

ISSN 1026-2237

DOI 10.18522/1026-2237

ИЗВЕСТИЯ
ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

*Северо-Кавказский
регион*

ЕСТЕСТВЕННЫЕ

НАУКИ

2023

3

Журнал основан в 1972 г. Ю.А. Ждановым

Главная редакция:

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

Редакционная коллегия:

М.А. Боровская – главный редактор, чл.-корр. РАО, доктор эконом. наук, профессор, Южный федеральный университет, Россия
В.Е. Закруткин – председатель редколлегии, доктор геол.-мин. наук, профессор, Южный федеральный университет, Россия
Я.М. Ерусалимский – зам. председателя редколлегии, кандидат физ.-мат. наук, доктор техн. наук, профессор, Южный федеральный университет, Россия
В.А. Бабешко – академик РАН, доктор физ.-мат. наук, профессор, Кубанский государственный университет, Россия
Б.С. Карамурзов – доктор техн. наук, профессор, Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова, Россия
В.И. Колесников – академик РАН, доктор техн. наук, профессор, Ростовский государственный университет путей сообщения, Россия
А.Г. Кусраев – доктор физ.-мат. наук, профессор, Южный математический институт ВНЦ РАН, Россия
Г.Г. Матишов – академик РАН, доктор геол.-мин. наук, профессор, Федеральный исследовательский центр Южный научный центр РАН, Россия
В.И. Минкин – академик РАН, доктор хим. наук, профессор, Южный федеральный университет, Россия
М.Х. Рабаданов – доктор физ.-мат. наук, профессор, Дагестанский государственный университет, Россия
А.В. Абанин – доктор физ.-мат. наук, профессор, Южный федеральный университет, Россия
Г.Г. Бабаян – доктор техн. наук, Центр эколого-ноосферных исследований НАН РА, Армения
О.С. Безуглова – доктор биол. наук, профессор, Южный федеральный университет, Россия
Н.И. Бойко – доктор геол.-мин. наук, профессор, Южный федеральный университет, Россия
А.В. Бочкарев – доктор геол.-мин. наук, профессор, Российский государственный университет нефти и газа им. И.М. Губкина, Россия
Л.С. Ворович – кандидат физ.-мат. наук, доцент, Южный федеральный университет, Россия
О.Н. Демина – доктор биол. наук, профессор, Карачаево-Черкесский государственный университет им. У.Д. Алиева, Россия
А.Г. Захаров – доктор техн. наук, профессор, Южный федеральный университет, Россия
Л.М. Зубов – доктор физико-математических наук, профессор, Южный федеральный университет, Россия
М.Ю. Жуков – доктор физико-математических наук, профессор, Южный федеральный университет, Россия
А.Н. Карапетянц – доктор физико-математических наук, профессор, Южный федеральный университет, Россия
Д.В. Карелин – доктор биол. наук, Институт географии РАН, Россия
М.И. Карякин – доктор физ.-мат. наук, доцент, Южный федеральный университет, Россия
С.И. Колесников – кандидат геогр. наук, доктор с.-х. наук, профессор, Южный федеральный университет, Россия
Е.М. Колосова – кандидат физ.-мат. наук, Южный федеральный университет, Россия
Г.В. Куповых – доктор физ.-мат. наук, профессор, Южный федеральный университет, Россия
С.В. Курбатов – доктор хим. наук, профессор, Южный федеральный университет, Россия
А.М. Лерер – доктор физ.-мат. наук, профессор, Южный федеральный университет, Россия
С.Н. Мелихов – 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
С.Г. Парада – доктор геол.-мин. наук, доцент, Федеральный исследовательский центр Южный научный центр РАН, Россия
Г.В. Пироговская – доктор с.-х. наук, профессор, Институт почвоведения и агрохимии НАН РБ, Белоруссия
В.С. Рабинович – доктор физ.-мат. наук, профессор, Национальный политехнический институт, Мексика
М.А. Сазыкина – доктор биол. наук, доцент, Южный федеральный университет, Россия
В.И. Силаев – доктор геол.-мин. наук, Институт геологии им. Н.П. Юшкина Коми НЦ УрО РАН, Россия
В.Н. Труфанов – доктор геол.-мин. 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

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

Journal was founded in 1972 by Yu.A. Zhdanov

Main Edition:

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

Editorial Board:

M.A. Borovskaya - Editor-in-Chief, Corresponding Member, Russian Academy of Education, Doctor of Economics, Professor, Southern Federal University, Russia
V.E. Zakrutkin - Chairman of the Editorial Board, Doctor of Geology and Mineralogy, Professor, Southern Federal University, Russia
Ya.M. Erusalimsky - Deputy Chairman of the Editorial Board, Candidate of Physics and Mathematics, Doctor of Technical Sciences, Professor, Southern Federal University, Russia
V.A. Babeshko - Academician, Russian Academy of Sciences, Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Kuban State University, Russia
B.S. Karamurзов - Doctor of Technical Sciences, Professor, Berbekov Kabardino-Balkarian State University, Russia
V.I. Kolesnikov - Academician, Russian Academy of Sciences, Doctor of Technical Sciences, Professor, Rostov State Transport University, Russia
A.G. Kusraev - Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Southern Mathematical Institute, Vladikavkaz Scientific Center, Russian Academy of Sciences, Russia
G.G. Matishov - Academician, Sciences, Doctor of Geology and Mineralogy, Professor, Federal Research Center the Southern Scientific Center, Russian Academy of Sciences, Russia
V.I. Minkin - Academician, Russian Academy of Sciences, Doctor of Chemistry, Professor, Southern Federal University, Russia
M.H. Rabadanov - Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Dagestan State University, Russia
A.V. Abanin - Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Southern Federal University, Russia
G.G. Babayan - Doctor of Technical Sciences, Center for Ecological and Noospheric Studies, National Academy of Sciences of Armenia, Armenia
O.S. Bezuglova - Doctor of Biology, Professor, Southern Federal University, Russia
N.I. Boiko - Doctor of Geology and Mineralogy, Professor, Southern Federal University, Russia
A.V. Bochkarev - Doctor of Geology and Mineralogy, Professor, Gubkin Russian State University of Oil and Gas, Russia
L.S. Vorovich - Candidate of Physics and Mathematics, Associate Professor, Southern Federal University, Russia
O.N. Dyomina - Doctor of Biological Sciences, Professor, Aliev Karachay-Cherkess State University, Russia
M.Y. Zhukov - Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Southern Federal 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
A.N. Karapetyants - Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Southern Federal University, Russia
Dmitry V. Karelin - Doctor of Biology, Institute of Geography of the Russian Academy of Sciences
M.I. Karjakin - Doctor of Physics and Mathematics, Associate Professor, Southern Federal University, Russia
S.I. Kolesnikov - Candidate of Geography, Doctor of Agricultural Science, Professor, Southern Federal University, Russia
E.M. Kolosova - Candidate of Physics and Mathematics, Southern Federal University, Russia
G.V. Kupovykh - Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Southern Federal University, Russia
S.V. Kurbatov - Doctor of Chemistry, Professor, Southern Federal University, Russia
A.M. Lerer - Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Southern Federal University, Russia
S.N. Melikhov - Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Southern Federal University, Russia
V.A. Minoranskiy - Doctor of Agricultural Sciences, Professor, Southern Federal University, Russia
V.V. Onishchenko - Doctor of Geography, Professor, Aliev Karachay-Cherkess State University, Russia
O.V. Nazarenko - Candidate of Geography, Associate Professor, Southern Federal University, Russia
S.G. Parada - Doctor of Geology and Mineralogy, Associate Professor, Federal Research Center the Southern Scientific Center, Russian Academy of Sciences, Russia
G.V. Pirogovskaya - Doctor of Agricultural Sciences, Professor, Institute of Soil Science and Agrochemistry, National Academy of Sciences of Belarus, Belarus
V.S. Rabinovich - Doctor of Physics and Mathematics, Professor, National Polytechnic Institute, Mexico
M.A. Sazykina - Doctor of Biological Sciences, Professor, Southern Federal University, Russia
Valerii I. Silaev - Doctor of Geology and Mineralogy, Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Russia
V.N. Trufanov - Doctor of Geology and Mineralogy, 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

The Founders

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

ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ. СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ РЕГИОН

BULLETIN OF HIGHER EDUCATIONAL INSTITUTIONS. NORTH CAUCASUS REGION

doi: 10.18522/1026-2237-2023-3

Свидетельство о регистрации
ПИ № ФС 77 – 77252 от 25.11.2019,
выдано Федеральной службой по надзору
в сфере связи, информационных технологий
и массовых коммуникаций
Научный журнал
Издаётся с 1973 г.
Периодичность серии 4 номера в год
№ 3 (219) 2023 г.

Registration certificate
PI No. FS 77 - 77252 dated 25.11.2019
issued Federal Service for Supervision
of Communications, Information Technology,
and Mass Media
Science magazine
Published since 1973.
4 issues per a year
No. 3 (219) 2023

ЕСТЕСТВЕННЫЕ НАУКИ

NATURAL SCIENCE

СОДЕРЖАНИЕ

CONTENTS

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ

PHYSICAL AND MATHEMATICAL SCIENCES

- Ватulyan A.O., Varchenko A.A., Yurov V.O.** Исследование коэффициентных обратных задач с учетом реологии для функционально-градиентных стержней 4
- Зехцер В.О., Костоглотов А.А.** Синтез квазиоптимальных законов управления на основе принципа декомпозиции и редукции задачи Лагранжа к изопериметрической в условиях неопределенности 13
- Костоглотов А.А., Пеньков А.С., Лазаренко С.В.** Квазиоптимальные законы управления на основе редукции экстремальных задач в динамических алгоритмах оценки положения маневрирующих объектов 23
- Полякова Н.М., Цветкова В.И.** Численное исследование двумерного симметричного течения несжимаемой жидкости с зависящей от координат вязкостью между частично неровными плоскостями ... 34

НАУКИ О ЗЕМЛЕ

SCIENCES OF EARTH

- Ашабоков Б.А., Федченко Л.М., Куповых Г.В., Ташилова А.А., Кешева Л.А., Теунова Н.В., Ашабокова М.Б.** Метод снижения рисков в сельском хозяйстве, связанных с засухами, с учетом вероятности их появления 45
- Баранникова Н.Н., Гарькуша Д.Н., Фёдоров Ю.А., Альмаджамай И.А.А., Эрешова А., Чернявская Е.В.** Гидрохимические особенности озёр Большое и Малое Турали по результатам исследований в 2018 и 2021 годах 57

<i>Бешенцев А.Н., Борисова Т.А., Лубсанов А.А., Будаева Д.Г., Петров С.А.</i> Декомпозиция ретроспективных топографических карт для послойной оценки типов регионального природопользования.....	71	<i>Beshentsev A.N., Borisova T.A., Lubsanov A.A., Budaeva D.G., Petrov S.A.</i> Decomposition of Retrospective Topographic Maps for Layer-by-Layer Assessment of Regional Nature Management Types.....	71
<i>Гарькуша Д.Н., Фёдоров Ю.А., Трубник Р.Г., Талпа Б.В., Ковалев Е.А.</i> Концентрация и эмиссия метана и сероводорода в озере Баскунчак, ручье балки Улан-Благ и дегазирующих источниках подземных вод в весенний период.....	80	<i>Gar'kusha D.N., Fedorov Yu.A. Trubnik R.G., Talpa B.V., Kovalev E.A.</i> Concentration and Emission of Methane and Hydrogen Sulfide in Lake Baskunchak, Ulan-Blag Beam Creek and Degassing Groundwater Sources in Spring.....	80
<i>Даукаев А.А.</i> Нефтегазовая отрасль Чеченской Республики: история и современность (к 130-летию промышленной добычи нефти).....	93	<i>Daukaev A.A.</i> Oil and Gas Industry of the Chechen Republic: History and Modernity (to the 130th Anniversary of Industrial Oil Production).....	93
<i>Забураева Х.Ш., Алиева Х.А.-В., Шаипова А.А.</i> Природные туристско-рекреационные ресурсы Северо-Восточного Кавказа.....	100	<i>Zaburaeva Kh.Sh., Alieva Kh.A.-V., Shaipova A.A.</i> Natural Tourist and Recreation Resources of the North-Eastern Caucasus.....	100
<i>Матюгин В.А., Безуглова О.С.</i> Влияние гуминовых препаратов на азотное питание озимой пшеницы и уреазную активность чернозема обыкновенного карбонатного.....	106	<i>Matyugin V.A., Bezuglova O.S.</i> Effect of Humic Preparations on Winter Wheat Nitrogen Nutrition and Calcic Chernozem Urease Activity.....	106
<i>Радионофф А.А., Тимченко В.Ю.</i> О сезонной изменчивости характеристик тропопаузы в предгорных районах Северного Кавказа по данным ERA-5 (Copernicus) и MERRA-2 (NASA).....	117	<i>Radionoff A.A., Timchenko V.Yu.</i> On Seasonal Variability of Tropopause Characteristics in Foothill Regions of the North Caucasus According to ERA-5 (Copernicus) и MERRA-2 (NASA) Reanalysis Data.....	117
<i>Скрипка Г.И., Сапрыгин В.В., Ивлиева О.В., Беспалова Л.А., Глинка В.В.</i> Опыт использования беспилотных летательных аппаратов для выявления мест размещения отходов в водоохраных зонах.....	131	<i>Skripka G.I., Saprygin V.V., Ivlieva O.V., Bepalova L.A., Glinka V.V.</i> Use of Unmanned Aerial Vehicles to Detect the Disposal Sites of Industrial and Consumer Waste in Water Protection Zones of Water Bodies.....	131

БИОЛОГИЧЕСКИЕ НАУКИ

BIOLOGICAL SCIENCES

<i>Дмитриева М.В., Мязин В.Д., Золотухина Е.В.</i> Влияние pH и состава питательной среды на дегидрогеназную активность экстрактов, полученных из <i>Escherichia coli</i>	140	<i>Dmitrieva M.V., Myazin V.D., Zolotukhina E.V.</i> Effect of pH and Nutrient Medium Composition on Dehydrogenase Activity of Extracts Obtained from <i>Escherichia Coli</i>	140
---	-----	---	-----

НАУЧНАЯ ЖИЗНЬ

SCIENTIFIC LIFE

<i>Миноранский В.А., Тимофеев Ю.В.</i> XI фестиваль экологического туризма «Воспетая степь».....	147	<i>Minoransky V.A., Timofeenko Yu.V.</i> 11th Festival of Ecological Tourism "Singing Steppe".....	147
--	-----	--	-----

НАШИ ЮБИЛЯРЫ

OUR PERSONS

<i>Ватульян А.О., Карякин М.И.</i> Леонид Михайлович Зубов (80 лет со дня рождения).....	152	<i>Vatulyan A.O., Karyakin M.I.</i> Leonid Mikhailovich Zubov (to the 80th Anniversary).....	152
Татьяна Александровна Ватульян.....	154	Tatyana Aleksandrovna Vatulyan.....	154

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ

PHYSICAL AND MATHEMATICAL SCIENCES

Научная статья
УДК 539.3;512.624.3
doi: 10.18522/1026-2237-2023-3-4-12

ИССЛЕДОВАНИЕ КОЭФФИЦИЕНТНЫХ ОБРАТНЫХ ЗАДАЧ С УЧЕТОМ РЕОЛОГИИ ДЛЯ ФУНКЦИОНАЛЬНО-ГРАДИЕНТНЫХ СТЕРЖНЕЙ

*Александр Ованесович Ватульян¹, Анастасия Андреевна Варченко^{2✉},
Виктор Олегович Юров³*

^{1, 2, 3}Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, Россия

¹aovatulyan@sfnedu.ru

²aner@sfnedu.ru ✉

³vyurov@sfnedu.ru

Аннотация. Рассмотрены задачи об определении переменных реологических свойств функционально-градиентных балок по некоторой дополнительной информации о смещениях. Колебания консольно закрепленной неоднородной вязкоупругой балки изучены в рамках двух моделей – Эйлера–Бернулли и Тимошенко. Колебания вызываются сосредоточенным на конце балки моментом, осциллирующим во времени. В рамках концепции комплексных модулей получены операторные соотношения, связывающие заданные и искомые функции. Восстановлены функции, отражающие законы изменения длительного и мгновенного модулей. Приведены результаты вычислительных экспериментов по восстановлению функций различных типов.

Ключевые слова: обратные задачи, реологические свойства, изгибные колебания, модель Эйлера – Бернулли, модель Тимошенко, неоднородность, вязкоупругость, комплексный модуль, идентификация

Благодарности: исследование выполнено при частичной поддержке гранта Российского научного фонда № 22-11-00265, <https://rscf.ru/project/22-11-00265/>, в Южном федеральном университете.

Для цитирования: Ватульян А.О., Варченко А.А., Юров В.О. Исследование коэффициентных обратных задач с учетом реологии для функционально-градиентных стержней // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2023. № 3. С. 4–12.

Статья опубликована на условиях лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY 4.0).

Original article

INVESTIGATION OF COEFFICIENT INVERSE PROBLEMS TAKING INTO ACCOUNT RHEOLOGY FOR FUNCTIONALLY GRADED MATERIAL

Alexander O. Vatulyan¹, Anastasiya A. Varchenko², Viktor O. Yurov³

^{1, 2, 3}Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia

¹aovatulyan@sfedu.ru

²aner@sfedu.ru

³yurov@sfedu.ru

Abstract. The problems of determining the variable rheological properties of functionally gradient beams from some additional information about displacements are considered. Vibrations of a cantilevered inhomogeneous viscoelastic beam are studied in the framework of two models - Euler-Bernoulli and Timoshenko. The oscillations are caused by a moment concentrated at the end of the beam, oscillating in time. Within the framework of the concept of complex modules, operator relations linking the given and desired functions are obtained. Functions reflecting the laws of change of long-term and instantaneous modules have been restored. The results of computational experiments on the restoration of functions of various types are presented.

Keywords: inverse problems, rheological properties, bending vibrations, Euler-Bernoulli model, the Timoshenko model, inhomogeneity, viscoelasticity, complex module, identification

Acknowledgments: the study was supported by the Russian Science Foundation grant No. 22-11-00265, <https://rscf.ru/project/22-11-00265/>, at the Southern Federal University.

For citation: Vatulyan A.O., Varchenko A.A., Yurov V.O. Investigation of Coefficient Inverse Problems Taking into Account Rheology for Functionally Graded Material. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2023;(3):4-12. (In Russ.).

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC-BY 4.0).

Введение

Функционально-градиентные материалы (ФГМ) имеют переменные свойства в зависимости от координат. Использование ФГМ при производстве изделий становится все более распространенным благодаря преимуществам, которые они имеют по сравнению с кусочно-однородными материалами. Это включает снижение вероятности появления трещин и расслоений, а также экономное использование материала при создании конструкций с заданными прочностными характеристиками [1, 2]. Производство неоднородных материалов с переменными свойствами является сложным технологическим процессом, требующим оценки переменных свойств для правильного расчета деформативности и прочности. Знание законов изменения свойств материала позволяет проводить более точные расчеты на прочность, устойчивость и колебания [3–5].

В настоящей работе рассмотрены два подхода при формулировке обратных задач по реконструкции неоднородных свойств балки из полимеркомпозитного материала в рамках концепции комплексных модулей [6]. В первом из них реконструкция происходит по заданной информации о деформировании балки в некотором наборе точек [7]. Во втором в обратной задаче задается информация об амплитудно-частотной характеристике (АЧХ) угла поворота концевого сечения балки в некотором диапазоне частот [5, 8].

Получено решение обратной задачи первого типа для моделей Эйлера – Бернулли [6] и Тимошенко [6, 9, 10] для различных видов функций, описывающих изменение комплексного модуля.

Для решения обратной задачи второго типа на основе операторного метода Ньютона построен итерационный процесс уточнения искомых функций, причем начальные приближения

выбраны в виде линейных функций. На каждом шаге операторное уравнение Фредгольма 1-го рода с непрерывным комплексным ядром для определения поправок [8] решается при помощи модифицированного метода регуляризации А.Н. Тихонова [7]. Восстановлены функции, отражающие законы изменения длительного и мгновенного модулей. Для модели Тимошенко поставлена обратная задача во второй постановке, на основе метода линеаризации сформированы две краевые задачи и из условия разрешимости получено операторное уравнение Фредгольма 1-го рода с непрерывным комплексным ядром, которое решается на основе метода А.Н. Тихонова. С помощью этого подхода построен итерационный процесс, представлены результаты вычислительных экспериментов.

Постановка и решение обратных задач первого типа

Рассмотрим задачу об изгибных колебаниях консольно закрепленной неоднородной вязкоупругой балки длины L . Будем считать, что левый конец балки зашпелен, а на правом действует момент M , осциллирующий с некоторой частотой [6, 11].

Для описания колебаний в первой постановке используем модель Эйлера – Бернулли. Уравнение установившихся колебаний в безразмерном виде и соответствующие граничные условия имеют вид

$$(G(x, k)w''(x, k))'' - k^4w(x, k) = 0, \quad (1)$$

$w(x, k)|_{x=0} = 0, w'(x, k)|_{x=0} = 0, G(x, k)w''(x, k)|_{x=1} = 1, (G(x, k)w''(x, k))'|_{x=1} = 0,$ (2)
 где $G(x, k) = (itk^2g(x) + h(x))/(1 + itk^2)$ – комплексный модуль для неоднородной среды, сформированный на базе модели стандартного вязкоупругого тела [12]; $h(x), g(x)$ – безразмерные функции, которые отражают законы изменения длительного и мгновенного модулей в зависимости от координаты x и удовлетворяют неравенству $g(x) > h(x) > 0$. Здесь и далее τ – безразмерное время релаксации; k – частотный параметр.

Сформулируем постановку обратной задачи в рамках самого простого подхода: будем считать, что известно смещение в наборе точек. Из уравнения (1), интегрируя дважды и учитывая граничные условия (2), получим следующее представление:

$$G(x, k) = (k^4 \int_1^x w(\xi, k)(x - \xi) d\xi + 1)/w''(x, k). \quad (3)$$

По формуле (3) можно явным образом найти комплексный модуль, однако при этом необходимо осуществлять двукратное дифференцирование функции $w(x, k)$, что является некорректной задачей, и при нахождении производных используем сплайн-аппроксимацию 5-го порядка [2].

В рамках модели Тимошенко безразмерная система уравнений установившихся колебаний с учетом касательных напряжений имеет вид [6]

$$\begin{cases} -(G(x, k)(\theta'(x, k)))' + smG(x, k)(w'(x, k) + \theta(x, k)) - \theta(x, k)k^4m^{-1} = 0, \\ sm(G(x, k)(w'(x, k) + \theta(x, k)))' + k^4w(x, k) = 0, \end{cases} \quad (4)$$

где s, m – безразмерные параметры модели [6].

Соответствующие граничные условия:

$$w(x, k)|_{x=0} = 0, \theta(x, k)|_{x=0} = 0, [G(x, k)(\theta(x, k) + w'(x, k))]|_{x=1} = 0, [G(x, k)\theta'(x, k)]|_{x=1} = -1. \quad (5)$$

Сформулируем постановку обратной задачи в рамках первого подхода для модели Тимошенко. По известным функциям $w(x, k), \theta(x, k)$, заданным в наборе точек x_k , требуется восстановить функцию $G(x, k)$. Из второго уравнения системы (4) получаем выражение для нахождения функции $G(x, k)$

$$G(x, k) = (1 + (sm)^{-1}k^4 \int_x^1 w(\xi, k) d\xi)/(w'(x, k) + \theta(x, k)). \quad (6)$$

Соответствующие производные находятся при помощи сплайн-аппроксимации. Проведем серию вычислительных экспериментов для модели 1 на основе (3). Сначала сформируем входную информацию для обратной задачи для фиксированного значения k . Из решения прямой задачи с заданной дважды непрерывно дифференцируемой функцией $G(x, k)$ методом стрельки на входе находим $w(x_j, k)$, с помощью сплайн-аппроксимации – $w''(x, k)$ и далее по формуле (4) строим искомую функцию $G(x, k)$.

В качестве тестового примера при нахождении функции $G(x, k)$ введем следующие законы длительного и мгновенного модуля и значения параметров:

$$g(x) = 1,5 + x^3, h(x) = 1 + x^2, \tau = 0,01, k = 1. \quad (7)$$

На рис. 1, 2 представлены результаты расчетов. Сплошной линией изображены исходные $Re(G(x, k))$ и $Im(G(x, k))$, а пунктиром – восстановленные.

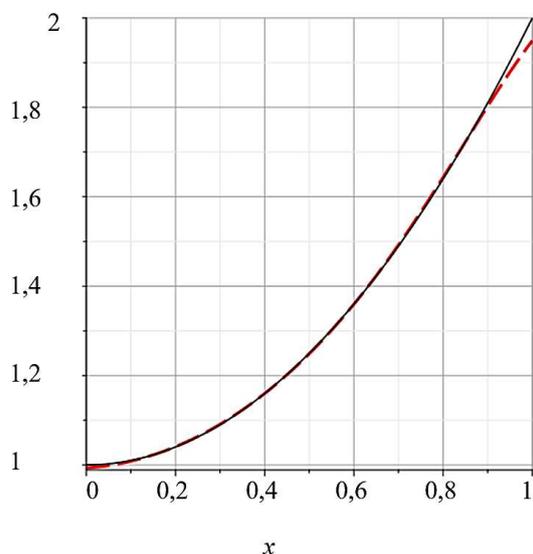


Рис. 1. $Re(G(x, k))$ / Fig. 1. $Re(G(x, k))$

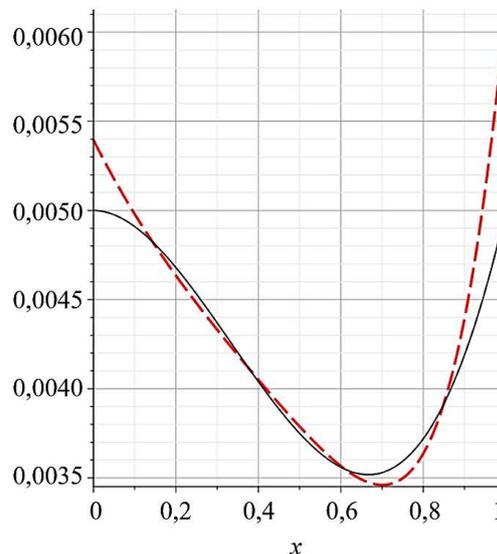


Рис. 2. $Im(G(x, k))$ / Fig. 2. $Im(G(x, k))$

Результаты вычислительных экспериментов показывают, что $Re(G(x, k))$ восстанавливается лучше, чем $Im(G(x, k))$.

Для построения восстановленной функции комплексного модуля в рамках модели 2 из решения прямой задачи с заданной дважды непрерывно дифференцируемой функцией $G(x, k)$ методом пристрелки находим $w(x_j, k)$ и $\theta(x_j, k)$ для фиксированного значения k . При помощи сплайн-аппроксимации строим функции $w(x, k), \theta(x, k)$ на отрезке $[0, 1]$, выбирая шаг в зависимости от количества используемых точек, после чего находим $w'(x, k)$.

Вычислительный эксперимент проведем для тех же функций и параметров (7). На рис. 3, 4 представлены результаты расчетов для модели Тимошенко.

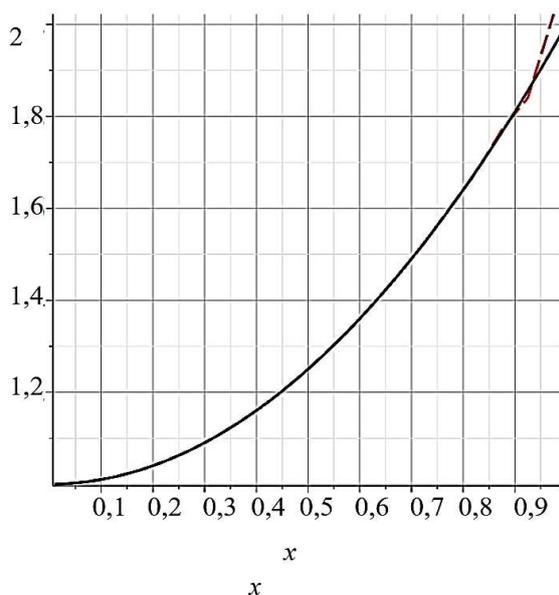


Рис. 3. $Re(G(x, k))$ / Fig. 3. $Re(G(x, k))$

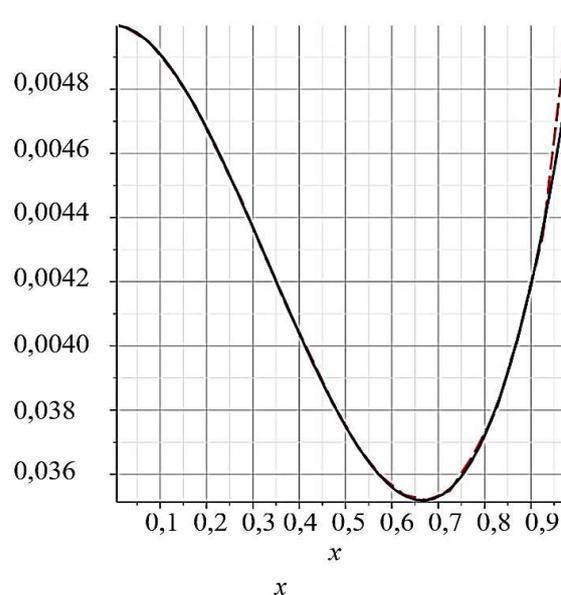


Рис. 4. $Im(G(x, k))$ / Fig 4. $Im(G(x, k))$

Постановка и решение обратных задач второго типа

Модель Эйлера – Бернулли. Представленные выше решения задач первого типа являются модельными. Гораздо более реалистичны такие постановки, где дополнительная информация снимается с торца балки. Сформулируем обратную задачу во второй постановке: по известной комплексной функции угла поворота $w'(1, k) = \varphi(k)$ восстановить две вещественные функции, характеризующие изменение длительного и мгновенного модулей $g(x), h(x)$. Заметим, что обратные задачи в такой постановке являются существенно нелинейными, при их решении требуется формировать итерационные процессы, основанные на методе линеаризации.

Отметим, что в [8] приведено решение задачи об определении неоднородных реологических свойств балки Эйлера – Бернулли на основе акустического метода и анализа АЧХ. Авторами рассматривается вязкоупругая балка при различных способах нагружения. Построен итерационный процесс, основанный на решении интегрального уравнения Фредгольма 1-го рода при помощи метода регуляризации А.Н. Тихонова [3, 4]. Приведены примеры определения реологических свойств для различных законов изменения комплексного модуля по длине стержня для различных граничных условий. В настоящей работе представлен способ решения обратных задач для моделей Эйлера – Бернулли и Тимошенко при другом типе задаваемой дополнительной информации на торце балки. Изложим основные моменты решения сформулированных нелинейных некорректных обратных задач.

Пусть известно некоторое начальное приближение $G_0(x, k)$. Для осуществления линеаризации в окрестности начального приближения представим функции, входящие в краевую задачу (1), (2), в виде

$$G(x, k) = G_0(x, k) + \varepsilon G_1(x, k), \quad w(x, k) = w_0(x, k) + \varepsilon w_1(x, k), \\ g(x, k) = g_0(x, k) + \varepsilon g_1(x, k), \quad h(x, k) = h_0(x, k) + \varepsilon h_1(x, k),$$

где ε – формальный малый параметр. Подставим эти разложения в краевую задачу (1), (2) и сформулируем операторные соотношения при одинаковых степенях ε

$$\varepsilon^0: (G_0 w_0'')'' - k^4 w_0 = 0, \tag{8}$$

$$w_0|_{x=0} = 0, w_0'|_{x=0} = 0, \\ (G_0 w_0'')|_{x=1} = 1, (G_0 w_0'')'|_{x=1} = 0, \\ \varepsilon^1: (G_1 w_0'')'' + (G_0 w_1'')'' - k^4 w_1 = 0, \tag{9}$$

$$w_1|_{x=0} = 0, w_1'|_{x=0} = 0, \\ (G_1 w_0'' + G_0 w_1'')|_{x=1} = 0, (G_1 w_0'' + G_0 w_1'')'|_{x=1} = 0.$$

Домножая уравнения (8) и (9) на w_1 и w_0 соответственно и интегрируя на отрезке $[0, 1]$ их разность, в результате имеем следующее соотношение:

$$\int_0^1 ((G_0 w_0'')'' w_1 - (G_1 w_0'')'' w_0 - (G_0 w_1'')'' w_0) dx = 0.$$

Интегрируя дважды по частям, получим

$$\int_0^1 G_1(x, k) w_0''^2(x, k) dx = -w_1'(1, k).$$

Учитывая, что $\varphi(k) = w'(1, k)$ является заданной функцией, получим для поправки интегральное уравнение Фредгольма 1-го рода с непрерывным комплекснозначным ядром

$$\int_0^1 (G_1(x, k) (w_0''(x, k))^2) dx = -(\varphi(k) - w_0'(1, k)). \tag{10}$$

Задача решения уравнения (10) является некорректной. Используя модифицированный метод Тихонова, определим поправку $G_1(x, k)$.

Разделяя вещественную и мнимую части подынтегрального выражения (10) $(G_1(w_0'')^2)$, получим систему интегральных уравнений Фредгольма 1-го рода с непрерывными ядрами

$$\begin{cases} \int_0^1 ((h_1(x)z_1(k) + g_1(x)z_2(k)) (W_1^2(x, k) - W_2^2(x, k)) - \\ - 2W_1(x, k)W_2(x, k)(g_1(x) - h_1(x))z_3(k)) dx = -Re(\varphi(k) - w_0'(1, k)), \\ \int_0^1 ((g_1(x) - h_1(x))z_3(k) (W_1^2(x, k) - W_2^2(x, k)) + \\ + 2W_1(x, k)W_2(x, k)(W_1(x, k)W_2(x, k))) dx = -Im(\varphi(k) - w_0'(1, k)), \end{cases} \tag{11}$$

где $W_1(x, k) = Re(w_0(x, k)'')$, $W_2(x, k) = Im(w_0(x, k)'')$ и введены обозначения $z_1(k) = \frac{1}{1+\tau^2 k^4}$, $z_2(k) = \frac{\tau^2 k^4}{1+\tau^2 k^4}$, $z_3(k) = \frac{\tau k^2}{1+\tau^2 k^4}$.

Решение системы (11) представляет собой некорректную задачу [3, 4]. Регуляризованное решение строится с помощью метода регуляризации А.Н. Тихонова и находятся функции первого приближения.

Для оценки точности приближения введем в рассмотрение функционал невязки

$$\Phi = \int_{k_1}^{k_2} |\varphi(k) - w'_0(1, k)|^2 dk. \quad (12)$$

На основе приведенных выше соотношений построен итерационный процесс для уточнения функций начального и следующего приближений. Процесс останавливался либо по числу итераций, либо при достижении порогового значения функционала (12).

Проведен ряд вычислительных экспериментов для стержня из вязкоупругого материала в случае различных законов изменения длительного и мгновенного модулей. Для краевой задачи (1), (2) были выбраны следующие функции длительного и мгновенного модулей: $g(x) = 1,5 + 0,1x^3$, $h(x) = 1 + 0,1x^2$, время релаксации $\tau = 0,01$.

По рассчитанным АЧХ частотный диапазон выбран в области между 1 и 2 резонансами: $[k_1; k_2] = [2,5; 3,5]$. Из условия минимума функционала (12) найдены значения начальных приближений в классе постоянных: $g_0 = 1,54$, $h_0 = 1,04$. Для достижения порогового значения точности 10^{-4} для функционала (12) потребовалось 10 итераций. Значение параметра регуляризации на последнем шаге итерации: $\alpha = 10^{-13}$.

На рис. 5 изображены результаты реконструкции функций $h(\xi)$ – слева, $g(\xi)$ – справа: —•—•— — 2-я итерация; ••••• — 4-я итерация; — — — — 7-я итерация; ••••• — 10-я итерация и — — — — точная функция.

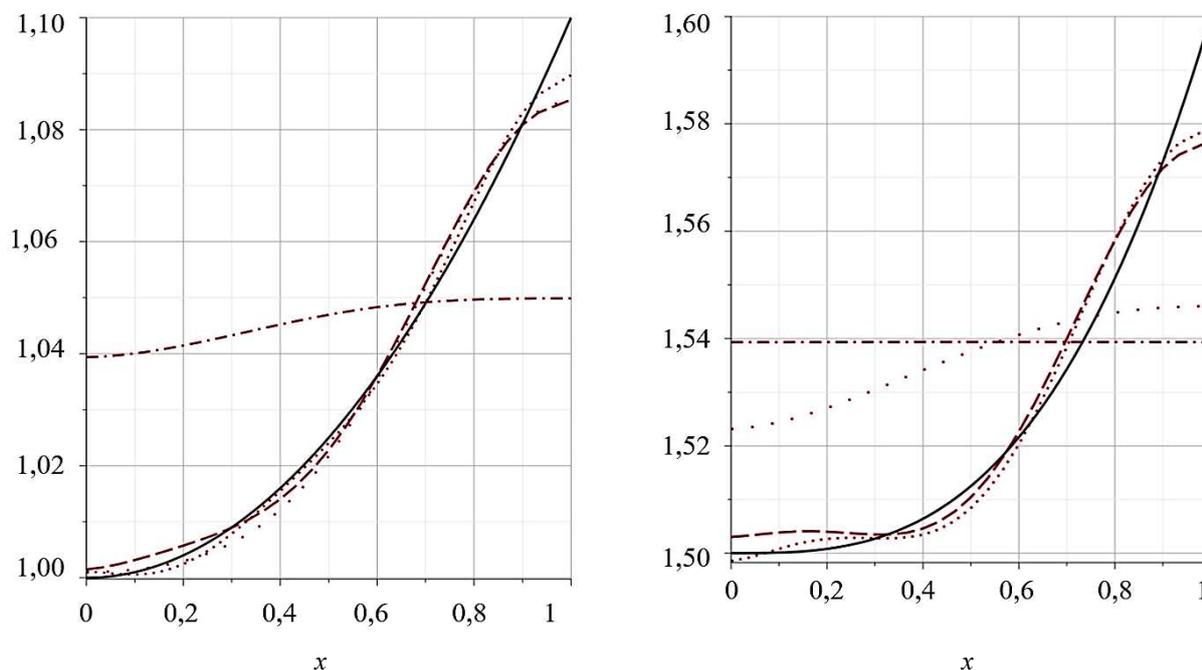


Рис. 5. Реконструкция функций $h(x)$ и $g(x)$ (модель Эйлера – Бернулли). Слева – $h(x)$, справа – $g(x)$
 / Fig. 5. Reconstruction of function $h(x)$ and $g(x)$ (Euler-Bernoulli). On the left is the function $h(x)$, on the right is the function $g(x)$

Модель Тимошенко. Сформулируем обратную задачу во второй постановке для модели Тимошенко: по известной функции угла поворота торцевого сечения $\theta(1, k)$ восстановить функции длительного и мгновенного модулей $g(x)$, $h(x)$.

