quercetea pubescentis*, *Alno glutinosae – Populetea albae*, *Alnetea glutinosae*, *Salicetea purpureae* и *Crataego – Prunetea*), 7 союзами (*Scillo sibericae – Quercion roboris*, *Aceri tartaric–Quercion*, *Alnion incanae*, *Alnion glutinosae*, *Salicion albae*, *Berberidion vulgaris*, *Prunion fruticosae*), 18 ассоциациями, 9 субассоциациями и более чем 40 вариантами, 10 безранговыми сообществами. Большая часть территории, занятая этими лесами, не имеет специальной охраны. Тем не менее в этих синтаксонах сосредоточены около 60 % редких видов растений, занесенных в Красную книгу РО [15]. Для каждого редкого вида растения указано участие в синтаксонах ранга ассоциации.

В естественных лесных сообществах РО всего отмечено 75 видов сосудистых растений, занесенных в Красную книгу области [15] (почти 40 % от всех видов высших растений, занесенных в Красную книгу РО) (рис. 2), в том числе:

– 9 видов федерального статуса охраны [20] (*Delphinium punicum* Pall, *Iris pumila* L., *Fritillaria ruthenica* Wikstr., *Stipa pennata* L., *Paeonia tenuifolia* L., *Pulsatilla pratensis* (L.) Mill. s. l., *Prangos trifida* (Mill.) Herminst. & Heyn, *Eriosynaphe longifolia* (Fisch. ex Spreng.) DC, *Orchis palustris* Jacq (последние три не отмечались более 20 лет);

– 8 видов, занесенных в Красный список МСОП [21] (*Lycopodiella inundata* (L.) Holub, *Equisetum fluviatile* L., *Cicuta virosa* L., *Corylus avellana* L., *Menyanthes trifoliata* L., *Crataegus ambigua* C. A. Mey. ex A. Beck., *Neottia nidus-avis* (L.) Rich., *Orchis*

palustris Jacq. (*Anacamptis palustris* (Jacq.) R.M. Bateman, Pridgeon & M. W. Chase));

– 11 видов, внесенных в Европейский красный список [22]: *Cicuta virosa* L., *Adenophora lilifolia* (L.) A. DC., *Menyanthes trifoliata* L., *Paeonia tenuifolia* L., *Naumburgia thyrsoflora* (L.) Reichenb., *Caltha palustris* L., *Allium lineare* L., *Epipactis helleborine* (L.) Crantz,

Neottia nidus-avis (L.) Rich., *Platanthera bifolia* (L.) Rich., *P. chlorantha* (Cust.) Reichenb.

Matteuccia struthiopteris (L.) Todaro впервые отмечен на территории РО в 2011 г.; *Arum nordmannii* Scott, *Menyanthes trifoliata* L., *Laser trilobum* (L.) Borkh., *Mercurialis perennis* L. – значительно позже.

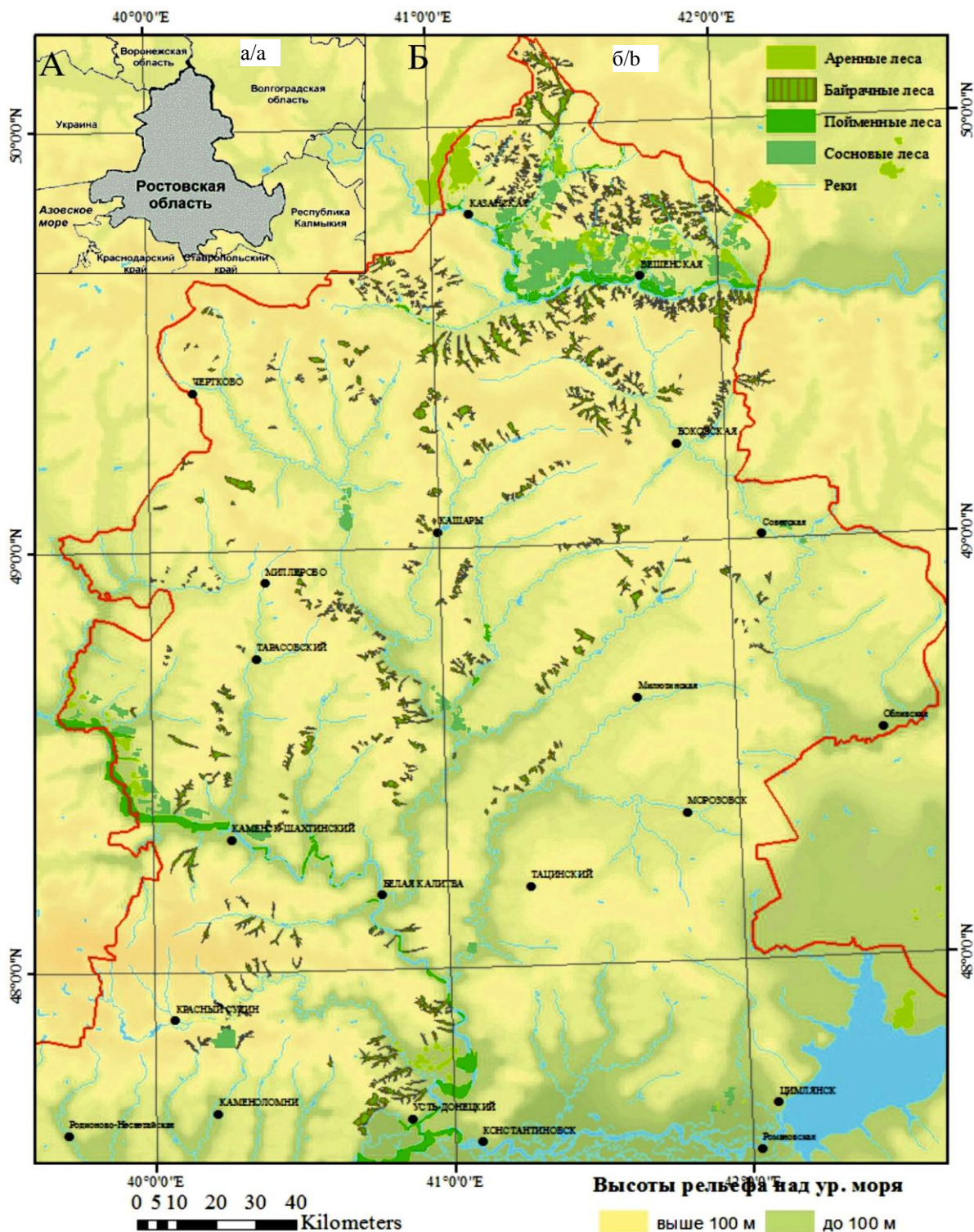


Рис. 1. а – Ростовская область; б – район исследований / Fig. 1. a - Rostov region; b - research area