Пусть известно некоторое начальное приближение $G_0(x, k)$. Для осуществления линеаризации и определения поправок представим функции в виде

$$\begin{aligned} G(x, k) &= G_0(x, k) + \varepsilon G_1(x, k), & w(x, k) &= w_0(x, k) + \varepsilon w_1(x, k), \\ g(x, k) &= g_0(x, k) + \varepsilon g_1(x, k), & \theta(x, k) &= \theta_0(x, k) + \varepsilon \theta_1(x, k), \\ h(x, k) &= h_0(x, k) + \varepsilon h_1(x, k). \end{aligned}$$

Подставив функции в систему (4), (5) и собрав слагаемые при одинаковых степенях ε , получим следующие краевые задачи:

$$\varepsilon^0: -(G_0 \theta_0')' + smG_0(w_0' + \theta_0) - \frac{\theta_0 k^4}{m} = 0, \tag{13}$$

$$sm(G_0(w_0' + \theta_0))' + k^4 w_0(x) = 0,$$

$$w_0|_{x=0} = 0, \theta_0|_{x=0} = 0,$$

$$G_0(w_0' + \theta_0)|_{x=1} = 0, G_0 \theta_0'|_{x=1} = -1,$$

$$\varepsilon^1: -(G_1 \theta_0' + G_0 \theta_1')' + sm(G_1(w_0' + \theta_0) + G_0(w_1' + \theta_1)) - \frac{k^4}{m} \theta_1 = 0, \tag{14}$$

$$sm(G_0(w_1' + \theta_1) + G_1(w_0' + \theta_0))' + k^4 w_1 = 0,$$

$$w_1|_{x=0} = 0, \theta_1|_{x=0} = 0,$$

$$(G_1(w_0' + \theta_0) + G_0(w_1' + \theta_1))|_{x=1} = 0, (G_1 \theta_0' + G_0 \theta_1')|_{x=1} = 0.$$

Домножим первые уравнения (13) и (14) на θ_1 и θ_0 соответственно, а вторые уравнения в (13) и (14) – на w_1 и w_0 , проинтегрируем их разность на отрезке $[0, 1]$ и, вычитая из первого уравнения второе, получим интегральное уравнение

$$\int_0^1 G_1(x, k)(\theta_0'^2(x, k) + sm(\theta_0^2(x, k) + w_0'^2(x, k)))dx = -(\theta_0(1, k) - \theta(1, k)). \tag{15}$$

Учитывая, что $\varphi(k) = \theta(1, k)$, сформулируем комплекснозначное операторное уравнение Фредгольма первого рода с непрерывным комплексным ядром. Из уравнения (15) определяются функции первого приближения. Обозначим

$$\theta_0'^2(x, k) + sm(\theta_0(x, k) + w_0'(x, k))^2 = P(x, k).$$

Отметим, что если положить $s = 0$, то из (15) следует уравнение (10). Таким образом, из уравнения (15), разделяя вещественную и мнимую части подынтегрального выражения, получим систему вещественных интегральных уравнений с непрерывными ядрами

$$\begin{cases} \int_0^1 ((h_1(x)z_1(k) + g_1(x)z_2(k))Re(P(x, k)) - (g_1(x) - h_1(x))z_3(k)Im(P(x, k)))dx = \\ \qquad \qquad \qquad = -Re(\theta_0(1, k) - \varphi(k)), \\ \int_0^1 ((g_1(x) - h_1(x))z_3(k)Re(P(x, k)) + (z_2(k)g_1(x) + h_1(x)z_1(k))Im(P(x, k)))dx = \\ \qquad \qquad \qquad = -Im(\theta_0(1, k) - \varphi(k)). \end{cases}$$

Решение этой системы представляет собой некорректную задачу [7]. Регуляризованное решение строится с помощью метода регуляризации А.Н. Тихонова и находятся функции первого приближения. Начальное приближение построено из условия минимума функционала невязки

$$\Phi = \int_{k_1}^{k_2} |\varphi(k) - \theta_0(1, k)|^2 dk. \tag{16}$$

Проведен ряд вычислительных экспериментов для стержня из вязкоупругого материала для модели Тимошенко для различных законов изменения длительного и мгновенного модулей. Ниже приведены результаты вычислительных экспериментов для функций, указанных при описании модели Эйлера – Бернулли.

Из условия минимума функционала (16) найдены значения начальных приближений: $g_0 = 1,53$, $h_0 = 1,03$. Построен итерационный процесс для уточнения функций начальных приближений. Процесс останавливался при достижении порогового значения 10^{-4} функционала (16). По рассчитанным АЧХ частотный диапазон выбран следующим образом: $[k_1; k_2] = [2,0; 2,6]$. Потребовалось 10 итераций, значение параметра регуляризации на последнем шаге: $\alpha = 10^{-12}$.

На рис. 6 представлены результаты реконструкции функций $h(\xi)$ – слева, $g(\xi)$ – справа: $-\cdot-\cdot-$ – 2-я итерация; $\bullet\bullet\bullet$ – 4-я итерация; $-\cdot-\cdot-$ – 7-я итерация; $\bullet\bullet\bullet\bullet\bullet$ – 10 итерация и $—$ – точная функция.

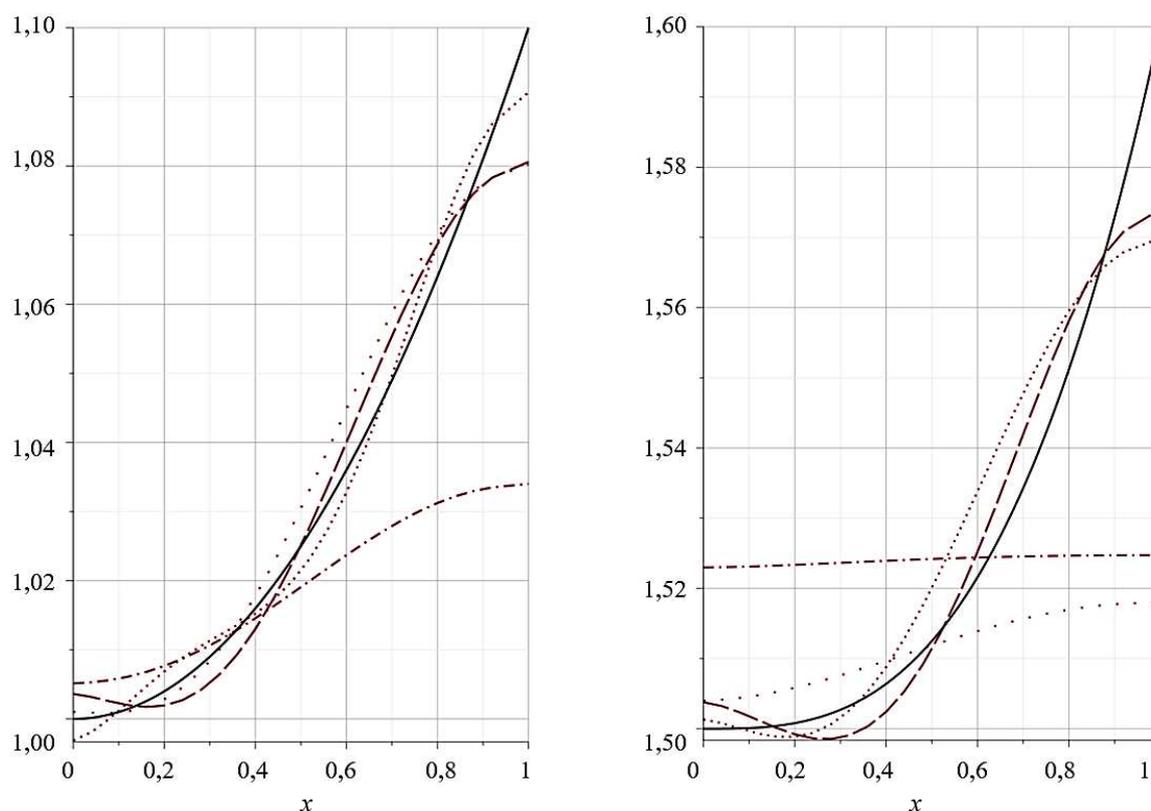


Рис. 6. Реконструкция функций $h(x)$ и $g(x)$ (модель Тимошенко). Слева – $h(x)$, справа $g(x)$
 / Fig. 6. Reconstruction of function $h(x)$ and $g(x)$ (Timoshenko model). On the left is the function $h(x)$, on the right is the function $g(x)$

Заключение

В работе получено решение обратной задачи первого типа в рамках двух моделей (модели Эйлера – Бернулли и модели Тимошенко) для различных (возрастающие, убывающие, немонотонные) функций, описывающих изменение вдоль осевой координаты мгновенного и длительного модулей упругости.

Для модели Эйлера – Бернулли приведено решение задачи об определении неоднородных реологических свойств балки на основе анализа АЧХ и построения итерационного процесса, на каждом шаге которого решается прямая задача с известным комплексным модулем и комплекснозначное операторное уравнение Фредгольма 1-го рода с непрерывным ядром. Начальное приближение выбрано среди постоянных из условия минимума функционала невязки. Приведены результаты вычислительных экспериментов.

Построено решение обратной задачи во второй постановке для модели Тимошенко. Построен итерационный процесс на основе метода линеаризации, получено интегральное уравнение Фредгольма 1-го рода с непрерывным комплекснозначным ядром, регуляризованное решение которого строится с помощью метода регуляризации А.Н. Тихонова. Приведены результаты восстановления функций мгновенного и длительного модулей.

Список источников

1. Неустроева Н.В., Лазарев Н.П., Задача сопряжения для упругих балок Бернулли – Эйлера и Тимошенко // Сиб. электр. матем. известия. 2016. Т. 13. С. 26–37.
2. Ватульян А.О., Плотников Д.К. Обратные коэффициентные задачи в механике // Вестн. ПНИПУ. Механика. 2019. № 3. С. 37–47.
3. Ватульян А.О., Беляк О.А., Сухов Д.Ю., Яеруян О.В. Обратные и некорректные задачи. Ростов н/Д.: Изд-во ЮФУ, 2011. 232 с.
4. Тихонов А.Н., Арсенин В.Я. Методы решения некорректных задач. 2-е изд. М.: Наука, 1979. 285 с.
5. Богачев И.В., Ватульян А.О. Обратные коэффициентные задачи для диссипативных операторов и идентификация свойств вязкоупругих материалов // Владикавк. матем. журн. 2012. № 3. С. 31–44.

6. Ватульян А.О., Варченко А.А. Исследование колебаний балки из функционально-градиентного материала с учетом затухания // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2021. № 4. С. 10–18.
7. Ватульян А.О. Коэффициентные обратные задачи механики. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2019. 272 с.
8. Аникина Т.А., Богачев И.В., Ватульян А.О. Об определении неоднородных реологических свойств балок // Вестн. ДГТУ. 2010. Т. 10, № 7. С. 1016–1023.
9. Timoshenko S.P. On the correction factor for shear of the differential equation for transverse vibrations of bars of uniform cross-section // Philosophical Magazine. 1921. 744 p.
10. Ватульян А.О., Гущина К.В. О реконструкции характеристик включения на основе модели Тимошенко // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2018. № 2. С. 16–22.
11. Айтбаева А.А., Ахтыамов А.М. Идентификация закрепленности и нагруженности одного из концов балки Эйлера – Бернулли по собственным частотам ее колебаний // Сиб. журн. индустр. математики. 2017. Т. 20, № 1 (69). С. 3–10.
12. Кристенсен Р. Введение в теорию вязкоупругости. М.: Мир, 1974. 228 с.

References

1. Neustroeva N.V., Lazarev N.P. The conjugation problem for elastic beams of Bernoulli-Euler and Timoshenko. *Sib. elektr. matem. izvestiya = Siberian Electronic Mathematical Reports*. 2016;13:26-37. (In Russ.).
2. Vatulyan A.O., Plotnikov D.K. Inverse coefficient problems in mechanics. *Vestn. PNIPU. Mekhanika = PNRPU Mechanics Bulletin*. 2019;(3):37-47. (In Russ.).
3. Vatulyan A.O., Belyak O.A., Sukhov D.Yu., Yavruyan O.V. *Inverse and incorrect tasks*. Rostov-on-Don: Southern Federal University Press; 2011. 232 p. (In Russ.).
4. Tikhonov A.N., Arsenin V.Ya. *Methods of solving ill-posed problems*. 2nd ed. Moscow: Nauka Publ.; 1979. 285 p. (In Russ.).
5. Bogachev I.V., Vatulyan A.O. Inverse coefficient problems for dissipative operators and identification of properties of viscoelastic materials. *Vladikavk. matem. zhurn. = Vladikavkaz Mathematical Journal*. 2012;(3):31-44. (In Russ.).
6. Vatulyan A.O., Varchenko A.A. Investigation of beam vibrations from a functionally gradient material taking into account attenuation. *Izv. vuzov. Sev.-Kavk. region. Estestv. nauki = Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science*. 2021;(4):10-18. (In Russ.).
7. Vatulyan A.O. *Coefficient inverse problems of mechanics*. Moscow: FIZMATLIT Publ.; 2019. 272 p. (In Russ.).
8. Anikina T.A., Bogachev I.V., Vatulyan A.O. On the determination of inhomogeneous rheological properties of beams. *Vestnik of DSTU*. 2010;10(7):1016-1023. (In Russ.).
9. Timoshenko S.P. On the correction factor for shear of the differential equation for transverse vibrations of bars of uniform cross-section. *Philosophical Magazine*. 1921:744.
10. Vatulyan A.O., Gushchina K.V. On reconstruction of inclusion characteristics based on the Timoshenko model. *Izv. vuzov. Sev.-Kavk. region. Estestv. nauki = Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science*. 2018;(2):16-22. (In Russ.).
11. Aitbayeva A.A., Akhtyamov A.M. Identification of the tightness and loading of one of the ends of the Euler-Bernoulli beam by its natural frequencies of oscillations. *Sib. zhurn. industr. matematiki = Journal of Applied and Industrial Mathematics*. 2017;20(1):3-10. (In Russ.).
12. Christensen R. *Introduction to the theory of viscoelasticity*. Moscow: Mir Publ.; 1974. 228 p. (In Russ.).

Информация об авторах

А.О. Ватульян – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой теории упругости, Институт математики, механики и компьютерных наук им. И.И. Воровича.

А.А. Варченко – магистр, кафедра теории упругости, Институт математики, механики и компьютерных наук им. И.И. Воровича.

В.О. Юров – кандидат физико-математических наук, старший преподаватель кафедры теории упругости, Институт математики, механики и компьютерных наук им. И.И. Воровича.

Information about the authors

A.O. Vatulyan - Doctor of Science (Physics and Mathematics), Professor, Head of the Department of Elasticity Theory, Vorovich Institute of Mathematics, Mechanics and Computer Sciences.

A.A. Varchenko - Master, Department of Elasticity Theory, Vorovich Institute of Mathematics, Mechanics and Computer Sciences.

V.O. Yurov - Candidate of Science (Physics and Mathematics), Senior Lecturer of the Department of Elasticity Theory, Vorovich Institute of Mathematics, Mechanics and Computer Sciences.

Статья поступила в редакцию 25.04.2023; одобрена после рецензирования 24.05.2023; принята к публикации 20.06.2023.
The article was submitted 25.04.2023; approved after reviewing 24.05.2023; accepted for publication 20.06.2023.

Научная статья

УДК 517.977.1, 62-50

doi: 10.18522/1026-2237-2023-3-13-22

СИНТЕЗ КВАЗИОПТИМАЛЬНЫХ ЗАКОНОВ УПРАВЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ ПРИНЦИПА ДЕКОМПОЗИЦИИ И РЕДУКЦИИ ЗАДАЧИ ЛАГРАНЖА К ИЗОПЕРИМЕТРИЧЕСКОЙ В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ

Владимир Олегович Зехцер^{1✉}, Андрей Александрович Костоглотов²

^{1, 2}Ростовский государственный университет путей сообщения, Ростов-на-Дону, Россия

¹vova-zehcer@yandex.ru[✉]

²kostoglotov@icloud.com

Аннотация. Принцип декомпозиции служит основой для методов построения универсальных законов управления механическими системами, которые обеспечивают устойчивость любого целевого движения из множества допустимых и не содержат информации о динамических параметрах объекта управления. Известно, что использование редукции задачи Лагранжа к изопериметрической позволяет получить эффективное решение задачи синтеза нелинейных законов управления, структура которого определяет вариант нелинейной коррекции законов управления принципа декомпозиции, что обеспечивает повышение быстродействия. Это возникает за счет того, что решение игровой задачи получено в предположении о наихудшем варианте возмущающих сил. При известной структуре управляемой системы или наличии информации о внешних силах коррекция закона управления дает возможность повышения качества управления в сравнении с традиционным решением.

Цель настоящей работы – повышение эффективности управления нелинейными динамическими системами в условиях неопределенности на основе использования структуры квазиоптимального управления, полученного на основе условия максимума функции обобщенной мощности и принципа освобожденности, и анализ эффективности полученного решения по быстродействию с использованием численного моделирования.

Ключевые слова: синтез законов управления, принцип декомпозиции, редукция задачи Лагранжа к изопериметрической, условие максимума функции обобщенной мощности, нелинейная коррекция, квазиоптимальное управление, быстродействие, условия неопределенности

Благодарности: исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-29-00812, <https://rscf.ru/project/23-29-00812>.

Для цитирования: Зехцер В.О., Костоглотов А.А. Синтез квазиоптимальных законов управления на основе принципа декомпозиции и редукции задачи Лагранжа к изопериметрической в условиях неопределенности // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2023. № 3. С. 13–22.

Статья опубликована на условиях лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY 4.0).

Original article

SYNTHESIS OF QUASI-OPTIMAL CONTROL LAWS BASED ON THE PRINCIPLE OF DECOMPOSITION AND REDUCTION OF THE LAGRANGE PROBLEM TO AN ISOPERIMETRIC ONE UNDER UNCERTAINTY

Vladimir O. Zekhtser^{1✉}, Andrey A. Kostoglotov²

^{1, 2}Rostov State Transport University, Rostov-on-Don, Russia

¹vova-zehcer@yandex.ru[✉]

²kostoglotov@icloud.com

© Зехцер В.О., Костоглотов А.А., 2023

Abstract. *The decomposition principle serves as the basis for methods for constructing universal laws of control of mechanical systems that ensure the stability of any target movement from a set of permissible ones and do not contain information about the dynamic parameters of the control object. It is known that the use of reduction of the Lagrange problem to an isoperimetric one makes it possible to obtain an effective solution to the problem of synthesis of nonlinear control laws, the structure of which determines the variant of nonlinear correction of the control laws of the decomposition principle, which provides an increase in performance. This happens due to the fact that the solution of the game problem is obtained under the assumption of the worst variant of disturbing forces. With a known structure of the controlled system or the availability of information about external forces based on their measurement, the correction of the control law makes it possible to improve the quality of control in comparison with the traditional solution.*

The purpose of this work is to increase the efficiency of control of nonlinear dynamic systems under uncertainty conditions based on the use of a quasi-optimal control structure obtained on the basis of the maximum condition of the generalized power function and the principle of release, and to analyze the effectiveness of the resulting solution in terms of speed using numerical simulation.

Keywords: *synthesis of control laws, decomposition principle, reduction of the Lagrange problem to an isoperimetric one, condition of the maximum of the generalized power function, nonlinear correction, quasi-optimal control, speed, uncertainty condition*

Acknowledgments: *the study was supported by the Russian Science Foundation grant No. 23-29-00812, <https://rscf.ru/project/23-29-00812>.*

For citation: *Zekhtser V.O., Kostoglotov A.A. Synthesis of Quasi-Optimal Control Laws Based on the Principle of Decomposition and Reduction of the Lagrange Problem to an Isoperimetric One Under Uncertainty. Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science. 2023;(3):13-22. (In Russ.).*

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC-BY 4.0).

Введение

Проблема синтеза законов управления механическими системами, которая является одной из центральных задач теории и практики управления, рассмотрена в работах Н.Г. Четаева, Д.Е. Охоцимского, Ф.Л. Черноусько. Как правило, задача синтеза управления решается при неполной информации о динамике системы, когда ее параметры (характеристики, свойства, коэффициенты) предполагаются не полностью известными. Такая постановка задачи является общепринятой и исследовалась еще в работах А.А. Андропова и Л.С. Понтрягина. Анализировались вопросы грубости (робастности) динамических систем, нечувствительности их свойств к изменениям параметров.

Известным традиционным подходом к решению задачи управления нелинейным объектом в условиях неопределённости являются линеаризация модели объекта управления и применение хорошо отлаженного аппарата линейного синтеза, содержащего широкий арсенал методов. Из их числа лишь отдельные могут быть использованы для синтеза управления неустойчивыми объектами. В исследованиях А.М. Формальского [1] для линеаризованной модели объекта управления получены решения, когда управление строится по принципу максимизации области притяжения, с использованием всех ресурсов управления для компенсации неустойчивой моды движения системы.

В работах Е.С. Пятницкого сформулирована задача управления для «черного ящика механической природы», где исследована предельная ситуация, когда информация о динамических параметрах системы являлась по существу недоступной и выдвинут принцип декомпозиции, который является одним из подходов к решению задачи управления в таких условиях.

В работах Ф.Л. Черноусько, И.М. Аняньевского [2, 3] на основе принципа декомпозиции задача управления решена в нелинейной постановке в условиях, когда внешние силы, действующие на динамическую систему, или ее инерционные характеристики считаются известными не полностью. Получена структура управления, которое является квазиоптимальным (близким к оптимальному по быстрдействию), если величины возмущений и нелинейностей в системе ограничены.

Принцип декомпозиции служит основой для методов построения универсальных законов управления механическими системами, которые обеспечивают устойчивость любого целевого движения из множества допустимых и не содержат информации о динамических параметрах объекта управления [4, 5].

Известно, что использование принципов нелинейной коррекции типовых законов управления обеспечивает повышение быстродействия [6]. Как показано в [7, 8], а позднее в [9] применение редукции задачи Лагранжа к изопериметрической может быть эффективно при решении задачи структурного синтеза нелинейных многорежимных законов управления. Полученная структура управления может служить основой для проведения нелинейной коррекции известных решений, что позволяет провести учет динамических свойств объекта управления и компенсировать погрешности линеаризации исходной нелинейной модели. Таким образом, возникает возможность повышения качества функционирования за счет того, что решение игровой задачи [10] получено в предположении о наихудшем варианте возмущающих сил. Соответственно, при известной структуре управляемой системы или наличии информации о внешних силах на основе их измерения коррекция закона управления может быть направлена на повышение качества управления в сравнении с решением дифференциальной игры, полученным в предположении наихудшего варианта внешних воздействий.

Цель работы – повышение эффективности управления нелинейными динамическими системами на основе использования структуры квазиоптимального управления [7, 8].

Научная задача – синтез квазиоптимальных законов управления на основе редукции задачи Лагранжа к изопериметрической в условиях неопределенности, их реализация в виде нелинейной коррекции решений принципа декомпозиции [10] и анализ эффективности полученного решения по критерию быстродействия.

Постановка задачи

При наличии внешних сил управляемая система в независимых обобщенных координатах $q_s, \dot{q}_s, s = \overline{1, n}$ описывается уравнениями Лагранжа второго рода

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_s} - \frac{\partial T}{\partial q_s} = f_s + u_s = Q_s, \quad s = \overline{1, n}, \quad (1)$$

где $f_s = f_s(q, \dot{q}, t)$ – обобщенные силы; T – кинетическая энергия; u_s – управляющие обобщенные силы, которые являются суммируемыми функциями, удовлетворяющими неравенствам

$$|u_s(t)| \leq h_s, \quad s = \overline{1, n}. \quad (2)$$

Положим, что величины h_s удовлетворяют условиям

$$\sup |f_s(q, \dot{q}, t)| < h_s, \quad \rho_s = \frac{f_s}{h_s} < 1, \quad s = \overline{1, n}. \quad (3)$$

Рассмотрим задачу синтеза квазиоптимальных управлений $u_s = u_s(q, \dot{q}), s = \overline{1, n}$, доставляющих минимум функционалу

$$J = \int_{t_0}^{t_k} F(q) dt, \quad (4)$$

где $F(q)$ – скалярная, непрерывная вместе со своими частными производными, положительно определенная целевая функция, при переводе системы из начального в конечное состояние

$$\begin{aligned} t = t_0, q(t_0) &= [q_{10}, \dots, q_{n0}]^T, \dot{q}(t_0) = [\dot{q}_{10}, \dots, \dot{q}_{n0}]^T, \\ t = t_k, q(t_k) &= 0, \dot{q}(t_k) = 0. \end{aligned} \quad (5)$$

Синтез квазиоптимального управления

Как показано в [9], краевая задача определения \dot{q}_s, q_s, Q_s , обеспечивающих минимум (4), может быть представлена в виде

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_s} - \frac{\partial T}{\partial q_s} &= Q_s + \lambda^{-1} V_s, \quad s = \overline{1, n}, \\ q_s(t_0) &= q_{s0}, \dot{q}_s(t_0) = \dot{q}_{s0}, q_s(t_1) = q_{s1}, \dot{q}_s(t_1) = \dot{q}_{s1}, \\ \Phi &= \sum_{s=1}^n Q_s(t) \dot{q}_s(t) \rightarrow \max, \quad t \in [t_0, t_1], \\ [\lambda(A - T) + F]_t^{t_1} &= 0, \quad t \in [t_0, t_1], \\ \lambda &= \frac{-\sum_{s=1}^n V_s}{\sum_{s=1}^n \left[-\frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_s} + \frac{\partial T}{\partial q_s} + Q_s \right]} \Bigg|_{t \in [t_0, t_1]} = \text{const}, \end{aligned} \quad (6)$$

где $A = \sum_{s=1}^n \int_{q_s(t_0)}^{q_s(t_1)} Q_s dq_s$ – работа обобщенных сил; λ – множитель Лагранжа; Φ – функция обобщенной мощности; $V_s = \partial F / \partial q_s$.

Решение системы (6) и построение программной экстремальной траектории является достаточно сложной задачей, которая может быть решена различными численными методами – пристрелки, итераций и т.д. с текущим поиском максимума функции обобщенной мощности. Но вместе с этим система (6) дает возможность записать решение задачи квазиоптимального структурного синтеза следующим образом: $u_s(\mathbf{q}(t), \dot{\mathbf{q}}(t)) = Q_s(\mathbf{q}(t), \dot{\mathbf{q}}(t)) + \lambda^{-1} V_s(\mathbf{q}(t)), s = \overline{1, n}$.

Условие максимума функции обобщенной мощности позволяет утверждать, что в квазиоптимальной системе знак обобщенной силы определяется знаком обобщенной скорости, что позволяет установить следующую связь: $Q_s(\mathbf{q}(t), \dot{\mathbf{q}}(t)) = \lambda^{-1} \mu_s(\mathbf{q}(t), \dot{\mathbf{q}}(t)) \dot{q}_s(t)$, где $\mu_s(\mathbf{q}(t), \dot{\mathbf{q}}(t))$ – знакопостоянная синтезирующая функция. Имеем следующую структуру управления:

$$u_s(\mathbf{q}(t), \dot{\mathbf{q}}(t)) = \lambda^{-1} (\mu_s(\mathbf{q}(t), \dot{\mathbf{q}}(t)) \dot{q}_s(t) + V_s(\mathbf{q}(t))), \quad s = \overline{1, n}. \quad (7)$$

Знак управления определяется в процессе синтеза на основе требований устойчивости управляемого движения [11].

При $\lambda \rightarrow 0$ управление (7) имеет релейный характер [9]

$$u_s(\mathbf{q}(t), \dot{\mathbf{q}}(t)) = h_s \text{sign}(\mu_s(\mathbf{q}(t), \dot{\mathbf{q}}(t)) \dot{q}_s(t) + V_s(\mathbf{q}(t))) = h_s \text{sign}[\Psi_s(\mathbf{q}(t), \dot{\mathbf{q}}(t))],$$

где функция $\Psi_s(\mathbf{q}(t), \dot{\mathbf{q}}(t)) = \mu_s(\mathbf{q}(t), \dot{\mathbf{q}}(t)) \dot{q}_s(t) + V_s(\mathbf{q}(t))$ определяет поверхность переключения.

Согласно [7], структура квазиоптимальной системы управления, полученная с использованием принципа освобождаемости, в случае главных обобщенных координат и квадратичного критерия качества при переводе (1) из произвольного состояния $q(t_0), \dot{q}(t_0)$ в состояние покоя $q(t_k) = 0, \dot{q}(t_k) = 0$ имеет следующий вид с точностью до параметров:

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_s} - \frac{\partial T}{\partial q_s} = -f_s - h_s \text{sign}\{\Psi_s\}, \quad s = \overline{1, n}, \quad (8)$$

$$\Psi_s(q_s, \dot{q}_s) = \alpha_{1s} \left[q_s + \alpha_{2s} \frac{|\dot{q}_s| \dot{q}_s}{|q_s| + \alpha_{3s}} \right], \quad s = \overline{1, n}, \quad (9)$$

$\alpha_{1s}, \alpha_{2s}, \alpha_{3s}$ – параметры закона управления.

Проведем анализ траекторий системы (8) из произвольного состояния в состояние покоя. Если выбрать линию переключения таким образом, что знак Ψ_s совпадает со знаком \dot{q}_s , то из теоремы механики о кинетической энергии [12] с учетом (3) следует утверждение Е.С. Пятницкого [11]

$$\dot{T} = \sum_{s=1}^n \dot{q}_s (f_s - h_s \text{sign}(\Psi_s)) \leq -2\delta \sqrt{T}, \quad \delta > 0.$$

Из этого неравенства вытекает, что $\sqrt{T} \leq \sqrt{T(t_0)} - \delta(t - t_0)$.

Это значит, что из любого положения система (8) за конечное время переходит в состояние покоя или в область заданного многообразия [11].

Применение принципа декомпозиции

Задачу (1)–(5) при соответствующих преобразованиях [2] можно свести к задаче приведения в состояние покоя системы n линейных подсистем с одной степенью свободы на основе метода декомпозиции.

Уравнения движения (1) запишем в виде [3]

$$A(q)\ddot{q} = u + s(q, \dot{q}, t). \quad (10)$$

Здесь $u = (u_1, \dots, u_n)^T$ – вектор управляющих сил; $s = (s_1, \dots, s_n)^T$ – вектор-функция

$$s(q, \dot{q}, t) = Q(q, \dot{q}, t) - \sum_{j,k=1}^n \Gamma_{jk} \dot{q}_j \dot{q}_k,$$

где $\Gamma_{jk} = (\Gamma_{1jk}, \dots, \Gamma_{njk})^T$ – n -мерные векторы с компонентами:

$$\Gamma_{ijk} = \frac{\partial a_{ij}}{\partial q_k} - \frac{1}{2} \frac{\partial a_{jk}}{\partial q_i}.$$

Заметим, что на управляющие воздействия в каждый момент времени наложены геометрические ограничения вида (2).

Рассмотрим случай, когда матрица; $A(q)$ близка к постоянной, т.е. представима в виде

$$A(q) = \bar{A} + \tilde{A}(q),$$

где \bar{A} – постоянная положительно определенная матрица; а $\tilde{A}(q)$ – неизвестная симметрическая матрица. Предполагается, что евклидовы нормы матриц $\tilde{A}(q)$ и $\bar{A}^{-1}(q)$ удовлетворяют неравенствам $\|\tilde{A}(q)\| \leq \mu$, $\mu > 0$, $\|\bar{A}^{-1}\| \leq \bar{\mu}^{-1}$, $\mu < \bar{\mu}$.

Здесь μ – достаточно малый параметр [2].

Кроме того, предположим, что

$$\left| \frac{\partial a_{jk}}{\partial q_i} \right| \leq C, \quad C > 0, \quad i, j, k = \overline{1, n}.$$

Умножим обе части уравнения (10) на $\bar{A}A^{-1}$. Обозначим $x_i = [\bar{A}q]_i$, получим

$$\dot{x}_i = u_i + v_i, \quad (11)$$

$$v_i = s_i - [\tilde{A}A^{-1}(u + s)]_i. \quad (12)$$

Установлено [2], что система (11), (12) эквивалентна уравнению (10) и (1).

Положим

$$|v_i| \leq \rho_i h_i, \quad \rho_i < 1, \quad (13)$$

где ρ_i – некоторые постоянные. Функции v_i будем рассматривать в (11) как неизвестные независимые ограниченные возмущения, не превосходящие допустимых значений управлений. Тогда исходная нелинейная система распадается на n линейных подсистем (i -я подсистема описывается i -м уравнением (11)), подверженных возмущениям, с одной степенью свободы каждая. Таким образом, для решения задачи достаточно решить n более простых задач управления для подсистем второго порядка. В каждой из этих задач требуется построить скалярное управление $u_i(x_i, \dot{x}_i)$, удовлетворяющее ограничению (2) и переводящее i -ю подсистему (11) из начального состояния (x_i^0, \dot{x}_i^0)

$$x_i^0 = [\bar{A}q^0]_i, \quad \dot{x}_i^0 = [\bar{A}\dot{q}^0]_i \quad (14)$$

в терминальное состояние $(0, 0)$ при любых допустимых возмущениях V_i , удовлетворяющих ограничению (13).

При каждом i рассмотрим задачу о приведении системы (11) в начало координат за кратчайшее время. Ее решение, как известно [13], может быть сведено к решению задачи оптимального быстрогодействия для системы

$$\dot{x}_i = (1 - \rho_i)u_i, \quad |u_i| \leq h_i \quad (15)$$

при тех же граничных условиях (14). Искомое управление $u_i(x_i, \dot{x}_i)$ и минимальное гарантированное время в игровой задаче (11), (14) совпадают, соответственно, с синтезом оптимального управления и временем оптимального быстрогодействия для задачи (14), (15). Отметим, что система (15) получается из (11) при возмущении, равном $v_i = -\rho_i u_i$, которое представляет собой оптимальное управление противника, выбирающего возмущение V_i с целью максимизации времени движения. Иными словами, наихудшее возмущение в данной задаче можно принять в виде $v_i = -\rho_i u_i$.

Решение задачи быстрогодействия, представленное в [2], имеет вид

$$u_i^{\text{opt}} = h_i \text{sign} \Psi'_i(x_i, \dot{x}_i) \quad \text{при } \Psi'_i \neq 0, \quad (16)$$

$$u_i^{\text{opt}} = h_i \text{sign} x_i = -h_i \text{sign} \dot{x}_i \quad \text{при } \Psi'_i = 0,$$

где $\Psi'_i(x_i, \dot{x}_i)$ – функция переключения:

$$\Psi'_i(x_i, \dot{x}_i) = - \left[x_i + \frac{\dot{x}_i |\dot{x}_i|}{[2h_i(1 - \rho_i)]} \right]. \quad (17)$$

Анализ решений (8), (9) и (16), (17) позволяет сделать заключение, что при выборе единой системы координат функция

$$\Psi_s(q_s, \dot{q}_s) = \alpha_{1s} \left[q_s + \alpha_{2s} \frac{|\dot{q}_s| \dot{q}_s}{|q_s| + \alpha_{3s}} \right]$$

является с учетом $\frac{1}{|q_s| + \alpha_{3s}}$ нелинейной коррекцией Ψ'_i при соответствующем выборе параметров.

Анализ эффективности квазиоптимальных законов управления на основе численного моделирования

Показано [10], что при изменении функции переключения (17), а значит, и (9) можно получить оценки времени движения в терминальную точку, которые оказываются меньше, чем полученные на основе решения игровой задачи. Это объясняется тем, что оценки получены для максимальной интенсивности внешних сил V_i , которые противодействуют управлению u_i . Таким образом, возникает возможность повышения качества функционирования за счет того, что решение игровой задачи получено в предположении о наихудшем варианте возмущающих сил. Соответственно, при известной структуре управляемой системы или наличии информации о внешних силах коррекция квазиоптимального закона быстрогодействия (16), (17) может быть направлена на повышение качества управления в сравнении с решением дифференциальной игры, полученным в предположении наихудшего варианта внешних воздействий. Таким образом, нелинейная коррекция (17) может быть использована для адаптации закона управления.

Рассмотрим пример использования разработанного закона управления (9) нелинейной неустойчивой системой с оценкой эффективности его применения. Положим, что применение процедуры декомпозиции приводит к тому, что исходная нелинейная система распадается на n линейных подсистем (i -я подсистема описывается i -м уравнением (11)), подверженных возмущениям, с одной степенью свободы каждая. Таким образом, для решения задачи достаточно решить n более простых задач управления для подсистем второго порядка.

В качестве одной из этих подсистем рассмотрим перевернутый маятник, который управляется приложенным к нему моментом u^* . Введем обозначения: φ – угол между маятником и вертикальной осью; m – масса маятника; r – радиус инерции маятника относительно точки подвеса; l – расстояние от точки подвеса маятника до его центра масс; g – ускорение свободного падения. Момент u^* приложен к этой точке и ограничен по абсолютной величине: $|u^*| \leq h^*$.

Уравнение движения обратного маятника можно представить в виде [1]

$$mr^2\ddot{\varphi} = mgl \sin \varphi + u^*, \quad (18)$$

После введения безразмерного времени τ и безразмерного момента силы u

$$\tau = t\sqrt{gl}/r, \quad u = u^*/mgl,$$

уравнение движения (18) можно представить в компактной форме [1]

$$\varphi'' = \sin \varphi + u, \quad (19)$$

где штрих ' означает дифференцирование по безразмерному времени τ .