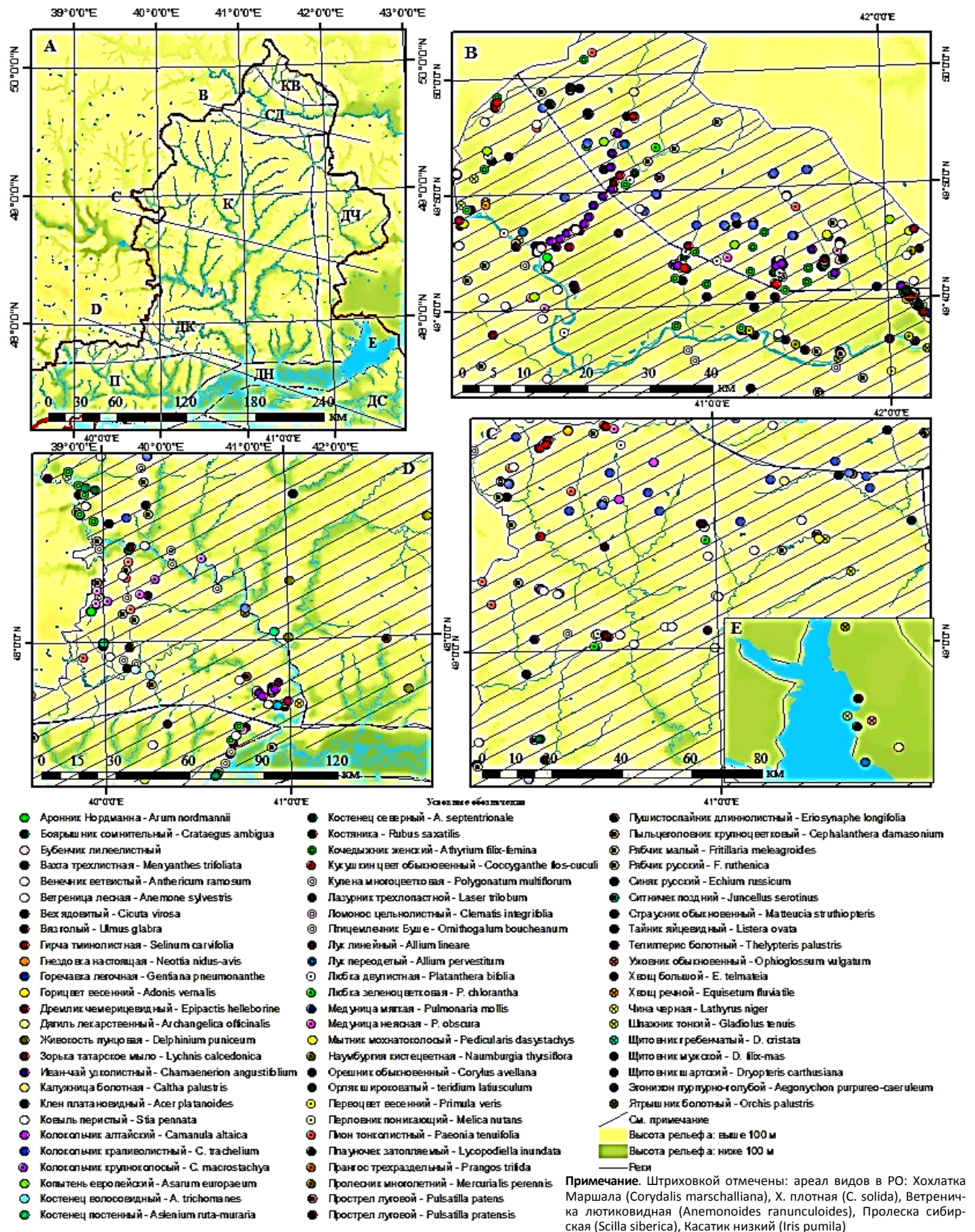


Рис. 2. Локализация редких видов растений Ростовской области, отмеченных в лесных сообществах: А – общий вид территории исследования; ботанико-географические районы Ростовской области: ДН – долины Нижнего Дона, ДС – Доно-Сальский; А, В, С, D, E – фрагменты Ростовской области в масштабе / Fig. 2. Localization of rare plant species of the Rostov region, noted in forest communities: A - general view of the research area; botanical and geographical areas of the Rostov region: DN - valley of the Lower Don, DS - Don-Salsk; A, B, C, D, E - fragments of the Rostov region in scale

Анализ геоботанических описаний показал, что редкие виды естественных лесов РО можно разделить на 6 групп:

1. Виды, встречающиеся во всех типах естественных лесов (аренных, байрачных, пойменных). Сведения о встречаемости приводятся по литературным источникам: в типах лесов и ботанико-географических районах [3, 6, 9, 13, 23–25]; в ассоциациях [26]. В эту группу вошли 9 видов: *Adenophora lilifolia* (L.) A. DC. (A.t. – A.g., A.t. – Q.r.; СД, КВ, К), *Anemonoides ranunculoides* (L.) Holub (во всех лесных асс.; КВ, СД, К, ДК), *Athyrium filix-femina* (L.) Roth (F.e. – Q.r., A.t. – A.g., U.d. – A.g., F.u. – Q.r., F.v. – U.m., C.e. – A.g., T.p. – A.g.; КВ, СД, К, ДЧ, ДК), *Campanula trachelium* L. (A.t. – Q.r., F.e. – Q.r., P.p. – Q.r., C.r. – Q.r., V.p. – Q.r.; КВ, СД, К, ДЧ, ДК), *Corydalis marschalliana* (Pall. ex Willd.) Pers. (во всех лесных асс.; КВ, СД, К, ДЧ, ДК, П), *C. solida* (L.) Clairv. (во всех лесных асс., но менее обильно, чем предыдущий вид; КВ, СД, К, ДЧ, ДК, П), *Dryopteris filix-mas* (L.) Schott (F.e. – Q.r., A.t. – A.g., U.d. – A.g., F.u. – Q.r., F.v. – Q.r., C.e. – A.g., T.p. – A.g.; КВ, СД, К, ДЧ, ДК), *Scilla siberica* Haw. (F.e. – Q.r., C.r. – Q.r., A.t. – A.g., U.d. – A.g., F.u. – Q.r., F.v. – U.m., P.p. – Q.r., R.c. – C.s., S.s. – U.l.; КВ, СД, К, ДЧ, ДК, П), *Ulmus glabra* Huds. (A.t. – A.g., U.d. – A.g., F.e. – Q.r.; КВ, СД, К, ДЧ, ДК).

2. Виды (25), встречающиеся в аренных и байрачных лесах: *Acer platanoides* L. (F.e. – Q.r., V.p. – Q.r., P.p. – Q.r., C.r. – Q.r.; КВ, СД), *Adonis vernalis* L. (F.e. – Q.r., P.p. – Q.r., A.t. – Q.r., V.p. – Q.r., C.r. – Q.r.; КВ, СД, ДК), *Asplenium ruta-muraria* L. (F.e. – Q.r., C.r. – Q.r.; КВ), *A. septentrionale* (L.) Hoffm. (F.e. – Q.r., C.r. – Q.r.; КВ), *Campanula macrostachya* Waldst. & Kit. ex Willd. (A.t. – Q.r.; КВ, СД, К), *Coccyganthe flos-cuculi* (L.) Fourr. (A.t. – Q.r., A.t. – A.g.; КВ, СД), *Epipactis helleborine* (L.) Crantz (A.t. – Q.r., P.p. – Q.r., V.p. – Q.r.; КВ, СД, К), *Fritillaria ruthenica* Wikstr. (A.t. – Q.r., P.p. – Q.r., F.e. – Q.r., C.r. – Q.r.; СД, КВ, К), *Iris pumila* L. (A.t. – Q.r., P.f., P.s., S.s., R.s. – C.s.; КВ, ДЧ), *Laser trilobum* (L.) Borkh. (A.t. – Q.r.; КВ, СД), *Lychnis chalconica* L. (A.t. – Q.r.; КВ, СД), *Ornithogalum boucheanum* (Kunth) Aschers (A.t. – Q.r.; ДЧ, К), *Platanthera bifolia* (L.) Rich. (S.e. – Q.r., A.t. – A.g., A.t. – Q.r.; КВ, СД, ДЧ, К), *P. chlorantha* (Cust.) Reichenb. (A.t. – Q.r., V.p. – Q.r.; КВ, СД, КЖ), *Pteridium latiusculum* (Desv.) Hieron. ex Fries (A.t. – A.g.; КВ, СД), *Polygonatum multiflorum* Stev. (A.t. – Q.r., V.p. – Q.r., C.r. – Q.r.; КВ, СД, К, ДЧ), *Pulmonaria mollis* Wulf. ex Hornem. (A.t. – Q.r.; ДК), *Stipa pennata* L. (A.t. – Q.r., P.s., P.f.; ДЧ), *Pulsatilla patens* (L.) Mill. (A.t. – A.g.; СД), *P. pratensis* (L.) Mill. s. l. m (A.t. – A.g.; СД), *Campanula altaica* Ledeb. (A.t. – Q.r., V.p. –

Q.r.; СД, К), *Clematis integrifolia* L. (A.t. – Q.r.; СД, К, ДЧ; Демина), *Corylus avellana* L. (F.e. – Q.r., V.p. – Q.r., C.r. – Q.r.; КВ, СД, К), *Crataegus ambigua* C. A. Mey. ex A. Beck (A.t. – Q.r.; КВ), *Delphinium puniceum* Pall. (A.t. – Q.r.; К).

3. Виды (16), встречающиеся в аренных и пойменных лесах: *Archangelica officinalis* (Moench) Hoffm. (A.t. – A.g., U.d. – A.g.; КВ, СД), *Arum nordmannii* Schott (F.u. – Q.r.; СД), *Caltha palustris* L. (A.t. – A.g., U.d. – A.g., T.p. – A.g., C.e. – A.g.; КВ, СД, ДЧ, К), *Chamaenerion angustifolium* (L.) Scop. (F.v. – U.m., A.t. – Q.r., A.t. – A.g.; КВ, СД), *Cicuta virosa* L. (A.t. – A.g., U.d. – A.g., T.p. – A.g., C.e. – A.g.; СД), *Dryopteris carthusiana* (Vill.) H. P. Fuchs (A.t. – A.g., U.d. – A.g., C.e. – A.g., T.p. – A.g.; КВ, СД, К, ДЧ), *D. cristata* (L.) A. Gray (A.t. – A.g., U.d. – A.g., C.e. – A.g., T.p. – A.g.; КВ, СД, К, ДЧ), *Equisetum fluviatile* L. (A.t. – A.g., U.d. – A.g., C.e. – A.g., T.p. – A.g.; КВ, СД, К, ДЧ), *Gladiolus tenuis* Bieb. (A.t. – A.g.; КВ, СД, К, ДЧ), *Menyanthes trifoliata* L. (U.d. – A.g., T.p. – A.g., C.e. – A.g.; СД), *Naumburgia thyrsoflora* (L.) Reichenb. (U.d. – A.g., T.p. – A.g., C.e. – A.g.; СД), *Selinum carvifolia* (L.) L. (A.t. – Q.r.; СД), *Thelypteris palustris* Schott (A.t. – A.g., U.d. – A.g., C.e. – A.g., T.p. – A.g.; КВ, СД, К, ДЧ), *Veratrum lobelianum* Bernh. (A.t. – A.g.; СД, КВ), *Matteuccia struthiopteris* (L.) Todaro (C.e. – A.g., U.d. – A.g.; КВ); *Gentiana pneumonanthe* L. (A.t. – Q.r., F.v. – U.m.; КВ, ДЧ).