В дальнейшем будем считать, если не оговорено иначе, что все вычисления и моделирование осуществляются в безразмерном виде, и переход к определенным размерностям не составляет трудности. Дифференцирование по безразмерному времени по умолчанию будем обозначать точкой.

Рассмотрим задачу управления системой (19). Ставится задача приведения маятника в малую окрестность положения неустойчивого равновесия $\varphi = 0$, $\dot{\varphi} = 0$ из заданного состояния $\varphi(0) = \varphi_0 > 0$, $\dot{\varphi}(0) = \dot{\varphi}_0 \geq 0$ в условиях ограничения на величину управления.

Закон управления для системы (19), полученный с использованием принципа декомпозиции на основе игрового подхода, представляет собой квазиоптимальное решение задачи быстродействия в условиях действия внешней силы: $\ddot{\varphi} = f + u$, имеет вид [2]

$$u = -h \operatorname{sign} \left(\varphi + \frac{|\dot{\varphi}|}{2h(1-\rho)} \dot{\varphi} \right), \quad (20)$$

где $\rho = \frac{f_{\max}}{h} = \frac{\sin \varphi_0}{h} < 1$; $u \leq h = \frac{h^*}{mgl}$.

Оценим эффективность применения нелинейной коррекции известного закона управления (20) с использованием условия максимума функции обобщенной мощности.

Нелинейная коррекция закона (20) с учетом (9) позволяет получить управление в виде

$$u = -h \operatorname{sign} \left\{ \varphi + \frac{1}{2h(1-\rho)} \frac{|\dot{\varphi}|}{|\varphi| + \alpha_3} \dot{\varphi} \right\}, \quad (21)$$

где $\alpha_1 = 1$; $\alpha_2 = \frac{1}{2h(1-\rho)}$; α_3 – параметр глубины коррекции линии переключения, который определяется путем численного моделирования.

Проведем численное моделирование при начальных условиях $\varphi_0 = 0,3$, $\dot{\varphi}_0 = 0$. Ограничение на управление h будем выбирать так, чтобы величина, определяющая ресурс управления в сравнении с внешним воздействием $\rho = \frac{f_{\max}}{h} = \frac{\sin \varphi_0}{h}$, изменялась в диапазоне от 0,61803 до 1, когда ресурсы управления невелики и при построении закона управления требуют учета наличия внешних сил [3].

Для оценки эффективности используем показатель быстродействия $J_{time} = \int_0^{t_k} dt$.

Расчет проведем методом Рунге – Кутты в безразмерном времени на интервале $t \in [0, T]$, $T = 15$ с шагом $\Delta t = 0,001$, точность достижения терминального состояния $\Delta = 0,5\%$, $t = t_k$.

Для случая $h = 0,3$, $\rho = 0,985$ результаты моделирования представлены на рис. 1–3, где φ_1 соответствует закону управления (20), φ_2 , φ_3 , φ_4 – закону управления (21) при $\alpha_3 = 1$, $\alpha_3 = 2$, $\alpha_3 = 5$ соответственно.

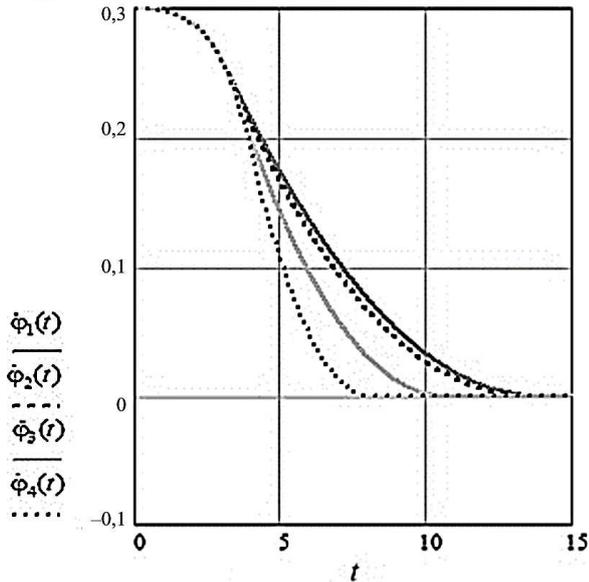


Рис. 1. Графики $\varphi(t)$ – угла между маятником и вертикальной осью / Fig. 1. Graphs of $\varphi(t)$ - angles between the pendulum and the vertical axis

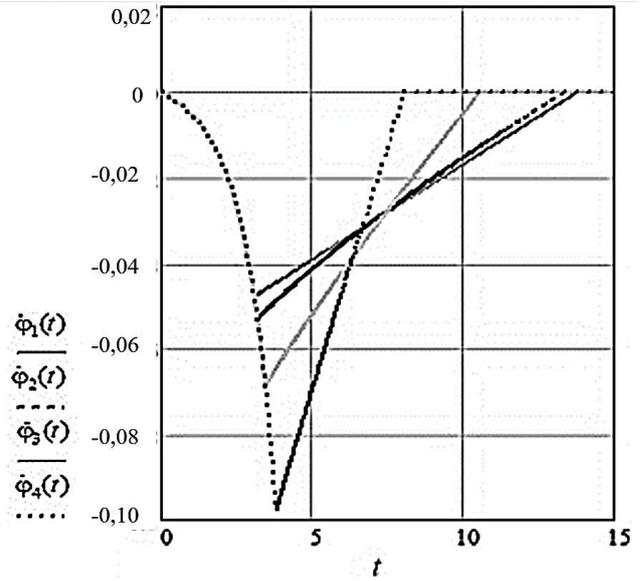


Рис. 2. Графики $\dot{\varphi}(t)$ – скорости изменения угла между маятником и вертикальной осью / Fig. 2. Graphs of $\dot{\varphi}(t)$ - change rate of the angle between the pendulum and the vertical axis

Значения критерия быстродействия в зависимости от параметра ρ для рассматриваемых законов представлены на рис. 4, где цифрой 1 обозначен закон управления (20), цифрой 2 – закон управления (23) с параметром $\alpha_3 = 1$, цифрой 3 – с параметром $\alpha_3 = 2$, цифрой 4 – с параметром $\alpha_3 = 5$.

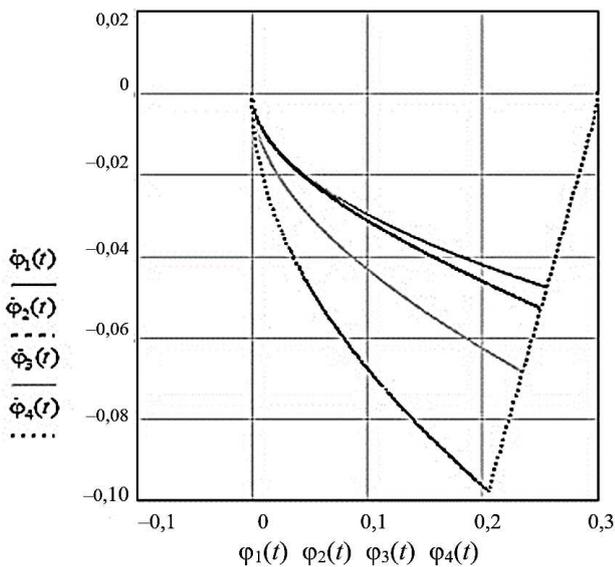


Рис. 3. Траектории управляемых систем на фазовой плоскости / Fig. 3. Trajectories of controlled systems on the phase plane

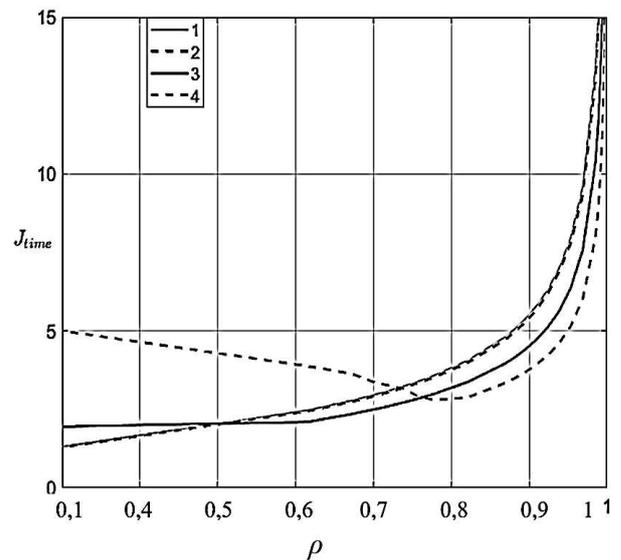


Рис. 4. Зависимость от ρ времени достижения терминального состояния (0,0) для различных законов управления / Fig. 4. Dependence on ρ of the time to reach the terminal state (0,0) for various control laws

Заключение

Анализ полученных результатов позволяет утверждать, что применение разработанного метода синтеза повысит быстродействие проектируемых систем управления в сравнении с известными решениями. Это дает возможность рассматривать процесс синтеза управления в комплексном варианте – использование классических методов для построения квазиоптимальных решений с дальнейшей нелинейной коррекцией на основе разработанного подхода. Условие максимума функции обобщенной мощности с успехом может быть использовано при решении задачи синтеза нелинейных законов управления в условиях неопределенности. Рассмотренный пример и полученные результаты моделирования показывают, что разработанный закон управления в условиях внешних воздействий высокой интенсивности на интервале значений параметра $\rho \in [0,61803...1]$ при $\alpha_3 \geq 2$ в сравнении с управлением [3], полученным на основе решения игровой задачи, обеспечивает повышение быстродействия. Достижение результата обеспечивается за счет изменения режима функционирования управляющей системы, что позволяет провести учет динамических свойств объекта управления и погрешности линеаризации исходной нелинейной модели.

Список источников

1. *Формальский А.М.* Управление движением неустойчивых объектов. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2012. 232 с. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=26012584> (дата обращения: 15.07.2021).
2. *Ананьевский И.М., Решмин С.А.* Непрерывное управление механической системой на основе метода декомпозиции // Изв. РАН. Теория и системы управления. 2014. № 4. С. 3–17.
3. *Черноузько Ф.Л.* Декомпозиция управления динамической системой // Докл. АН СССР. 1990. Т. 314, № 4. С. 801–805.
4. *Матюхин В.И.* Многорежимные законы управления движением твердого тела // Изв. РАН. Механика твердого тела. 2012. № 4. С. 21–31.
5. *Матюхин В.И., Пятницкий Е.С.* Управляемость механических систем в классе управлений, ограниченных вместе с производной // Автоматика и телемеханика. 2004. № 8. С. 14–38.
6. *Шеваль В.В., Дорохов В.И., Исаков С.А., Земцов В.И.* Двухзонные следящие системы. М.: Энергоатомиздат, 1984. 88 с.
7. *Лазаренко С.В., Костоглотов А.А., Агапов А.А., Ляценко З.В.* Синтез квазиоптимального многорежимного закона управления на основе условия максимума функции обобщенной мощности и принципа освобождаемости // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2020. № 4 (208). С. 29–35. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44526462> (дата обращения: 17.06.2021).
8. *Костоглотов А.А., Лазаренко С.В., Агапов А.А., Ляценко З.В.* Синтез квазиоптимальных многорежимных законов управления на основе условия максимума функции обобщенной мощности и условия трансверсальности // Вестн. РГУПС. 2020. № 4 (80). С. 170–179.
9. *Костоглотов А.А., Лазаренко С.В.* Метод квазиоптимального синтеза законов управления на основе редукции задачи Лагранжа к изопериметрической задаче с использованием асинхронного варьирования // Изв. РАН. Теория и системы управления. 2021. Т. 6, № 6. С. 3–12.
10. *Черноузько Ф.Л., Ананьевский И.М., Решмин С.А.* Методы управления нелинейными механическими системами. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. 328 с. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=24057190> (дата обращения: 06.07.2021).
11. *Пятницкий Е.С.* Принцип декомпозиции в управлении механическими системами // Докл. АН СССР. 1988. Т. 300, № 2. С. 300–303.
12. *Лурье А.И.* Аналитическая механика. М.: Физматгиз, 1961. 824 с.
13. *Красовский Н.Н.* Игровые задачи о встрече движений. М.: Наука, 1970. 420 с.

References

1. Formalsky A.M. *Motion control of unstable objects*. Moscow: FIZMATLIT Publ.; 2012. 232 p. Available from: <https://elibrary.ru/item.asp?id=26012584> [Accessed 15th July 2021]. (In Russ.).
2. Ananyevskiy I.M., Reshmin S.A. Continuous control of a mechanical system based on the decomposition method. *Izvestiya RAN. Teoriya i sistemy upravleniya = Journal of Computer and Systems Sciences International*. 2014;(4):3-17. (In Russ.).
3. Chernousko F.L. Decomposition of dynamic system control. *Dokl. Akad. nauk SSSR = Reports of USSR Academy of Sciences*. 1990;314(4):801-805. (In Russ.).

4. Matyukhin V.I. Multimode laws of motion control of a rigid body. *Izv. RAN. Mekhanika tverdogo tela = Mechanics of Solids*. 2012;(4):21-31. (In Russ.).
5. Matyukhin V.I., Pyatnitsky E.S. Controllability of mechanical systems in the class of controls limited together with a derivative. *Avtomatika i telemekhanika = Automation and Remote Control*. 2004;(8):14-38. (In Russ.).
6. Sheval V.V., Dorokhov V.I., Isakov S.A., Zemtsov V.I. *Two-zone tracking systems*. Moscow: Energoatomizdat Publ.; 1984. 88 p. (In Russ.).
7. Lazarenko S.V., Kostoglotov A.A., Agapov A.A., Lyachenko Z.V. Synthesis of a quasi-optimal multimode control law based on the maximum condition of the generalized power function and the principle of release. *Izv. vuzov. Sev.-Kavk. region. Estestv. nauki = Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science*. 2020;(4):29-35. Available from: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44526462> [Accessed 17th June 2021]. (In Russ.).
8. Kostoglotov A.A., Lazarenko S.V., Agapov A.A., Lyachenko Z.V. Synthesis of quasi-optimal multimode control laws based on the maximum condition of the generalized power function and the transversality condition. *Vestn. RGUPS = Bulletin of the Rostov State Transport University*. 2020;(4):170-179. (In Russ.).
9. Kostoglotov A.A., Lazarenko S.V. The method of quasi-optimal synthesis of control laws based on the reduction of the Lagrange problem to an isoperimetric problem using asynchronous variation. *Izvestiya RAN. Teoriya i sistemy upravleniya = Journal of Computer and Systems Sciences International*. 2021;6(6):3-12. (In Russ.).
10. Chernousko F.L., Ananyevsky I.M., Reshmin S.A. *Methods of control of nonlinear mechanical systems*. Moscow: FIZMATLIT Publ.; 2006. 328 p. Available from: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=24057190> [Accessed 6th July 2021]. (In Russ.).
11. Pyatnitsky E.S. The principle of decomposition in the management of mechanical systems. *Dokl. Akad. nauk SSSR = Reports of USSR Academy of Sciences*. 1988;300(2):300-303. (In Russ.).
12. Lurie A.I. *Analytical mechanics*. Moscow: Fizmatgiz Publ.; 1961. 824 p. (In Russ.).
13. Krasovskiy N.N. *Game problems about the meeting of movements*. Moscow: Nauka Publ.; 1970. 420 p. (In Russ.).

Информация об авторах

*В.О. Зехцер – младший научный сотрудник, кафедры связи на железнодорожном транспорте.
А.А. Костоглотов – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой связи на железнодорожном транспорте.*

Information about the authors

*V.O. Zekhtser - Junior Researcher, Department of Communication on Railway Transport.
A.A. Kostoglotov - Doctor of Science (Technical Science), Professor, Head of the Department of the Communication on Railway Transport.*

*Статья поступила в редакцию 12.04.2023; одобрена после рецензирования 13.05.2023; принята к публикации 20.06.2023.
The article was submitted 12.04.2023; approved after reviewing 13.05.2023; accepted for publication 20.06.2023.*

Научная статья
УДК 62-50; 519.3; 621.37
doi: 10.18522/1026-2237-2023-3-23-33

КВАЗИОПТИМАЛЬНЫЕ ЗАКОНЫ УПРАВЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ РЕДУКЦИИ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ ЗАДАЧ В ДИНАМИЧЕСКИХ АЛГОРИТМАХ ОЦЕНКИ ПОЛОЖЕНИЯ МАНЕВРИРУЮЩИХ ОБЪЕКТОВ

*Андрей Александрович Костоглотов*¹, *Антон Сергеевич Пеньков*^{2✉},
*Сергей Валерьевич Лазаренко*³

^{1, 2, 3} Ростовский государственный университет путей сообщения, Ростов-на-Дону, Россия

¹kostoglotov@icloud.com

²pencha@mail.ru

³rh3311@mail.ru

Аннотация. Предложен метод динамической оценки положения маневрирующих объектов на основе использования квазиоптимальных законов управления в режиме декомпозиции для построения модели динамической системы, описывающей движение маневрирующих объектов, аппроксимирующее реальную траекторию. Расширение пространства состояний с применением метода формирующего фильтра обеспечивает учет регулярной составляющей случайного процесса маневрирования.

На основе полученной стохастической марковской модели движения предложен алгоритм калмановского типа для динамической оценки положения маневрирующего объекта с использованием конечномерной аппроксимации. Определены выражения переходных матриц состояния и возмущения, необходимые для построения алгоритма.

Анализ результатов численного моделирования позволяет говорить о повышении точности оценки положения маневрирующего объекта при использовании алгоритма динамической оценки на базе квазиоптимальных законов управления в сравнении с фильтром на основе модели Зингера.

Ключевые слова: адаптация, декомпозиция, функция максимума обобщенной мощности, фильтр Калмана, управление, оценка, маневр, формирующий фильтр

Благодарности: исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-29-00812, <https://rscf.ru/project/23-29-00812>.

Для цитирования: Костоглотов А.А., Пеньков А.С., Лазаренко С.В. Квазиоптимальные законы управления на основе редукции экстремальных задач в динамических алгоритмах оценки положения маневрирующих объектов // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2023. № 3. С. 23–33.

Статья опубликована на условиях лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY 4.0).

Original article

QUASI-OPTIMAL CONTROL LAWS BASED ON THE REDUCTION OF EXTREMUM PROBLEMS IN DYNAMIC ALGORITHMS FOR ESTIMATING THE POSITION OF MANEUVERING OBJECTS

*Andrey A. Kostoglotov*¹, *Anton S. Penkov*^{2✉}, *Sergey V. Lazarenko*³

^{1, 2, 3} Rostov State Transport University, Rostov-on-Don, Russia

¹kostoglotov@icloud.com

²pencha@mail.ru

³rh3311@mail.ru

© Костоглотов А.А., Пеньков А.С., Лазаренко С.В., 2023

Abstract. A method is proposed for dynamically estimating the position of maneuvering objects based on the use of quasi-optimal control laws in the decomposition mode to construct a model of a dynamic system that describes the movement of maneuvering objects, approximating the real trajectory. The expansion of the state space using the shaping filter method ensures that the regular component of the random maneuvering process is taken into account.

Based on the obtained stochastic Markov motion model, a Kalman-type algorithm is proposed for dynamically estimating the position of a maneuvering object using a finite-dimensional approximation. The expressions for the transition matrices of the state and perturbation necessary for the construction of the algorithm are determined.

An analysis of the results of numerical simulation suggests an increase in the accuracy of estimating the position of a maneuvering object when using a dynamic estimation algorithm based on quasi-optimal control laws in comparison with a filter based on the Singer model.

Keywords: adaptation, decomposition, generalized power maximum function, Kalman filter, control, estimation, maneuver, shaping filter

Acknowledgments: the study was supported by the Russian Science Foundation Grant No. 23-29-00812, <https://rscf.ru/project/23-29-00812>.

For citation: Kostoglotov A.A., Penkov A.S., Lazarenko S.V. Quasi-Optimal Control Laws Based on the Reduction of Extremum Problems in Dynamic Algorithms for Estimating the Position of Maneuvering Objects. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2023;(3):23-33. (In Russ.).

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC-BY 4.0).

Введение

В последние годы существенно возрос интерес к исследованиям и разработкам в области автоматической цифровой обработки радиолокационной информации (ЦОРИ) [1]. Это обусловлено тем, что при решении задач управления движением маневрирующих летательных аппаратов (ЛА) и противовоздушной обороны поступающая от обзорных радиолокационных систем (РЛС) информация должна быть обработана для определения координат, скорости и характера объекта движения [2, 3]. Обычно модель маневрирующего ЛА задается с помощью процесса расширения пространства состояния [2–5] и построения уравнений для ускорения, вызывающего маневр. При этом используется кинематическая модель с неизвестными параметрами, что не согласуется с физической сущностью исследуемого процесса. Это позволяет сделать заключение, что существует резерв повышения точности за счет учета физических характеристик объекта наблюдения. Это может быть реализовано на основе использования динамической модели движения с квазиоптимальным законом управления [6] в совокупности с традиционным применением формирующего фильтра.

Целью работы является разработка метода динамической оценки положения маневрирующих объектов на основе использования квазиоптимальных законов управления.

Научная задача – получение математической модели движения с использованием редукции задачи Лагранжа к изопериметрической и синтез алгоритма динамической оценки положения маневрирующих объектов.

Постановка задачи синтеза адаптивной динамической модели движения

Теория систем позволяет сформировать единый подход к анализу и разработке автоматических систем сопровождения. Особенностью этой теории является то, что в качестве концептуальных подходов в неё введены принцип динамического изменения переменных, характеризующих состояние систем, метод оптимального управления при возмущениях и входных воздействиях, описание искаженной шумом информации с помощью случайных процессов [7].

Для математического описания поведения исследуемого физического объекта вводится понятие динамической системы. Рассмотрим совокупность динамических систем, моделирующих

динамику маневрирующих объектов, движение которых описывается уравнением Лагранжа 2-го рода [8]

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_s} \right) + \frac{\partial T}{\partial q_s} = Q_s, \quad s = \overline{1, \dots, n}, \quad (1)$$

где $T = T(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$ – кинетическая энергия; $\mathbf{q} = [q_1, \dots, q_n]^T \in R^n$ – вектор обобщенных координат; $\mathbf{Q}(t) = [Q_1(t), \dots, Q_n(t)]^T$ – вектор обобщенных сил; $n = \dim \mathbf{q}$ – число степеней свободы динамической системы; t – знак транспонирования; точкой обозначена производная по времени.

Если в качестве обобщенных координат выбраны координаты, в которых производятся наблюдения [9], уравнение наблюдения имеет линейный вид [10], что значительно снижает сложность алгоритмов оценки в системах траекторной обработки

$$\mathbf{z}(t) = \mathbf{H}\mathbf{q} + \mathbf{v}(t), \quad (2)$$

где $\mathbf{z}(t) = [z_1(t), \dots, z_n(t)]^T \in R^n$ – вектор наблюдения; \mathbf{H} – матрица наблюдения; $\mathbf{v}(t) \in R^n$ – вектор случайных воздействий на канал наблюдения с известной интенсивностью [4].

Задача построения модели движения (1) состоит в поиске обобщенных сил, обеспечивающих минимизацию квадратичного функционала невязки (3) с учетом информации о точностных характеристиках канала наблюдения

$$J(\mathbf{q}) = \frac{1}{2} \int_{t_0}^{t_1} (\mathbf{z} - \hat{\mathbf{q}})^T \mathbf{N}^{-1} (\mathbf{z} - \hat{\mathbf{q}}) dt = \frac{1}{2} \int_{t_0}^{t_1} F(\mathbf{z}, \hat{\mathbf{q}}) dt \rightarrow \min, \quad (3)$$

где $\mathbf{N} \in R^{n \times n}$ – весовая матрица, характеризующая интенсивность помех в канале наблюдений [10], знак $\hat{}$ означает оценку.

Синтез модели движения

Определение структуры модели движения (1), связанное с минимизацией функционала (3) при условии (2), может быть отнесено к классу обратных задач типа синтеза оптимального управления системами. Решение такой задачи может достигаться на элементах $Q_s(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$, нереализуемых или трудно реализуемых на практике, что следует из опыта применения классических методов оптимизации, например принципа максимума Л.С. Понтрягина, динамического программирования Р. Беллмана, а также различных вариантов градиентных методов. Трудность реализации в данном случае понимается в смысле недостаточной мощности вычислительных средств при решении двухточечной краевой задачи принципа максимума или уравнения Беллмана.

Данные трудности наиболее характерно проявляются при исследовании динамических систем, которые описываются нелинейными дифференциальными уравнениями. Поэтому необходимо ставить дополнительные условия [11] в виде ограничения на сложность элементов Q .

Известно [12], что для обратных задач типа синтеза оптимального управления введение дополнительных условий возможно и вполне обоснованно, поскольку требуется определить любое технически реализуемое (в данном случае – в смысле объема вычислительных затрат) решение, устойчивое к малым изменениям входных данных и обеспечивающее экстремум критерия качества (3).

В соответствии с положениями аналитической механики математическая модель движения (1) динамической системы является следствием принципа Гамильтона – Остроградского, со-

гласно которому выполняется условие $\delta'S = \int_{t_0}^{t_1} (\delta T + \delta'A) dt = 0$ для интеграла действия

$$S(\mathbf{q}, \mathbf{Q}) = \int_{t_0}^{t_1} (T + A) dt = r, \quad (4)$$

где r – заданное значение интеграла действия, такое, что $r > \tilde{r}$ (\tilde{r} – экстремальное значение интеграла действия) [6]; $A = \sum_{s=1}^n \int_{q_s(t_0)}^{q_s(t_1)} Q_s dq_s$ – работа обобщенных сил; t_0, t_1 – время начала и окончания наблюдений.

В [6] рассмотрена изопериметрическая задача поиска обобщенных сил \mathbf{Q} , на которых функционал (3) принимает минимальное значение при заданном значении функционала (4), что требует исследования расширенного функционала действия:

$$S^* = \lambda S + J = \int_{t_0}^{t_1} [\lambda(T + A) + F] dt \rightarrow \min,$$

где λ – множитель Лагранжа.

Для поиска обобщенных сил \mathbf{Q} необходимо решить следующую краевую задачу:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_s} - \frac{\partial T}{\partial q_s} &= \tilde{Q}_s + \lambda^{-1} \tilde{V}_s, \quad s = \overline{1, n}, \\ \tilde{q}_s(t_0) &= \tilde{q}_{s0}, \quad \dot{\tilde{q}}_s(t_0) = \dot{\tilde{q}}_{s0}, \quad \tilde{q}_s(t_1) = \tilde{q}_{s1}, \quad \dot{\tilde{q}}_s(t_1) = \dot{\tilde{q}}_{s1}, \\ \tilde{\Phi} &= \sum_{s=1}^n \tilde{Q}_s(t) \dot{\tilde{q}}_s(t) \rightarrow \max, \quad t \in [t_0, t_1], \\ [\lambda(A - T) + F]_{t_0}^{t_1} &= 0, \quad t \in [t_0, t_1], \end{aligned}$$

$$\lambda = \frac{-\sum_{s=1}^n \tilde{V}_s}{\sum_{s=1}^n \left[-\frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_s} + \frac{\partial T}{\partial q_s} + \tilde{Q}_s \right]} \Bigg|_{t \in [t_0, t_1]} = \text{const.}$$

Здесь $[\lambda(A - T) + F]_{t_0}^{t_1} = 0, t \in [t_0, t_1]$, – требование выполнения энергетического баланса на экстремальной траектории;

$$\lambda = \frac{-\sum_{s=1}^n \tilde{V}_s}{\sum_{s=1}^n \left[-\frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_s} + \frac{\partial T}{\partial q_s} + \tilde{Q}_s \right]} \Bigg|_{t \in [\tau, t_1]} \quad - \text{множитель Лагранжа; } \tilde{\Phi} = \sum_{s=1}^n \tilde{Q}_s(t) \dot{\tilde{q}}_s(t) \rightarrow \max, \quad t \in [t_0, t_1], -$$

необходимое условие обеспечения максимума функции обобщенной мощности всюду на экстремальной траектории.

Определение значения интеграла действия r , как правило, представляет некоторые трудности, однако измерительные системы всегда характеризуются техническими параметрами, которые определяются заданной погрешностью измерения с известной дисперсией D .

Эквивалентной задаче (3), (4) является оптимизационная задача

$$S(\mathbf{q}, \mathbf{Q}) \rightarrow \min, \quad J(\mathbf{q}) = D. \tag{5}$$

С учетом этого можно говорить о том, что в задачах оценки множество траекторий, для которых выполняется (5), определяет структуру следующей модели:

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_s} \right) + \frac{\partial T}{\partial q_s} = \lambda^{-1} \left[\mu_s(q_s, \dot{q}_s) \dot{q}_s + \frac{\partial F}{\partial q_s} \right], & s = \overline{1, n}, \\ (A - T) + \lambda^{-1} F \Big|_{t_0}^{t_1} = 0, \end{cases} \tag{6}$$

где $\mu_s(q_s, \dot{q}_s)$ – синтезирующая функция; $T = \frac{1}{2} \dot{\mathbf{q}}^T \mathbf{A}(\mathbf{q}) \dot{\mathbf{q}}$, $\mathbf{A}(\mathbf{q}) \in R^{n \times n}$ – матрица квадратичной формы.

При незначительных изменениях кинетической энергии за время наблюдения при разложении $\mathbf{A}(\mathbf{q})$ в ряд Тейлора

$$\mathbf{A}(\mathbf{q}_0 + \Delta\mathbf{q}) = \mathbf{A}(\mathbf{q}_0) + \mathbf{A}'(\mathbf{q}_0)\Delta\mathbf{q} + \dots + \frac{\mathbf{A}^{(n)}(\mathbf{q}_0)\Delta\mathbf{q}^n}{n!}$$

достаточно ограничиться первыми двумя слагаемыми: $\mathbf{A}(\mathbf{q}_0 + \Delta\mathbf{q}) \approx \mathbf{A}(\mathbf{q}_0) + \mathbf{A}'(\mathbf{q}_0)\Delta\mathbf{q}$.

Тогда матрицу $\mathbf{A}(\mathbf{q})$ можно представить как

$$\mathbf{A}(\mathbf{q}) = \bar{\mathbf{A}} + \tilde{\mathbf{A}}(\mathbf{q}), \tag{7}$$

где $\bar{\mathbf{A}}$ и $\tilde{\mathbf{A}}(\mathbf{q})$ – постоянная положительно-определенная и неизвестная симметричная матрицы соответственно.

Евклидовы нормы матриц $\tilde{\mathbf{A}}(\mathbf{q})$ и $\bar{\mathbf{A}}^{-1}(\mathbf{q})$ удовлетворяют неравенствам:

$$\|\tilde{\mathbf{A}}(\mathbf{q})\| \leq \mu, \quad \mu > 0, \tag{8}$$

$$\|\bar{\mathbf{A}}^{-1}(\mathbf{q})\| \leq \bar{\mu}^{-1}, \quad \mu < \bar{\mu}, \tag{9}$$

где μ – достаточно малый параметр [13].

Выполнение (7)–(9) позволяет воспользоваться одним из возможных подходов к решению задач построения моделей управляемых систем без привлечения линейного приближения – принципом декомпозиции [9, 14, 15], суть которого заключается в следующем: с помощью допустимого управления полностью устраняется динамическое взаимовлияние между элементами. Тогда система (1) выводится на движение в режиме декомпозиции [15] за счет выбора квазиоптимального управления [6], устраняющего взаимовлияние, обеспечивая заданное значение функционала, характеризующего качество процесса оценки состояния. Это значит, что нелинейная многосвязная динамическая система высокого порядка через конечный интервал времени начинает двигаться как более простая система, состоящая из совокупности отдельных подсистем, что можно использовать при построении модели исследуемой системы с учетом выбора квазиоптимальной обратной связи [14].

Рассмотрим вариант построения модели, когда работа обобщенных сил $A=0$ во втором уравнении системы (6), что соответствует приближенному (прогнозному) движению объекта в режиме декомпозиции [9, 14, 16, 17] $T = \lambda^{-1}F$, или $\dot{\mathbf{q}}^T \mathbf{A}^* \dot{\mathbf{q}} = \lambda^{-1}(\mathbf{z} - \mathbf{q})^T \mathbf{N}^{-1}(\mathbf{z} - \mathbf{q})$, где \mathbf{A}^* – диагональная матрица, характеризующая режим декомпозиции.

В режиме декомпозиции [18] движение системы задается совокупностью не связанных между собой линейных дифференциальных уравнений Лагранжа (6). Тогда систему можно представить как объединение невзаимодействующих подсистем [15], что, как показано в [9, 14], позволяет получить уравнение модели, аппроксимирующее реальное движение в компактной форме:

$$\ddot{q}_s = -\sqrt{\lambda_s} \dot{q}_s - \lambda_s(z_s - q_s), \quad s = \overline{1, n}, \tag{10}$$

где $\lambda_s = \lambda^{-1} a_{ss}^{*-1} N_{ss}^{-1}$, $s = \overline{1, n}$, – параметр адаптации; a_{ss}^* – элементы матрицы квадратичной формы кинетической энергии в режиме декомпозиции; N_{ss} – элементы диагональной весовой матрицы \mathbf{N} .

Модель (10) требует адаптации по параметру λ_s и может быть использована для построения адаптивного фильтра оценки состояния калмановской структуры. Адаптация модели может быть проведена для типовых траекторий движения с учетом маневра цели по критерию (5).

Таким образом, выражение (10) представляет собой адаптацию исходной модели (1) по заданной типовой траектории с декомпозицией по целевому функционалу $J(\mathbf{q})$.

После проведения адаптации $z_s(t) - \hat{q}_s(t) = \eta_s(t)$ [19] получим случайный процесс, ковариационная функция которого не равняется нулю для несовпадающих моментов времени. Другими словами, рассматривается случайный процесс $\eta_s(t)$, такой, что $\text{cov}\{\eta_s(t), \eta_s(\tau)\} \neq 0$ для $\tau \neq t$ [20]. В частности, такой шум рассматривается как процесс на выходе линейной динамической системы, на вход которой воздействует белый шум. В качестве процесса $\eta_s(t)$ традиционно используется модель марковского типа

$$\dot{\eta}_s(t) = \alpha_s(t)\eta_s(t) + w_s(t), \quad s = \overline{1, n}, \quad (11)$$

где $\alpha_s(t)$ – величина, обратная средней продолжительности маневра [21]; $w_s(t)$ – белый шум с нулевым средним; $\text{cov}\{w_s(t), w_s(\tau)\} = \psi_s(t)\delta(t - \tau)$; $\text{cov}\{w_s(t), \eta_s(\tau)\} = 0$; $\psi_s(t)$ – спектральная плотность $w_s(t)$.

С учетом (10), (11) адаптивная модель эволюции состояния системы для синтеза фильтра сопровождения принимает вид

$$\begin{cases} \dot{q}_s(t) = -\sqrt{\lambda_s} \dot{q}_s(t) + \lambda_s \eta_s(t), \\ \dot{\eta}_s(t) = \alpha_s(t)\eta_s(t) + w_s(t), \end{cases} \quad s = \overline{1, n}, \quad (12)$$

а модель наблюдения $z_s(t) = h_{ss}q_s(t) + v_s(t)$, $s = \overline{1, n}$, где h_{ss} – элементы матрицы \mathbf{H} , которая в случае отсутствия корреляции между каналами наблюдения является диагональной.

Синтез адаптивного алгоритма оценки состояния динамических систем в сферических координатах с применением марковского подхода

Марковская теория оптимального оценивания случайных процессов представляет собой созданный на единой основе марковских и условных марковских процессов корректный векторно-матричный математический аппарат, базирующийся на основных положениях теории статистических решений. Исходя из статистических характеристик процессов, моделирующих маневр, случайный процесс управления может описываться автокоррелированной (марковской) последовательностью.

Для получения модели дискретного марковского процесса воспользуемся процедурой расширения пространства состояний для системы (12), где обобщенные координаты q_1 , q_2 , и q_3 – азимут, угол места и дальность соответственно:

$$\begin{cases} x_{1,s}(t) = q_s(t), & \dot{x}_{1,s}(t) = x_{2,s}(t), \\ x_{2,s}(t) = \dot{q}_s(t), & \dot{x}_{2,s}(t) = -\sqrt{\lambda_s} x_{2,s}(t) - \lambda_s x_{3,s}(t), \\ x_{3,s}(t) = \eta_s(t), & \dot{x}_{3,s}(t) = -\alpha_s x_{3,s}(t) + w_s(t), \end{cases} \quad s = \overline{1, 3},$$

или в векторно-матричном виде для каждой степени свободы

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{F}\mathbf{x}(t) + \mathbf{G}w(t), \quad (13)$$

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \begin{bmatrix} \dot{x}_1(t) \\ \dot{x}_2(t) \\ \dot{x}_3(t) \end{bmatrix}, \quad \mathbf{F} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & -\sqrt{\lambda_s} & \lambda_s \\ 0 & 0 & -\alpha_s \end{bmatrix}, \quad \mathbf{G} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix},$$

где $\mathbf{x}(t)$ – расширенный вектор состояния; \mathbf{F} – переходная матрица состояния; \mathbf{G} – вектор возмущения.

Уравнение наблюдения имеет вид

$$\mathbf{z}(t) = \mathbf{H}\mathbf{x}(t) + \mathbf{v}(t), \quad (14)$$

где $\mathbf{z}(t) = [z_1(t) \ z_2(t) \ z_3(t)]^T$ – вектор наблюдения; $\mathbf{H} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$ – матрица наблюдения;

$\mathbf{v}(t) = [v(t) \ 0 \ 0]^T$ – вектор шума наблюдения.