4. Виды (1), встречающиеся в байрачных и пойменных лесах: *Fritillaria meleagroides* Patrin ex Schult. & Schult. Fil. (A.t. – A.g., F.u. – Q.r.; СД, КВ, К).

5. Виды (5), встречающиеся только в аренных лесах: *Juncellus serotinus* (Rottb.) Clarke (A.t. – A.g., U.d. – A.g.; СД), *Lycopodiella inundata* (L.) Holub (A.t. – A.g.; ДЧ), *Ophioglossum vulgatum* L. (A.t. – A.g., U.d. – A.g., C.e. – A.g.; КВ, ДЧ), *Rubus saxatilis* L. (A.t. – A.g., U.d. – A.g.; КВ, СД), *Listera ovata* (L.) R. Br. (A.t. – A.g., U.d. – A.g.; СД).

6. Виды (18), встречающиеся только в байрачных лесах: *Aegonychon purpureo-caeruleum* (L.) Holub (A.t. – Q.r., V.p. – Q.r., P.p. – Q.r., C.r. – Q.r., P.s., P.f.; КВ, СД, ДЧ), *Allium lineare* L. (R.c. – C.s., P.f., P.s., A.t. – Q.r.; КВ, СД, К, ДЧ, ДК), *Anemone sylvestris* L. (C.r. – Q.r., F.e. – Q.r., V.p. – Q.r.; КВ, СД, К, ДК), *Anthericum ramosum* L. (A.t. – Q.r.; СД), *Asarum europaeum* L. (C.r. – Q.r., F.e. – Q.r., V.p. – Q.r.; КВ, СД), *Asplenium trichomanes* L. (A.t. – Q.r.; ДК), *Echium russicum* J. F. Gmel. (A.t. – Q.r., V.p. – Q.r., F.e. – Q.r.; КВ, СД, К, ДК), *Equisetum telmateia* Ehrh. (A.t. – A.g.; КВ, ДК); *Eriosynaphe longifolia* (Fisch. ex Spreng.) DC (A.t. – Q.r.; ДЧ), *Lathyrus niger* (L.) Bernh. (F.e. – Q.r., V.p. – Q.r.; К), *Mercurialis perennis* L. (C.r. – Q.r., F.e. – Q.r., V.p. – Q.r.; КВ), *Muscari neglectum* Guss. (A.t. – Q.r.; ДК, ДЧ), *Ne-*

ottia nidus-avis (L.) Rich (*F.e. – Q.r., V.p. – Q.r.*; К), *Paeonia tenuifolia* L. (*A.t. – Q.r., C.r. – Q.r.*; КВ), *Pedicularis dasystachys* Schrenk (*P.f.*; К), *Prangos trifida* (Mill.) Herrnst. & Heyn (*C.r. – Q.r.*; КВ), *Primula veris* L. (*V.p. – Q.r., P.p. – Q.r., C.r. – Q.r., F.e. – Q.r.*; СД), *Pulmonaria obscura* Dumort. (*P.p. – Q.r., C.r. – Q.r., F.e. – Q.r., A.t. – Q.r.*; КВ, СД, ДЧ).

7. Виды (1), встречающиеся только в пойменных лесах: *Orchis palustris* Jacq. (*U.d. – A.g., A.t. – A.g.*; СД, К, ДЧ).

Принятые сокращения: ботанико-географические районы: КВ – Калачская возвышенность; СД – Средне-Донской; К – Калитвинский; ДК – Донецкий кряж; ДЧ – Доно-Чирский; П – Приазовский. Ассоциации: *F.e. – Q.r.* – асс. *Fraxino excelsioris-Quercetum roboris* Bulokhov et Solomeshch, 2003; *A.t. – Q.r.* – асс. *Aceri tatarici-Quercetum* Zólyomi, 1957; *S.e. – Q.r.* – асс. *Scorzonero ensifoliae – Quercetum* Sokolova, 2011; *V.p. – Q.r.* – асс. *Vicio pisiformis – Quercetum roboris* Semenishchenkov, 2012; *P.p. – Q.r.* – асс. *Pyro pyrastris-Quercetum roboris* Poluyanov, 2012; *C.r. – Q.r.* – асс. *Chamaecytiso ruthenici – Quercetum roboris* Poluyanov, 2012; *A.t. – A.g.* – асс. *Aceri tatarici-Alnetum glutinosae* O. Dyakova, V. Onyshchenko, T. Sokolova, 2015; *U.d. – A.g.* – асс. *Urtico dioicae – Alnetum glutinosae* Bulokhov et Solomeshch, 2003; *F. – U.m.* – асс. *Ficario – Ulmetum minoris* Knapp 1942 em J. Matuszkiewicz, 1976; *F.u. – Q.r.* – асс. *Filipendulo ulmariae – Quercetum roboris* Polozov et Solomeshch in Semenishchenkov, 2015; *C.e. – A.g.* – асс. *Carici elongatae – Alnetum glutinosae* Tx., 1931; *T.p. – A.g.* 0 – асс. *Thelypterido palustris – Alnetum glutinosae* Klika, 1940; *R.c. – C.s.* – асс. *Rhamno cathartici – Cornetum sanguineae* (Kais. 1930) Passarge (1957) 1962; *S.s. – U.l.* – асс. *Swido sanguineae – Ulmetum laevis* Semenishchenkov in Bulokhov et Semenishchenkov, 2015; *P.s.* – асс. *Prunetum spinosae* R. Tx., 1952; *P.f.* – асс. *Prunetum fruticosae* Dziubaltowski, 1926.

Помимо перечисленных выше видов, имеющих официальный статус охраняемых, в лесах области произрастает ряд видов, которые являются здесь редкими. Все они рекомендуются для внесения в 3-е издание Красной книги РО:

Adoxa moschatellina L. (*F.e. – Q.r., S.e. – Q.r., V.p. – Q.r., P.p. – Q.r., C.r. – Q.r., A.t. – A.g., U.d. – A.g., F.u. – Q.r., F.v. – U.m., C.e. – A.g., T.p. – A.g.*; КВ, СД, К). Редкий в области голарктический вид. Распространен в холодном и умеренном поясах Евразии, включая горные страны Средиземноморья и Центральной Азии, в Северной Америке [27]. Отмечен во всех типах естественных лесов северных районов РО. Встречается спорадически, обилие низкое, приурочен к влажным местам обитания.

Allium pervestitum Klokov. (*A.t. – Q.r.*; ДЧ). Восточноевропейский вид. Распространен в степной части Крыма. В РО естественно произрастает в центральных районах. Отмечен в Цимлянском (Сальское лесничество Романовского лесхоза; юго-восточнее г. Волгодонска) и Октябрьском (северовосточнее ст. Бессергеновской) районах. Встречается на опушках байрачных лесов (простые дубравы), обилие низкое.

Angelica sylvestris L. (*A.t. – A.g., U.d. – A.g., C.e. – A.g., T.p. – A.g.*; КВ, СД). Европейско-сибирский вид, распространенный в Западной Сибири и в отдельных районах Восточной Сибири (Енисейский, Ангаро-Саянский, Лено-Колымский районы). В РО зафиксирован в Верхнедонском (Мигулинский лесхоз, южнее хут. Сухой Лог) и Шолоховском (ст. Вёшенская) районах.

Campanula patula L. (*F.e. – Q.r., V.p. – Q.r., P.p. – Q.r., C.r. – Q.r.*; КВ, СД). Очень редкий в области европейский вид. Отмечен в небольшом количестве в двух дубравах – в окрестностях хут. Гребенниковский (Верхнедонской р-н) и Гороховский (Шолоховский р-н). Растение занесено в Красную книгу г. Москвы, во многих регионах России и мира находится на грани вымирания.

Cardamine parviflora L. (*A.t. – A.g., U.d. – A.g., C.e. – A.g., T.p. – A.g.*; СД). Редкий в области средиземноморский лесной вид. Широко распространен в Европе, Северной Африке и Северной Америке. В РО отмечен единожды в сырых черноольшаниках урочища Чернь (Шолоховский р-н).

Carex elongata L. (*A.t. – A.g., U.d. – A.g., C.e. – A.g., T.p. – A.g.*; СД). Редкий в области, находящийся на южной границе ареала, европейско-сибирский вид. Широко распространен в европейской части страны. Отмечен в сырых черноольшаниках урочища Чернь и вблизи хут. Алимовский, а также в ольшаниках хут. Гороховский и Антиповский Шолоховского района. Обилие вида низкое.

Carex hirta L. (*A.t. – A.g., U.d. – A.g., C.e. – A.g., T.p. – A.g.*; КВ, СД). Очень редкий в области европейский вид. Распространен в европейской части страны. Изредка встречается в аренных черноольшаниках среднего увлажнения Шолоховского района. Возможно нахождение в урочище Калинов Куст Верхнедонского района.