С помощью стандартной процедуры дискретизации непрерывной модели, заданной (13), (14) при $\Delta t = \text{const}$, осуществляется переход к дискретной модели, что обеспечивает статистическое представление типового поведения цели и позволяет записать дискретную модель состояния и наблюдения как

$$\mathbf{x}(i) = \mathbf{\Phi}\mathbf{x}(i-1) + \mathbf{\Gamma}w(i), \quad (15)$$

$$\mathbf{z}(i) = \mathbf{H}\mathbf{x}(i) + \mathbf{v}(i), \quad (16)$$

где для модели движения на базе квазиоптимальных законов управления

$$\Phi = \begin{bmatrix} \varphi_{11} & \varphi_{12} & \varphi_{13} \\ 0 & \varphi_{22} & \varphi_{23} \\ 0 & 0 & \varphi_{33} \end{bmatrix}, \Gamma = \begin{bmatrix} \gamma_1 \\ \gamma_2 \\ \gamma_3 \end{bmatrix}, \quad (17)$$

где $\varphi_{11} = 1$, $\varphi_{12} = \Delta t - 0,5\sqrt{\lambda_s}\Delta t^2$, $\varphi_{13} = 0,5\lambda_s\Delta t^2$,

$\varphi_{22} = 1 - \sqrt{\lambda_s}\Delta t + 0,5\lambda_s\Delta t^2$, $\varphi_{23} = \lambda_s\Delta t - 0,5\Delta t^2(\lambda_s\sqrt{\lambda_s} + \alpha_s\lambda_s)$, $\varphi_{33} = 1 - \alpha_s\Delta t + 0,5\alpha_s\Delta t^2$;

$\gamma_1 = \frac{\lambda_s\Delta t^3}{6}$, $\gamma_2 = \frac{\lambda_s\Delta t^2}{2} - \frac{\sqrt{\lambda_s^3}\Delta t^3}{6} + \frac{\alpha_s\lambda_s\Delta t^3}{6}$, $\gamma_3 = \Delta t - \alpha_s\frac{\Delta t^2}{2} + \frac{\alpha_s\Delta t^3}{6}$.

Уравнения фильтра имеют следующий вид [5]:

$$\hat{\mathbf{x}}(i|i-1) = \Phi\hat{\mathbf{x}}(i-1),$$

$$\hat{\mathbf{x}}(i) = \hat{\mathbf{x}}(i|i-1) + \mathbf{P}(i)\mathbf{H}^T\mathbf{R}^{-1}\{\mathbf{z}(i) - \mathbf{H}\hat{\mathbf{x}}(i|i-1)\},$$

$$\mathbf{P}(i|i-1) = \Gamma\mathbf{Q}\Gamma^T + \Phi\mathbf{P}(i-1)\Phi^T,$$

$$\mathbf{P}(i) = \mathbf{P}(i|i-1) - \mathbf{P}(i|i-1)\mathbf{H}^T[\mathbf{H}\mathbf{P}(i|i-1)\mathbf{H}^T + \mathbf{R}]^{-1}\mathbf{H}\mathbf{P}(i|i-1),$$

где $\hat{\mathbf{x}}(i)$ – оценка состояния системы; $\hat{\mathbf{x}}(i|i-1)$ – одношаговое предсказание; $\mathbf{P}(i|i-1)$ – априорная дисперсия; $\mathbf{P}(i)$ – дисперсия ошибки оценки.

Считая шумы $\mathbf{w}(t)$ и $\mathbf{v}(t)$ некоррелированными [22], ковариационные матрицы шумов состояния и наблюдения можно представить в виде [21, 22]

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} \frac{2\alpha_s\sigma_{Ms}^2}{\Delta t} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{2\alpha_s\sigma_{Ms}^2}{\Delta t} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{2\alpha_s\sigma_{Ms}^2}{\Delta t} \end{bmatrix}, \mathbf{R} = \begin{bmatrix} \sigma_s^2 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_s^2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_s^2 \end{bmatrix},$$

где σ_s – среднеквадратичное отклонение (СКО) шума наблюдения; σ_M^2 – дисперсия ускорения цели [21].

Оценка эффективности предлагаемого алгоритма

Проведено численное моделирование процесса оценки параметров состояния ЛА с использованием предлагаемого алгоритма.

Исходные данные для моделирования взяты из траектории движения ЛА в сферических координатах, полученной с использованием технологии автоматического зависимого наблюдения вещательного типа (АЗН-В) (данная траектория принимается в качестве эталонной). Для реализации измерительных данных эталонная траектория искажается шумом типовых РЛС:

- $\sigma_\varphi = 0,01$ рад – СКО по азимуту;
- $\sigma_\theta = 0,02$ рад – СКО по углу места;
- $\sigma_r = 400$ м – СКО по дальности.

Полученные измерительные данные обрабатываются по каждой координате в соответствии с алгоритмом на основе модели (15) – (17), а также алгоритмом на основе модели Зингера [21]. Усредненные на 1000 реализациях траектории в декартовых координатах представлены на рис. 1.

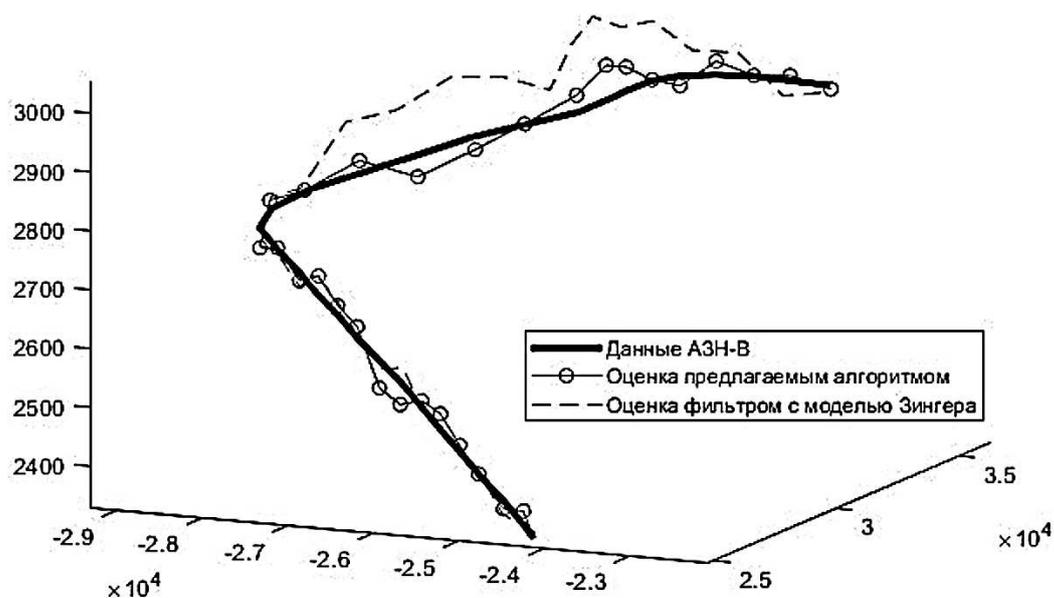


Рис. 1. Оценка траектории ЛА предлагаемым алгоритмом в сравнении с фильтром Зингера и данными АЗН-В / Fig. 1. Estimation of the aircraft trajectory by the proposed algorithm in comparison with the Singer filter and ADS-B data

Анализ полученных результатов показывает повышение точности определения положения ЛА при использовании модели движения на базе квазиоптимальных законов управления. Эффект достигается за счет учета динамических характеристик объекта наблюдения и наиболее ярко проявляется при оценке дальности (рис. 2).

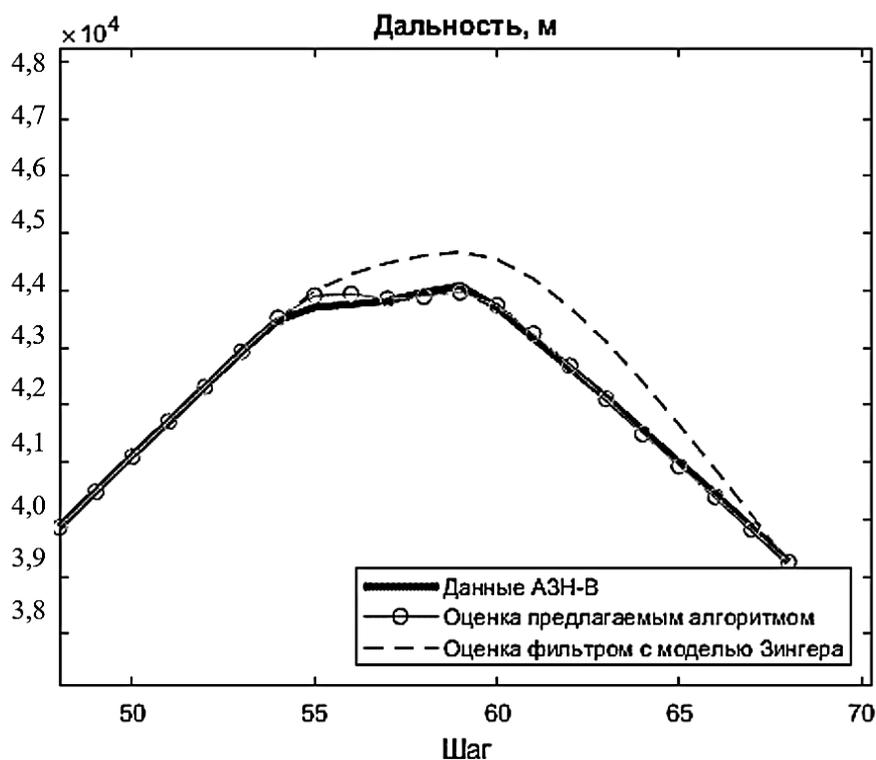


Рис. 2. Оценка дальности до ЛА предлагаемым алгоритмом в сравнении с фильтром Зингера и данными АЗН-В / Fig. 2. Estimation of the distance to the aircraft by the proposed algorithm in comparison with the Singer filter and ADS-B data

В результате проведенного статистического моделирования получены численные значения СКО (σ) оценки траектории, которые сведены в таблицу.

СКО оценки траектории движения ЛА предлагаемым алгоритмом в сравнении с алгоритмом на основе модели Зингера / RMS estimate of the aircraft motion trajectory by the proposed algorithm in searches with an algorithm based on the Singer model

Координаты	Ошибки	Алгоритм Зингера	Предлагаемый алгоритм
Сферические	σ_φ , рад	$379 \cdot 10^{-6}$	$376 \cdot 10^{-6}$
	σ_θ , рад	$529 \cdot 10^{-6}$	$522 \cdot 10^{-6}$
	σ_r , м	316	95
Декартовы	σ_X , м	193	115
	σ_Y , м	249	145
	σ_Z , м	30	18
	$\sqrt{\sigma_X^2 + \sigma_Y^2 + \sigma_Z^2}$, м	317	215

Анализ результатов численного моделирования позволяет сделать вывод о повышении точности определения координат ЛА на интервале маневра в рассмотренном примере на 32 % при использовании алгоритма на базе квазиоптимальных законов управления с расширением пространства состояний в сравнении с алгоритмом на основе модели Зингера.

Заключение

Разработка современных и эффективных систем сопровождения требует синтеза модели движения с учетом физических особенностей маневрирующего объекта.

Использование квазиоптимального закона управления в режиме декомпозиции позволяет получить уравнение модели, аппроксимирующее реальное движение. Расширение пространства состояний с применением метода формирующего фильтра обеспечивает учет регулярной составляющей случайного процесса.

Синтез динамического алгоритма оценки положения маневрирующего объекта основан на нахождении конечномерной аппроксимации полученной модели с расширением пространства состояний и приведением ее к виду марковского процесса. В результате проделанных операций получены выражения переходных матриц состояния и возмущения, необходимых для построения алгоритма динамической оценки калмановского типа.

Результаты численного моделирования позволяют утверждать, что использование алгоритма динамической оценки на базе квазиоптимальных законов управления обеспечивает повышение точности оценки положения маневрирующего объекта в сравнении с фильтром на основе модели Зингера.

Список источников

1. Панасюк Ю.Н., Пудовкин А.П. Обработка радиолокационной информации в радиотехнических системах: учеб. пособие. Тамбов: ТГТУ, 2016. 84 с.
2. Фарина А.Н., Студер Ф.И. Цифровая обработка радиолокационной информации. Сопровождение целей. М.: Радио и связь, 1993. 320 с.
3. Бочкарев А.М. Цифровая обработка радиолокационной информации при сопровождении целей // Зарубежная радиоэлектроника. 1991. № 3. С. 3–22.
4. Bar-Shalom Y. Estimation with applications to tracking and navigation. John Wiley & Sons, 2001. 580 p.
5. Сейдж Э.П., Мелса Дж.Л. Идентификация систем управления. М.: Наука, 1974. 248 с.
6. Костоготов А.А., Лазаренко С.В. Метод квазиоптимального синтеза законов управления на основе редукции задачи Лагранжа к изопериметрической задаче с использованием асинхронного варьирования // Изв. РАН. Теория и системы управления. 2021. № 6. С. 3–12.

7. Черкесова Л.А. [и др.]. Применение технологий искусственного интеллекта и теории поддержки принятия решений в задачах информационной безопасности. Ростов н/Д. : Изд. центр ДГТУ, 2023. 488 с.
8. Лурье А.И. Аналитическая механика. М.: GIFML, 1961. 824 с.
9. Костоглотов А.А., Пеньков А.С., Лазаренко С.В. Структурно-параметрический синтез фильтра сопровождения на базе декомпозиции по целевому функционалу с адаптацией к возмущениям траектории // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2021. Т. 19, № 2. С. 14–25.
10. Костоглотов А.А., Кузнецов А.А., Лазаренко С.В. Синтез модели процесса с нестационарными возмущениями на основе максимума функции обобщенной мощности // Матем. моделирование. 2016. Т. 28, № 12. С. 133–142.
11. Костоглотов А.А., Таран В.Н. Оптимальная фильтрация состояния пространственно-распределенных объектов на основе метода регуляризации А.Н. Тихонова // Повышение эффективности средств обработки информации на базе математического и машинного моделирования: материалы Меж-республ. конф. Тамбов, 1993. С. 135.
12. Коробейников В.П., Мельникова Н.С., Рязанов Е.В. Теория конечного взрыва. М.: Наука, 1961. 332 с.
13. Черноусько Ф.Л., Ананьевский И.М., Решмин С.А. Методы управления нелинейными механическими системами. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. 328 с.
14. Костоглотов А.А., Пеньков А.С., Лазаренко С.В. Метод синтеза адаптивных алгоритмов оценки параметров динамических систем на основе принципа декомпозиции и методологии объединенного принципа максимума // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2020. № 4 (208). С. 22–28.
15. Пятницкий Е.С. Принцип декомпозиции в управлении механическими системам // Докл. АН СССР. 1988. Т. 300, № 2. С. 300–303.
16. Костоглотов А.А., Пеньков А.С., Лазаренко С.В. Структурно-параметрический синтез адаптивного фильтра оценки состояния динамических систем с использованием принципа декомпозиции // Вестн. Ростовского гос. ун-та путей сообщения. 2020. № 4 (80). С. 180–188.
17. Kostoglotov A.A., Penkov A.S., Pavlov V.M., Lazarenko S.V. Analysis of the possibility of intellectualization of algorithms for estimating the parameters of dynamic systems based on adaptive model of motion // Lecture Notes in Networks and Systems. 2022. Vol. 330. P. 589–600.
18. Пятницкий Е.С. Синтез иерархических систем управления механическими и электромеханическими объектами на принципе декомпозиции. I // Автоматика и телемеханика. 1989. Т. 50, № 1. С. 87–99.
19. Андраштитов Д.С., Костоглотов А.А., Лазаренко С.В., Пеньков А.С. Метод синтеза алгоритмов сопровождения с использованием формирующего фильтра и квазиоптимальных законов управления маневрирующими объектами // Радиотехника. 2023. Т. 87, № 2. С. 93–104.
20. Сейдж Э., Мелс Дж. Теория оценивания и ее применение в связи и управлении. М.: Связь, 1976. 496 с.
21. Зингер Р.А. Оценка характеристик оптимального фильтра для слежения за пилотируемой целью // Зарубежная радиоэлектроника. 1971. № 8. С. 40–57.
22. Матвеев В.В., Распопов В.Я. Основы построения бесплатформенных инерциальных навигационных систем. СПб.: Концерн «ЦНИИ "Электрон"», 2009. 280 с.

References

1. Panasyuk Yu.N., Pudovkin A.P. *Processing of radar information in radio engineering systems: a tutorial*. Tambov: Tambov State Technical University Press; 2016. 84 p. (In Russ.).
2. Farina A.N., Studer F.I. *Digital processing of radar information. Goal tracking*. Moscow: Radio i svyaz' Publ.; 1993. 320 p. (In Russ.).
3. Bochkarev A.M. Digital processing of radar information when tracking targets. *Zarubezhnaya radioelektronika = Foreign Radioelectronics*. 1991;(3):3-22. (In Russ.).
4. Bar-Shalom Y. *Estimation with applications to tracking and navigation*. John Wiley & Sons, 2001. 580 p.
5. Sage E.P., Melsa J.L. *Identification of control systems*. Moscow: Nauka Publ.; 1974. 248 p. (In Russ.).
6. Kostoglotov A.A., Lazarenko S.V. A method for quasi-optimal synthesis of control laws based on the reduction of the Lagrange problem to an isoperimetric problem using asynchronous variation. *Izvestiya RAN. Teoriya i sistemy upravleniya = Journal of Computer and Systems Sciences International*. 2021;(6):3-12. (In Russ.).
7. Cherkesova L.A. et al. *Application of artificial intelligence technologies and decision support theory in information security problems*. Rostov-on-Don: DSTU Publishing Center; 2023. 488 p. (In Russ.).
8. Lurie A.I. *Analytical mechanics*. Moscow: GIFML Publ.; 1961. 824 p. (In Russ.).
9. Kostoglotov A.A., Penkov A.S., Lazarenko S.V. Structural-parametric synthesis of the tracking filter based on decomposition by the target functional with adaptation to trajectory disturbances. *Informatsionno-izmeritel'nye i upravlyayushchie sistemy = Information-Measuring and Control Systems*. 2021;19(2):14-25. (In Russ.).

10. Kostoglotov A.A., Kuznetsov A.A., Lazarenko S.V. Synthesis of a process model with non-stationary disturbances based on the maximum of the generalized power function. *Matem. modelirovanie = Mathematical Models and Computer Simulations*. 2016;28(12):133-142. (In Russ.).
11. Kostoglotov A.A., Taran V.N. Optimal filtering of the state of spatially distributed objects based on the regularization method of A.N. Tikhonov. *Improving the efficiency of information processing tools based on mathematical and machine modeling*. Proceedings of the Inter-Republican Conference. Tambov, 1993:135. (In Russ.).
12. Korobeinikov V.P., Melnikova N.S., Ryazanov E.V. *Theory of the final explosion*. Moscow: Nauka Publ.; 1961. 332 p. (In Russ.).
13. Chernous'ko F.L., Ananyevskiy I.M., Reshmin S.A. *Control methods for nonlinear mechanical systems*. Moscow: FIZMATLIT Publ.; 2006. 328 p. (In Russ.).
14. Kostoglotov A.A., Penkov A.S., Lazarenko S.V. Synthesis method for adaptive algorithms for estimating the parameters of dynamic systems based on the decomposition principle and the methodology of the combined maximum principle. *Sev.-Kavk. region. Estestv. nauki = Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science*. 2020;(4):22-28. (In Russ.).
15. Pyatnitskiy E.S. The principle of decomposition in the control of mechanical systems *Dokl. Akad. nauk SSSR = Reports of USSR Academy of Sciences*. 1988;300(2):300-303. (In Russ.).
16. Kostoglotov A.A., Penkov A.S., Lazarenko S.V. Structural-parametric synthesis of an adaptive filter for assessing the state of dynamic systems using the decomposition principle. *Vestn. RGUPS = Bulletin of The Rostov State Transport University*. 2020;(4):180-188. (In Russ.).
17. Kostoglotov A.A., Penkov A.S., Pavlov V.M., Lazarenko S.V. Analysis of the possibility of intellectualization of algorithms for estimating the parameters of dynamic systems based on adaptive model of motion. *Lecture Notes in Networks and Systems*. 2022;330:589-600.
18. Pyatnitskiy E.S. Synthesis of hierarchical control systems for mechanical and electromechanical objects based on the principle of decomposition. I. *Avtomatika i telemekhanika = Automation and Remote Control*. 1989;50(1):87-99. (In Russ.).
19. Andrashitov D.S., Kostoglotov A.A., Lazarenko S.V., Penkov A.S. A method for synthesizing tracking algorithms using a shaping filter and quasi-optimal control laws for maneuvering objects. *Radiotekhnika = Journal Radioengineering*. 2023;87(2):93-104. (In Russ.).
20. Sage E., Mels J. *Estimation theory and its application in communication and management*. Moscow: Svyaz' Publ.; 1976. 496 p. (In Russ.).
21. Zinger R.A. Evaluation of the characteristics of the optimal filter for tracking a manned target. *Zarubezhnaya radioelektronika = Foreign Radioelectronics*. 1971;(8):40-57. (In Russ.).
22. Matveev V.V., Raspopov V.Ya. *Fundamentals of construction of strapdown inertial navigation systems*. St. Petersburg: OJSC "Concern TsNII Elektropribor", 2009. 280 p. (In Russ.).

Информация об авторах

А.А. Костоглотов – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой связи на железнодорожном транспорте.

А.С. Пеньков – научный сотрудник, кафедра связи на железнодорожном транспорте.

С.В. Лазаренко – кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник, кафедра связи на железнодорожном транспорте.

Information about the authors

A.A. Kostoglotov - Doctor of Science (Technical Science), Professor, Head of the Department of Communication on Railway Transport.

A.S. Penkov - Researcher, Department of Communication on Railway Transport.

S.V. Lazarenko - Candidate of Science (Technical Science), Associate Professor, Senior Researcher, Department of Communication on Railway Transport.

*Статья поступила в редакцию 12.04.2023; одобрена после рецензирования 13.05.2023; принята к публикации 20.06.2023.
The article was submitted 12.04.2023; approved after reviewing 13.05.2023; accepted for publication 20.06.2023.*

Научная статья
УДК 532.5, 556
doi: 10.18522/1026-2237-2023-3-34-44

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДВУХМЕРНОГО СИММЕТРИЧНОГО ТЕЧЕНИЯ НЕСЖИМАЕМОЙ ЖИДКОСТИ С ЗАВИСЯЩЕЙ ОТ КООРДИНАТ ВЯЗКОСТЬЮ МЕЖДУ ЧАСТИЧНО НЕРОВНЫМИ ПЛОСКОСТЯМИ

Наталья Михайловна Полякова^{1✉}, Виктория Ивановна Цветкова²

^{1,2} Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, Россия

¹nmzhukova@sfnu.ru ✉

²vcvetkova@sfnu.ru

Аннотация. Численными методами при помощи пакета конечных элементов Freefem++ исследована структура симметричного двухмерного нестационарного течения между двумя плоскостями, имеющими периодическую ступенчатоподобную неровность. Кинематическая вязкость жидкости выбрана типичной для турбулентных течений, зависящей от координат $\mu = \mu_0(\eta^2(x) - z^2)$, $\eta(x) = h(x) + \delta$, где μ_0 – характерная вязкость; δ – шероховатость; $h(x)$ – функция, задающая границу $z = \eta(x)$ (профили плоскостей, зеркально симметричных относительно $z = 0$); x, z – продольная и поперечная координаты вдоль основного течения. В отличие от обычного параболического профиля течения Пуазейля между плоскостями при указанном выборе вязкости профиль течения – логарифмический и имеет сингулярность на границе области, для предотвращения которой и вводится шероховатость границы. Отличительной чертой исследуемой задачи является постановка краевых условий на неровной части границы. На ее плоских участках сохраняем обычные для вязкой жидкости условия прилипания, но на неровной части границы задаем лишь условия непроницаемости границы для жидкости (нет прилипания!). Вычислительный эксперимент (численное решение уравнений Навье – Стокса для вязкой несжимаемой жидкости при помощи модифицированного метода штрафов) показал, что для широкого набора параметров структура течения, описываемого исходной нестационарной полной задачей, и структура квазистационарного течения, описываемого построенной в представленной работе асимптотической моделью, для которой имеется точное решение, находятся в хорошем соответствии – в нестационарном течении устанавливается стабильная регулярная система вихрей, сосредоточенная вблизи тех неровностей поверхности, для которых граница имеет отрицательную кривизну («ямки» границы).

Ключевые слова: турбулентное течение, уравнения Навье – Стокса, асимптотическая модель, вихревые структуры

Для цитирования: Полякова Н.М., Цветкова В.И. Численное исследование двухмерного симметричного течения несжимаемой жидкости с зависящей от координат вязкостью между частично неровными плоскостями // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2023. № 3. С. 34–44.

Статья опубликована на условиях лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY 4.0).

Original article

NUMERICAL STUDY OF A TWO-DIMENSIONAL SYMMETRIC FLOW OF AN INCOMPRESSIBLE FLUID WITH A COORDINATE-DEPENDENT VISCOSITY BETWEEN PARTIALLY IRREGULAR PLANES

Natalia M. Polyakova^{1✉}, Victoria I. Tsvetkova²

^{1,2}Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia

¹nmzhukova@sfnu.ru ✉

²vcvetkova@sfnu.ru

© Полякова Н.М., Цветкова В.И., 2023

Abstract. The structure of a symmetric two-dimensional unsteady flow between two planes having a periodic step-like irregularity is investigated by numerical methods using the finite element package Freefem++. The kinematic viscosity of the fluid is chosen as typical for turbulent flows, depending on the coordinates as $\mu = \mu_0(\eta^2(x) - z^2)$, $\eta(x) = h(x) + \delta$, where μ_0 is the characteristic viscosity, δ is the roughness, $h(x)$ is the function defining the boundary $z = \eta(x)$ (profiles of planes mirror-symmetric with respect to $z = 0$), x, z are longitudinal and transverse coordinates along the main flow. In contrast to the usual parabolic profile of the Poiseuille flow between the planes, with the specified choice of viscosity, the flow profile is logarithmic and has a singularity at the boundary of the region, to prevent which the roughness of the boundary is introduced. A distinctive feature of the problem under study is the setting of boundary conditions on an irregular part of the boundary. On plane sections of the boundary, we maintain the usual non-slip conditions for a viscous liquid, but on the irregular part of the boundary we set only the impermeability conditions of the boundary for the liquid (no sticking!). Computational experiment - numerical solution of the Navier-Stokes equations for a viscous incompressible fluid using a modified penalty method, showed that for a wide set of parameters, the structure of the flow described by the initial non-stationary complete problem and the quasi-stationary flow described by the asymptotic model constructed in the presented paper, for which there is an exact solution, are in good agreement - in the non-stationary flow, a stable regular system of vortices is established concentrated near those surface irregularities for which the boundary has a negative curvature ('deepening' of boundary).

Keywords: turbulent flow, the Navier-Stokes equations, asymptotic model, vortex structures

For citation: Polyakova N.M., Tsvetkova V.I. Numerical Study of a Two-Dimensional Symmetric Flow of an Incompressible Fluid with a Coordinate-Dependent Viscosity Between Partially Irregular Planes. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2023;(3): 34-44.(In Russ.).

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC-BY 4.0).

Введение

При моделировании турбулентных течений жидкости, помимо моделей статистических, $k - \varepsilon$ и т.п., достаточно широко используются полуэмпирические, для которых кинематическая вязкость жидкости считается зависящей от координат [1–5]. Идея о турбулентной вязкости, не являющейся физической константой жидкости, а представляющей собой некоторую функцию координат, принадлежит Ж.В. Буссинеску (1877 г.). Считается, что вязкость – не свойство жидкости, а свойство потока. Предполагается, что поведение вязкости определяется для пространственно двухмерных задач соотношениями $\mu = \mu(x, z) = \mu(\eta(x), z)$, $\mu(\eta(x), \eta(x)) = 0$, например $\mu(\eta(x), z) = \mu_0(\eta^2(x) - z^2)$, где $\eta(x)$ – функция, задающая границу $z = \eta(x)$ области, в которой происходит течение жидкости; μ_0 – характерная вязкость. Известно, что такой выбор вязкости, в частности при течении между двумя бесконечными плоскостями, приводит к логарифмическому профилю скорости, наблюдаемому на практике при турбулентных течениях [1, 6, 7]. Однако на границе области возникает сингулярность скорости, для предотвращения которой вводится понятие шероховатости. Реальная область заменяется некоторой фиктивной областью с границей $z = h(x)$, $\eta(x) = h(x) + \delta$, где δ – положительный параметр шероховатости (возможно, переменный, $\delta = \delta(x)$).

В предлагаемой работе рассматривается симметричное нестационарное течение между двумя плоскостями, которые имеют некоторые неровности (достаточно малые). Построена асимптотическая модель, описывающая стационарное течение в бесконечной области и предсказывающая существование структуры вихрей в окрестности неровностей, имеющих отрицательную кривизну. Отличительной особенностью модели является отказ от условий прилипания жидкости на неровностях поверхности. Замена условия прилипания, например условием Навье (касательное напряжение пропорционально касательной скорости), не является новой, и имеются различные обобщения таких условий [8–12]. Полный отказ от прилипания является некоторым предельным случаем. Отметим, что при отсутствии неровностей как при условии прилипания, так и при наличии полного прилипания жидкости никакой вихревой структуры не возникает. Для подтверждения выводов асимптотической модели представлены результаты численного исследования (ме-

тод конечных элементов) исходной задачи. Вычислительный эксперимент подтвердил результаты, полученные для асимптотической модели, – даже при малых амплитудах неровностей в окрестности «ямок» границы (отрицательная кривизна) возникает некоторая стационарная вихревая структура, качественно похожая на предсказанную асимптотической моделью. Для существенных неровностей, например набора каверн, такой результат, конечно, неудивителен – о возникновении вихрей в кавернах хорошо известно.

Упомянутое качественное (а не количественное) совпадение точных результатов, полученных для асимптотической модели, и результатов вычислений для полной модели объясняется многими причинами. В частности, при вычислениях невозможно реализовать бесконечную область и приходится решать задачу протекания с трудностями, возникающими при реализации условий протекания [13, 14] и при создании равномерной сетки для малых амплитуд неровностей. Кроме этого, построенная асимптотическая модель является достаточно «грубой» – главные члены асимптотики определяются линейной задачей и, естественно, не учитывают нелинейности реального течения. Тем не менее положение вихрей в окрестностях «ямок» предсказывается достаточно хорошо, хотя их интенсивности и «размеры» не совпадают.

Поиск симметричного решения связан с желанием сравнивать асимптотические модели течения между плоскостями и модели течения в цилиндрической трубе с неровностями, также предсказывающей возникновение вихревых структур и изученной в [4].

Постановка задачи

Рассматриваем двухмерное симметричное нестационарное течение вязкой несжимаемой жидкости в области

$$\mathbb{D}_0 = \{0 \leq x \leq L, -\eta(x) \leq z \leq \eta(x)\} \quad (1)$$

с кинематической вязкостью, зависящей от координат

$$\mu(x, z) = \mu_0(\eta^2(x) - z^2). \quad (2)$$

Здесь μ_0 – характерная вязкость; δ – шероховатость; $\eta(x)$ – функция, задающая границу $z = \eta(x)$; x, z – продольная и поперечная координаты вдоль основного течения; L – длина области.

Ввиду требования симметричности течения и выбора вязкости μ в виде (2), для которой, как показывает анализ, профиль скорости имеет сингулярность в точках границ $z = \pm\eta(x)$ (логарифмический профиль турбулентной скорости), заменяем область \mathbb{D}_0 (полу) областью \mathbb{D}

$$(x, z) \in \mathbb{D} = \{0 \leq x \leq L, 0 \leq z \leq h(x)\}, \quad \eta(x) = h(x) + \delta, \quad \delta = const, \quad (3)$$

где δ – шероховатость ($0 < \delta \ll 1$); $h(x)$ – переменная ширина области \mathbb{D} .

Считаем, что граница $z = h(x)$ области \mathbb{D} состоит из нескольких непересекающихся участков Γ_i, Γ_p (необязательно связных), один из которых соответствует плоской части границы ($h_x(x) \equiv 0$), а другой – неровной (иррегулярной) части ($h_x(x) \not\equiv 0$)

$$h(x) = \begin{cases} h_0, & (x, z = h_0) \in \Gamma_p, & h_x(x) \equiv 0, \\ h_0 + a \varphi(x), & (x, z = h_0 + a \varphi(x)) \in \Gamma_i, & h_x(x) \not\equiv 0. \end{cases} \quad (4)$$

Здесь h_0 – ширина части области с плоской границей; a – амплитуда неровностей границы; $\varphi(x)$ – вспомогательная функция, описывающая неровности границы, такая, что $h(x)$ является кусочно-гладкой функцией. Введение понятия шероховатости (с параметром δ) позволяет отступить от границы $z = \eta(x)$, задавать условия на некоторой фиктивной границе $z = h(x)$ и тем самым избавиться от сингулярности скорости на границе. Такой подход типичен при рассмотрении течений с турбулентной вязкостью [1, гл. 20].

Для описания нестационарного двухмерного симметричного течения между двумя неровными плоскостями несжимаемой жидкости с турбулентной вязкостью (2) используем систему уравнений Навье – Стокса в безразмерных переменных

$$\nabla_k v_k = 0, \quad (5)$$

$$\partial_t v_i + v_k \nabla_k v_i = -\nabla_k p + \nabla_k (\mu D_{ik}), \quad D_{ik} = \nabla_k v_i + \nabla_i v_k, \quad (6)$$

$$\mu = \mu(x, z) = \mu_0(\eta^2(x) - z^2), \quad \eta(x) = h(x) + \delta. \quad (7)$$

Здесь $(x_1 = x, x_2, x_3 = z)$ – координаты; $\mathbf{v} = (v_1 = u, 0, v_3 = w)$ – компоненты скорости; p – давление; D_{ik} – тензор деформаций; ∂_t, ∇_i – производные по времени и по направлению x_i (частные производные по координате x_i); индексы i, k принимают значения 1, 3; по повторяющимся индексам подразумевается суммирование, зависимость от координаты x_2 отсутствует ($\nabla_2 = 0$);

μ – кинематическая вязкость жидкости; μ_0 – характерная величина вязкости; δ – постоянная шероховатость границы; $h(x)$ – функция, задающая границу области \mathbb{D} (3).

Для уравнений (5)–(7) на границах области \mathbb{D} задаем следующие условия:

$$(u, w)|_{x=0} = (u_{in}(z), 0), \quad (u, w)|_{x=L} = (u_{out}(z), 0), \quad (8)$$

$$u_z|_{z=0} = 0, \quad w|_{z=0} = 0, \quad (9)$$

$$(un_1 + wn_3)|_{z=h(x)} = 0 \quad \mathbf{v} \cdot \mathbf{n}|_{z=h(x)} = 0, \quad (10)$$

где $\mathbf{n} = (n_1, 0, n_3)$ – внешняя нормаль к границе $z = h(x)$; функция $h(x)$ определяет профиль границы; $u_{in}(z)$, $u_{out}(z)$ – заданные продольные компоненты скорости на границах $x = 0$, $x = L$.

Перечисленные условия соответствуют протеканию жидкости через область \mathbb{D} . Отметим, что если условие (8) при $x = 0$ (на входе) является достаточно очевидным и, в принципе, может задаваться произвольно, то, напротив, условие (8) при $x = L$ (на выходе) не столь очевидно и справедливо, скорее всего, лишь для случая течения в бесконечной области ($L \rightarrow \infty$) с плоскими границами. Более подробно о проблеме постановки условия на выходной части границы – в [13, 14]. Детальное обсуждение реализации условия протекания для границы $x = L$ при численном решении задачи (3)–(10) дано ниже.

Условие (9) отвечает требованию для полной области (область \mathbb{D} плюс зеркальное отражение относительно $z = 0$) симметричности течения и связано с желанием построить простой аналог задачи для цилиндрической области, рассмотренный в работе [4].

Формула (10) является обычным условием непроницаемости границы $z = h(x)$ для жидкости. Особенно обратим внимание на то, что на границе $z = h(x)$ заданы лишь условия непроницаемости для жидкости (нет прилипания!). Иными словами, для неподвижной твердой границы $z = h(x)$ сохранено только типичное для свободной границы (или идеальной невязкой жидкости) кинематическое условие $w = h_t + uh_x$, в стационарном случае ($h_t = 0$) совпадающее с (10). Обоснованием выбора служит тот факт, что вязкость $\mu(x, z)$, заданная соотношением (7) (или (2)), обращается в нуль на границе $z = \eta(x)$ и является почти нулевой при $z = h(x)$ ввиду $\delta \ll h_0$, $\eta(x) \approx h(x)$. Иными словами, считается, что к шероховатостям неровной части границы жидкость не прилипает. Отсутствие условия прилипания приводит к недоопределенности задачи – не хватает граничного условия.

Для плоских участков границы можно сохранить условия прилипания

$$u|_{z=h(x)} = 0, \quad w|_{z=h(x)} = 0, \quad (x, z = h(x)) \in \Gamma_p, \quad (11)$$

что тем не менее для полной определенности задачи требует дополнительного условия на неровной части границы Γ_i . Варианты постановки дополнительного условия обсуждаются ниже, а также в [4].

Основная цель представленной работы – построение численного решения задачи (3)–(11) и сопоставление результатов с точным решением сконструированной ниже асимптотической модели.

Асимптотическая модель

Аналогично работе [4] для задачи (3)–(11) строим асимптотическую модель, производя замены

$$w \rightarrow \varepsilon w, \quad z \rightarrow \varepsilon z, \quad p \rightarrow \varepsilon^{-1} p, \quad \mu \rightarrow \varepsilon \mu, \quad \eta \rightarrow \varepsilon \eta, \quad h \rightarrow \varepsilon h, \quad \varepsilon = \frac{h_0}{L} \quad (12)$$

и полагая $\varepsilon \rightarrow 0$. Все новые переменные (и параметры) считаем имеющими порядок малости $O(1)$ при $\varepsilon \rightarrow 0$.