Carex hartmanii Sajand. (*F.u. – Q.r., F.v. – U.m., A.t. – A.g.*; КВ, СД). Очень редкий в области европейский вид. Распространен в европейской части страны, на Украине, в Европе и Азии. В РО с середины XX в. известны немногие места нахождения. Произрастает в Верхнедонском (между ст. Шумилинской и хут. Быковский) и Цимлянском (окр. хут. Линьки) районах. В РО обнаружен в дубово-осиновых и заболоченных березовых колках.

Epilobium parviflorum Schreb. (*U.d.* – *A.g.*, *C.e.* – *A.g.*, *T.p.* – *A.g.*; СД). Очень редкий в области средиземноморско-умеренный вид. Распространен в европейской части страны, встречается в Калмыкии, на Украине, в Азии. Отмечен в малом количестве в одном месте обитания – сырых черноольшаниках урочища Чернь.

Glechoma hirsuta Waldst. & Kit. (*F.e.* – *Q.r.*, *V.p.* – *Q.r.*, *P.p.* – *Q.r.*, *C.r.* – *Q.r.*; КВ, СД). Редкий в области восточноевропейско-балканский вид на юго-восточной границе ареала. Распространен в широколиственно-лесной зоне от Средней Европы до Волги, на Балканах, единично – на юго-востоке Украины [28]. В РО естественно произрастает в Верхнедонском (окр. ст. Казанская, ур. Перерванов, балка Водяная), Константиновском (хут. Ермилов), Миллеровском (с. Дегтево) районах, где встречается на дне балок, в байрачных лесах [29].

Lathyrus vernus (L.) Bernh. (*F.e.* – *Q.r.*, *V.p.* – *Q.r.*, *P.p.* – *Q.r.*, *C.r.* – *Q.r.*; КВ, СД). Редкий в области неморальный вид. Распространен в Европе, на Кавказе, Алтае, в Сибири и Малой Азии. В РО – только на нижней части склонов байрачных сложных дубрав. Численность вида мала.

Ligustrum vulgare L. (*F.e.* – *Q.r.*, *V.p.* – *Q.r.*, *P.p.* – *Q.r.*, *C.r.* – *Q.r.*; КВ, СД, К, ДК, П, ДЧ). Редкий в области субсредиземноморский вид на северо-восточной границе ареала. Распространен на Северном Кавказе, в Крыму, Молдавии, Западной Европе, Средиземноморье, Малой Азии. В РО в естественном состоянии произрастает на Донецком кряже и в Северном Приазовье. Отмечен в Каменском, Красносулинском (г. Гуково), Белокалитвинском (п. Шолоховский), Усть-Донецком, Октябрьском, Константиновском (хут. Ведерников), Семикаракорском, Родионово-Несветайском (ст. Кутейниково), Куйбышевском, Неклиновском, Мясниковском, Матвеево-Курганском и Заветинском (с. Заветное) районах. В области растёт преимущественно в байрачных, реже пойменных (Усть-Донецкий р-н, ст. Верхнекундрюченская) лесах, на опушках и осветлённых участках, в кустарниковых зарослях и в балках; реже встречается в каменистых степях, на обнажениях известняка, в лесополосах.

Linum nervosum Waldst. et Kit. (*F.e.* – *Q.r.*, *V.p.* – *Q.r.*, *P.p.* – *Q.r.*, *C.r.* – *Q.r.*, *R.c.* – *C.s.*, *P.f.*, *P.s.*; КВ, СД). В РО распространен в западных районах. Встречается в Верхнедонском (хут. Новониколаевский, Казанская Лопатина), Зерноградском (хут. Средние Хороли), Каменском (хут. Аникин), Кашарском (хут. Артамошкин), Куйбышевском (хут. Скелянский), Миллеровском (хут. Фоминка), Мясниковском (хут. Недвиговка), Октябрьском (пос. Персиановский), Тарасовском (пос. Тарасовский), Черт-

ковском (хут. Кадамов) и Красносулинском (г. Гуково) районах. В области встречается на опушках байрачных лесов, на каменистых степных склонах.

Lysimachia verticillaris Spreng. (*F.e.* – *Q.r.*, *A.t.* – *Q.r.*, *F.u.* – *Q.r.*, *F.v.* – *U.m.*, *A.t.* – *A.g.*, *U.d.* – *A.g.*; КВ, СД, ДЧ, К). Редкий и уникальный в области, субсредиземноморский вид на северо-восточной границе ареала. Распространен в бассейне среднего и нижнего течения Дона, на Кавказе, в Крыму, Малой Азии, Иране. Неоднократно учитывался как редкий вид [8, 9, 13]. Нами встречен во многих местах обитания аренных, чаще черноольховых, лесов, но обилие вида всегда низкое.

Melica nutans L. (*F.e.* – *Q.r.*, *V.p.* – *Q.r.*, *P.p.* – *Q.r.*, *C.r.* – *Q.r.*, *A.t.* – *A.g.*; КВ, СД). Очень редкий в области палеобореальный вид. Островные находения на южной границе равнинной части ареала. Распространен в лесной зоне Евразии от Атлантической Европы до Дальнего Востока и Японии, в горах Монголии, Джунгарии, Кашгарии, Гималаях [30]. Отмечен в единичных экземплярах на склонах байрачных сложных дубрав вблизи хут. Колундаевский Шолоховского района, в урочище Широкое Миллеровского района.

Pedicularis kaufmanni Pinzg. (*V.p.* – *Q.r.*, *P.p.* – *Q.r.*, *C.r.* – *Q.r.*, *A.t.* – *Q.r.*, *A.t.* – *A.g.*; КВ, СД, К, ДЧ). Восточноевропейско-западносибирский вид. Распространен в пределах европейской части России, Западной Сибири, в Прибалтике и Украине. В РО рассеянно распространён в северных и центральных районах: Верхнедонском, Чертковском (ур. Осиковское), Миллеровском (Донецкий лесхоз на правом берегу р. Калитва, с. Имени Ленина), Милютинском (истоки р. Берёзовой), Красносулинском (хут. Калиновка) районах. Довоенные места нахождения в Аксайском и Октябрьском районах, вероятно, утрачены. В области растёт на лугах, лесных полянах, встречается также в степях, на степных склонах и в байрачных лесах.

Physalis alkekengi L. (*F.u.* – *Q.r.*, *F.v.* – *U.m.*, *A.t.* – *A.g.*; КВ, СД, К). Редкий в области средиземноморский лесной вид. Распространен в европейской части страны, Центральной Америке и Северной Америке, Европе, Китае, Японии. В РО отмечен в аренных тополеватниках и ивниках в Верхнедонском р-не, вблизи хут. Базковский, и в пойменных черноольшаниках Тарасовского района, вблизи хут. Маноцкий, по реке Деркул.

Saponaria officinalis L. (*A.t.* – *A.g.*, *F.u.* – *Q.r.*; СД). Редкий в области европейско-средиземноморский вид. Распространен в европейской части России, стран СНГ, на Кавказе, в Центральной Азии, Западной Сибири, Европе. В РО отмечен единожды на опушке сырого черноольшаника в окрестностях хут. Базковский Верхнедонского района.

Scrophularia vernalis L. (F.e. – Q.r., S.e. – Q.r., V.p. – Q.r., P.p. – Q.r., C.r. – Q.r., F.u. – Q.r., F.v. – U.m.). Очень редкий в области европейско-средиземноморский вид с дизъюнктивным ареалом. Распространен в Средней и Атлантической Европе, Средиземноморье, южной части Украины (лесостепной части). В РО в довоенное время обнаруживался в северных районах: Верхнедонском (ст. Казанская) и Тарасовском (пос. Тарасовский). В области произрастает в пойменных и байрачных лесах.

Stachys officinalis L. (A.t. – A.g., A.t. – Q.r., F.e. – Q.r., S.e. – Q.r., F.v. – U.m.; KB, СД). Редкий в области европейско-сибирский вид. Распространен в европейской части России, на Кавказе, в Западной Сибири и Урале, по всей Европе. Отмечен в единичных экземплярах на опушках или окраинах аренных осинников и березняках Шолоховского и Верхнедонского районов.

Symphytum tauricum Willd. (A.t. – A.g., A.t. – Q.r., F.v. – U.m.; F.u. – Q.r.; KB, СД, К, ДЧ). Редкий в области понтический лесной вид на северной границе своего ареала. Распространен в европейской части бывшей территории СССР, на Северном Кавказе, в Средней Европе и Малой Азии. В РО отмечен в пойменных и аренных дубравах: на террасе р. Песковатка окр. хут. Морозовский Верхнедонского района, на песчаных террасах р. Кундрючья, байрачных дубравах Миллеровского и Константиновского районов.

Veratrum nigrum L. (A.t. – A.g.; KB). Очень редкий в области восточноевропейско-сибирско-среднеазиатский вид. Его ареал охватывает Среднюю Европу, Балканский п-ов, Западную и Восточную Сибирь, Дальний Восток, северо-восточную часть Средней Азии, Японию и Китай. В средней полосе Европейской России – Центральное Черноземье, а также Калужскую, Московскую, Пензенскую, Рязанскую, Саратовскую, Тульскую области. Точечно отмечен в Воронежской области. В РО найден в 3 экземплярах в аренном осиннике урочища Калинов Куст Верхнедонского района.

Заключение

Наличие и количество редких видов в лесах РО не случайны, а их распределение по топологическим группам леса имеет закономерность. Леса области характеризуются сложной историей формирования, которая связана с участием различных исторических свит растительности. В зависимости от того, какие свиты стояли на заре формирования или внедрялись потом, в определенных топогруппах по-разному складывались современный облик и флористический состав леса.

Наибольшее количество редких видов (53) отмечено в байрачных лесах, которые наиболее флори-

стически богаты и самобытны. В них велико участие лесных видов неморальной свиты, а большая их часть в РО находится на южной границе своего ареала. Виды субсерофильно-дубравной свиты находятся на западной границе ареала.

Пойменные леса относительно молоды и наиболее обеднены видами, чаще всего антропогенно нарушенные, в них меньше всего специфических редких видов. Но в формировании лесов приняли участие виды березняковой, бореально-ивняковой, травянисто-болотной и луговой исторических свит, и процесс перекомбинации видов контактных исторических свит (перечислены выше) продолжается. В сообществах присутствует немало редких видов (27). Участие в формировании лесов этих исторических свит, а также неморальной привело к большому флористическому сходству пойменных лесов с лесами других топогрупп.

В аренных лесах флористическое богатство – среднее (между байрачными и пойменными). Здесь произрастают виды таежной и боровой свит (реликтовые), а также внедряются виды псаммофильно-травянистой свиты. Эти леса наиболее специфичны по флористическому составу и набору редких видов, которых больше, чем в других топогруппах (55). Значительное участие в формировании аренных лесов играют виды неморальной свиты (отсюда велико число общих видов с байрачными лесами) и березняковой (сходство с пойменными).

Леса области произрастают на землях лесного фонда, которые в РО относятся к охраняемым [31]. Поэтому под непосредственной угрозой редкие и исчезающие виды растений естественных лесов не находятся. Однако, к сожалению, нередкие нарушения режима лесопользования (выпас скота в лесах, нарушение противопожарного режима, свалка мусора, самовольные рубки и т. п.) являются заметным лимитирующим фактором для части наиболее редких и уязвимых видов. Особых мер охраны и мониторинга состояния популяций требуют редкие виды бореальной группы, которые в своем большинстве являются реликтами разных фаз плейстоцена. По причине этого и в силу особенностей своей экологии и биологии они относятся к естественно угасающим в РО.

В комплексе мер охраны редких и исчезающих видов лесов области должно быть обеспечение охраны сообществ, в которых они обитают, в первую очередь редких, сформировавшихся в естественно-исторических условиях генезиса лесостепной и степной флоры. Законодательным основанием для охраны редких лесных экосистем в России в настоящее время служат Федеральный закон «Об охране окружающей среды» и Лесной кодекс РФ.

Для сохранения сообществ естественных лесов РО предлагается создать на территориях лесничеств ключевые участки для ведения мониторинга и рекомендовать некоторые из них к отнесению к особо охраняемым природным территориям (ООПТ). К таким участкам следует отнести:

1. Природный комплекс в окрестностях хут. Алимовский (Шолоховский р-н). Старовозрастные черноольшаники среди высокобугристых песков. Местообитание редких видов: *Pteridium aquilinum*, *Chamaenerion angustifolium*, *Anemonoides ranunculoides*, *Equisetum fluviatile*, *Scilla sibirica*, *Platanthera bifolia*, *Adenophora lilifolia*, *Thelypteris palustris*, *Menyanthes trifoliata*, *Matteuccia struthiopteris*, *Rubus saxatilis*, *Dryopteris filix-mas*, *D. cristata*, *D. cartusiana*, *Athyrium filix-femina*, *Caltha palustris*. Предполагаемая площадь ООПТ – 2,5 км², включает также комплексы песчаных степей и аренных дубрав.

2. Природный комплекс в окрестностях хут. Солоновский и Морозовский (Верхнедонской р-н). Представляет лентовидные сообщества дубрав и осинников на хорошо задерненных песчаных степях. Местообитание редких видов: *Campanula trachelium*, *Anemonoides ranunculoides*, *Pulmonaria obscura*, *Corydalis marschaliana*, *C. solida*, *Veratrum lobelianum*, *Stachys officinalis*, *Polygonatum odoratum*, *Laser trilobium* и др. Предполагаемая площадь ООПТ (4 км²) включает также комплексы высокобугристых песчаных степей и голых песков с *Juniperus sabina*.

3. Природный комплекс в окрестностях хут. Базковский (Верхнедонской р-н). Дубравы аренные в комплексе с пойменными, светлые березняки и ольшаники в песчаной степи. Местообитание редких видов: *Arum nordmanii*, *Chamaenerion angustifolium*, *Stipa pennata*, *Scilla sibirica*, *Adenophora lilifolia*, *Veratrum lobelianum* и др. Предполагаемая площадь ООПТ (2,7 км²) включает также комплексы песчаных степей, пойменных тополеводов.

4. Природный комплекс на 5 км восточнее хут. Терновский Шолоховского района. Эталон аренной дубравы в комплексе с пойменными и байрачными лесами. Переходит в крупную Шакинскую дубраву Волгоградской области. Местообитание редких видов: *Pteridium aquilinum*, *Arum nordmanii*, *Chamaenerion angustifolium*, *Stipa pennata*, *Scilla sibirica*, *Pulmonaria obscura*, *Corydalis marschaliana*, *C. solida*, *Adenophora lilifolia*, *Veratrum lobelianum* и др. Предполагаемая площадь ООПТ (4 км²) включает также комплексы песчаных степей.

5. Природный комплекс в окрестностях хут. Нижние Грачики (Тарасовский и Каменский рай-

оны), Уляшкин, Лопуховатый (Каменский район). Включает в себя аренные и пойменные леса. Крайняя юго-западная точка, где отмечены черноольшаники в РО. *Pteridium aquilinum*, *Anemonoides ranunculoides*, *Scilla sibirica*, *Platanthera bifolia*, *Thelypteris palustris*, *Dryopteris filix-mas*, *Athyrium filix-femina*, *Corydalis marschaliana*, *C. solida*, *Caltha palustris*. Предполагаемая площадь ООПТ (10 км²) включает также комплексы песчаных степей.

Литература

1. Танфильев Г.И. Краткий очерк растительности Европейской России. СПб.: Тип. В. Демакова, 1898. 12 с.
2. Новопокровский И.В. Растительность войсковых песчаных лесничеств Донской области // Изв. Императорского бот. сада. 1915. Т. 15. С. 1–56.
3. Зозулин Г.М. Леса Нижнего Дона. Ростов н/Д.: Изд-во Рост. ун-та, 1992. 206 с.
4. Федяева В.В. Растительный покров. Природные условия и естественные ресурсы Ростовской области / под ред. Ю.Н. Хрусталёва. Ростов н/Д.: Изд-во Рост. ун-та, 2002. С. 116–154.
5. Соколова Т.А. Новые флористические находки в аренных лесах Шолоховского района // Экология и культура: материалы VI Междунар. науч.-практ. конф. Вешенская, 2015. С. 97–105.
6. Федяева В.В., Шишлова Ж.Н., Шмараева А.Н. О распространении некоторых редких и исчезающих видов растений Ростовской области // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2010. № 1 (155). С. 74–78.
7. Зозулин Г.М., Селедец В.П., Абрамова Т.И. Новые и редкие виды растений в бассейне реки Дона в Ростовской и Волгоградской областях. Ботанические исследования. Ростов н/Д.: Изд-во Рост. ун-та, 1968. С. 18–26.
8. Зозулин Г.М., Пашков Г.Д. Редкие растения Ростовской области. Охрана природы Нижнего Дона. Ростов н/Д.: Изд-во Рост. ун-та, 1969. С. 40–45.
9. Зозулин Г.М., Федяева В.В. Редкие и исчезающие виды флоры Ростовской области. Растительные ресурсы. Ч. 3: Редкие и исчезающие растения и растительные сообщества Северного Кавказа. Ростов н/Д., 1986. С. 190–211.
10. Федяева В.В., Абрамова Т.И. Редкие и исчезающие виды растений Ростовской области. Ростов н/Д., 1995. 60 с.
11. Флора Нижнего Дона (определитель) / под ред. Г.М. Зозулина, В.В. Федяевой. Ростов н/Д.: Изд-во Рост. гос. ун-та, 1984. Ч. 1. 280 с.
12. Флора Нижнего Дона (определитель) / под ред. Г.М. Зозулина, В.В. Федяевой. Ростов н/Д.: Изд-во Рост. ун-та, 1984. Ч. 2. 240 с.