Заметим, что на самом деле предельный переход при $\varepsilon \rightarrow 0$ требуется лишь для того, чтобы определить в задаче главные члены асимптотики. Иными словами, вовсе не обязательно осуществлять обратный переход к старым переменным – достаточно в исходных уравнениях отбросить малые члены, отсутствующие в асимптотической модели. Опуская подробности, запишем стационарный вариант асимптотической задачи в старых (исходных) переменных для бесконечной области $\mathbb{D}_\infty = \{-\infty < x < \infty, \quad 0 \leq z \leq h(x)\}$

$$u_x(x, z) + w_z(x, z) = 0, \quad (13)$$

$$(\mu(x, z) u_z(x, z))_z = p_x(x), \quad (14)$$

$$u_z(x, 0) = 0, \quad w(x, 0) = 0, \quad (15)$$

$$w(x, h(x)) = w(x, h(x)) h_x(x). \quad (16)$$

Вводим функцию тока ψ

$$u = \psi_z(x, z), \quad w = -\psi_x(x, z), \quad (17)$$

что позволяет автоматически удовлетворить уравнению неразрывности (13) и записать задачу (13)–(17) в форме

$$\begin{aligned} (\mu(x, z) \psi_{zz}(x, z))_z &= p_x(x), \\ \psi_{zz}(x, 0) &= 0, \quad \psi(x, 0) = 0, \quad \psi(x, h(x)) = Q, \\ Q &= \int_0^{h(x)} u(x, z) dx = \psi(x, h(x)) = const, \end{aligned} \quad (18)$$

где Q – заданный расход жидкости.

Точное решение для общего варианта вязкости

Асимптотическая модель (13)–(16) (или для функции тока (17), (18)) приведена для случая, когда условие (11) не учитывается. Уравнения модели являются линейными, и нетрудно построить точное решение для (почти) произвольной вязкости $\mu(x, z)$. Ограничимся некоторым классом вязкостей, для которых зависимость от продольной координаты x определяется только поведением границы $z = \eta(x)$ области \mathbb{D}_0 (1) и которые обращаются в нуль только на границе

$$\mu(x, z) = \mu(\eta(x), z) > 0, \quad (x, z) \in \mathbb{D}_0 \setminus \partial \mathbb{D}_0, \quad \mu(\eta(x), \eta(x)) = 0. \quad (19)$$

Естественно, для вязкости, определяемой соотношением (2), условия (19) выполнены.

Вводим вспомогательную функцию $\varphi(\eta(x), z)$

$$\begin{aligned} \varphi(\eta(x), z) &= \int_0^z \frac{s(z-s) ds}{\mu(\eta(x), s)}, \quad \varphi_z(\eta(x), z) = \int_0^z \frac{s ds}{\mu(\eta(x), s)}, \\ \varphi_{zz}(\eta(x), z) &= \frac{z}{\mu(\eta(x), z)}, \quad \varphi_\eta(\eta(x), z) = - \int_0^z \frac{s(z-s) \mu_\eta(\eta(x), s) ds}{\mu^2(\eta(x), s)}, \end{aligned}$$

при помощи которой точное решение линейной задачи (18) записываем в форме

$$\psi(x, z) = \frac{Qz}{h(x)} + \frac{p_x(x)}{h(x)} (h(x) \varphi(\eta(x), z) - z \varphi(\eta(x), h(x))). \quad (20)$$

Используя (17), (20), вычисляем функции $u(x, z)$, $w(x, z)$:

$$u(x, z) = \psi_z(x, z) = \frac{Q}{h(x)} + \frac{p_x(x)}{h(x)} (h(x) \varphi_z(\eta(x), z) - \varphi(\eta(x), h(x))), \quad (21)$$

$$\begin{aligned} w(x, z) &= -\psi_x(x, z) = - \frac{p_{xx}(x)}{h(x)} (h(x) \varphi(\eta(x), z) - z \varphi(\eta(x), h(x))) + \\ &+ \frac{Qz}{h^2(x)} h_x(x) + \frac{p_x(x)}{h^2(x)} (h(x) \varphi(\eta(x), z) - z \varphi(\eta(x), h(x))) h_x(x) - \\ &- \frac{p_x(x)}{h(x)} (h(x) \varphi_\eta(\eta(x), z) - z \varphi_\eta(\eta(x), h(x))) \eta_x(x) - \\ &- \frac{p_x(x)}{h(x)} (\varphi(\eta(x), z) - z \varphi_z(\eta(x), h(x))) h_x(x). \end{aligned} \quad (22)$$

Как уже говорилось, отсутствие дополнительного граничного условия приводит к недоопределенности задачи, и ввиду этого соотношение (20) содержит две несвязанные между собой величины – Q и $p_x(x)$.

Рассматриваем прямолинейные участки границы, на которых, очевидно (соотношения (3), (4)),

$$z = h(\tilde{x}) = h_0, \quad \eta(\tilde{x}) = \eta_0 = h_0 + \delta, \quad (\tilde{x}, z = h_0) \in \Gamma_p, \quad (23)$$

$$h_x(\tilde{x}) = 0, \quad \eta_x(\tilde{x}) = 0,$$

где \tilde{x} означает координату x на границе Γ_p .

Условие прилипания (11) $w|_{\Gamma_p} = 0$ на прямолинейных участках границы Γ_p (точнее, условие непроницаемости границы) выполнено автоматически ввиду равенств $\eta_x(\tilde{x}) = 0$, $h_x(\tilde{x}) = 0$, указанных в (23), и соотношения (22). Из условия (11) $u|_{\Gamma_p} = 0$ и выражения (21) следует, что в области с прямолинейными участками границы градиент давления $p_x(x)$ постоянен и связан с расходом жидкости соотношением (см. аналогичное условие для цилиндрической области в [4])

$$p_x(\tilde{x}) = \tilde{p}_x = \frac{Q}{h_0 \varphi_z(\eta_0, h_0) - \varphi(\eta_0, h_0)} = const, \quad (\tilde{x}, z = h_0) \in \Gamma_p. \quad (24)$$

Градиент давления $p_x(x)$ постоянен не только на границе Γ_p , но и во всех частях области, имеющих прямолинейную границу, справедливо условие постоянства градиента $p_x(x) = \tilde{p}_x = const$.

Конечно, соотношение (24) точно такое же, как в случае бесконечной области с полностью прямолинейными границами (без неровностей), на которых выполнено условие прилипания.

В качестве одного из вариантов дополнительного условия, замыкающего задачу, выбираем соотношение

$$p_x(x) = \tilde{p}_x, \quad (x, z) \in \mathbb{D}. \quad (25)$$

Иными словами, требуем постоянство градиента давления $p_x(x)$ во всей области, включая границу $z = h(x)$. Фактически (25) является некоторым динамическим условием на границе $z = h(x)$ – постоянство градиента давления вдоль всей границы, т.е. не только вдоль прямолинейных участков, но и вдоль неровностей. С физической точки зрения условие (25) достаточно правдоподобно, если неровности границы малы по сравнению с шириной области, т.е. $|a \varphi(x)| \ll h_0$ (4). Заметим, что ввиду отсутствия зависимости $p_x(x)$ от z условие (25) можно трактовать и как постоянство среднего градиента давления вдоль всей области. Отметим, что при $\eta(x) = const$, $h(x) = const$ и выполнении условий прилипания (20)–(22) – обычное решение, соответствующее турбулентному течению между двумя плоскостями (без неровностей). Оно, в частности, является точным решением задачи (2)–(11) для исходных уравнений – $w = 0$, $u = u(z)$, $p_x = const$.

Другим вариантом дополнительного условия является задание градиента давления во всей области соотношением

$$p_x(x) = \frac{Q(h_0 - h(x))}{\varphi(\eta(x), h(x))} + \tilde{p}_x \frac{h(x)\varphi(\eta_0, h_0)}{h_0 \varphi(\eta(x), h(x))}, \quad (x, z) \in \mathbb{D}. \quad (26)$$

На прямолинейных участках границы градиент давления постоянен, но на неровных он зависит от неровностей. Условие (26) вытекает из требования постоянства скорости u во всей области при $z = 0$, т.е. $u(x, 0) = u(\tilde{x}, 0) = const$. Такое предположение хорошо подходит для ситуации, при которой ось $z = 0$ достаточно удалена от границы $z = h(x)$ (течение при $z = 0$ «не замечает» неровностей границы). В случае (25) в областях с неровными границами $u(x, 0) \neq const$.

Приведем выражение для функции $\varphi(\eta(x), z)$, когда вязкость μ задана формулой (2) (или (7))

$$\mu_0 \varphi(\eta(x), z) = z - \frac{1}{2} z \ln \frac{\eta^2(x) - z^2}{\eta^2(x)} - \frac{1}{2} \eta(x) \ln \frac{\eta(x) + z}{\eta(x) - z}, \quad (27)$$

которая позволяет легко произвести требуемые вычисления соотношений (20)–(26).

Опуская подробный, но громоздкий анализ, сформулируем основной результат для асимптотической модели (сравни с аналогичным результатом в [4] для цилиндрической области).

Утверждение. Если в точке (x_k, z_k) , принадлежащей внутренности области \mathbb{D} , выполнены условия

$$u(x_k, z_k) = 0, \quad w(x_k, z_k) = 0, \quad h_x(x_k) = 0, \quad h_{xx}(x_k) < 0, \quad (28)$$

то в окрестности точки (x_k, z_k) имеется стационарный вихрь скорости.

Иными словами, в окрестности «ямки» границ области при некоторых условиях имеются стационарные вихревые течения. Приведенный результат основан на исследовании структуры линий уровня функции тока $\psi(x, z)$ и гамильтоновой динамической системы с гамильтонианом $\psi(x, z)$. Точка (x_k, z_k) является стационарной точкой динамической системы, описывающей движение «жидкой частицы» с координатами $(x(t), z(t))$

$$\frac{dx(t)}{dt} = \psi_z(x, z) = u(x, z), \quad \frac{dz(t)}{dt} = -\psi_x(x, z) = w(x, z). \quad (29)$$

Ввиду двумерности стационарные точки являются либо седлом, либо центром [15, с. 68, 69, 128–130], который и соответствует вихрю скорости в окрестности стационарной точки.

Оказалось, что и для полных уравнений (2)–(11) с одним из дополнительных условий (25) или (26) в нестационарном течении достаточно быстро устанавливается стационарная структура вихрей, предсказываемая (качественно) асимптотической моделью, что подтверждается приведенными ниже численными расчетами.

Область \mathbb{D} и структура асимптотического решения

В качестве области \mathbb{D} для проведения расчетов выбираем область, показанную на рис. 1.

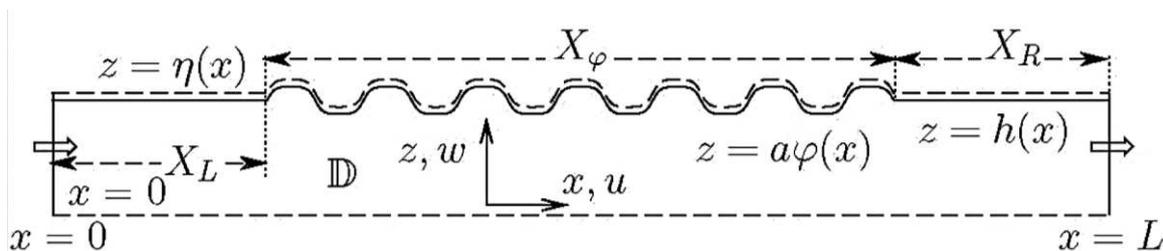


Рис. 1. Область \mathbb{D} . Длина области $L \approx 9,834$, ширина $h_0 = 1,0$, длина области неровностей $X_\varphi = 13\pi/7 \approx 5,834$, длины прямолинейных участков границы $X_L = 2,0$, $X_R = 2,0$, амплитуда неровностей $a = 0,125$, шероховатость $\delta = 0,0625$ / Fig. 1. Region \mathbb{D} . Region length $L \approx 9.834$, width $h_0 = 1.0$, length of the region of irregularities $X_\varphi = 13\pi/7 \approx 5.834$, lengths of straight sections of the boundary $X_L = 2.0$, $X_R = 2.0$, amplitude of irregularities $a = 0.125$, roughness $\delta = 0.0625$

Функция $\varphi(x)$, определяющая неровности границы (4), имеет вид

$$\varphi(x) = h_0 + a \tanh(\beta \sin(m(x - X_L))), \quad m = 7, \quad \beta = 2,0, \quad (30)$$

где m – количество «ямок» на границе; a, β – амплитуда и параметр сглаживания неровностей.

На рис. 2 показана структура течения в окрестности «ямки», которая рассчитана при помощи соотношений (20)–(22), (27)–(29) для асимптотической модели (17), (18).

Рассмотрено два варианта – случай (25), когда градиент давления постоянен, и случай (26), когда постоянна продольная скорость u при $z = 0$. Стационарные точки (x_k, z_k) (указаны на рисунке) вычислены путем решения уравнений (28). Помимо стационарных точек, являющихся центрами (и центрами вихрей), имеются седловые стационарные точки $(x_k, z_k) = (4,693; 1,000)$, $(x_k, z_k) = (5,142; 1,000)$ (одинаковые для обоих случаев), через которые проходят сепаратрисы динамической системы (32). Очевидно, что такие точки соответствуют точкам пересечения линий $z = \varphi(x)$ и $z = h_0$.

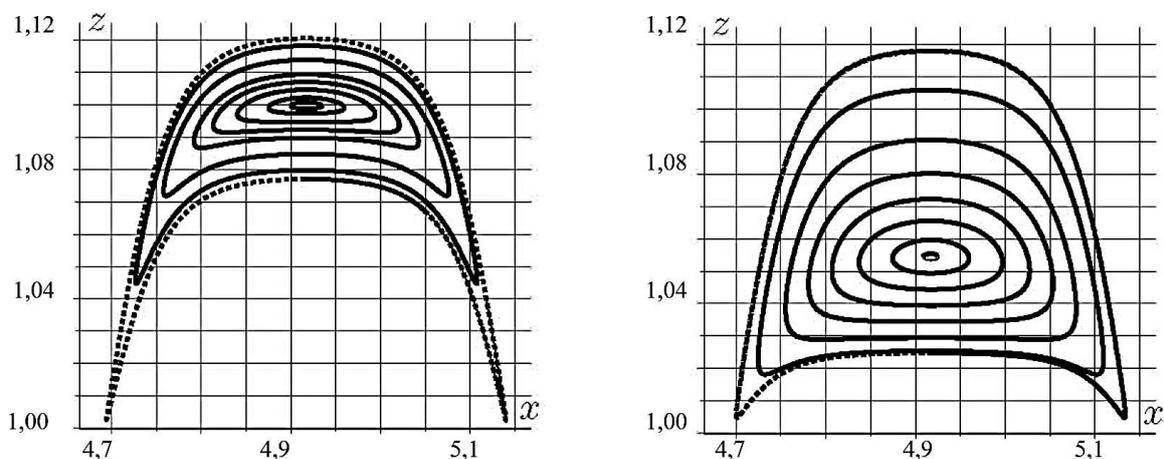


Рис. 2. Асимптотическая задача. Изолинии функции тока. Структура течения в случае (25), когда градиент давления постоянен (слева). Стационарная точка $x_k = 4,917$, $z_k = 1,100$ – центр вихря. Структура течения в случае (26), когда постоянна скорость (справа), стационарная точка $x_k = 4,917$, $z_k = 1,054$ – центр вихря. Внешние пунктирные линии соответствуют сепаратрисам динамической системы (29). Ввиду периодичности границы показан лишь фрагмент течения / Fig. 2. Asymptotic problem. Isolines of the stream function. Flow structure in case (25), when the pressure gradient is constant (left). Stationary point $x_k = 4.917$, $z_k = 1.100$ – vortex center. The flow structure in case (26), when the velocity is constant (on the right), the stationary point $x_k = 4.917$, $z_k = 1.054$ is the center of the vortex. The outer dotted lines correspond to the separatrices of the dynamical system (29). Due to the periodicity of the boundary, only a fragment of the flow is shown

Представленные рисунки и значения x_k, z_k , естественно, соответствуют центральной «ямке». Для остальных «ямок» (кроме крайних) картина та же самая ввиду периодичности выбранной функции $\varphi(x)$, и к приведенным значениям x_k, z_k следует добавить соответствующий период.

Структуры течения для случаев (25) и (26) качественно мало отличаются друг от друга (рис. 2). Собственно говоря, важен лишь факт возникновения вихревой структуры, предсказанной асимптотической моделью.

Численное решение исходной задачи (2)–(11), (24), (25)

Исходная нестационарная задача численно решена методом конечных элементов [16] при помощи пакета FreeFem++ [17–19]. Результаты расчета приведены на рис. 3 в момент времени $t = 50$. Количество треугольников сетки ≈ 14000 . Средняя площадь треугольника $\approx 0,019$. Максимальный и минимальный размеры сторон треугольников $\approx 0,060$; $0,027$ и коэффициент анизотропии $\approx 2,59$.

Для решения уравнений Навье – Стокса используем метод штрафов [20, § 8], основная идея которого, как известно, заключается в замене эллиптического уравнения неразрывности $\operatorname{div} \mathbf{v} = 0$ фактически уравнением сжимаемой жидкости (другое название метода штрафов – метод искусственной сжимаемости [20, §8, (8.2),(8.3)])

$$\gamma p_t + \operatorname{div} \mathbf{v} = 0, \quad (31)$$

где p – давление; γ – коэффициент штрафа (сжимаемости жидкости).

Такой метод хорошо подходит для решения стационарных задач методом установления. Строгое обоснование его применимости для решения нестационарных задач при $\gamma \rightarrow 0$ имеется в [20, §8]. При вычислениях выбран коэффициент $\gamma = 0,0001$. В случае, когда разыскивается стационарное решение (установившееся течение жидкости), а именно такая цель преследуется в представленной работе, выбор γ не играет большой роли и влияет лишь на устойчивость расчетной схемы.

В качестве начального условия при $t = 0$ для нестационарной задачи (2)–(11) выбираем асимптотическое решение (21)–(24), которое на прямолинейных участках границы области \mathbb{D} (рис. 1, (4), (30)) является точным решением нелинейной задачи. Скорости $u_{in}(z)$, $u_{out}(z)$ для краевых условий (8) в момент $t = 0$ определяем при помощи соотношений (21), (22). В последующие моменты времени, например t_n , заменяем (8) условиями $u_{in}(z) = u(0, z, t_{n-1})$, $u_{out}(z) = u(L, z, t_{n-1})$, что позволяет имитировать условия протекания жидкости через боковые границы.

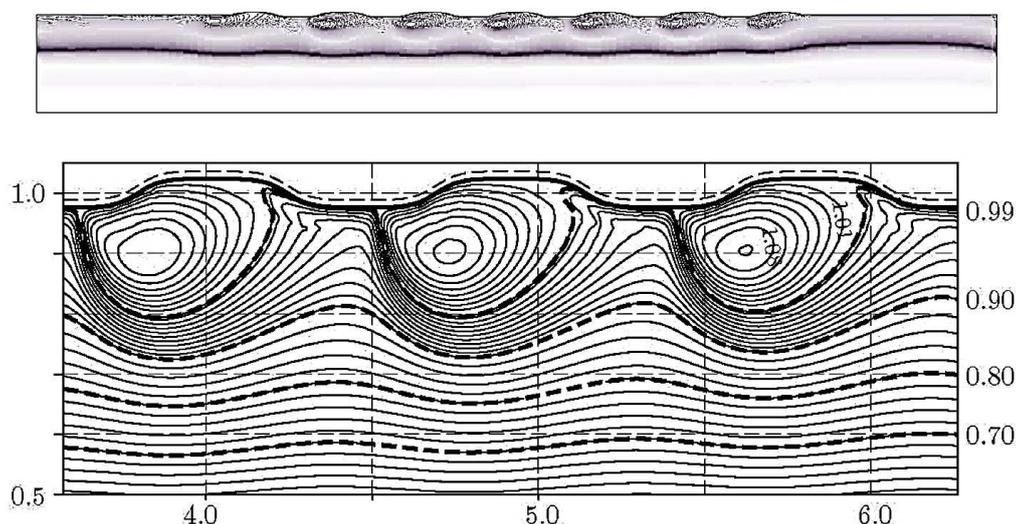


Рис. 3. Изолинии функции тока $\psi(x, z)$ для нестационарной исходной задачи в момент времени $t = 50$. Линии показаны с шагом 0,02 при $\psi \in [0,7; 0,9]$ и далее с шагом 0,01. Жирный пунктир соответствует $\psi = 0,7; 0,8; 0,9; 0,99$, $a = 0,025$, шероховатость $\delta = 0,0125$. Фрагмент области – внизу, полная область длиной $L \approx 9,834$ с соблюдением реальных масштабов – сверху / Fig. 3. Isolines of the stream function $\psi(x, z)$ for the nonstationary original problem at time $t=50$. The lines are shown with a step of 0.02 for $\psi \in [0.7; 0.9]$ and further with a step of 0.01. Bold dotted line corresponds to $\psi=0.7; 0.8; 0.9; 0.99$, $a=0.025$, roughness $\delta=0.0125$. A fragment of the area is at the bottom, a full area with a length of $L \approx 9.834$ in compliance with real scales is at the top

Ввиду особенностей пакета FreeFem++, не позволяющего задавать в качестве краевых условий линейные комбинации неизвестных функций, условия непротекания (10) на границе $z = \varphi(x)$ (30) заменяем приближенным условием $u(x, \varphi(x), t_n) = w(x, \varphi(x), t_{n-1}) n_3/n_1$.

Нестационарную задачу решаем с шагом по времени $\Delta t = 0,05$ для параметров

$$Q = 1,0, \quad \mu_0 = 0,025.$$

Стационарная структура вихрей устанавливается к моменту $t \approx 10$ и не претерпевает каких-либо изменений, по крайней мере до момента $t \approx 50$, показанного на рис. 3. Приведенные результаты и вычислительные эксперименты с другими значениями параметров (в частности, рис. 2, 3 различаются параметрами амплитуды a и шероховатости δ , что слабо влияет на окончательные результаты и сделано для улучшения визуализации рис. 2) позволяют сделать вывод о том, что асимптотическая модель качественно правильно предсказывает наличие вихрей в окрестностях появления неровностей поверхностей (точнее – в окрестности «ямок»). Результаты расчета на сетках, 14 000 и 28 000 треугольников, различаются не более чем на 0,5 %, что указывает на приемлемую точность вычислений.

Заметим, что замена условия (25) условием (26) не приводит к существенному изменению результатов расчета – незначительно изменяется форма вихрей.

Заключение

Как уже говорилось во введении, качественное (а не количественное) совпадение точных результатов, полученных для асимптотической модели, и результатов вычислений для полной модели объясняется несколькими причинами. Основная из них, с точки зрения авторов, – «грубость» асимптотической модели. Иная по сравнению с (12) замена переменных

$$w \rightarrow \varepsilon w, \quad z \rightarrow \varepsilon z, \quad \mu \rightarrow \varepsilon^2 \mu, \quad \eta \rightarrow \varepsilon \eta, \quad h \rightarrow \varepsilon h, \quad \varepsilon = \frac{h_0}{L},$$

т.е. выбор $p = O(1)$ и уменьшение порядка малости вязкости μ приводит к нелинейным уравнениям (взамен линейных (13), (14))

$$\mu u_x + w u_z = -p_x + (\mu u_z)_z, \quad u_x + w_z = 0, \quad (32)$$

формально совпадающим с уравнениями Прандтля для пограничного слоя [6, §39, (39.5), (39.6)]. Скорее всего, решение уравнений (32) с краевыми условиями, соответствующими рассматриваемой задаче, приведет к лучшему количественному совпадению результатов.

Уместно отметить, что использованный для численного решения метод штрафов, как показал вычислительный эксперимент, для рассматриваемой задачи предпочтительнее, чем разнообразные конечно-разностные [21, гл. 17] (ввиду трудностей аппроксимации сложных границ области) и проекционные методы [22, 23] ввиду плохой устойчивости вычислительных схем для данной задачи.

Список источников

1. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. М.: Наука, 1974. 722 с.
2. Монин А.С., Яглом А.М. Статистическая гидромеханика. Механика турбулентности. М.: Наука, 1965. Ч. I. 641 с.
3. Жуков М.Ю., Ширяева Е.В. Математическое моделирование процесса седиментации примеси в потоке жидкости. Ростов н/Д.: Изд-во ЮФУ, 2016. 208 с.
4. Жуков М.Ю., Полякова Н.М., Ширяева Е.В. Квазистационарное турбулентное течение в цилиндрическом канале с неровными стенками // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2020. № 1. С. 4–10. Doi: 10.18522/1026–2237-2020-1-4-10.
5. Жуков М.Ю., Ширяева Е.В., Васильев А.В. Модель стационарного турбулентного течения и процесс седиментации примеси // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2019. № 3. С. 4–14.
6. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Гидродинамика. Теоретическая физика. М.: Наука, 1986. Т. VI. 736 с.
7. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. М.: Дрофа, 2003. 840 с.
8. Lauga E., Brenner M.P., Stone H.A. Microfluidics: The No-Slip Boundary Condition // Handbook of Experimental Fluid Dynamics. 2007. Ch. 19. P. 1–27. Doi: 10.1007/978-3-540-30299-5_19.
9. Belyaev A.V., Vinogradova O.I. Wetting, roughness and flow boundary conditions // J. Phys.: Condens. Matter. 2011. Vol. 23. P. 184104. Doi: 10.1088/0953-8984/23/18/184104.

10. Барановский Е.С., Артемов М.А. О стационарном течении жидкостей второго порядка в канале // Вестн. Санкт-Петербургского ун-та. Прикладная математика. Информатика. Процессы управления. 2017. Т. 13, вып. 4. С. 342–353.
11. Брутян М.А., Крапивский П.Л., Славнов Н.Н. Эффективное условие проскальзывания в задаче о течении вязкой жидкости над структурированной поверхностью // Уч. зап. ЦАГИ. 1991. Т. XXII, № 1. С. 72–76.
12. Жуков М.Ю., Ширяева Е.В. Микрогидродинамика, жидкие плёнки и электрофорез. Ростов н/Д.: Изд-во ЮФУ, 2015. 240 с.
13. Юдович В.И. Нестационарные течения идеальной несжимаемой жидкости // Журн. вычисл. математики и матем. физики. 1963. Т. 3, № 6. С. 1032–1066.
14. Трошкин О.В. Вихревые фантомы в стационарной задаче о протекании Кочина – Юдовича // ЖВМ и МФ. 2021. Т. 61, № 4. С. 684–688.
15. Баутин Н.Н., Леонтович Е.А. Методы и приемы качественного исследования динамических систем на плоскости. 2-е изд., доп. М.: Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит-ры, 1990. 488 с.
16. Марчук Г.И., Агошков В.И. Введение в проекционно-сеточные методы М.: Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит-ры, 1981. 416 с.
17. Hecht F. New development in FreeFem++ // J. Numer. Math. 2012. Vol. 20, № 3–4. P. 251–256.
18. 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.
19. Жуков М.Ю., Ширяева Е.В. Решение задач математической физики при помощи пакета конечных элементов FreeFem++. Ростов н/Д.: Изд-во ЮФУ, 2014. 256 с.
20. Темам Р. Уравнения Навье – Стокса. Теория и численный анализ. М.: Мир, 1981. 408 с.
21. Флетчер К. Вычислительные методы в динамике жидкостей. Т. 1, 2. М.: Мир, 1991. 1056 с.
22. Chorin A. A numerical method for solving incompressible viscous flow problems // J. Comput. Phys. 1967. Vol. 2. P. 12–26.
23. Rannacher R. On Chorin’s projection method for the incompressible Navier-Stokes equations // The Navier-Stokes Equations II. Theory and Numerical Methods. Vol. 1530 of Lecture Notes in Mathematics. Berlin: Springer, 1992. P. 167–183. Doi: 10.1007/BFb0090341.

References

1. Shlihting G. *Boundary layer theory*. Moscow: Nauka Publ.; 1974. 722 p. (In Russ.).
2. Monin A. S., Jaglom A. M. *Statistical hydromechanics. Mechanics of turbulence*. Moscow: Nauka Publ.; 1965. Part I. 641 p. (In Russ.).
3. Zhukov M. Yu., Shiryayeva E. V. *Mathematical modeling of the process of impurity sedimentation in a liquid flow*. Rostov-on-Don: Southern Federal University Press; 2016. 208 p. (In Russ.).
4. Zhukov M. Yu., Polyakova N. M., Shiryayeva E. V. Quasi-stationary turbulent flow in cylinder channel with irregular walls. *Sev.-Kavk. region. Estestv. nauki = Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science*. 2020;(1):4-10, doi: 10.18522/1026-2237-2020-1-4-10. (In Russ.).
5. Zhukov M. Yu., Shiryayeva E. V., Vasil'ev A. V. Model of a stationary turbulent flow and the process of impurity sedimentation. *Sev.-Kavk. region. Estestv. nauki = Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science*. 2019;(3):4-14. (In Russ.).
6. Landau L. D., Lifshic E. M. *Hydrodynamics. Theoretical physics*. Moscow: Nauka Publ.; 1986. Vol. VI. 736 p. (In Russ.).
7. Loitsyansky L. G. *Fluid and gas mechanics*. Moscow: Drofa Publ.; 2003. 840 p. (In Russ.).
8. Lauga E., Brenner M.P., Stone H. A. Microfluidics: The No-Slip Boundary Condition. *Handbook of Experimental Fluid Dynamics*. 2007;(19):1-27, doi: 10.1007/978-3-540-30299-5-19.
9. Belyaev A. V., Vinogradova O. I. Wetting, roughness and flow boundary conditions. *J. Phys.: Condens. Matter*. 2011;23:184104, doi: 10.1088/0953-8984/23/18/184104.
10. Baranovsky E. S., Artemov M. A. On stationary flow of second-order fluids in a channel. *Vestn. Sankt-Peterburgskogo un-ta. Prikladnaya matematika. Informatika. Protsessy upravleniya = Vestnik of Saint Petersburg University. Applied Mathematics. Computer Science. Control Processes*. 2017;13(4):342-353. (In Russ.).
11. Brutyan M. A., Krapivsky P. L., Slavnov N. N. An effective slip condition in the problem of a viscous fluid flow over a structured surface. *Uchenye zapiski CAGI = TsAGI Science Journal*. 1991;XXII(1):72-76. (In Russ.).
12. Zhukov M. Yu., Shiryayeva E. V. *Microfluidics, liquid membrane and electrophoresis*. Rostov-on-Don: Southern Federal University Press; 2015. 240 p. (In Russ.).
13. Yudovich V. I. Unsteady flows of an ideal incompressible fluid. *Zhurn. vychisl. matematiki i matem. fiziki = Computational Mathematics and Mathematical Physics*. 1963;3(6):1032-1066. (In Russ.).

14. Troshkin O. V. Vortex phantoms in the stationary Kochin-Yudovich flow problem. *Zhurn. vychisl. matematiki i matem. fiziki = Computational Mathematics and Mathematical Physics*. 2021;61(4):684-688. (In Russ.).
15. Bautin N. N., Leontovich E. A. *Methods and techniques for a qualitative study of dynamical systems on a plane*. 2nd ed., compl. Moscow: Nauka Publ., Main Editorial Office of the Physical and Mathematical Literature; 1990. 488 p. (In Russ.).
16. Marchuk G. I., Agoshkov V. I. *Introduction to projection-grid methods*. Moscow: Nauka Publ., Main Editorial Office of the Physical and Mathematical Literature; 1981. 426 p. (In Russ.).
17. Hecht F. New development in FreeFem++. *J. Numer. Math.* 2012;20(3-4):251-256.
18. Zhukov M. Yu., Shiryayeva E. V. *Solving problems of mathematical physics using the FreeFem++ finite element package*. Rostov-on-Don: Southern Federal University Press; 2008. 256 p. (In Russ.).
19. Zhukov M. Yu., Shiryayeva E. V. *Solving problems of mathematical physics using the FreeFem++ finite element package*. Rostov-on-Don: Southern Federal University Press; 2014. 256 p. (In Russ.).
20. Temam R. *Navier-Stokes equations. Theory and numerical analysis*. Moscow: Mir Publ.; 1981. 408 p. (In Russ.).
21. Fletcher K. *Computational methods in fluid dynamics*. Vol. 1, 2. Moscow: Mir Publ.; 1991. 1056 p. (In Russ.).
22. Chorin A. A numerical method for solving incompressible viscous flow problems. *J. Comput. Phys.* 1967;2:12-26.
23. Rannacher R. On Chorin's projection method for the incompressible Navier-Stokes equations. *The Navier-Stokes Equations II – Theory and Numerical Methods*. Vol. 1530 of Lecture Notes in Mathematics. Berlin: Springer Publ.; 1992:167-183, doi: 10.1007/BFb0090341.

Информация об авторах

Н.М. Полякова – старший преподаватель, кафедры вычислительной математики и математической физики, Институт математики, механики и компьютерных наук им. И.И. Воровича.

В.И. Цветкова – ассистент, кафедры вычислительной математики и математической физики, Институт математики, механики и компьютерных наук им. И.И. Воровича.

Information about the authors

N.M. Polyakova - Senior Lecturer, Department of Computational Mathematics and Mathematical Physics, Vorovich Institute of Mathematics, Mechanics and Computer Sciences.

V.I. Tsvetkova - Assistant, Department of Computational Mathematics and Mathematical Physics, Vorovich Institute of Mathematics, Mechanics and Computer Sciences.

*Статья поступила в редакцию 29.03.2023; одобрена после рецензирования 24.04.2023; принята к публикации 20.06.2023.
The article was submitted 29.03.2023; approved after reviewing 24.04.2023; accepted for publication 20.06.2023.*

НАУКИ О ЗЕМЛЕ SCIENCES OF EARTH

Научная статья
УДК 551.583:631.559
doi: 10.18522/1026-2237-2023-3-45-56

МЕТОД СНИЖЕНИЯ РИСКОВ В СЕЛЬСКОМ ХОЗЯЙСТВЕ, СВЯЗАННЫХ С ЗАСУХАМИ, С УЧЕТОМ ВЕРОЯТНОСТИ ИХ ПОЯВЛЕНИЯ

**Б.А. Ашабоков^{1✉}, Л.М. Федченко², Г.В. Куповых³, А.А. Ташилова⁴, Л.А. Кешева⁵,
Н.В. Теунова⁶, М.Б. Ашабокова⁷**

^{1, 2, 4, 5, 6, 7}Высокогорный геофизический институт, Нальчик, Кабардино-Балкарская Республика, Россия

¹Институт информатики и проблем регионального управления КБНЦ РАН, Нальчик,
Кабардино-Балкарская Республика, Россия

³Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, Россия

¹ashabokov.boris@mail.ru✉

²fedchenkolm@mail.ru

³kupovykh@sfedu.ru

⁴tashilovaa@mail.ru

⁵kesheva.lara@yandex.ru

⁶nata0770@yandex.ru

⁷ashabokova.marina@rambler.ru

Аннотация. Повышение средних и экстремальных температур на фоне практически неизменного количества осадков на юге европейской территории России (ЕТР) приводит к целому ряду изменений, влияющих на сельскохозяйственное производство. Сочетание таких неблагоприятных факторов внешней среды, как высокая температура, дефицит воды, может оказывать сравнительно кратковременное, но сильное влияние на растениеводческую отрасль с долгосрочными последствиями. Ожидается, что с учетом современных тенденций изменения климата предгорная и равнинная зоны юга ЕТР окажутся в засушливой зоне. Таким образом, нехватка воды была и остается критическим фактором, определяющим производство сельскохозяйственных культур в регионе.

В работе обсуждаются механизмы влияния изменения климата на сельское хозяйство. Отмечено, что актуальность разработки эффективных и экономичных для практического использования методов снижения рисков в данной отрасли, связанных с экстремальными погодными явлениями, включая и засухи, повышается и становится важнейшим условием обеспечения продовольственной безопасности страны. Отмечены особенности информационного обеспечения проблемы разработки моделей снижения рисков, связанных с засухами. Изложен метод снижения потерь сельского хозяйства, связанных с данным погодным явлением. Он основан на использовании различной уязвимости сельскохозяйственных культур для опасных погодных явлений. Затронуты возможности практического использования метода в условиях изменения климата, обсуждаются основные задачи, возникающие на этом пути. Приводятся результаты модельных расчетов, которые были проведены с целью исследования эффективности метода. Отмечено, что на основе предложенного подхода могут быть созданы гибкие и быстро реагирующие на изменения условий функционирования сельского хозяйства системы, позволяющие снизить потери сельского хозяйства от неблагоприятных погодных явлений.

Ключевые слова: климатические риски, засухи, сельское хозяйство, коэффициенты влагообеспеченности, повреждаемость сельхозкультур, снижение рисков, теория принятия решения, целевая функция

© Ашабоков Б.А., Федченко Л.М., Куповых Г. В., Ташилова А.А., Кешева Л.А., Теунова Н.В.,
Ашабокова М.Б., 2023

Для цитирования: Ашабоков Б.А., Федченко Л.М., Куповых Г. В., Ташилова А.А., Кешева Л.А., Теунова Н.В., Ашабокова М.Б. Метод снижения рисков в сельском хозяйстве, связанных с засухами, с учетом вероятности их появления // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2023. № 3. С. 45–56.

Статья опубликована на условиях лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY 4.0).

Original article

METHOD FOR REDUCING RISKS IN AGRICULTURE ASSOCIATED WITH DROUGHTS, TAKING INTO ACCOUNT THE PROBABILITY OF THEIR OCCURRENCE

B.A. Ashabokov^{1✉}, L.M. Fedchenko², G.V. Kupovykh³, A.A. Tashilova⁴, L.A. Kesheva⁵, N.V. Teunova⁶, M.B. Ashabokova⁷

^{1, 2, 4, 5, 6, 7}High-Mountain Geophysical Institute, Nalchik, Kabardino-Balkar Republic, Russia

¹Institute of Informatics and Problems of Regional Management KBSC RAS, Nalchik, Kabardino-Balkar Republic, Russia

³Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia

¹ashabokov.boris@mail.ru ✉

²fedchenkolm@mail.ru

³kupovykh@sfedu.ru

⁴tashilovaa@mail.ru

⁵kesheva.lara@yandex.ru

⁶nata0770@yandex.ru

⁷ashabokova.marina@rambler.ru

Abstract. The increase in mean and extreme temperatures against the background of almost unchanged precipitation in the south of the European territory of Russia (ETR) leads to a number of changes affecting agricultural production. The combination of such unfavorable environmental factors as high temperature and water shortage can have a relatively short-term, but strong impact on the crop industry with long-term consequences. It is expected that, taking into account current trends in climate change, the foothill and plane zones in the south of the ETR will be in an arid zone. Thus water scarcity has been and remains a critical factor in determining crop production in the region.