13. Редкие и исчезающие виды растений, грибов и лишайников Ростовской области / под ред. В.В. Федяевой. Ростов н/Д.: Пайк, 1996. 248 с.

14. Красная книга Ростовской области. Ростов н/Д., 2004. Т. 2. 333 с.

15. Красная книга Ростовской области: в 2 т. Т. 2: Растения и грибы. 2-е изд. Ростов н/Д.: Минприроды Ростовской обл., 2014. 344 с.

16. Braun-Blanquet J. Pflanzensoziologie. Grundzüge der Vegetationskunde. 3 Aufl. Wien; N.Y.: Springer-Verlag, 1964. 865 S.

17. Черепанов С.К. Сосудистые растения России и сопредельных государств. СПб.: Мир и семья, 1995. 992 с.

18. Зозулин Г.М., Федяева В.В. Анализ флоры степной части бассейна реки Дон. Региональные флористические исследования. Л., 1987. С. 20–28.

19. Миркин Б.М., Наумова Л.Г. Наука о растительности (история и современное состояние основных концепций). Уфа: Гилем, 1998. 413 с.

20. Красная книга Российской Федерации. Растения и грибы. М.: Т-во научных изданий КМК, 2008. 855 с.

21. Красный список МСОП. URL: https://ru.qwe.wiki/wiki/IUCN_Red_list (дата обращения: 11.01.2019).

22. Европейский красный список животных и растений, находящихся под угрозой исчезновения в мировом масштабе. URL: <https://redbook-ua.org/ru/page/european-red-list> (дата обращения 11.01.2019).

23. Флеров А.Ф. Растительный покров. Доно-Цимлянский песчаный массив. Ростов н/Д., 1935. Вып. 1. С. 127–160.

24. Сукачев В.Н. Ботанико-географические исследования в Донской области летом 1902 г. // Тр. Санкт-Петербургского общества естествоиспытателей. 1903. Т. 34, вып. 1. С. 70–83.

25. Соколова Т.А. Эколого-флористическая классификация как основа картографирования и охраны естественных лесов Казанско-Вешенского песчаного массива: автореф. дис. ... канд. биол. наук. Брянск, 2013. 24 с.

26. Соколова Т.А. Природоохранная оценка аренных лесов Ростовской области для создания региональной Зеленой книги // Бюл. Брянского отделения Русского бот. общества. 2019. № 1 (17). С. 35–48.

27. Иконников С.С. Семейство 128. Adoxaceae Trautv. – Адоксовые // Флора европейской части СССР. 1978. Т. 3. С. 21–22.

28. Кондратюк Е.Н., Бурда Р.И., Остапко В.М. Конспект флоры юго-востока Украины: сосудистые растения. Киев: Наукова думка, 1985. 272 с.

29. Зозулин Г.М. Пойменные леса степной части р. Дон // Изв. СКНЦ ВШ. Естеств. науки. 1977. № 4. С. 26–30.

30. Цвелев Н.Н. Порядок 77. Poales – Мятликоцветные // Флора европейской части СССР. 1974. Т. 1. С. 117–368.

31. Лесной кодекс Российской Федерации от 04.12.2006 № 200-ФЗ (ред. от 27.12.2018).

References

1. Tanfiliev G.I. (1898). *A brief outline of the vegetation of European Russia*. Saint Petersburg, V. Demakov's Printing House, 12 p. (in Russian).

2. Novopokrovsky I.V. (1915). Vegetation of military sand forestries of the Don region. *Izvestiya Imperatorskogo bot. sada*, vol. 15, pp. 1-56. (in Russian).

3. Zozulin G.M. (1992). *Forests of the Lower Don*. Rostov-on-Don, Rostov University Press, 206 p. (in Russian).

4. Fedyaeva V.V. (2002). *Plant cover. Natural conditions and natural resources of the Rostov region*. Yu.N. Khrustalyov (Ed.). Rostov-on-Don, Rostov University Press, pp. 116-154. (in Russian).

5. Sokolova T.A. (2015). New floristic finds in the arena forests of the Sholokhov district. *Ekologiya i kul'tura* [Ecology and Culture]. Proceedings of the VI International Scientific and Practical Conference. Veshenskaya, pp. 97-105. (in Russian).

6. Fedyaeva V.V., Shishlova Zh.N., Shmaraeva A.N. (2010). About the distribution of some rare and endangered plant species of the Rostov region. *Izv. vuzov. Sev.-Kavk. region. Estestv. nauki* (Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science), no. 1 (155), pp. 74-78. (in Russian).

7. Zozulin G.M., Seledets V.P., Abramova T.I. (1968). *New and rare plant species in the Don river basin in the Rostov and Volgograd regions*. *Botanical studies*. Rostov-on-Don, Rostov University Press, pp. 18-26. (in Russian).

8. Zozulin G.M., Pashkov G.D. (1969). *Rare plants of the Rostov region. Nature protection of the Lower Don*. Rostov-on-Don, Rostov University Press, pp. 40-45. (in Russian).

9. Zozulin G.M., Fedyaeva V.V. (1986). *Rare and endangered species of flora of the Rostov region. Plant resources*. Chapter 3. Rare and endangered plants and plant communities of the North Caucasus. Rostov-on-Don, pp. 190-211. (in Russian).

10. Fedyaeva V.V., Abramova T.I. (1995). *Rare and endangered plant species of the Rostov region*. Rostov-on-Don, 60 p. (in Russian).

11. *Flora of the Lower Don* (1984). G.M. Zozulin, V.V. Fedyaeva (Eds.). Rostov-on-Don, Rostov University Press, ch. 1, 280 p. (in Russian).

12. *Flora of the Lower Don* (1984). G.M. Zozulin, V.V. Fedyaeva (Eds.). Rostov-on-Don, Rostov University Press, ch. 2, 240 p. (in Russian).

13. *Rare and endangered species of plants, mushrooms and lichens of the Rostov region*. (1996).

V.V. Fedyaeva (Ed.). Rostov-on-Don, Paik Publ., 248 p. (in Russian).

14. *The Red Book of the Rostov Region*. (2004). Rostov-on-Don, vol. 2, 333 p. (in Russian).

15. *The Red Book of the Rostov region*. (2014). Vol. 2. Plants and mushrooms. 2nd ed. Rostov-on-Don, Ministry of Natural Resources of the Rostov Region Press, 344 p. (in Russian).

16. Braun-Blanquet J. (1964). *Pflanzensoziologie. Grundzuge der Vegetationskunde*. 3 Aufl. Wien, New York, Springer-Verlag, 865 S.

17. Cherepanov S.K. (1995). *Vascular plants of Russia and neighboring states*. Saint Petersburg, Mir i semiya Publ., 992 p. (in Russian).

18. Zozulin G.M., Fedyaeva V.V. (1987). *Analysis of the flora of the steppe part of the Don River Basin. Regional floristic studies*. Leningrad, pp. 20-28. (in Russian).

19. Mirkin B.M., Naumova L.G. (1998). *The science of vegetation (history and current status of basic concepts)*. Ufa, Gilem Publ., 413 p. (in Russian).

20. *The Red Book of the Russian Federation*. (2008). Plants and mushrooms. Moscow, Association of Scientific Publications KMK Publ., 85 p. (in Russian).

21. *IUCN Red List*. Available at: https://ru.qwe.wiki/wiki/IUCN_Red_list (accessed January 11, 2019). (in Russian).

22. The European Red List of Globally Threatened Animals and Plants. Available at: <https://redbook-ua.org/en/page/european-red-list> (accessed January 11, 2019). (in Russian).

23. Flerov A.F. (1935). *Vegetation cover. Don Tsimlyansky sand massif*. Rostov-on-Don, iss. 1, pp. 127-160. (in Russian).

24. Sukachev V.N. (1903). Botanical and geographical research in the Don region in the summer of 1902. *Tr. Sankt-Peterburgskogo obshchestva estestvoispytatelei*, vol. 34, iss. 1, pp. 70-83. (in Russian).

25. Sokolova T.A. (2013). *Ecological and floristic classification as the basis for mapping and protection of natural forests of the Kazanskaya-Veshenskaya sand massif*. Dissertation Thesis. Bryansk, 24 p. (in Russian).

26. Sokolova T.A. (2019). Environmental assessment of arena forests of the Rostov region to create a regional Green Book. *Byul. Bryanskogo otdeleniya Russkogo bot. obshchestva*, no. 1 (17), pp. 35-48. (in Russian).

27. Ikonnikov S.S. (1978). Family 128. Adoxaceae Trautv. - Adoksy. *Flora evropeiskoi chasti SSSR*, vol. 3, pp. 21-22. (in Russian).

28. Kondratyuk E.N., Burda R.I., Ostapko V.M. (1985). *Abstract of the flora of South-Eastern Ukraine: vascular plants*. Kiev, Naukova dumka Publ., 272 p. (in Russian).

29. Zozulin G.M. (1977). Floodplain forests of the steppe part of the river Don. *Izv. SKNTs VSh. Estestv. nauki*, no. 4, pp. 26-30. (in Russian).