The paper discusses the mechanisms of the impact of climate change on agriculture. It is noted that the relevance of developing effective and cost-effective for practical use methods to reduce risks in this industry associated with extreme weather events, including droughts, is increasing and becoming an essential condition for ensuring the country's food security. The features of information support of the problem of developing models for reducing risks associated with droughts are noted. A method for reducing agricultural losses associated with this weather event is outlined. It is based on exploiting the different vulnerabilities of crops by hazardous weather events. The possibilities of practical use of the method under conditions of climate change are touched upon, and the main tasks arising along this path are discussed. The results of model calculations, which were carried out in order to study the effectiveness of the method, are presented. It is noted that, on the basis of the proposed approach, flexible and quickly responding to changes in the conditions for the functioning of agriculture, systems can be created to reduce the loss of agriculture from adverse weather events.

Keywords: climate risks, droughts, agriculture, moisture coefficients, crop damage, risk reduction, decision theory, objective function

For citation: Ashabokov B.A., Fedchenko L.M., Kupovykh G.V., Tashilova A.A., Kesheva L.A., Teunova N.V., Ashabokova M.B. Method for Reducing Risks in Agriculture Associated with Droughts, Taking into Account the Probability of Their Occurrence. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science*. 2023;(3):45-56. (In Russ.).

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC-BY 4.0).

Введение

Со второй половины XX в. беспрецедентное изменение климата в постиндустриальный период стало заметно влиять не только на биологические системы Земли, но и на различные сферы деятельности человека [1–9]. Особенно значительным может оказаться его влияние на аграрный сектор экономики многих стран мира, включая и Россию [10–24]. Оно может осуществляться многочисленными путями, одним из которых является изменение термического и гидрологического циклов системы атмосфера – почва – урожай. Отметим, что исследованию изменений различных климатических факторов посвящено достаточно много работ. В работах [4–6] приводятся результаты исследований изменений режима атмосферных осадков и температуры приземного воздуха с 1961 по 2018 г. в различные сезоны года и в различных климатических зонах на юге европейской территории России (ЕТР). Исследования показали, что изменения метеорологических параметров на указанном временном отрезке уже в состоянии оказать заметное влияние на аграрный сектор экономики Юга России.

Под влиянием изменения климата быстрыми темпами происходит увеличение частоты и мощности экстремальных погодных явлений, расширение территорий, охваченных ими. Очевидно, что такие тенденции приводят к усложнению проблем разработки и практического использования методов снижения, связанных с ними рисков, повышают требования к этим методам. Что касается территории Российской Федерации, то на ней «отмечается примерно 1000 опасных гидрометеорологических явлений ежегодно, из них около половины наносят значительный ущерб отраслям экономики и жизнедеятельности населения» [7]. Поскольку главные растениеводческие районы страны (юг ЕТР) расположены в зоне недостаточного увлажнения, то эффективное редуцирование рисков в сельском хозяйстве, связанных с экстремальными погодными явлениями, становится важнейшим условием обеспечения продовольственной безопасности общества.

В настоящей работе изложен метод снижения рисков в сельском хозяйстве, связанных с засухами. В качестве механизма снижения рисков в методе используется тот факт, что уязвимость для этих погодных явлений различна для сельскохозяйственных культур. Соответственно, путем подбора структуры производства сельхозкультур с учетом их уязвимости для засух можно осуществить управление рисками, а также регулирование условий, наложенных на объемы производства сельскохозяйственных культур и на использование ограниченных ресурсов для производственных целей.

Некоторые результаты анализа климатических изменений влагообеспеченности почвы на юге ЕТР

Как известно, дефицит влаги наряду с высокими температурами приводит к опасному погодному явлению – засухам. Различают атмосферную и почвенную засуху. При длительном отсутствии дождя атмосферная засуха переходит в почвенную, когда содержание воды в почве снижается до пределов недоступной влаги [25]. Остановимся на некоторых результатах анализа изменений влагообеспеченности почвы в различных климатических зонах юга ЕТР, которая играет значительную роль в обеспечении продовольственной безопасности страны. Для мониторинга и анализа влияния увлажненности почв на сельскохозяйственное производство широко используются различные индексы [26, 27]. Для этой цели в настоящей работе исследовалась динамика гидротермического коэффициента увлажнения (ГТК) Г.Т. Селянинова [28]:

$$K = \frac{\sum P}{0,1 \sum t}, \quad (1)$$

где $\sum P$ – сумма осадков за период с температурами выше +10 °С, мм; $\sum t$ – сумма температур за этот же отрезок времени, °С; 0,1 – нормировочный коэффициент.

В зависимости от значений K выделяются следующие зоны влагообеспеченности почвы:

- 1) $K > 1,3$ – избыточное увлажнение;
- 2) $1 < K \leq 1,3$ – зона обеспеченного увлажнения;
- 3) $0,7 < K \leq 1,0$ – засушливая зона (или слабая засуха);
- 4) $0,5 < K \leq 0,7$ – зона сухого земледелия (средняя засуха);
- 5) $K \leq 0,5$ – зона ирригации (сильная засуха).

Исследования проводились с использованием данных метеостанций о количестве осадков и температуре воздуха с 1961 по 2018 г. (13 метеостанций в равнинной и предгорной климатических зонах юга ЕТР). В предгорной зоне метеостанции расположены в г. Буйнакск, Нальчик, Владикавказ, Черкесск, Ставрополь, Кисловодск. В равнинной зоне они расположены в г. Изобильный, Моздок, Прохладный (степная зона) и Дербент, Изберг, Изобильный, Кизляр, Махачкала (прикаспийская).

В качестве примера приведем результаты расчетов коэффициента K по данным метеопараметров в степной зоне г. Прохладного (Кабардино-Балкарская Республика) в 2018 г. (табл. 1).

Таблица 1 / Table 1

Средняя месячная температура воздуха t , °С, и количество осадков P , мм, в 2018 г., Прохладный /
 Average monthly air temperature t , °С, and precipitation P , mm, in 2018, Prokhladny

Показатель	Месяц											
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
t , °С	0,8	1,6	7,3	10,0	17,2	23,7	26,9	22,9	20,3	14,0	4,9	-0,8
P , мм	28,9	19,9	17,8	19,6	76,2	71,4	18,5	47,0	10,4	3,2	15,9	54,5

В табл. 1 приведены средние месячные температуры воздуха, а также выделены ячейки с месяцами, когда средняя температура выше +10 °С: май, июнь, июль, август, сентябрь, октябрь и соответствующие им среднемесячные суммы осадков. Тогда сумма осадков $\sum P$ определяется как простое сложение количества осадков в отмеченные месяцы:

$$\sum P = 76,2 + 71,4 + 18,5 + 47,0 + 10,4 + 3,2 = 226,7 \text{ мм.}$$

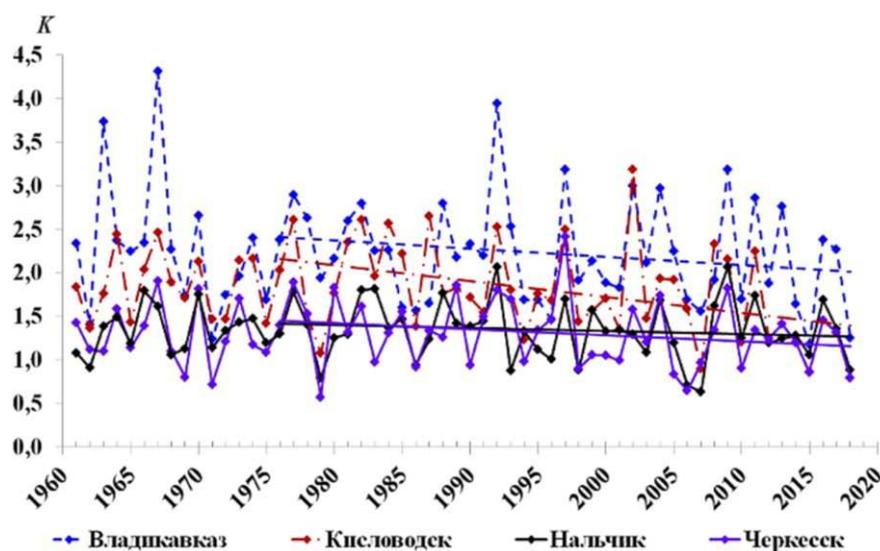
Сумма температур определяется с учетом количества дней в каждом месяце:

$$\sum t = 17,2 \cdot 31 \text{ (май)} + 23,7 \cdot 30 \text{ (июнь)} + 26,9 \cdot 31 \text{ (июль)} + 22,9 \cdot 31 \text{ (август)} + 20,3 \cdot 30 \text{ (сентябрь)} + 14,0 \cdot 31 \text{ (октябрь)} = 3831,0 \text{ °С.}$$

По формуле (1) определяется K для степной зоны в 2018 г.: $K = 226,7 / 0,1 \cdot 3831 = 0,59$.

Полученный коэффициент $K=0,59$ соответствует состоянию сухого земледелия для рассматриваемой территории в 2018 г. ($0,5 < K \leq 0,7$ – зона средней засухи). Аналогично проводится расчет коэффициента увлажнения K для каждого года.

Авторами был проведен подробный анализ динамики данного коэффициента в различных климатических зонах юга ЕТР, результаты изложены в работе [29]. Коротко отметим, что данный коэффициент имеет тенденцию к уменьшению различными темпами во всех климатических зонах. На рис. 1 приведены графики изменения значений коэффициента K для метеостанций предгорной (а) и степной (б) зон.



а – предгорная зона

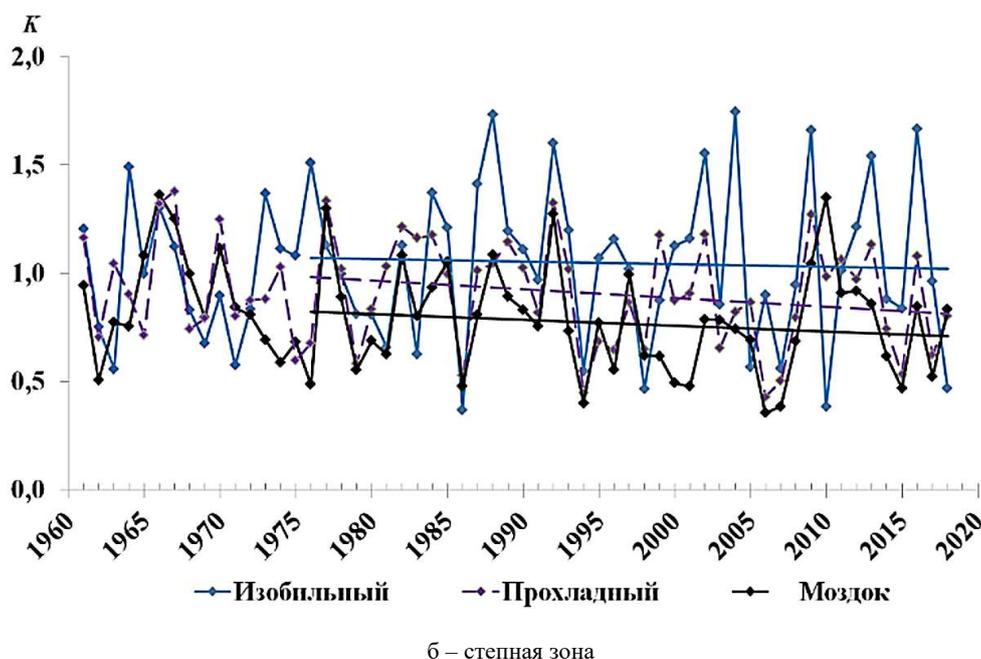


Рис. 1. Коэффициенты влагообеспеченности, полученные по данным метеостанций: а – предгорной и б – степной зон за 1961–2018 гг. / Fig. 1. Moisture coefficients obtained from the data of weather stations: a - in the foothill and b - steppe zones, 1961-2018

Если наблюдаемая в настоящее время тенденция изменения климата сохранится, то примерно в середине нынешнего столетия предгорная и равнинная климатические зоны юга ЕТР окажутся в засушливой зоне. Такая тенденция наблюдается и в других регионах ЕТР. Очевидно, что последствия таких изменений условий производства сельскохозяйственной продукции могут оказаться крайне негативными для продовольственной безопасности страны, что в существенной степени повышает актуальность разработки эффективных методов снижения последствий засух для производства сельскохозяйственной продукции.

Модель снижения потерь сельского хозяйства, связанных с засухами

Остановимся в краткой форме на записи модели снижения потерь сельского хозяйства от засух. Важнейшими задачами на пути разработки такой модели являются прогноз появления засухи в предстоящем году и определение ее характеристик или состояния, в котором она может находиться. Но в связи с отсутствием информации достаточного объема и достаточного качества на пути решения этих задач возникают серьезные трудности: невозможно с достаточной точностью определить состояние, в котором будет находиться рассматриваемое погодное явление в предстоящем году. Следует отметить, что источником такой информации являются данные многолетних наблюдений о засухах на заданной территории. Пользуясь этими данными, характеристики состояния засух, определяющие состояния, в которых они находятся, могут быть представлены либо в виде счетного множества их значений, либо в виде дискретной случайной величины с известным законом распределения. Такие особенности информационного обеспечения делают более перспективным рассмотрение задачи снижения рисков в рамках теории принятия решений. Во втором случае можно сказать, что имеется множество состояний засух $U_1, U_2, U_3, \dots, U_N$ с соответствующими вероятностями $p_1, p_2, p_3, \dots, p_N$ (табл. 2).

Таблица 2 / Table 2

Состояния засух на рассматриваемой территории n и соответствующие им вероятности p_j
 / States of droughts in the considered territory n and their corresponding probabilities p_j

n	0	1	2	N
p	p_0	p_1	p_2	p_N

Таким образом, предположено, что число состояний засух на заданной территории равно N , вероятности их нахождения в этих состояниях равны p_1, p_2, \dots, p_N . Случай $n=0$ в таблице соответствует отсутствию засух ($p=p_0$). Отметим, что в первом случае вероятности $p_1, p_2, p_3, \dots, p_N$ неизвестны [30].

Кроме этого, постановка данной задачи требует формирования и использования множества $A_1, A_2, A_3, \dots, A_M$, каждое из которых приводит к снижению рисков по выбранному критерию [31]. В данной работе при рассмотрении случая засух элементами множества $A_1, A_2, A_3, \dots, A_M$ являются площади сельскохозяйственных культур, а элементами множества $U_1, U_2, U_3, \dots, U_N$, как было отмечено, могут быть различные характеристики данного природного явления. При этом важно иметь в виду, что для каждой пары (A_i, U_j) должно быть возможным вычисление некоторой величины (исход) S_{ij} ($i=1, 2, \dots, M; j=1, 2, \dots, N$), которая равна значению выигрышей или потерь сельского хозяйства, в случае, когда используется действие A_i , а засуха находится в состоянии U_j . При их вычислении необходимо учитывать уязвимость сельскохозяйственных культур для засух. Отметим, что под уязвимостью культуры понимается доля урожайности, теряющаяся в случае, когда засуха находится в состоянии U_j [32].

В случае, когда известны $U_1, U_2, U_3, \dots, U_N$ и вероятности $p_1, p_2, p_3, \dots, p_N$, приходим к задаче принятия решений в условиях риска [31]. Для решения данной задачи получаем различные исходы в зависимости от комбинаций действий и состояния засух и формируем табл. 3, что позволяет определить ее как модель принятия решений для снижения потерь от засухи. Для выбора наиболее приемлемого из множества $A_1, A_2, A_3, \dots, A_M$ существуют различные критерии. В выражения для этих критериев входят и исходы S_{ij} ($i=1, 2, \dots, M; j=1, 2, \dots, N$).

Таблица 3 / Table 3

Формирование исходов S_{ij} , соответствующих действиям A_i и состояниям засух U_j
 / **Formation of outcomes S_{ij} corresponding to actions A_i and states U_j of droughts**

	U_1	U_2	U_3	–	U_N
A_1	S_{11}	S_{12}	S_{13}	–	S_{1N}
A_2	S_{21}	S_{22}	S_{23}	–	S_{2N}
A_3	S_{31}	S_{32}	S_{33}	–	S_{3N}
–	–	–	–	–	–
A_M	S_{M1}	S_{M2}	S_{M3}	–	S_{MN}

Ниже в качестве такого критерия используется математическое ожидание валового объема производства сельскохозяйственной продукции. Важно отметить, что элементы множества $A_1, A_2, A_3, \dots, A_M$ (допустимые площади производства сельхозкультур) подбираются с учетом ограничений, наложенных на объемы производства культур, на использование ограниченных ресурсов [30].

На пути решения данной задачи могут возникнуть такие трудности:

- множество действий $A_1, A_2, A_3, \dots, A_M$ может оказаться ограниченным и, как следствие, его элементы могут быть далекими от оптимальных;
- формирование множества $A_1, A_2, A_3, \dots, A_M$ может оказаться трудоемким.

Ниже при решении модельных задач излагается один подход к определению элементов множества состояний засух и соответствующих им вероятностей, приводятся выражения для вычисления значений S_{ij} с учетом уязвимости культур для засух.

Некоторые результаты модельных расчетов

Остановимся на некоторых результатах модельных расчетов, проведенных для производственно-экономических условий предгорной и степной климатических зон КБР. Для определения состояний, в которых могут находиться засухи, была использована приведенная выше их классификация по значениям коэффициента K . Значения K , как было отмечено, были вычислены на интервале 1976–2018 гг. с использованием данных о среднемесячной температуре

приземного воздуха и сумме осадков с мая по октябрь метеостанций Нальчик и Прохладный. Пользуясь значениями K на достаточно длинном отрезке времени, состояния засух в различных климатических зонах были представлены в виде дискретной случайной величины. Для этой цели во временных рядах K были определены количества элементов n_1, n_2, n_3, n_4, n_5 , которые соответствуют различным зонам увлажнения: $K > 1,3$; $1 < K \leq 1,3$; $0,7 < K \leq 1,0$; $0,5 < K \leq 0,7$ и $K < 0,5$. Очевидно, что $\sum_{j=1}^5 n_j = N$, а вероятности состояний засух определяются по формуле $p_i = n_i/N$.

В табл. 4 приведены состояния, в которых могут оказаться засухи в предгорной (м/с Нальчик) и степной (м/с Прохладный) климатических зонах КБР и соответствующие им вероятности. Из таблицы видно, что за исследуемый период времени наиболее часто встречающимся состоянием в предгорной зоне является избыточное увлажнение ($p=0,420$), за ним следует состояние обеспеченного увлажнения ($p=0,403$). Случаю, когда значение K находится в засушливой зоне, соответствует вероятность $p=0,145$. Состояние $K \leq 0,5$, соответствующее сильной засухе, на рассматриваемом отрезке времени в данной климатической зоне не наблюдалось.

Таким образом, засухи в предгорной климатической зоне могут находиться в четырех состояниях U_j ($j=1, 2, 3, 4$). Из таблицы видно, что вероятность появления засух в данной климатической зоне незначительна и равна 0,177 (для коэффициента влагообеспеченности в интервалах $0,7 < K \leq 1,0$ и $0,5 < K \leq 0,7$).

Таким образом, агрометеорологические условия в предгорной климатической зоне КБР пока еще являются благоприятными для производства растениеводческой продукции. Данные, приведенные в табл. 4, показывают, что подверженности климатических зон региона данному погодному явлению существенным образом различаются.

Таблица 4 / Table 4

Зоны увлажнения почвы в предгорной и степной климатических зонах КБР и соответствующие вероятности / Soil moistening zones in the foothill and steppe climatic zone of the KBR and the corresponding probabilities

Предгорная зона КБР (м/с Нальчик)					
K	$K > 1,3$	$1 < K \leq 1,3$	$0,7 < K \leq 1,0$	$0,5 < K \leq 0,7$	$K < 0,5$
p	0,420	0,403	0,145	0,032	0,0
Степная зона КБР (м/с Прохладный)					
K	$K > 1,3$	$1 < K \leq 1,3$	$0,7 < K \leq 1,0$	$0,5 < K \leq 0,7$	$K \leq 0,5$
p	0,016	0,371	0,355	0,226	0,032

Если наиболее часто встречающимся состоянием коэффициента влагообеспеченности в предгорной зоне является избыточное увлажнение ($p=0,420$), то в степной зоне таким состоянием является обеспеченное увлажнение ($p=0,371$). Вероятность того, что сельское хозяйство предгорной зоны окажется под влиянием засух, незначительна и равна $p=0,177$, для степной зоны – $p=0,613$.

Далее предположим, что на участке $S=600$ га производятся сельхозкультуры: озимая пшеница, кукуруза, овес и картофель. Влагообеспеченность почвы может находиться в состояниях, которые указаны в табл. 4. Вероятности p_i , соответствующие каждому состоянию, известны.

Пусть элементами множества действий являются следующие структуры производства культур:

- | | | |
|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| 1. 300, 100, 100, 100 га. | 4. 240, 100, 100, 160 га. | 7. 240, 100, 160, 100 га. |
| 2. 150, 100, 250, 100 га. | 5. 200, 200, 20, 180 га. | 8. 150, 100, 100, 250 га. |
| 3. 300, 100, 80, 120 га. | 6. 240, 160, 100, 100 га. | 9. 210, 190, 100, 100 га. |

Таким образом, для снижения потерь сельского хозяйства от засух возможно использование девяти действий. Задача заключается в выборе наиболее приемлемой структуры. Для этой цели, как было отмечено, необходимо составить табл. 3, что требует вычисления исходов S_{ij} ($i=1, 2, \dots, 9$;

$j=1, 2, \dots, 4$). В качестве исхода, соответствующего действию A_i и состоянию засух j , в работе используется объем производства сельскохозяйственной продукции:

$$S_{ij} = \sum_{l=1}^4 (1 - k_{jl}) Y_l R_l x_{il}, \quad (2)$$

где k_{jl} – уязвимость культуры с номером l , когда засуха находится в состоянии j ; Y_l, R_l – соответственно, урожайность, ц/га, и цена реализации культуры с номером l , руб./ц; x_{il} – площадь пашни, занимаемая культурой с номером l и соответствующая действию A_i , га. Под уязвимостью понимается доля урожайности культуры l , теряющаяся под влиянием засухи в состоянии U_j [32].

Тогда ожидаемый объем производства сельскохозяйственных культур, соответствующий действию A_i , можно записать в виде

$$V_i = \sum_{j=1}^4 \sum_{l=1}^4 p_j (1 - k_{jl}) Y_l R_l x_{il}, \quad (3)$$

где p_j – вероятность того, что засуха находится в состоянии U_j .

Расчеты проводились для значений параметров урожайности культуры Y_l , цены реализации R_l и коэффициента уязвимости k_{jl} , приведенных в табл. 5.

Таблица 5 / Table 5

Исходные данные для проведения расчетов / Initial data for calculations

m , сельхозкультура	Y_l , ц/га	Коэффициент уязвимости k_{jl}					R^*_l , тыс. руб./ц
$j=1$, пшеница	40	$k_{11}=0,0$	$k_{12}=0,0$	$k_{13}=0,0$	$k_{14}=0,0$	$k_{15}=0,6$	1,35
$j=2$, кукуруза	50	$k_{21}=0,0$	$k_{22}=0,0$	$k_{23}=0,0$	$k_{24}=0,0$	$k_{25}=0,6$	1,1
$j=3$, овес	35	$k_{31}=0,2$	$k_{32}=0,2$	$k_{33}=0,2$	$k_{34}=0,2$	$k_{35}=0,7$	0,7
$j=4$, картофель	150	$k_{41}=0,3$	$k_{42}=0,3$	$k_{43}=0,4$	$k_{44}=0,4$	$k_{45}=0,6$	1,0

* – данные сайта Госкомстата КБР [33].

Не останавливаясь подробно на результатах вычисления исходов S_{ij} ($i=1, 2, \dots, 9; j=1, 2, \dots, 5$), приведем ожидаемые валовые объемы производства продукции V_i , полученные для условий предгорной климатической зоны и соответствующие действиям A_i :

$$\begin{aligned} V_1 &= 37\ 583 \text{ тыс. руб.} & V_4 &= 43\ 092 \text{ тыс. руб.} & V_7 &= 35\ 877 \text{ тыс. руб.} \\ V_2 &= \mathbf{33\ 317 \text{ тыс. руб.}} & V_5 &= 47\ 299 \text{ тыс. руб.} & V_8 &= \mathbf{51\ 355 \text{ тыс. руб.}} \\ V_3 &= 39\ 989 \text{ тыс. руб.} & V_6 &= 37\ 641 \text{ тыс. руб.} & V_9 &= 37\ 669 \text{ тыс. руб.} \end{aligned}$$

Отсюда можно заметить, что наилучшим из всех действий является A_8 (150, 100, 100, 250), а наихудшим, как можно заметить, – действие A_2 (150, 100, 250, 100). Разброс между ожидаемыми валовыми объемами производства продукции, соответствующими отмеченным действиям, равен 18 038 тыс. руб.

Для сравнения такие же расчеты с использованием тех же данных проводились и для условий степной зоны. В этом случае соответствующие различным действиям ожидаемые объемы производства сельскохозяйственных культур V_i получились равными:

$$\begin{aligned} V_1 &= 31\ 018 \text{ тыс. руб.} & V_4 &= 35\ 599 \text{ тыс. руб.} & V_7 &= 29\ 623 \text{ тыс. руб.} \\ V_2 &= \mathbf{27\ 532 \text{ тыс. руб.}} & V_5 &= 39\ 082 \text{ тыс. руб.} & V_8 &= \mathbf{42\ 471 \text{ тыс. руб.}} \\ V_3 &= 33\ 010 \text{ тыс. руб.} & V_6 &= 31\ 076 \text{ тыс. руб.} & V_9 &= 31\ 105 \text{ тыс. руб.} \end{aligned}$$

Можно заметить, что, как и в предгорной зоне, максимальный и минимальный ожидаемые объемы производства продукции соответствуют действиям A_8 (150, 100, 100, 250) и A_2 (150, 100,

250, 100), а разброс между ними равен 14 939 тыс. руб. Кроме этого, значения V_i в предгорной зоне выше, чем в степной, что связано с тем, что данная климатическая зона менее подвержена засухам.

Отметим, что с точки зрения отмеченного выше требования к методам снижения рисков (с точки зрения экономичности практического использования) изложенный метод имеет значительное преимущество.

Заключение

В методе, предложенном в работе, в качестве механизма снижения потерь растениеводческой отрасли аграрного сектора от засух используется то, что уязвимость для засух различна для различных сельскохозяйственных культур. Путем выбора наиболее эффективной структуры производства сельскохозяйственных культур с точки зрения используемого критерия осуществляется управление потерями сельского хозяйства от засух. Авторами предложена модель снижения потерь сельского хозяйства от засух в рамках теории принятия решений.

Для анализа эффективности метода для производственно-экономических условий предгорной и степной климатических зон КБР проведены модельные расчеты. При этом для определения возможных состояний засух в данной климатической зоне была использована классификация засух в зависимости от значений гидротермического коэффициента увлажнения Селянинова. Для вычисления значений данного коэффициента и соответствующих им вероятностей использовались временные ряды температуры воздуха и количества осадков за период 1961–2018 гг., что сводит задачу снижения потерь сельского хозяйства к задаче принятия решений в условиях риска. Приведенные модельные расчеты показали достаточно высокую эффективность метода для поставленной задачи. Важным достоинством метода является то, что практическое его использование не требует значительных финансовых затрат.

Серьезное внимание следует уделить исследованию уязвимости сельскохозяйственных культур для засух. При этом необходимо учитывать, что она существенно зависит от фазы развития сельскохозяйственных культур и от состояния, в котором находятся засухи. Это относится и к другим опасным погодным явлениям.

Список источников

1. Парниковый эффект, изменение климата и экосистемы / под ред. Б. Болина, Б. Дееса, Дж. Ягера, Р. Уорика. Л.: Гидрометеиздат, 1989. 558 с.
2. Булыгина О.Н., Кориунова Н.Н., Кузнецова В.Н., Разуаев В.Н., Трофименко Л.Т. Анализ изменчивости климата на территории России в последние десятилетия // Тр. ВНИИГМИ-МЦД. 2000. Вып. 167. С. 3–15.
3. Золина О.Г., Булыгина О.Н. Современная климатическая изменчивость характеристик экстремальных осадков в России // Фундаментальная и прикладная климатология. 2016. Т. 1. С. 84–103.
4. Ashabokov B.A., Tashilova A.A., Kesheva L.A., Taubekova Z.A. Trends in Precipitation Parameters in the Climate Zones of Southern Russia (1961–2011) // Russian Meteorology and Hydrology. 2017. Vol. 42, № 3. P. 150–158.
5. Ашабоков Б.А., Ташилова А.А., Кешева Л.А., Таубекова З.А. Климатические изменения средних значений и экстремумов приповерхностной температуры воздуха на юге европейской территории России // Фундаментальная и прикладная климатология. 2017. Т. 1. С. 5–19.
6. Ашабоков Б.А., Федченко Л.М., Ташилова А.А., Кешева Л.А., Теунова Н.В. Пространственно-временное изменение климата юга европейской территории России, оценка его последствий, методы и модели адаптации АПК. Нальчик: Фрегат, 2020. 476 с.
7. Катцов В.М., Школьник И.М., Павлова В.Н., Хлебникова Е.И., Константинов А.В., Павлова Т.В., Пикалева А.А., Рудакова Ю.А., Салль И.А., Байдин А.В., Задворных В.А. Развитие технологии вероятностного прогнозирования регионального климата на территории России и построение на ее основе сценарных прогнозов изменения климатических воздействий на секторы экономики. Часть II: Оценки климатических воздействий // Тр. Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова. 2019. Вып. 593. С. 6–52.
8. Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации: общее резюме. СПб.: Научное издание, 2022. 124 с.
9. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2022 год. М., 2023. 104 с.

10. *Кравченко Р.Г.* Математическое моделирование экономических процессов в сельском хозяйстве. М.: Колос, 1979. 388 с.
11. *Уланова Е.С., Страшина А.И.* Засухи в России и их влияние на урожайность зерновых культур // Тр. ВНИИСХМ. 2000. Вып. 33. С. 64–83.
12. *Израэль Ю.А., Сиротенко О.Д.* Моделирование влияния изменений климата на продуктивность сельского хозяйства России // Метеорология и гидрология. 2003. № 6. С. 5–17.
13. *Зойдзе Е.К., Хомякова Т.В., Шостак З.А., Сиротенко В.Г., Овчаренко А.И., Сухарева В.А.* О проблеме адекватного агроклиматического обеспечения экономики Российской Федерации в условиях изменения климата // Метеорология и гидрология. 2010. № 8. С. 73–86.
14. *Переверденцев Ю.П., Шарипова Р.Б., Важнова Н.А.* Агроклиматические ресурсы Ульяновской области и их влияние на урожайность зерновых культур // Вестн. УдГУ. Биология. Науки о Земле. 2012. № 2. С. 120–126.
15. *Черенкова Е.А., Бардин М.Ю., Золотокрылин А.Н.* Статистика осадков и засух в противоположные фазы квазидвухлетней цикличности атмосферных процессов и ее связь с урожайностью в европейской части РФ // Метеорология и гидрология. 2015. № 3. С. 23–35.
16. *Балкизова А.Х., Ташилова А.А., Пишхачева И.Н.* Основные этапы и задачи проблемы адаптации аграрного сектора к изменениям климата // Устойчивое развитие: проблемы, концепции, модели: материалы междунар. симп. КБНЦ РАН, 28 июня – 3 июля. Нальчик, 2013. Т. 1. С. 106–109.
17. *Ashabokov B.A., Fedchenko L.M., Tashilova A.A., Shapovalov A.V., Khavtsukov A.Kh., Balkarova S.B.* Modeling Risk Reduction in Agriculture Associated with Dangerous Agrometeorological Phenomena // AgroSMART – Smart solutions for agriculture. International Scientific and Practical Conference. KnE Life Sciences, 2019. P. 223–231. Doi: 10.18502/kl.v4i14.5608.
18. *Dai A., Trenberth K.E., Qian T.* A global dataset of Palmer Drought Severity Index for 1870–2002: Relationship with soil moisture and effects of surface warming // J. Hydrometeorol. 2004. Vol. 5. P. 1117–1130.
19. *Lane D., Chatrchyan A., Tobin D., Thorn K., Allred S., Radhakrishna R.* Climate change and agriculture in New York and Pennsylvania: Risk perceptions, vulnerability and adaptation among farmers // Renew. Agric. FoodSyst. 2018. Vol. 33. P. 197–205.
20. *Vicente-Serrano S.M., Dominguez-Castro F., Murphy C., Hannaford J., Reig F., Pena-Angulo D., Trambly Y., Trigo R.M., MacDonald N., Luna M.Y., McCarthy M., Van der Schrier G., Turco M., Camuffo D., Noguera I., Carcia-Herrera R., Becherini F., della Valle A., Tomas-Burguera M., El Kenawy A.* Long-Term Variability and Trends in Meteorological Droughts in Western Europe (1851–2018) // Int. J. Climatol. 2021. Vol. 41. P. 690–717.
21. *Ferreira N.C.R., Rötter R.P., Bracho-Mujica G., Nelson W.C.D., Lam Q.D., Recktenwald C., Abdulai I., Odhiambo J., Foord S.* Drought patterns: Their spatiotemporal variability and impacts on maize production in Limpopo province, South Africa // Int. J. Biometeorol. 2023. Vol. 67. P. 133–148.
22. *Shang Z., Lu Z., Shang S., Zhang X., He L., Jiang D.* Effects of Relative Climate Changes on the Growth Period of Winter Wheat in Jiangsu Province, China // Romanian Agricultural Research. 2016. Vol. 33. P. 88–96.
23. *Wilcox J., Makowski D.* A Meta-Analysis of the Predicted Effects of Climate Change on Wheat Yields using Simulation Studies // Field Crops Research. 2014. Vol. 156. P. 180–190.
24. *Elias E.H., Flynn R., Idowu O.J., Reyes J., Sanogo S., Schutte B.J., Smith R., Steele C., Sutherland C.* Crop Vulnerability to Weather and Climate Risk: Analysis of Interacting Systems and Adaptation Efficacy for Sustainable Crop Production // Sustainability. 2019. Vol. 11 (23). P. 6619. <https://doi.org/10.3390/su11236619>.
25. *Чудинова Л.А., Орлова Н.В.* Физиология устойчивости растений. Пермь: Перм. ун-т, 2006. 124 с.
26. *Heim R.R.* A review of twentieth-century drought indices used in the United States // Bull. Am. Met. Soc. 2002. Vol. 84. P. 1149–1165.
27. *Hayes M.J., Alvord C., Lowrey J.* Drought indices // Intermountain West Climate Summary. 2007. Vol. 3 (6). P. 2–6.
28. *Селянинов Г.Т.* Агроклиматическая карта мира. Л.: Гидрометеиздат, 1996. 12 с.
29. *Залиханов М.Ч., Федченко Л.М., Ашабоков Б.А., Кешева Л.А., Теунова Н.В.* Возможные последствия изменения климата на юге европейской территории России // Успехи современного естествознания. 2021. № 12. С. 107–113.
30. *Кини Р.Л., Райфа Х.* Принятие решений при многих критериях: предпочтения и замещения. М.: Радио и связь, 1981. 560 с.
31. *Таха Х.* Введение в исследование операций. М.: Мир, 1985. Т. 2. 496 с.
32. *Генкель П.А.* Физиология жаро- и засухоустойчивости. М.: Наука, 1982. 280 с.
33. Управление Федеральной службы государственной статистики по Северо-Кавказскому федеральному округу. URL: https://stavstat.gks.ru/ofstatistics_kbr (дата обращения: 10.03.2023).