30. Tsvelev N.N. (1974). Order 77. Poales - Bluegrass. *Flora evropeiskoi chasti SSSR*, vol. 1, pp. 117-368. (in Russian).

31. Forest Code of the Russian Federation dated 04.12.2006 No. 200-FZ (accessed December 27, 2018). (in Russian).

НАШИ ЮБИЛЯРЫ

OUR PERSONS

DOI 10.18522/1026-2237-2020-1-122-124

ВЛАДИМИР ИСААКОВИЧ МИНКИН (85 ЛЕТ СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ)



Академику Владимиру Исааковичу Минкину – видному российскому ученому, одному из крупнейших специалистов в области квантовой, физической и органической химии, основателю и признанному лидеру известной ростовской школы химиков – 85 лет. Владимир Исаакович родился 4 марта 1935 г. в Ростове-на-Дону. В 1957 г. с отличием окончил химический факультет Ростовского государственного университета (РГУ) и решением комиссии по распределению молодых специалистов был направлен в одну из небольших сельских школ. Однако волею судьбы ему не удалось поработать на ниве донского просвещения. Молодого и перспективного ученого перераспределили сначала в Новочеркасск, а затем в РГУ, с которым судьба навсегда связала его жизнь. Его трудовой путь: ассистент (1958–1961 гг.), доцент (1961–1967 гг.),

профессор (с 1967 г.), директор Научно-исследовательского Института физической и органической химии (НИИ ФОХ) РГУ (1981–2012 гг.), заведующий кафедрой химии природных и высокомолекулярных соединений (2004–2009 гг.). С 2012 г. Владимир Исаакович Минкин – научный руководитель Южного федерального университета (ЮФУ).

Еще студентом химфака РГУ В.И. Минкин активно занялся научной работой, выполнил ряд интересных исследований в области химии гетероциклических соединений, что позволило ему вскоре после окончания университета досрочно защитить кандидатскую диссертацию (1959 г.). Одним из оппонентов был Юрий Андреевич Жданов. Благодаря природному таланту, аналитическому мышлению, способности проникать в самую суть химических процессов и явлений, целеустремленности и исключительному трудолюбию Владимир Исаакович Минкин стал одним из ведущих ученых в нашей стране и за рубежом. В 1966 г. он блестяще защитил докторскую диссертацию, в которой было описано новое явление (атропоизомерия азометинов), связанное с пространственным строением одного из важных классов органических соединений. В 1967 г. был избран профессором кафедры химии природных и высокомолекулярных соединений, которой в то время заведовал молодой ректор РГУ профессор Ю.А. Жданов. Следует отметить, что Владимира Исааковича и Юрия Андреевича связывали почти полувековая дружба и активное плодотворное научное сотрудничество, что стало основой создания ростовской школы химиков, одной из известнейших в России и за рубежом. В ее рамках были подготовлены высококвалифицированные кадры, кандидаты и доктора наук для вузов, промышленности, Академии наук, опубликовано большое число научных статей в самых престижных российских и иностранных журналах,

написано и издано много монографий, ставших классическими изданиями и настольными книгами для нескольких поколений химиков. В 1974 г. комитет Совета министров СССР по делам изобретений и открытий зарегистрировал явление ацилотропии как научное открытие (пятое в области химии). Это признание явилось крупнейшим успехом ростовской химической школы, замечательного сотрудничества Ю.А. Жданова, В.И. Минкина, Л.П. Олехновича. На базе этой школы по инициативе Ю.А. Жданова и В.И. Минкина был создан НИИ ФОХ, который более 30 лет возглавлял Владимир Исаакович. За это время институт стал признанным центром химической науки. Благодаря усилиям своего директора и ближайших его сторонников институт располагает высококвалифицированными научными кадрами, подготовленными в основном в стенах института и на кафедрах ЮФУ, обладает уникальным отечественным и зарубежным оборудованием, позволяющим проводить научные исследования в различных областях химии на самом высоком уровне. По количеству российских (ФЦП, Минобрнауки, РАН, РФФИ и др.) и различных международных (INTAS, CRDF, CNRS, DFG и др.) грантов НИИ ФОХ ЮФУ не уступает ведущим российским университетам и специализированным институтам Российской академии наук (РАН), а по индексу цитирования работ, выполненным его сотрудниками, занимает одну из передовых позиций в нашей стране.

В 1990 г. В.И. Минкин был избран членом-корреспондентом АН СССР, а в 1994 г. – академиком РАН. Он возглавляет секцию квантовой химии в совете по химической кинетике и строению, является членом совета по элементоорганической химии и экспертного совета программы РАН «Теоретическое и экспериментальное изучение природы химической связи и механизмов важнейших химических реакций и процессов». Начав свою научную деятельность как химик-синтетик, он вскоре переключился с органического синтеза на физические и теоретические методы, стал первым на химическом факультете использовать в своих исследованиях квантово-химические расчеты, электронную, инфракрасную, ЯМР-спектроскопию, люминесцентный, флуоресцентный и корреляционный анализ, метод дипольных моментов. Это увлечение теоретическими и физико-химическими методами исследования строения и реакционной способности органических и металлокомплексных соединений дало возможность В.И. Минкину с сотрудниками получить принципиально важные научные результаты, заложившие фундамент современной квантовой, физической и органической химии, а также сделать ряд открытий в этих областях. На основе

квантово-химических расчетов им было впервые предсказано и затем экспериментально подтверждено неплоское строение молекул ароматических и гетероциклических азометинов, выявлен новый вид стереоизомерии, присущий этому классу соединений.

Владимир Исаакович стоял у истоков создания Южного научного центра РАН (ЮНЦ РАН) (2003 г.). Он – заместитель председателя ЮНЦ РАН по науке и бессменно возглавляет, как научный руководитель, одно из крупнейших подразделений центра – отдел физической и органической химии.

Академик В.И. Минкин – признанный в мире лидер в области теоретической и физической органической химии, дополнивший ряд фундаментальных направлений новыми положениями в области направленного синтеза, строения, термических и фотоиницированных перегруппировок органических, элементоорганических и координационных соединений. Научные интересы В.И. Минкина лежат в области синтеза, изучения строения и динамики бистабильных органических и металлоорганических соединений для материалов молекулярной электроники, спинтроники и фотоники, квантовой химии органических структур и механизмов реакций, фотохимии, таутомерии и стереохимии.

Владимир Исаакович Минкин – один из самых цитируемых российских ученых и первый демидовский лауреат на Юге России. Общенациональная неправительственная Демидовская премия 2018 г. ему была присуждена за выдающийся вклад в развитие физической, органической и квантовой химии. Эта премия для ученых – одна из самых престижных отечественных научных наград. Из последних его выдающихся работ в области квантовой химии следует отметить теоретически спрогнозированную им со своими сотрудниками аллотропную форму алюминия. Ростовским химикам под руководством академика В.И. Минкина с помощью компьютерного моделирования удалось заменить в кристаллической решетке алмаза каждый атом углерода на тетраэдр алюминия и получить очень легкий кристаллический алюминий – настолько легкий, что, как показывают расчеты, он не тонет в воде. После того как в американском журнале была опубликована статья наших ученых с описанием этого материала, более 40 зарубежных новостных агентств вышли с заголовками, утверждавшими, что использование этого сверхлегкого алюминия станет революцией в авиации, космонавтике и медицине.

В.И. Минкин является членом Королевского химического общества (Великобритания), иностранным членом Итальянской академии наук,

почетным доктором Средиземноморского университета (Франция), входит в состав редакционных коллегий многих авторитетных международных и академических российских журналов, в том числе *Advances in Heterocycles Chemistry*, *Mendeleev Communications*. С 1990 по 2006 г. Владимир Исаакович представлял нашу страну в Международном союзе теоретической и прикладной химии (IUPAC) в качестве титулярного члена. В.И. Минкин – член многочисленных редакционных коллегий: *Journal of Molecular Structure (THEOCHEM)* (1992–1995); *Journal of Physical Organic Chemistry* (1996–2001); *Isotopes in Organic Chemistry (Academic Press)* (1983–1986); *Advances in Heterocyclic Chemistry* (с 1995 г.); *Mendeleev Communications*; «Успехи химии»; «Журнал общей химии»; «Журнал органической химии»; «Известия Академии наук» (химия); «Химия гетероциклических соединений» (Латвия), «Сверхкритические флюиды. Теория и практика».

За выдающие достижения академик В.И. Минкин был отмечен многочисленными наградами и премиями: Государственная премия СССР (1989), *Dr. Honoris Causa of the Mediterranean University (Marseille)* (1995), Международная премия им. Александра фон Гумбольдта (1999), премия им. А.М. Бутлерова РАН (2000), премия им. Л.А. Чугаева РАН (2003), премия Фонда содействия отечественной науке в номинации «Выдающиеся ученые Российской академии наук» (2003, 2004), Демидовская премия (2018 г.).

Ему вручены нагрудный знак «За отличные успехи в работе» – за заслуги в области высшего образования СССР, медаль им. академика М.В. Келдыша Федерации космонавтики России.