References

1. Bolin B., Dees B., Jager J., Warwick R., eds. *Greenhouse effect, climate change and ecosystems*. Leningrad: Gidrometeoizdat Publ., 1989. 558 p. (In Russ.).
2. Bulygina O.N., Korshunova N.N., Kuznetsova V.N., Razuvaev V.N., Trofimenko L.T. Analysis climate variability in Russia in recent decades. *Tr. VNIIGMI-MTsD = Proceedings of the All-Russian Research Institute of Hydrometeorological Information - World Data Center*. 2000;(167):3-15. (In Russ.).
3. Zolina O.G., Bulygina O.N. Modern climatic variability of extreme precipitation characteristics in Russia. *Fundamental'naya i prikladnaya klimatologiya = Fundamental and Applied Climatology*. 2016;1:84-103. (In Russ.).
4. Ashabokov B.A., Tashilova A.A., Kesheva L.A., Taubekova Z.A. Trends in Precipitation Parameters in the Climate Zones of Southern Russia (1961-2011). *Russian Meteorology and Hydrology*. 2017;42(3):150-158.
5. Ashabokov B.A., Tashilova A.A., Kesheva L.A., Taubekova Z.A. Climatic changes in mean values and extremes of near-surface air temperature in the south of the European territory of Russia. *Fundamental'naya i prikladnaya klimatologiya = Fundamental and Applied Climatology*. 2017;1:5-19. (In Russ.).
6. Ashabokov B.A., Fedchenko L.M., Tashilova A.A., Kesheva L.A., Teunova N.V. *Spatio-temporal climate change in the south of the European territory of Russia, assessment of its consequences, methods and models of adaptation of agriculture*. Nalchik: Fregat Publ.; 2020. 476 p. (In Russ.).
7. Kattsov V.M., Shkolnik I.M., Pavlova V.N., Khlebnikova E.I., Konstantinov A.V., Pavlova T.V., Pikaleva A.A., Rudakova Yu.A., Sall I.A., Baidin A.V., Zadvornykh V.A. Development of technology for probabilistic forecasting of regional climate in Russia and building on it is based on scenario forecasts of changes in climate impacts on economic sectors. Part II: Climate impact assessments. *Tr. Glavnoi geofizicheskoi observatorii im. A.I. Voeikova = Proceedings of the Voeikov Main Geophysical Observatory*. 2019;(593):6-52. (In Russ.).
8. *Third assessment report on climate change and its consequences on the territory of the Russian Federation: general summary*. St. Petersburg: Naukoemkie tekhnologii Publ.; 2022. 124 p. (In Russ.).
9. *Report on the peculiarities of the climate in the territory of the Russian Federation for 2022*. Moscow, 2023. 104 p. (In Russ.).
10. Kravchenko R.G. *Mathematical modeling of economic processes in agriculture*. Moscow: Kolos Publ.; 1979. 388 p. (In Russ.).
11. Ulanova E.S., Strashnaya A.I. Droughts in Russia and their impact on the yield of grain crops. *Tr. VNIISKhM = Proceedings of the All-Russian Research Institute of Agricultural Meteorology*. 2000;(33):64-83. (In Russ.).
12. Israel Yu.A., Sirotenko O.D. Modeling the impact of climate change on the productivity of agriculture in Russia. *Meteorologiya i gidrologiya = Meteorology and Hydrology*. 2003;(6):5-17. (In Russ.).
13. Zoidze E.K., Khomyakova T.V., Shostak Z.A., Sirotenko V.G., Ovcharenko A.I., Sukhareva V.A. On the problem of adequate agro-climatic support of the economy of the Russian Federation in the conditions of climate change. *Meteorologiya i gidrologiya = Meteorology and Hydrology*. 2010;(8):73-86. (In Russ.).
14. Perevedentsev Yu.P., Sharipova R.B., Vazhnova N.A. Agro-climatic resources of the Ulyanovsk region and their impact on the yield of grain crops. *Vestn. UdGU. Biologiya. Nauki o Zemle = Bulletin of Udmurt University. Series Biology. Earth Sciences*. 2012;(2):120-126. (In Russ.).
15. Cherenkova E.A., Bardin M.Yu., Zolotokrylin A.N. Statistics of precipitation and droughts in the opposite phases of the quasi-two-year cycle of atmospheric processes and its relationship with productivity in the European part of the Russian Federation. *Meteorologiya i gidrologiya = Meteorology and Hydrology*. 2015;(3):23-35. (In Russ.).
16. Balkizova A.Kh., Tashilova A.A., Pshikhacheva I.N. The main stages and tasks of the problem of adaptation of the agricultural sector to climate change. *Sustainable development: problems, concepts, models: materials of the international symposium*. KBSC RAS, June 28 - July 3. Nalchik, 2013;1:106-109. (In Russ.).
17. Ashabokov B.A., Fedchenko L.M., Tashilova A.A., Shapovalov A.V., Khavtsukov A.Kh., Balkarova S.B. Modeling Risk Reduction in Agriculture Associated with Dangerous Agrometeorological Phenomena. *AgroSMART – Smart solutions for agriculture. International Scientific and Practical Conference*. KnE Life Sciences, 2019:223-231, doi: 10.18502/cls.v4i14.5608.
18. Dai A., Trenberth K.E., Qian T. A global dataset of Palmer Drought Severity Index for 1870-2002: Relationship with soil moisture and effects of surface warming. *J. Hydrometeorol.* 2004;5:1117-1130.
19. Lane D., Chatrchyan A., Tobin D., Thorn K., Allred S., Radhakrishna R. Climate change and agriculture in New York and Pennsylvania: Risk perceptions, vulnerability and adaptation among farmers. *Renew. Agric. FoodSyst.* 2018;33:197-205.
20. Vicente-Serrano S.M., Domínguez-Castro F., Murphy C., Hannaford J., Reig F., Pena-Angulo D., Trambly Y., Trigo R.M., MacDonald N., Luna M.Y., McCarthy M., Van der Schrier G., Turco M., Camuffo D., Noguera I., Carcia-Herrera R., Becherini F., della Valle A., Tomas-Burguera M., El Kenawy A. Long-Term Variability and Trends in Meteorological Droughts in Western Europe (1851-2018). *Int. J. Climatol.* 2021;41:690-717.

21. Ferreira N.C.R., Rötter R.P., Bracho-Mujica G., Nelson W.C.D., Lam Q.D., Recktenwald C., Abdulai I., Odhiambo J., Foord S. Drought patterns: Their spatiotemporal variability and impacts on maize production in Limpopo province, South Africa. *Int. J. Biometeorol.* 2023;67:133-148.
22. Shang Z., Lu Z., Shang S., Zhang X., He L., Jiang D. Effects of Relative Climate Changes on the Growth Period of Winter Wheat in Jiangsu Province, China. *Romanian Agricultural Research.* 2016;33:88-96.
23. Wilcox J., Makowski D. A Meta-Analysis of the Predicted Effects of Climate Change on Wheat Yields using Simulation Studies. *Field Crops Research.* 2014;156:180-190.
24. Elias E.H., Flynn R., Idowu O.J., Reyes J., Sanogo S., Schutte B.J., Smith R., Steele C., Sutherland C. Crop Vulnerability to Weather and Climate Risk: Analysis of Interacting Systems and Adaptation Efficacy for Sustainable Crop Production. *Sustainability.* 2019;11(23):6619, <https://doi.org/10.3390/su11236619>.
25. Chudinova L.A., Orlova N.V. *Physiology of plant resistance.* Perm: Perm University Press; 2006. 124 p. (In Russ.).
26. Heim R.R. A review of twentieth-century drought indices used in the United States. *Bull. Am. Met. Soc.* 2002;84:1149-1165.
27. Hayes M.J., Alvord C., Lowrey J. Drought indices. *Intermountain West Climate Summary.* 2007;3(6):2-6.
28. Selyaninov G.T. *Agro-climatic map of the world.* Leningrad: Gidrometeoizdat Publ.; 1996. 12 p. (In Russ.).
29. Zalikhanov M.Ch., Fedchenko L.M., Ashabokov B.A., Kesheva L.A., Teunova N.V. Possible consequences of climate change in the south of the European territory of Russia. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya = Advances in Current Natural Sciences.* 2021;(12):107-113. (In Russ.).
30. Kini R.L., Raifa X. *Decision-making under many criteria: preferences and substitutions.* Moscow: Radio i svyaz' Publ.; 1981. 560 p. (In Russ.).
31. Takha H. *Introduction to operations research.* Moscow: Mir Publ.; 1985. Vol. 2. 496 p. (In Russ.).
32. Genkel P.A. *Physiology of heat and drought resistance.* Moscow: Nauka Publ.; 1982. 280 p. (In Russ.).
33. *Department of the Federal State Statistics Service for the North Caucasus Federal District.* Available from: https://stavstat.gks.ru/ofstatistics_kbr [Accessed 10th March 2023]. (In Russ.).

Информация об авторах

Борис Азреталиевич Ашабоков – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий отделом физики облаков, Высогогорный геофизический институт; заведующий отделом, Институт информатики и проблем регионального управления КБНЦ РАН.

Людмила Михайловна Федченко – доктор географических наук, профессор, главный научный сотрудник.

Геннадий Владимирович Куповых – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой высшей математики, Институт компьютерных технологий и информационной безопасности.

Алла Амарбиевна Ташилова – доктор физико-математических наук, доцент, старший научный сотрудник.

Лара Асировна Кешева – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник.

Наталья Вячеславовна Теунова – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник.

Марина Борисовна Ашабокова – младший научный сотрудник.

Information about the authors

Boris A. Ashabokov - Doctor of Science (Physics and Mathematics), Professor, Head of the Department of Cloud Physics, High-Mountain Geophysical Institute; Head of the Department, Institute of Informatics and Problems of Regional Management, KBSC RAS.

Lyudmila M. Fedchenko - Doctor of Science (Geography), Professor, Main Researcher.

Gennady V. Kupovykh - Doctor of Science (Physics and Mathematics), Professor, Head of the Department of Higher Mathematics, Institute of Computer Technologies and Information Security.

Alla A. Tashilova - Doctor of Science (Physics and Mathematics), Associate Professor, Senior Researcher.

Lara A. Kesheva - Candidate of Science (Physics and Mathematics), Senior Researcher.

Nataliya V. Teunova - Candidate of Science (Physics and Mathematics), Senior Researcher.

Marina B. Ashabokova - Junior Researcher.

Статья поступила в редакцию 06.04.2023; одобрена после рецензирования 23.05.2023; принята к публикации 20.06.2023.
The article was submitted 06.04.2023; approved after reviewing 23.05.2023; accepted for publication 20.06.2023.

Научная статья

УДК 911.2:556.11

doi: 10.18522/1026-2237-2023-3-57-70

ГИДРОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ОЗЁР БОЛЬШОЕ И МАЛОЕ ТУРАЛИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ИССЛЕДОВАНИЙ В 2018 И 2021 годах

Н.Н. Баранникова¹, Д.Н. Гарькуша², Ю.А. Фёдоров³, И.А.А. Альмаджамал⁴, А. Эршова⁵,
Е.В. Чернявская⁶

^{1, 2, 3, 4, 5, 6} Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, Россия

¹nnbarannikova@sfedu.ru

²gardim1@yandex.ru

³fedorov@sfedu.ru

Аннотация. В летние месяцы 2018 и 2021 гг. в воде озёр Малое и Большое Турали определены концентрации главных ионов, сухой остаток, значения рН и температуры; в различных горизонтах (до 20 см) донных отложений, помимо концентраций метана и суммарного сероводорода, определены значения Eh и рН, влажность и плотность. Минерализация вод озёр Большое и Малое Турали в 2018 г., соответственно, составляла 275,8 и 19,1 г/дм³. По химическому составу класс вод в озерах хлоридный, группа натриевая, тип второй. В 2021 г. минерализация озера снизилась, особенно сильно в оз. Большое Турали. Показано, что значительное рассоление его вод не связано с выпадением атмосферных осадков, а вызвано искусственным обводнением водами подпитывающего канала. Для отложений озёр характерна нейтральная или слабощелочная среда (рН от 7,01 до 7,88) и сильная изменчивость окислительно-восстановительных условий (Eh от -213,8 до +177,0 мВ). Концентрации CH₄ в отложениях озёр Малое и Большое Турали варьировались в пределах 0,006–0,070 и 0,011–0,12 мкг/г влажного осадка. Концентрации ΣH₂S изменялись от <0,005 до 0,241 мг/г – в оз. Малое Турали и от <0,005 до 1,47 мг/г – в оз. Большое Турали. Связь между CH₄ и ΣH₂S проявляется слабо, что обусловлено незначительными их концентрациями, связанными с недостаточно низким для интенсивного протекания анаэробных процессов Eh в большинстве горизонтов отложений.

Ключевые слова: Туралинские озёра, источники питания, вода, донные отложения, катион-анионный состав, Eh, рН, метан, сероводород

Благодарности: исследование выполнено по гранту Российского научного фонда № 22-27-00671, <https://rscf.ru/project/22-27-00671/>, в Южном федеральном университете.

Для цитирования: Баранникова Н.Н., Гарькуша Д.Н., Фёдоров Ю.А., Альмаджамал И.А.А., Эршова А., Чернявская Е.В. Гидрохимические особенности озёр Большое и Малое Турали по результатам исследований в 2018 и 2021 годах // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2023. № 3. С. 57–70.

Статья опубликована на условиях лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY 4.0).

Original article

HYDROCHEMICAL FEATURES OF LAKES BOLSHOE AND MALOE TURALI ACCORDING TO RESEARCH RESULTS IN 2018 AND 2021

N.N. Barannikova^{1✉}, D.N. Gar'kusha², Yu.A. Fedorov³, I.A.A. Almajamai⁴, A. Ereshova⁵,
E.V. Chernyavskaya⁶

^{1, 2, 3, 4, 5, 6} Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia

¹nnbarannikova@sfedu.ru✉

²gardim1@yandex.ru

³fedorov@sfedu.ru

Abstract. In the summer months of 2018 and 2021, concentrations of major ions, dry residue, pH and temperature were determined in the water of the Maloe and Bolshoe Turali lakes; in various horizons (up to 20 cm) of bottom sediments, in addition to concentrations of methane and total hydrogen sulfide, Eh and pH values, humidity and density were determined. The mineralization of the waters of the Bolshoe and Maloe Turali lakes in 2018 was 275.8 and 19.1 g/dm³, respectively. According to the chemical composition, the class of waters in lakes is chloride, the sodium group, the second type. In 2021, the mineralization of lakes decreased, especially strongly in the lake Bolshoe Turali. It is shown that the significant salinization of its waters is not associated with precipitation, but is caused by artificial flooding of the feeding channel with water. Lake sediments are characterized by a neutral or slightly alkaline environment (pH from 7.01 to 7.88) and strong variability of redox conditions (Eh from -213.8 to 177.1 mV). The concentrations of CH₄ in the sediments of the Maloe and Bolshoe Turali lakes varied in the range of 0.006–0.070 µg/g of wet sediment and 0.011–0.12 µg/g, respectively. The concentrations of ΣH₂S varied from <0.005 to 0.241 mg/g in the lake of Maloe Turali and from <0.005 to 1.47 mg/g in the lake of Bolshoe Turali. The relationship between CH₄ and ΣH₂S is weakly manifested, which is due to their insignificant concentrations associated with Eh not low enough for intensive anaerobic processes in most sediment horizons.

Keywords: Turali lakes, food sources, water, bottom sediments, cation-anionic composition, Eh, pH, methane, hydrogen sulfide

Acknowledgments: the study was carried out under the grant of the Russian Science Foundation No. 22-27-00671, <https://rscf.ru/project/22-27-00671/>, at the Southern Federal University.

For citation: Barannikova N.N., Gar'kusha D.N., Fedorov Yu.A., Almajamai I.A.A., Ereshova A., Chernyavskaya E.V. Hydrochemical Features of Lakes Bolshoe and Maloe Turali According to Research Results in 2018 and 2021. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2023;(3):57-70. (In Russ.).

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC-BY 4.0).

Введение

Озёра Большое и Малое Турали (Туралинские озёра) расположены в центральной части западного побережья Каспийского моря, на южной окраине г. Каспийска, на севере Карабудахкентского района Республики Дагестан [1].

Туралинские озёра – естественные постоянные приморские водоёмы лагунного происхождения, вытянутые параллельно друг другу с северо-запада на юго-восток вдоль побережья Каспий-

ского моря. От Каспийского моря оз. Большое Турали отделено подверженной переработке ветром песчано-гравийно-галечной пересыпью шириной до 1,7–2,5 км с псаммофильной растительностью. К западу от него на расстоянии до 750 м на севере, до 280 м на юге и на 10 м гипсометрически выше расположено оз. Малое Турали. Гряда, отделяющая озера и являющаяся препятствием для поверхностного водообмена между ними, сложена плотными песчаными отложениями, ракушей, суглинками и известняками [2].

Располагаются озёра на двух древних морских террасах, сформированных в периоды позднехвалынской и в последнюю фазу новокаспийских трансгрессий [3]. Образовались озёра из отшнуровавшихся лагун Каспийского моря при падении его уровня, унаследовав их плоские выровненные чаши.

Берега озёр на большей части открытые, и лишь по берегам оз. Малое Турали местами формируются разреженные и невысокие заросли тростника. Территории вокруг озёр заняты злаково-полюнной полупустынной растительностью с сильнозасоленными почвами, в составе которых преобладает сульфатно-хлоридное и хлоридно-сульфатное засоление [4].

Озёра питаются атмосферными осадками, солёными грунтовыми водами и попусками воды с каналов [5, 6]. Вода в озёрах солёная [2, 6]. Формирование химического состава вод исследуемых озёр связано как с естественными процессами растворения солей, содержащихся в подстилающих ложе озёр породах, ионно-обменными процессами и концентрированием солей при испарении вод, так и с антропогенным влиянием [2].

Согласно оценке [7], озёра Большое и Малое Турали имеют очень высокую антропогенную нагрузку и уровень загрязнения, связанные с близостью к крупным городам – Махачкале и Каспийску. Наиболее негативное влияние оказывают застройка водосбора, обуславливающая поступление хозяйственно-бытовых сточных вод, и замусоренность различными бытовыми отходами прибрежной зоны [7]. Как следствие, в отложениях данных озёр фиксируется повышенная численность сульфитредуцирующих клостридий – индикатора фекального загрязнения [2], что представляет опасность для местного населения, использующего их в качестве лечебных грязей [8]. Важным фактором загрязнения озёр является также непосредственная близость сельскохозяйственного сектора, откуда поступают биогенные вещества и удобрения, что обуславливает высокое содержание аммонийного азота в их водах [6].

По данным [3], наряду с резким сокращением площади поверхностных водосборов озёр (с 45,8 до 7,2 км² для оз. Малое Турали и с 19,8 до 10,5 км² для оз. Большое Турали) уменьшилась и площадь самих озёр. Так, на протяжении последних лет водное зеркало оз. Малое Турали не превышает 50 % от максимальной наполняемости, а оз. Большое Турали, даже при искусственном обводнении в холодное время года, летом часто пересыхает. Возможной причиной является сооружение в 1987 г. магистрального коллектора дренажных вод К-6, проходящего рядом с озерами, что могло полностью отрезать озёра от потока грунтовых вод, распространяющихся от предгорий к Каспийскому морю [3].

Озёра характеризуются сглаженностью береговых линий, имеют овально-удлиненную форму и относятся к озёрам со средней площадью водного зеркала (от 1,01 до 10,0 км²) [7]. Берега озёр пологие, аккумулятивные, за исключением юго-западного участка оз. Большое Турали, сложенного моноклинально залегающими пластами верхнесарматских известняков [2]. В настоящее время этот участок интенсивно разрабатывается для добычи строительного камня. Прилегающая к озёрам с запада и юго-запада равнина отличается ровными поверхностями, нарушенными небольшими естественными понижениями, многочисленными каналами и валами оросительных систем.

Мелководность Туралинских озёр (до 1–1,5 м в центральных плесах) определяет особенности термического режима в них – быстрый прогрев и быстрое охлаждение водной массы [9].

В оз. Большое Турали обитает реликт Сарматского моря – микроскопический жаброногий рачок *Artemia salina*, живущий в гипергалинных озёрах, что объясняет розоватый оттенок его вод.

Несмотря на близость Махачкалы и Каспийска, озёра являются одним из ключевых мест миграционных остановок и массовой зимовки водоплавающих и околоводных птиц на Каспийском побережье [10]. Помимо орнитологического, Туралинские озёра имеют и большое эстетическое значение и подлежат учету и охране как гидроминеральный тип памятников

природы [11]. Кроме этого, оз. Малое Турали использовалось для рыборазведения, а в оз. Большое Турали административными органами республики планируется добыча лечебных грязей.

Несмотря на важное хозяйственное и природоохранное значение, Туралинские озёра в гидрохимическом и микробиологическом отношении слабо изучены [2, 6].

Целью настоящих исследований является изучение химического и газового состава вод и донных отложений Туралинских озёр.

Материалы и методы исследования

Экспедиционные исследования проведены в восточной прибрежной зоне оз. Малое Турали (станция 1) и северо-западной прибрежной зоне оз. Большое Турали (станция 2) (рис. 1) во второй половине августа 2018 г. и середине июля 2021 г.



Рис. 1. Местоположение точек отбора проб в озёрах Большое и Малое Турали
/ Fig. 1. Location of sampling points in lakes Bolshoe and Maloe Turali

В оз. Малое Турали пробы донных отложений отобраны в 6 м (точка 1-1) и 15 м (точка 1-2) от уреза воды на глубинах до 0,6 м. В оз. Большое Турали пробы отложений отобраны в 30 м (точка 2-1) и 50 м (точка 2-2) от уреза воды на глубинах до 0,3–0,4 м.

Донные отложения отобраны с помощью специальной пластиковой трубки длиной 500 мм и диаметром 45 мм с остро заточенными краями и фторопластовым поршнем для выдавливания керна. В керне с различных горизонтов (0–5, 5–10, 10–15 и 15–20 см) специальным устройством мерником [12] отобраны пробы, в которых, помимо концентраций метана и общего содержания сульфидной серы (далее суммарного сероводорода – $\Sigma\text{H}_2\text{S}$), определены значения Eh и pH, влажность и плотность (табл. 1).

Таблица 1 / Table 1

Результаты исследований донных отложений озёр Большое и Малое Турали
/ **Results of studies of bottom sediments of lakes Bolshoe and Maloe Turali**

Местоположение точки отбора проб. Координаты, с.ш./в.д.	Горизонт, см	CH ₄ , мкг/г вл.о.	ΣH ₂ S, мг/г вл.о.	pH	Eh, мВ	ρ, г/см ³ вл.о.	Влажность, %	Визуальное описание донных отложений
Т. 1-1, оз. Малое Турали, в 6 м от берега 42°50'36.66" 47°39'33.29"	0–5	<u>0,012</u> * 0,020	<u>0,005</u> <0,005	<u>7,69</u> 7,61	<u>+141,7</u> +177,1	<u>1,963</u> 1,438	<u>26,9</u> 27,5	Бурый, влажный, пластичный глинистый ил с серыми прослоями
	5–10	<u>0,030</u> 0,021	<u>0,005</u> <0,005	<u>7,17</u> 7,77	<u>+2,4</u> +124,2	<u>2,174</u> 1,622	<u>24,0</u> 22,1	То же, только более плотный и менее влажный
	10–15	= 0,055	= <0,005	= 7,67	–	= 2,052	= 23,2	То же
Т. 1-2, оз. Малое Турали, в 15 м от берега 42°50'36.42" 47°39'33.05"	0–5	<u>0,037</u> 0,040	<u>0,144</u> 0,180	<u>7,11</u> 7,20	<u>+7,0</u> +9,9	<u>1,751</u> 1,573	<u>35,2</u> 43,4	Серый, влажный, пластичный глинистый ил с включениями полуразложившейся растительности
	5–10	<u>0,070</u> 0,028	<u>0,015</u> 0,241	<u>7,44</u> 7,30	<u>–127,9</u> –137,9	<u>1,865</u> 1,608	<u>35,2</u> 33,7	То же, только серо-светло-коричневый
	10–15	<u>0,023</u> 0,006	<u>0,005</u> 0,006	<u>7,30</u> 7,26	<u>–29,7</u> –114,8	<u>1,943</u> 1,778	<u>30,9</u> 30,3	То же, только буровато-светло-коричневый
	15–20	= 0,018	= <0,005	= 7,44	–	= 1,807	= 27,0	То же
Т. 2-1, оз. Большое Турали, в 30 м от берега 42°50'47.04" 47°40'03.05"	0–5	<u>0,120</u> 0,022	<u>1,470</u> 0,821	<u>7,30</u> 7,62	<u>–213,8</u> –166,1	<u>1,692</u> 1,808	<u>32,0</u> 24,2	Темно-серый, влажный глинистый ил с примесью тонкого песчаного материала
	5–10	<u>0,028</u> 0,038	<u>0,005</u> 0,005	<u>7,30</u> 7,84	<u>–48,3</u> –140,0	<u>1,899</u> 1,839	<u>29,4</u> 21,6	То же, только серый и менее влажный
	10–15	<u>0,035</u> 0,035	<u>0,005</u> <0,005	<u>7,23</u> 7,53	<u>–46,1</u> –97,9	<u>1,961</u> 2,302	<u>32,8</u> 19,9	То же, только светло-серый
	15–20	<u>0,024</u> –	<u>0,005</u> –	<u>7,11</u> –	<u>–30,9</u> –	<u>2,046</u> –	<u>34,3</u> –	То же
Т. 2-2, оз. Большое Турали, в 50 м от берега 42°50'47.46" 47°40'03.60"	0–5	<u>0,026</u> 0,011	<u>0,006</u> <0,005	<u>7,01</u> 7,88	<u>–95,7</u> –136,0	<u>1,947</u> 1,853	<u>37,4</u> 12,5	Темно-серый, влажный ил с примесью тонкого песчаного материала
	5–10	<u>0,021</u> 0,015	<u>0,005</u> <0,005	<u>7,28</u> 7,86	<u>–12,5</u> –110,5	<u>2,056</u> 1,915	<u>28,2</u> 11,0	То же, только серый
	10–15	<u>0,023</u> –	<u>0,005</u> –	<u>7,16</u> –	<u>–49,0</u> –	<u>1,917</u> –	<u>30,8</u> –	То же, только светло-серый
	15–20	<u>0,061</u> –	<u>0,005</u> –	<u>7,10</u> –	<u>–44,4</u> –	<u>1,947</u> –	<u>25,4</u> –	То же

Примечание. * – в числителе приведены данные за 2018 г.; в знаменателе – за 2021 г.; прочерк – измерения не проводились.

В 2018 г. в воде Туралинских озёр в точках 1-1 и 2-2 определены концентрации главных ионов (HCO₃[–], Cl[–], SO₄^{2–}, Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺, K⁺), значения pH и температуры. В 2021 г. в пробах воды, отобранных в данных точках, выполнено определение сухого остатка, значений pH и температуры (табл. 2).

Таблица 2 / Table 2

Результаты исследований вод озёр Большое и Малое Турали
/ Results of studies of the waters of the lakes Bolshoe and Maloe Turali

Показатель	№ точки отбора проб	
	Т. 1-1, оз. Малое Турали	Т. 2-2, оз. Большое Турали
Т, °С	$\frac{25^*}{30}$	$\frac{32}{26}$
рН	$\frac{7,99}{7,97-8,06}$	$\frac{7,85}{7,90-7,95}$
Ca ²⁺ , мг/л	$\frac{346}{-}$	$\frac{400}{-}$
Mg ²⁺ , мг/л	$\frac{793}{-}$	$\frac{12946}{-}$
Na ⁺ , мг/л	$\frac{5000}{-}$	$\frac{74497}{-}$
K ⁺ , мг/л	$\frac{72}{-}$	$\frac{1275}{-}$
HCO ₃ ⁻ , мг/л	$\frac{577}{-}$	$\frac{966}{-}$
SO ₄ ²⁻ , мг/л	$\frac{4456}{-}$	$\frac{75925}{-}$
Cl ⁻ , мг/л	$\frac{7896}{-}$	$\frac{109793}{-}$
∑ ионов, мг/л	$\frac{19140}{-}$	$\frac{275802}{-}$
Сухой остаток, мг/л	$\frac{-}{10750-10890}$	$\frac{-}{19260-19460}$
Жесткость, мг-экв/л	$\frac{82,533}{-}$	$\frac{1085,43}{-}$
Щелочность, мг-экв/л	$\frac{9,450}{-}$	$\frac{15,830}{-}$

Примечание. * – в числителе приведены данные за 2018 г.; в знаменателе – за 2021 г.

Отбор, транспортировка, хранение проб донных отложений и последующее определение метана и сероводорода проводили согласно аттестованным методикам [13, 14]. Определение концентрации метана в пробах проведено на газовом хроматографе «Хроматэк-Кристалл 5000.2» с дозатором равновесного пара на пламенно-ионизационном детекторе. Выполнение измерений массовой доли сульфидной серы (ΣH_2S) основано на переводе сульфидов донных отложений в сероводород действием соляной кислоты и последующей отдувке сероводорода азотом особой чистоты в раствор гидроксида натрия и определения сульфид-ионов фотометрическим методом с N,N-диметил-п-фенилендиамином [14]. Определение газов производилось в донных отложениях при их естественной влажности и выражалось в мкг/г и мг/г влажного осадка (вл. о.) соответственно для метана и сероводорода. Одновременно с отбором проб в заранее взвешенные и пронумерованные бюксы отбирали навеску донных отложений для определения их влажности и плотности. Измерение значений рН, Eh и температуры выполнено с помощью электродов портативного рН-метра-иономера «Экотест 2000» сразу после отбора проб. Концентрации главных ионов и сухой остаток в рапе определены по общепринятым в системе Росгидромета стандартным методикам [15].

Результаты исследования и их обсуждение

В период наблюдений в 2018 г. была ясная, малооблачная погода, температура воздуха до +32 °С, влажность 45–46 %, ветер юго-восточный, скорость ветра 6–12 м/с. На момент исследований в 2021 г. была преимущественно облачная погода (до 88 %), температура воздуха до +28 °С, влажность 64–65 %, ветер восточный, скорость ветра до 6–7 м/с.

Согласно расчетам, проведенным по актуальным на момент исследований космосникам (Sentinel-2), площадь водной поверхности оз. Большое Турали в 2018 и 2021 гг. составляла соответственно 3,38 и 5,13 км², длина – 8,6 и 10,7 км и максимальная ширина – 2,4 и 2,7 км. Урез воды в озере в 2021 г. находился на 23 м ниже уровня Мирового океана, что на 5 м выше уровня Каспийского моря.

Площадь водной поверхности оз. Малое Турали в 2018 и 2021 гг. составляла соответственно 1,43 и 1,61 км², длина – 5,85 и 5,94 км и максимальная ширина – 1,51 и 1,58 км. Абсолютная отметка поверхности воды в озере в 2021 г. находилась на уровне – 13 м.

Температура воды в период отбора проб в 2018 и 2021 гг. в оз. Малое Турали достигала 23–25 и 26–30 °С, в оз. Большое Турали – 32–35 и 26–30 °С, с минимальными значениями на более удаленных от берега точках наблюдения.

Минерализация воды в оз. Малое Турали (т. 1-1), по данным проведенных в 2018 г. исследований, составляла 19,1 г/дм³ (солончатые воды). По химическому составу вода этого озера в соответствии с классификацией О.А. Алекина [16] относится к классу хлоридных вод, группе натриевых вод, второму типу (формула Cl_{II}^{Na}). Для вод оз. Малое Турали формула Курлова, в которой указываются только ионы, присутствующие в воде в количестве больше чем 12,5 % экв. (из расчета к 50 % сумм анионов и катионов отдельно) имеет следующий вид:

$$M_{19,1} = \frac{(Cl)_{35,54}(SO_4)_{14,80}}{(Na)_{34,69}} pH7,99.$$

Минерализация воды в оз. Большое Турали (т. 2-2) в 2018 г. составляла 275,8 г/дм³ (рассолы). Вода (рапа) этого озера также относится к классу хлоридных вод, группе натриевых вод, типу второму. Формула Курлова для вод оз. Большое Турали имеет следующий вид:

$$M_{275,8} = \frac{(Cl)_{34,22}(SO_4)_{17,47}}{(Na)_{35,79}} pH7,85.$$

В 2021 г. минерализация вод обоих озёр по сравнению с 2018 г. заметно снизилась, о чем свидетельствуют данные определения сухого остатка. При этом вода оз. Большое Турали больше опреснилась (до 19,3–19,5 г/дм³ сухого остатка) по сравнению с водами оз. Малое Турали, в которых содержание сухого остатка в 2021 г. составило 10,8–10,9 г/дм³.

Резкое снижение солёности оз. Большое Турали, подтверждаемое данными [6], согласно которым солёность воды в этом озере в мае-июне 2019 г. составляла 6,71–6,94 ‰, обусловлено поступлением в озеро большого объема слабоминерализованных вод. Последнее подтверждается увеличением в 1,5 раза площади водной поверхности оз. Большое Турали в 2021 г. по сравнению с 2018 г. Возможным источником пресных вод в объёме, необходимом для наблюдаемого в оз. Большое Турали рассоления рапы, могли быть как атмосферные осадки, так и попуски воды с подпитывающего канала.

Анализ массива базы данных Всероссийского научно-исследовательского института гидрометеорологической информации (ВНИИГМИ-МЦД) [17] по наиболее близко расположенной к озёрам (~30 км) метеостанции Махачкала показывает (рис. 2), что за период с 2017 по 2021 г. изменения среднегодовых количеств атмосферных осадков и температур воздуха были невелики и поэтому не могли определять значительное наполнение водой котловины оз. Большое Турали и, как следствие, опреснение его вод. Вероятно, основной причиной рассоления рапы оз. Большое Турали являлось искусственное обводнение пресными водами по проходящему рядом каналу (коллектор К-6).

Сделанный вывод о незначительной роли атмосферных осадков в рассолении озера согласуется с исследованиями [3], показавшими, что вследствие естественного увлажнения в центральном понижении оз. Большое Турали может накопиться слой воды не более 10 см.

В целом сильное расслоение оз. Большое Турали представляет серьезную угрозу для его экосистемы и может привести к ухудшению качества донных отложений, которые планируются использовать для грязелечения. Так, согласно работе [18], оптимальной для микроорганизмов грязеобразователей считается рапа, минерализация которой лежит в пределах 50–100 г/кг.

В оз. Малое Турали донные отложения в точках наблюдения представлены пластичными глинистыми илами. При удалении от берега их цвет меняется с бурого на серый, что может свидетельствовать о смене окислительной обстановки восстановительной. Донные отложения оз. Большое Турали представлены от темно- до светло-серого цвета глинистыми илами с небольшой примесью тонкозернистого песка.

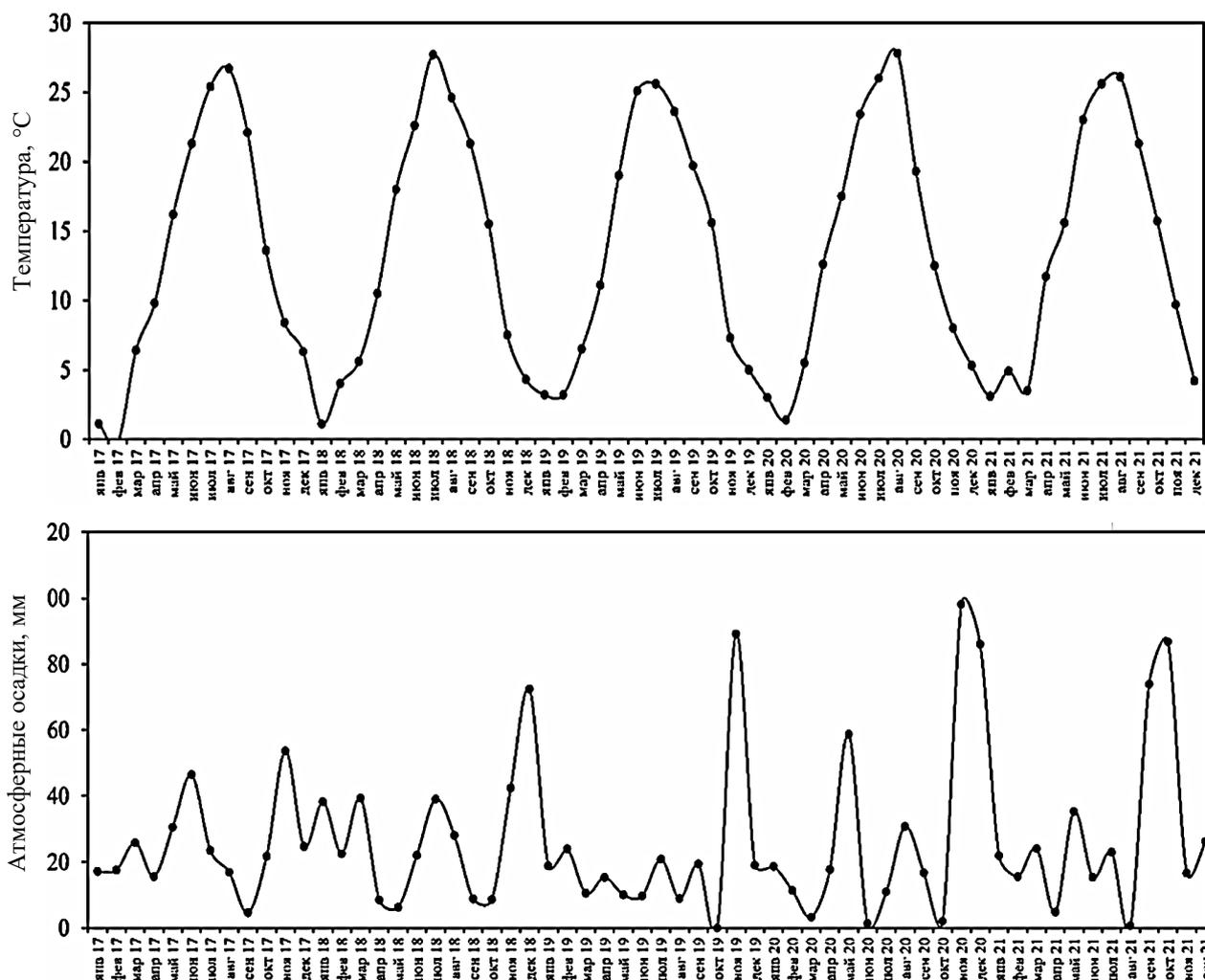


Рис. 2. Изменение среднемесячных значений температуры воздуха и количества атмосферных осадков за период 2017–2021 гг., метеостанция Махачкала (построено авторами по данным [17]) / Fig. 2. Change in the average monthly values of air temperature and precipitation for the period 2017-2021, Makhachkala weather station (built by the authors according to [17])

В оз. Большое Турали физико-химические показатели в исследованных в 2018 и 2021 гг. горизонтах донных отложений (до 20 см) следующие: влажность 25,4–37,4 и 19,4–24,2 %; плотность 1,69–2,06 и 1,81–2,30 г/см³; рН 7,01–7,30 (нейтральная среда) и 7,53–7,88 (слабощелочная среда); Eh от –213 до –12,5 и от –166,1 до –97,9 мВ (восстановительная среда) соответственно. При этом значения Eh становятся менее восстановленными в направлении от верхних к нижним горизонтам (рис. 3).

В донных отложениях оз. Малое Турали физико-химические показатели в 2018 и 2021 гг., соответственно, следующие: влажность 24,0–35,2 и 22,1–43,4 %; плотность 1,75–2,17 и 1,44–2,05 г/см³; pH 7,11–7,69 и 7,20–7,77 (нейтральная – слабощелочная среда); Eh от –127,9 до 141,7 и от –137,9 до 177,1 мВ. В данном озере, в отличие от озера Большое Турали, значения Eh становятся более восстановленными в направлении от верхних к нижним горизонтам и при удалении точек отбора проб от берега (рис. 3). В обоих озёрах, как правило, значения pH немного увеличиваются от поверхностного (0–5 см) к подповерхностному (5–10 см) горизонту, после чего незначительно снижаются; плотность отложений закономерно возрастает с глубиной, а влажность уменьшается.