Академик В.И. Минкин является автором более 1000 научных статей и 22 монографий, в том числе 7 в зарубежных издательствах, получил более 100 отечественных и международных патентов. Им в соавторстве или индивидуально написаны труды: «*Quantum Chemistry of Organic Compounds. Mechanisms of Reactions*». Heidelberg: Springer, 1990; «*Aromaticity and Antiaromaticity. Electronic and Structural Aspects*». New York: J. Wiley, 1994; «*Photo-, Thermo-, Solvato-, and Electrochromic Spiroheterocyclic Compounds*». *Chemical Reviews*, 2004; «Бистабильные органические, металлоорганические и координационные соединения для молекулярной электроники спинтроники». Изв. АН (сер. хим.); «*Photoswitchable Molecular Systems Based on Spiropyrans and Spirooxazines*»; «*Valence tautomeric dinuclear adducts of Co (II) diketonates with redox-active diquinones for the design of spin qubits: computational modeling*». *Dalton Trans.*, 2015, «*Light-Controlled Spin-State-Switching Rearrangements of Transition Metal Complexes with Photochromic Ligands*». *Pure Applied Chemistry*, 2017, и др. Под руководством Владимира Исааковича защитили свои диссертации более 20 докторов и около 70 кандидатов наук. Многие из них под его началом продолжают свои плодотворные исследования в институте и в отделе ФОХ ЮНЦ РАН, образуя активную и целеустремленную команду исследователей и друзей.

От всей души поздравляем академика Владимира Исааковича Минкина с 85-летием! Желаем крепкого здоровья и счастья на долгие годы жизни, больших успехов в личных делах и новых выдающихся научных открытий и достижений, направленных на благо нашей российской науки.

И.Е. Михайлов, доктор химических наук, профессор,

Южный федеральный университет

В.В. Калинин, член-корреспондент РАН, доктор физико-математических наук, профессор,

Южный научный центр РАН

Коллектив редколлегии и сотрудники редакции журнала «Известия вузов. Северо-Кавказский регион» от всей души поздравляют юбиляра и желают ему крепкого здоровья на долгие годы, благополучия семье, новых свершений во всех сферах деятельности!

ПАМЯТИ УЧЕНОГО

SCIENTIST'S MEMORY

НИКАНОРОВ АНАТОЛИЙ МАКСИМОВИЧ (22.05.1935–28.12.2019)



28 декабря 2019 г. после продолжительной болезни скончался Анатолий Максимович Никаноров – член-корреспондент РАН, доктор геолого-минералогических наук, профессор, заведующий гидрохимическим отделом (г. Ростов-на-Дону) Института водных проблем РАН, главный научный сотрудник, заслуженный деятель науки и техники Российской Федерации, заслуженный метеоролог Российской Федерации, талантливый учёный и прекрасный человек.

В 1958 г. Анатолий Максимович, выпускник Грозненского нефтяного института, начал свою трудовую деятельность в Ставропольском филиале (г. Пятигорск), с 1960 г. продолжил трудиться в головном институте СевКавНИПИнефть (г. Грозный), где в 1964 г. подготовил и защитил кандидатскую диссертацию «Гидрогеология постплиоценовых и плиоценовых отложений Восточного Предкавказья», а в 1972 г. – докторскую диссертацию «Исследования в области гидрогеологии нефтяных

месторождений (на примере мезозоя Северо-Восточного Кавказа)».

В 1972 г. Анатолий Максимович был приглашен для работы в Ростовский государственный университет, где основал и возглавил кафедру гидрогеологии и инженерной геологии; одновременно был деканом геолого-географического факультета.

С 1977 по 2014 г. А.М. Никаноров был директором Гидрохимического института Росгидромета. С 2000 г. Анатолий Максимович возглавил гидрохимический отдел (г. Ростов-на-Дону) Института водных проблем РАН, основными направлениями исследований которого были теоретические и прикладные аспекты гидрохимии пресноводных экосистем в условиях антропогенного воздействия, научно-методическое обеспечение мониторинга качества поверхностных вод суши и их загрязнения. Он стал одним из авторитетнейших ученых, признанным лидером в этой области в России и за рубежом.

Анатолий Максимович внес неоценимый вклад в развитие науки гидрохимии, обогатив фундаментальными трудами ее теоретические основы. Он впервые в отечественной практике разработал научные основы одного из наиболее актуальных современных разделов гидрохимии – мониторинга качества природных вод.

Под руководством и при непосредственном участии А.М. Никанорова разработана новая методология изучения внутриводоемных процессов с помощью не имеющих аналогов в мире многоцветных флуоресцентных трассеров, впервые применен термодинамический подход для оценки способности водных экосистем к самоочищению.

Анатолий Максимович – автор и соавтор более 500 научных публикаций, в том числе более 40 монографий; более 60 работ опубликовано за рубежом, в том числе монография «Научные основы мониторинга качества вод».

Ряд работ А.М. Никанорова отмечен ведомственными премиями Росгидромета. В 2010 г. он

стал лауреатом премии Российской академии наук им. академика Ф.П. Саваренского за выдающиеся работы в области исследования вод суши. Дважды (в 2008 и 2014 гг.) А.М. Никанорову присуждалась премия международной академической издательской компании «Наука/Интерпериодика» за лучшие работы, опубликованные в зарубежных изданиях.

А.М. Никаноров в 1983–1997 гг. был вице-президентом международной комиссии по качеству вод Международной ассоциации гидрологических наук, более 20 лет – соруководителем советско-американского проекта по охране вод от загрязнения, в 1991 г. он награжден памятным знаком правительства США, в 1994 г. получил почетное звание профессора Висконсинского университета США.

А.М. Никаноровым была создана научная школа по гидрохимии, в 1999 г. официально включенная Министерством образования и науки в перечень научных школ Российской Федерации. Его учени-

ками защищено более 20 кандидатских и 6 докторских диссертаций.

Более 20 лет А.М. Никаноров совмещал работу в Гидрохимическом институте с преподавательской деятельностью в Ростовском государственном университете (ныне Южный федеральный университет), заведовал созданным им на базе института филиалом кафедры геоэкологии и прикладной геохимии.

Заслуги А.М. Никанорова отмечены орденами Дружбы, «Знак Почета», медалями «За доблестный труд», «Ветеран труда», почетными грамотами и благодарностями от руководства Росгидромета.

Анатолий Максимович был мудрым, интеллигентным, активным и доброжелательным человеком, глубоко преданным науке. Его уход – невосполнимая утрата для коллектива института, близких и коллег. Память об Анатолии Максимовиче навсегда сохранится в сердцах всех, кому посчастливилось знать его и работать вместе.

*О.В. Назаренко, кандидат географических наук,
Южный федеральный университет*

**НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
«ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ.
СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ РЕГИОН. ЕСТЕСТВЕННЫЕ НАУКИ»**

Рецензируемый журнал «Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки» продолжает приём работ. Он имеет статус центрального издания и включён в перечень ВАК по следующим отраслям:

- физико-математические науки (математика, механика);
- науки о Земле.

Принимаются работы и по другим отраслям науки. Также печатаются материалы в разделах «Заметки о книгах», «Научная жизнь», «Штрихи к портрету».

Журнал издается с периодичностью 4 номера в год. С электронной версией можно ознакомиться на сайте Научной электронной библиотеки http://elibrary.ru/title_about.asp?id=7362. Опубликованные статьи индексируются в российских и международных электронных библиотеках и наукометрических базах данных: РИНЦ (RSCI), РУКОНТ, «Киберленинка», ЭБС «Университетская библиотека онлайн», Ulrich, EBSCO, Chemical Abstracts.

Авторы, сохраняя за собой авторские права на работу и передавая журналу «Известия вузов. Северо-Кавказский регион» право первой публикации, автоматически принимают на себя обязательство не печатать её ни полностью, ни частично в каком-либо издании без указания ссылки на оригинальную публикацию в этом журнале.

Издательские услуги оплачиваются организацией или автором после утверждения статьи на редколлегии.

Оформление работ осуществляется согласно правилам:

1. Представляется статья в электронном виде. Перед заголовком указать индекс УДК.
2. Текст должен быть набран в редакторе Microsoft Office Word 2000, 2003, 2007, 2010, 2016 через 1,5 интервала, шрифтом Times New Roman, размером 14 пт, страницы пронумерованы.
3. Сопроводительное или рекомендательное письмо, если статья представляется от организации. Экспертное заключение.
4. Полное название организации и ее адрес на русском и английском языках.
5. Сведения об авторах с указанием адреса, по которому будет вестись переписка, на русском и английском языках.
6. Название статьи и фамилии авторов на русском и английском языках.
7. Аннотация на русском и английском языках (1000–1500 знаков / 150–200 слов).
8. Ключевые слова на русском и английском языках (8–10 слов).

Журнал распространяется по подписке – через 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

ISSN 1026-2237. DOI 10.18522/1026-2237-2020-1. Известия высших учебных заведений.

Северо-Кавказский регион. Естественные науки.

2020. № 1