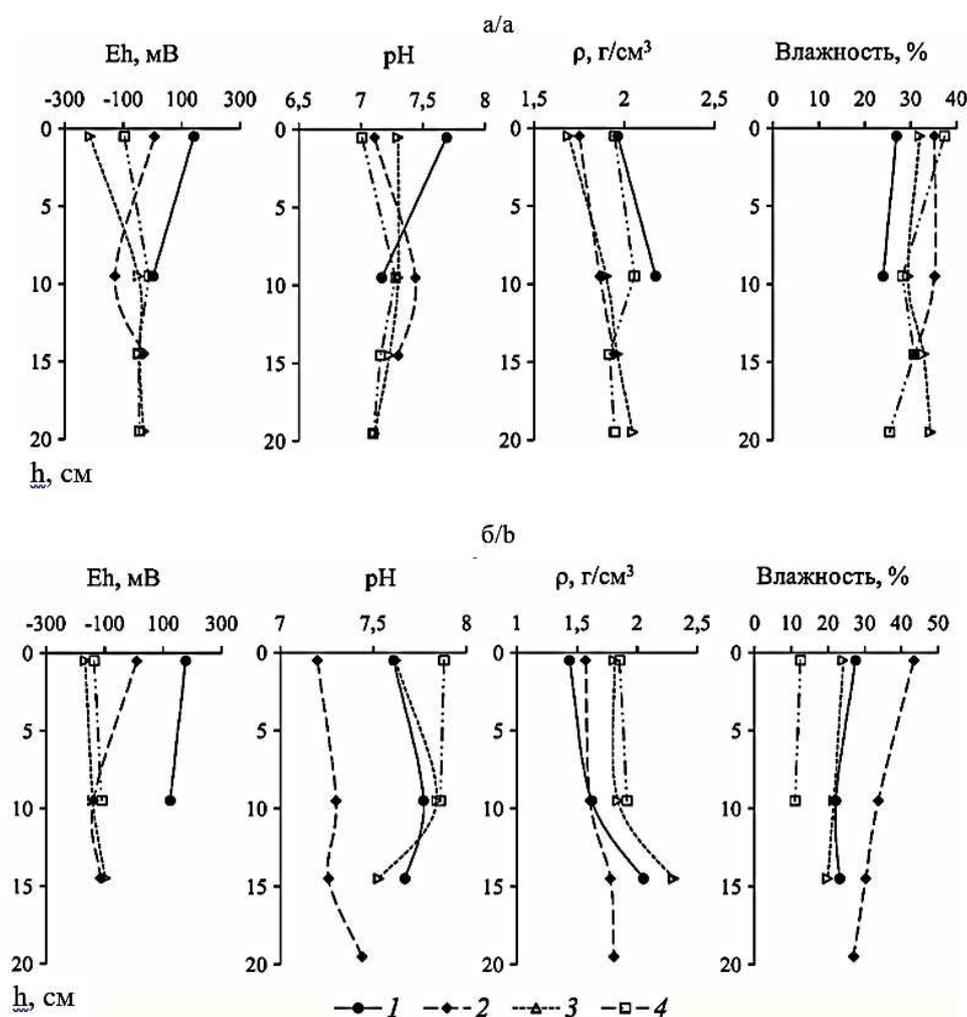


Рис. 3. Распределение значений Eh, pH, плотности и влажности по вертикальному профилю донных отложений Туралинских озёр в 2018 (а) и 2021 гг. (б): 1 – точка 1-1; 2 – точка 1-2; 3 – точка 2-1; 4 – точка 2-2 / Fig. 3. Distribution of Eh, pH, density and humidity values along the vertical profile of bottom sediments of the Turaly Lakes in 2018 (a) and 2021 (b): 1 - point 1-1; 2 - point 1-2; 3 - point 2-1; 4 - point 2-2

Концентрация метана в исследованных в 2018 и 2021 гг. горизонтах донных отложений оз. Малое Турали варьировалась, соответственно, в пределах 0,012–0,070 мкг/г (в среднем 0,034 мкг/г) и 0,006–0,055 мкг/г влажного осадка (в среднем 0,027 мкг/г). В оба периода более высокие концентрации чаще наблюдались в нижних горизонтах (рис. 4), а минимальные – в поверхностном (0–5 см) слое, за исключением донных отложений, отобранных в 2021 г. в точке 1-2, в которой концентрации метана в поверхностном слое были максимальными для оз. Малое Турали. В целом в точке 1-2, расположенной дальше от уреза воды, концентрации метана в донных отложениях, как в 2018 г., так и в 2021 г. были более высокими, чем в точке 2-2, расположенной ближе к берегу.

Концентрация метана в донных отложениях оз. Большое Турали варьировалась в пределах 0,021–0,12 (в среднем 0,042 мкг/г) и 0,011–0,038 мкг/г (в среднем 0,024 мкг/г) соответственно в 2018 и 2021 гг. Так же, как и в оз. Малое Турали, в оба периода наблюдений наиболее высокие его концентрации, как правило, были приурочены к нижним горизонтам отложений, за исключением точки 2-1, где в 2018 г. в поверхностном (0–5 см) слое концентрации метана были максимальными (0,12 мкг/г) для оз. Большое Турали. В отличие от оз. Малое Турали в оз. Большое Турали более высокие концентрации метана в оба периода наблюдались в точке 2-1, расположенной ближе к урезу воды.

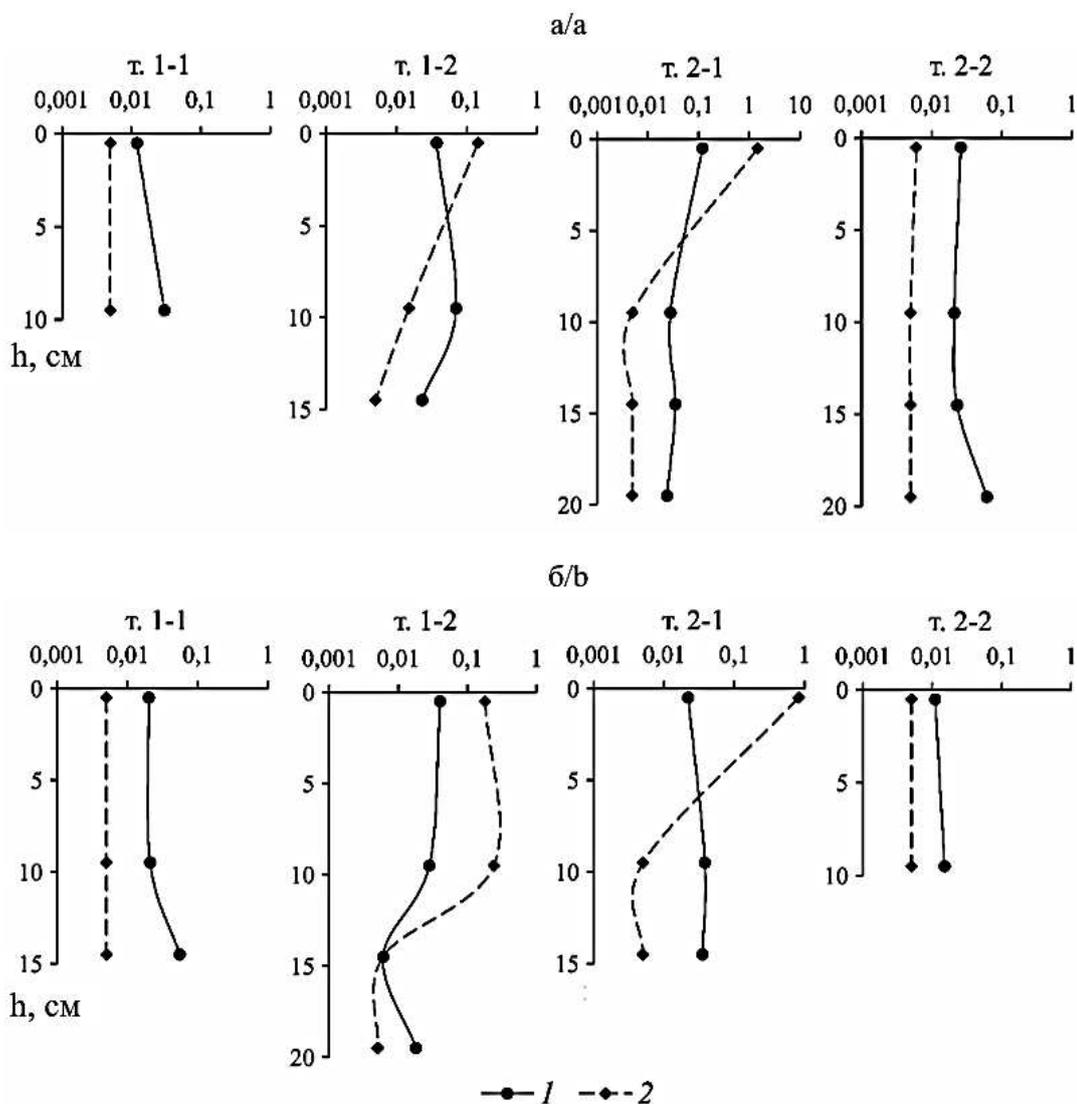


Рис. 4. Распределение концентраций CH_4 , мкг/г, (1) и $\Sigma\text{H}_2\text{S}$, мг/г, (2) по вертикальному профилю донных отложений Туралинских озёр: а – 2018 г.; б – 2021 г. / Fig. 4. Distribution of concentrations of CH_4 , mg/g, (1) and $\Sigma\text{H}_2\text{S}$, mg/g, (2) in the vertical profile of bottom sediments of the Turaly lakes: a - 2018; b - 2021

Концентрация $\Sigma\text{H}_2\text{S}$ в донных отложениях оз. Малое Турали в 2018 и 2021 гг. изменялась, соответственно, в диапазоне 0,005–0,144 (в среднем 0,035 мг/г) и <0,005–0,241 мг/г влажного осадка (в среднем 0,064 мг/г) и в оз. Большое Турали – в диапазоне 0,005–1,47 (в среднем 0,188 мг/г) и <0,005–0,821 мг/г (в среднем 0,168 мг/г). В оба периода в большинстве отобранных проб донных отложений исследованных озёр концентрации $\Sigma\text{H}_2\text{S}$ были близкими к пределу обнаружения (0,005 мг/г) или ниже его. И только в верхних горизонтах отложений точек 1-2 и 2-1 определены достаточно высокие концентрации $\Sigma\text{H}_2\text{S}$, достигающие значений 0,180–0,241 и 0,821–1,47 мг/г соответственно.

В целом для всего массива данных связь между концентрациями исследуемых восстановленных газов проявляется слабо. Это обусловлено тем, что 60 % массива составляют пробы, в которых концентрации $\Sigma\text{H}_2\text{S}$ находятся на уровне предела обнаружения или ниже его. Концентрации метана также очень малы. Низкие концентрации и характер распределения по вертикали донных отложений озёр CH_4 и $\Sigma\text{H}_2\text{S}$, являющихся важными показателями качества лечебных грязей в бальнеологии [19], могут свидетельствовать о подавлении процессов образования этих газов. Причиной подавления, вероятно, является недостаточно низкий для интенсивного протекания анаэробных процессов окислительно-восстановительный потенциал, значимое влияние которого на концентрации исследуемых восстановленных газов установлено на примере многих водных объектов [20, 21]. Так, в оз. Малое Турали в 70 % проб донных отложений значения Eh варьируют от $-29,7$ до $177,1$ мВ (в среднем $61,8$ мВ), в оз. Большое Турали в 46 % проб значения Eh составляют от $-12,5$ до $-49,0$ мВ (в среднем $-38,5$ мВ). В донных отложениях, где значения Eh приближаются к -150 мВ и ниже, концентрации CH_4 и $\Sigma\text{H}_2\text{S}$, как правило, заметно увеличиваются, достигая максимальных значений для обоих газов в наиболее восстановленном (0–5 см) слое отложений точки 2-1 в оз. Большое Турали (Eh от $-166,1$ до $-213,8$ мВ). Высокие концентрации $\Sigma\text{H}_2\text{S}$ (до $1,47$ мг/г) в резко восстановительной обстановке 0–5 см слоя донных отложений точки 2-1 при относительно низких концентрациях CH_4 (до $0,12$ мкг/г) могут свидетельствовать об активной деятельности консорциума анаэробных метанооксиляющих архей и сульфатредуцирующих бактерий [20, 22, 23], сопровождающейся интенсивным образованием H_2S и окислением CH_4 .

Выводы

1. Минерализация вод в озёрах Большое и Малое Турали в августе 2018 г., соответственно, составляла $275,8$ (рассолы) и $19,1$ г/дм³ (солончатые воды). По химическому составу воды озёр отнесены (по классификации О.А. Алекина) к классу хлоридных вод, группе натриевых вод, типу второму. В июле 2021 г. минерализация вод обоих озёр снизилась, особенно сильно в оз. Большое Турали (до $19,3$ – $19,5$ г/дм³ сухого остатка). Резкое снижение минерализации вод оз. Большое Турали обусловлено поступлением в озеро большого объёма слабоминерализованных вод. Анализ гидрометеорологической информации за период с 2017 по 2021 г. показал, что изменения среднегодовых количеств атмосферных осадков и температур воздуха были невелики и поэтому не могли определять значительное рассоление его вод. Основной причиной рассоления рапы оз. Большое Турали, вероятно, являлось искусственное обводнение водами проходящего рядом канала.

2. Исследованные в летние месяцы 2018 и 2021 гг. донные отложения (до 20 см) Туралинских озёр представлены глинистыми илами, для которых характерна нейтральная или слабощелочная среда (рН от $7,01$ до $7,88$). В отложениях оз. Большое Турали в оба периода наблюдались восстановительные условия (Eh от $-213,8$ до $-12,5$ мВ), в то время как в оз. Малое Турали в отдельных слоях – как окислительная, так и восстановительная обстановка (Eh от $-137,9$ до $+177,1$ мВ). При положительных значениях Eh слои донных отложений приобретали бурю окраску.

3. Концентрация метана в донных отложениях озёр Малое и Большое Турали варьировалась в небольшом диапазоне, соответственно, от $0,006$ до $0,070$ (в среднем $0,030$ мкг/г; медиана – $0,026$ мкг/г) и от $0,011$ до $0,12$ мкг/г влажного осадка (в среднем $0,035$ мкг/г; медиана – $0,025$ мкг/г). В обоих озёрах как в 2018 г., так и в 2021 г. наиболее высокие его концентрации, как правило, были приурочены к нижним горизонтам отложений. Концентрация $\Sigma\text{H}_2\text{S}$ изменялась в диапазонах от $<0,005$ до $0,241$ мг/г влажного осадка (в среднем $0,052$ мг/г; медиана – $0,005$ мг/г) – в оз. Малое Турали и от $<0,005$ до $1,47$ мг/г (в среднем $0,181$ мг/г; медиана – $0,005$ мг/г) – в оз. Большое Турали.

4. Связь между концентрациями в донных отложениях исследуемых восстановленных газов проявляется слабо, что обусловлено очень низкими их концентрациями, близкими к пределу обнаружения в большинстве проб. Небольшие концентрации CH_4 и $\Sigma\text{H}_2\text{S}$, вероятно, обусловлены недостаточно низким для интенсивного протекания анаэробных процессов окислительно-восстановительным потенциалом донных отложений (Eh выше -50 мВ в оз. Малое Турали наблюдается в 70 % проб и в оз. Большое Турали – в 46 %). В отложениях, где значения Eh снижаются до -150 мВ и ниже, концентрации CH_4 и $\Sigma\text{H}_2\text{S}$ заметно увеличиваются. Высокие концентрации

$\Sigma\text{H}_2\text{S}$ при относительно низких концентрациях CH_4 могут свидетельствовать об активной деятельности консорциума анаэробных метанооксиляющих архей и сульфатредуцирующих бактерий.

5. В целом наблюдаемое рассоление вод оз. Большое Турали, наряду с низкими концентрациями в донных отложениях CH_4 и $\Sigma\text{H}_2\text{S}$ – газов, являющихся важными показателями качества лечебных грязей, свидетельствует о неоптимальности условий для формирования их бальнеологических свойств.

Список источников

1. Салихов З.М., Баранникова Н.Н., Трубник Р.Г., Лулудов Н.И., Федоров Ю.А. Экспедиционные исследования грязевых озер Республики Дагестан // Инновационные подходы в современной науке. М.: Интернаука, 2019. Ч. 1. С. 20–33.
2. Федоров Ю.А., Баранникова Н.Н., Доценко И.В., Лулудов Н.И. Грязевые озера Республики Дагестан: прошлое и настоящее. Ростов н/Д.: Донской изд. дом, 2019. 107 с.
3. Шапоренко С.И., Десинов С.Л. Исследование водного питания оз. Большое Турали с применением космических снимков // Исследование Земли из космоса. 2021. № 2. С. 77–86.
4. Баламирзоев М.А., Аличаев М.А., Шахмирзоев Р.А., Джабраилов Д.У. Почвенно-агроэкологическое районирование приморской низменности Дагестана в целях охраны и рационального использования земель // Тр. Ин-та геологии Даг. НЦ РАН. 2014. № 63. С. 43–46.
5. Водные ресурсы Дагестана: состояние и проблемы / отв. ред. И.М. Сайпулаев, Э.М. Эльдаров. Махачкала, 1996. 180 с.
6. Юсупов А.Р., Курбанисмаилова А.С., Алхулаев К.Г., Мамаев А.С., Юсупов З.А. Влияние антропогенного фактора на химический состав озер засушливых районов Дагестана (на примере Большое и Малое Турали) // Аридные экосистемы. 2021. Т. 27, № 4 (89). С. 118–122.
7. Гарькуша Д.Н., Федоров Ю.А., Потапов Е.Г., Крамаренко В.А. Морфометрия и морфология грязевых озер Ростовской, Волгоградской и Астраханской областей, республик Калмыкия и Дагестан: антропогенная нагрузка на них // Курортная медицина. 2021. № 1. С. 24–36.
8. Fedorov Yu.A., Gar'kusha D.N., Trubnik R.G., Morozova M.A. Sulfite-Reducing Clostridia and their Participation in Methane and Hydrogen Sulfide Formation in the Bottom Sediments of Water Objects and Streams of the ETR South // Water Resources. 2019. Vol. 46, № 1. P. S85–S93.
9. Лурье П.М., Панов В.Д. Реки бассейна Азовского моря: гидрография и режим стока. Ростов н/Д.: Донской изд. дом, 2021. 670 с.
10. Вилков Е.В. Лагуны Дагестана как модель трансформации морских побережий в условиях трансгрессии Каспия и их роль в сохранении птиц палеарктики // Вестн. Даг. НЦ. 2017. № 65. С. 43–53.
11. Юсупов А.Р., Мамаев А.С., Мамаев А.С., Юсупов З.А. Гидроминеральные и живописные природные памятники низменного Дагестана // Тр. Ин-та геологии Даг. НЦ РАН. 2021. № 3 (86). С. 86–93.
12. Федоров Ю.А., Тамбиева Н.С., Гарькуша Д.Н., Хорошевская В.О. Метан в водных экосистемах. Ростов н/Д.; М.: Ростиздат, 2007. 330 с.
13. РД 52.24.511-2013. Массовая доля метана в донных отложениях. Методика измерений газохроматографическим методом с использованием анализа равновесного пара. Ростов н/Д.: Гидрохим. ин-т, 2013. 19 с.
14. РД 52.24.525-2011. Массовая доля сульфидной серы в донных отложениях. Методика выполнения измерений фотометрическим методом с N,N-диметил-п-фенилендиаминном. Ростов н/Д.: Гидрохим. ин-т, 2011. 26 с.
15. Руководство по химическому анализу поверхностных вод суши / под ред. Л.В. Боевой. Ростов н/Д.: НОК, 2009. Ч. 1. 1037 с.
16. Алевкин О.А. Основы гидрохимии. Л.: Гидрометеиздат, 1970. 444 с.
17. База данных Всероссийского научно-исследовательского института гидрометеорологической информации. URL: <http://meteo.ru/data> (дата обращения: 01.03.2023).
18. Волкова О.Ю. Интенсивность биологических процессов в Тамбуканском озере при различных условиях // Тр. Бальнеол. ин-та КМВ. 1935. Т. 13. С. 118–129.
19. Федоров Ю.А. К вопросу о классификации лечебных грязей // Экологические проблемы. Взгляд в будущее: сб. тр. VIII Междунар. науч.-практ. конф. Ростов н/Д.: ЮФУ, 2017. С. 447–456.
20. Гарькуша Д.Н., Федоров Ю.А. Метан и сероводород в донных отложениях водохранилищ и прудов бассейна Азовского моря // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2022. № 3. С. 37–53.
21. Гарькуша Д.Н., Федоров Ю.А., Трубник Р.Г., Доценко Н.В. Метан и сероводород в донных отложениях лиманов Азово-Черноморского бассейна // Антропогенная трансформация природной среды. 2022. Т. 8, № 1. С. 6–20.

22. Knittel K., Wegener G., Boetius A. Anaerobic methane oxidizers // Microbial Communities Utilizing Hydrocarbons and Lipids: Members, Metagenomics and Ecophysiology / Ed. T.J. McGenity. Cham: Springer, 2018. P. 1–21.

23. Баранникова Н.Н., Федоров Ю.А., Лулудов Н.И. Физико-химическая характеристика грязевых отложений Туралинских озер Республики Дагестан // Экологические проблемы. Взгляд в будущее: материалы IX Междунар. науч.-практ. конф. Ростов н/Д.; Таганрог: ЮФУ, 2020. С. 46–51.

References

1. Salikhov Z.M., Barannikova N.N., Trubnik R.G., Luludov N.I., Fedorov Yu.A. Expedition studies of mud lakes of the Republic of Dagestan. *Innovative approaches in modern science*. Moscow: Internauka Publ.; 2019;(1):20-33. (In Russ.).
2. Fedorov Yu.A., Barannikova N.N., Dotsenko I.V., Luludov N.I. *Mud lakes of the Republic of Dagestan: past and present*. Rostov-on-Don: Don Publishing House; 2019. 107 p. (In Russ.).
3. Shaporenko S.I., Desinov S.L. Investigation of water nutrition of the lake Bolshoe Turali with the use of satellite images. *Issledovanie Zemli iz kosmosa = Exploration of the Earth from Space*. 2021;(2):77-86. (In Russ.).
4. Balamirzoev M.A., Alichayev M.A., Shakhmirzoev R.A., Dzhabrailov D.U. Soil-agroecological zoning of the coastal lowland of Dagestan for the protection and rational use of land. *Tr. In-ta geologii Dag. NTs RAN = Proceedings of the Institute of Geology of the Dagestan Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2014;(63):43-46. (In Russ.).
5. Saipulaev I.M., Eldarov E.M., eds. *Water resources of Dagestan: state and problems*. Makhachkala, 1996. 180 p. (In Russ.).
6. Yusupov A.R., Kurbanismailova A.S., Alkhulaev K.G., Mamaev A.S., Yusupov Z.A. The influence of anthropogenic factor on the chemical composition of lakes in arid regions of Dagestan (by the example of Bolshoe and Maloe Turali). *Aridnye ekosistemy = Arid Ecosystems*. 2021;27(4):118-122. (In Russ.).
7. Garkusha D.N., Fedorov Yu.A., Potapov E.G., Kramarenko V.A. Morphometry and morphology of mud lakes of Rostov, Volgograd and Astrakhan regions, the republics of Kalmykia and Dagestan: anthropogenic load on them. *Kurortnaya meditsina = Resort Medicine*. 2021;(1):24-36. (In Russ.).
8. Fedorov Yu.A., Garkusha D.N., Trubnik R.G., Morozova M.A. Sulfite-reducing clostridia and their participation in the formation of methane and hydrogen sulfide in bottom sediments of water bodies and streams in the South of the ETR. *Water Resources*. 2019;46(1):S85-S93.
9. Lurie P.M., Panov V.D. *Rivers of the Azov Sea basin: hydrography and flow regime*. Rostov-on-Don: Don Publishing House; 2021. 670 p. (In Russ.).
10. Vilkov E.V. Lagoons of Dagestan as a model of transformation of seacoasts in conditions of transgression of the Caspian Sea and their role in the conservation of Palearctic birds. *Vestn. Dagestanskogo NTs = Herald of the Daghestan Scientific Center*. 2017;(65):43-53. (In Russ.).
11. Yusupov A.R., Mamaev S.A., Mamaev A.S., Yusupov Z.A. Hydromineral and picturesque natural monuments of lowland Dagestan. *Tr. In-ta geologii Dag. NTs RAN = Proceedings of the Institute of Geology of the Dagestan Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2021;(3):86-93. (In Russ.).
12. Fedorov Yu.A., Tambieva N.S., Garkusha D.N., Khoroshevskaya V.O. *Methane in aquatic ecosystems*. Rostov-on-Don; Moscow: Rostizdat Publ., 2007. 330 p. (In Russ.).
12. RD 52.24.511-2013. *The mass fraction of methane in bottom sediments. Measurement technique by gas chromatographic method using equilibrium vapor analysis*. Rostov-on-Don: Hydrochemical Institute Press; 2013. 19 p. (In Russ.).
14. RD 52.24.525-2011. *The mass fraction of sulfide sulfur in bottom sediments. The method of performing measurements by photometric method with N,N-dimethyl-p-phenylenediamine*. Rostov-on-Don: Hydrochemical Institute Press; 2011. 26 p. (In Russ.).
15. Boeva L.V., ed. *Guidelines for the chemical analysis of land surface waters*. Rostov-on-Don: NOK Publ.; 2009. Part 1. 1037 p. (In Russ.).
16. Alekin O.A. *Fundamentals of hydrochemistry*. Leningrad: Gidrometeoizdat Publ.; 1970. 444 p. (In Russ.).
17. *Database of the All-Russian Research Institute of Hydrometeorological Information*. Available from: <http://meteo.ru/data> [Accessed 1st March 2023]. (In Russ.).
18. Volkova O.Yu. The intensity of biological processes in Lake Tambukan under various conditions. *Tr. Bal'neol. in-ta KMV = Proceedings of the Balneological Institute CMW*. 1935;13:118-129. (In Russ.).
19. Fedorov Yu.A. On the classification of therapeutic mud. *Ecological problems. A look into the future*. Proceedings of the VIII International Scientific and Practical Conference. Rostov-on-Don: Southern Federal University Press; 2017:447-456. (In Russ.).
20. Garkusha D.N., Fedorov Yu.A. Methane and hydrogen sulfide in bottom sediments of reservoirs and ponds of the Azov Sea basin. *Izv. vuzov. Sev.-Kavk. region. Estestv. nauki = Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science*. 2022;(3):37-53. (In Russ.).

21. Garkusha D.N., Fedorov Yu.A., Trubnik R.G., Dotsenko N.V. Methane and hydrogen sulfide in the bottom sediments of the estuaries of the Azov-Black Sea basin. *Antropogennaya transformatsiya prirodnoi sredy = Anthropogenic Transformation of the Natural Environment*. 2022;8(1):6-20. (In Russ.).

22. Knittel K., Wegener G., Boetius A. Anaerobic methane oxidizers. *Microbial Communities Utilizing Hydrocarbons and Lipids: Members, Metagenomics and Ecophysiology*. Ed. T.J. McGenity. Cham: Springer Publ.; 2018:1-21.

23. Barannikova N.N., Fedorov Yu.A., Luludov N.I. Physico-chemical characteristics of mud deposits of Turaly lakes of the Republic of Dagestan. *Environmental problems. A look into the future: Proceedings of the IX International Scientific and Practical Conference*. Rostov-on-Don; Taganrog: Southern Federal University Press; 2020:46-51. (In Russ.).

Информация об авторах

Наталья Николаевна Баранникова – старший преподаватель, кафедра физической географии, экологии и охраны природы, Институт наук о Земле.

Дмитрий Николаевич Гарькуша – кандидат географических наук, доцент кафедры физической географии, экологии и охраны природы, Институт наук о Земле.

Юрий Александрович Фёдоров – доктор географических наук, профессор, заведующий кафедрой физической географии, экологии и охраны природы, Институт наук о Земле.

Идхам Абдулмунир Алван Альмаджамай – магистрант, Институт наук о Земле.

Айнур Эрешова – магистрант, Институт наук о Земле.

Екатерина Валерьевна Чернявская – магистрант, Институт наук о Земле.

Information about the authors

Natalia N. Barannikova - Senior Lecturer, Department of Physical Geography, Ecology and Nature Protection, Institute of Earth Sciences.

Dmitry N. Gar'kusha - Candidate of Science (Geography), Associate Professor, Department of Physical Geography, Ecology and Environment Protection, Institute of Earth Sciences.

Yury A. Fedorov - Doctor of Science (Geography), Professor, Head of Department of Physical Geography, Ecology and Environment Protection, Institute of Earth Sciences.

Idham A.A. Almajamai - Master's Student, Institute of Earth Sciences.

Ainur Ereshova - Master's Student, Institute of Earth Sciences.

Ekaterina V. Chernyavskaya - Master's Student, Institute of Earth Sciences.

*Статья поступила в редакцию 19.03.2023; одобрена после рецензирования 24.04.2023; принята к публикации 20.06.2023.
The article was submitted 19.03.2023; approved after reviewing 24.04.2023; accepted for publication 20.06.2023.*

Научная статья

УДК 528.91

doi: 10.18522/1026-2237-2023-3-71-79

ДЕКОМПОЗИЦИЯ РЕТРОСПЕКТИВНЫХ ТОПОГРАФИЧЕСКИХ КАРТ ДЛЯ ПОСЛОЙНОЙ ОЦЕНКИ ТИПОВ РЕГИОНАЛЬНОГО ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЯ

А.Н. Бешенцев^{1✉}, Т.А. Борисова², А.А. Лубсанов³, Д.Г. Будаева⁴, С.А. Петров⁵

^{1, 2, 3, 4, 5} Байкальский институт природопользования СО РАН, Улан-Удэ, Россия

¹abesh@binm.ru✉

²tabor@binm.ru

³alub@binm.ru

⁴budaevadarima@yandex.ru

⁵sergei_petrov13@mail.ru

Аннотация. На примере наиболее освоенной части бассейна оз. Байкал выполнена декомпозиция содержания цифрового покрытия из 12 листов топографической карты масштаба 1:84 000, составленной Корпусом военных топографов в 1896–1912 гг. В результате векторизации ретроспективных слоёв топографических объектов и последующего преобразования их shp-файлов в классы пространственных объектов среды ArcGIS сформировано два картографических набора классов пространственных объектов, характеризующих два типа регионального природопользования – традиционный скотоводческий и инвазивный земледельческий. В результате послойного геоинформационного моделирования картографических наборов на современной топографической основе и цифровой модели рельефа установлены первичные ареалы заселения и хозяйственного использования территории, определены физико-географические характеристики прошлого хозяйственного использования территории, а также выполнено раздельное картографирование пространственно-временных структур жизнеобеспечения разных типов природопользования. Для оперативной цифровой визуализации предложено технологическое решение хранения и картографирования наборов классов пространственных объектов посредством организации файловой базы геоданных информационной среды ArcGIS. Представлены картографические реконструкции скотоводческого и земледельческого природопользования начала XX в., а также общая картографическая реконструкция природопользования на ландшафтной основе, позволяющая утверждать, что традиционное скотоводческое природопользование не предполагает преобразования земной поверхности и характеризуется непрерывной восстановительной динамикой природных ландшафтов, а инвазивное природопользование основано на нарушении почвенного покрова, что в дальнейшем привело к появлению ареалов водной и ветровой эрозии.

Ключевые слова: ретроспективная карта, типы регионального природопользования, цифровая визуализация, ГИС, картографический набор классов пространственных объектов

Благодарности: статья подготовлена в рамках выполнения государственного задания Байкальского института природопользования СО РАН.

Для цитирования: Бешенцев А.Н., Борисова Т.А., Лубсанов А.А., Будаева Д.Г., Петров С.А. Декомпозиция ретроспективных топографических карт для послойной оценки типов регионального природопользования // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2023. № 3. С. 71–79.

Статья опубликована на условиях лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY 4.0).

Original article

DECOMPOSITION OF RETROSPECTIVE TOPOGRAPHIC MAPS FOR LAYER-BY-LAYER ASSESSMENT OF REGIONAL NATURE MANAGEMENT TYPES

A.N. Beshentsev^{1✉}, T.A. Borisova², A.A. Lubsanov³, D.G. Budaeva⁴, S.A. Petrov⁵

^{1, 2, 3, 4, 5} Baikal Institute of Nature Management SB RAS, Ulan-Ude, Russia

¹abesh@binm.ru✉

²tabor@binm.ru

³alub@binm.ru

⁴budaevadarima@yandex.ru

⁵sergei_petrov13@mail.ru

Abstract. On the example of the most developed part of the lake Baikal basin, the decomposition of the digital coverage content from 12 sheets of the topographic map scale 1:84 000, compiled by the Corps of Military Topographers in 1896-1912, was performed. As a result of vectorization of retrospective layers of topographic objects and subsequent transformation of their shp files into classes of spatial objects of the ArcGIS environment, two cartographic sets of spatial object classes were formed that characterize two types of regional environmental management - traditional pastoral and invasive agricultural. As a result of layer-by-layer geoinformation modeling of cartographic sets on a modern topographic basis and a digital relief model, primary areas of settlement and economic use of the territory were established, physical and geographical characteristics of the past economic use of the territory were determined, and separate mapping of spatial and temporal life support structures of different types of nature management was performed. For operational digital visualization, a technological solution is proposed for storing and mapping sets of spatial object classes by organizing a file-based geodata of the ArcGIS information environment. Cartographic reconstructions of pastoral and agricultural nature management at the beginning of the 20th century are presented, as well as a general cartographic reconstruction of nature management on a landscape basis, which allows us to assert that traditional pastoral nature management does not involve the transformation of the Earth's surface and is characterized by continuous restorative dynamics of natural landscapes, and invasive nature management is based on the violation of soil cover, which later led to the emergence of areas of water and wind erosion.

Keywords: retrospective map, types of regional environmental management, digital visualization, GIS, cartographic set of classes of spatial objects

Acknowledgments: the article was prepared within the framework of the implementation of the state task of the Baikal Institute of Nature Management of the SB RAS.

For citation: Beshentsev A.N., Borisova T.A., Lubsanov A.A., Budaeva D.G., Petrov S.A. Decomposition of Retrospective Topographic Maps for Layer-by-Layer Assessment of Regional Nature Management Types. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2023;(3):71-79. (In Russ.).

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC-BY 4.0).

Введение

В результате внедрения геоинформационной технологии в историко-географические исследования повысился интерес к ретроспективным картографическим произведениям. Ретроспективные карты разных лет издания являются историческим источником топографической информации и поэтому востребованы в различных областях территориальной деятельности. Они – надежные источники для геоэкологического картографирования [1] и метрической оценки влияния природопользования на географическую среду [2–4], исследований влияния географических факторов на пространственное размещение населения [5], на основе их анализа составляются летописи катастроф [6], они несут ценную информацию по истории формирования Российского государства

[7, 8]. Такие карты успешно используются при исследованиях динамики географических объектов, и в первую очередь изменений лесного покрова [9], оценки динамики русел рек [10].

Для декомпозиции ретроспективных топографических карт и выделения типов регионального природопользования выбрано Селенгинское среднегорье – наиболее освоенный участок бассейна оз. Байкал и территория исторического проживания бурятского этноса. Основными формами природопользования до XVII в. (до прихода русских поселенцев) на исследуемой территории были кочевое скотоводство, охота и рыболовство [11]. Пограничное положение территории между лесом и степью со смешанным характером ландшафта определило диверсифицированный характер природопользования [12] и обеспечило условия для развития как традиционного кочевого и полукочевого скотоводческого, так и инвазивного земледельческого природопользования.

Важное значение ретроспективных карт как основного источника метрической планово-высотной информации о прошлых состояниях геосистем требует методического обоснования их включения в современные исследования динамики структур жизнеобеспечения и антропогенного преобразования земной поверхности. Создание на их основе новых цифровых картографических ресурсов является перспективным научно-исследовательским направлением.

Материалы и методы исследований

Ретроспективные карты имеют важное научное значение для исследования долговременных природных, социальных и экономических процессов, хозяйственного освоения территории, метрической оценки динамики и трансформации природных ландшафтов [13]. Основным картографическим источником для оценки типов регионального природопользования послужили листы топографической карты масштаба 2 версты в 1 дюйме (1:84 000), составленные Корпусом военных топографов в 1896–1912 гг.

Для определения точности, приемов составления и принципов генерализации исследуемых карт выполнен сравнительный анализ ретроспективной карты с современной топографической картой масштаба 1:100 000 издания Роскартографии. Для минимизации искажений была разработана методика геометрической коррекции ретроспективной топоосновы, представляющая собой совокупность последовательных технологических операций исправления векторных слоёв на основе ряда геометрических преобразований программной среды ArcGIS [14].

Основным литературным источником для отдельной оценки типов природопользования послужили материалы комиссии Куломзина – комиссии для изучения состояния землевладения, землепользования и хозяйства в Забайкальской области, учрежденной правительством Российской империи в 1897 г. [15].

Под декомпозицией картографического изображения мы понимаем процесс векторного расчленения содержания ретроспективной карты и группировки цифровых слоёв в виде картографических наборов классов пространственных объектов программной среды ArcGIS, характеризующих разные типы регионального природопользования. Таким образом, в результате векторизации и коррекции ретроспективных слоёв объектов природопользования и последующего преобразования их shp-файлов в классы пространственных объектов среды ArcGIS сформировано два картографических набора классов пространственных объектов, характеризующих два типа регионального природопользования: картографический набор объектов скотоводческого природопользования описывает пространственные параметры традиционного природопользования региона; картографический набор объектов земледельческого природопользования – пространственные параметры инвазивного земледельческого природопользования. В результате объединения перечисленных картографических ресурсов в информационной среде ArcGIS создана файловая база геоданных «Типы природопользования Селенгинского среднегорья в начале XX в.» (рис. 1).

Для высотной локализации объектов природопользования создана цифровая модель рельефа исследуемой территории (ЦМР) на основе изолиний высот топографической основы масштаба 1:100 000 Роскартографии. Для оценки воздействия природопользования на природные геосистемы региона составлен цифровой слой природных ландшафтов региона на основе карты «Ландшафты юга Восточной Сибири» [16]. Содержание карты основано на классификации гео-

систем, разработанной в Институте географии СО РАН на основе таксономической системы типологических иерархических подразделений геосистем юга Восточной Сибири. Для метрической оценки динамики природопользования и трансформации природных ландшафтов, а также для сравнительного анализа освоения территории составлен слой бассейнового физико-географического деления исследуемой территории.

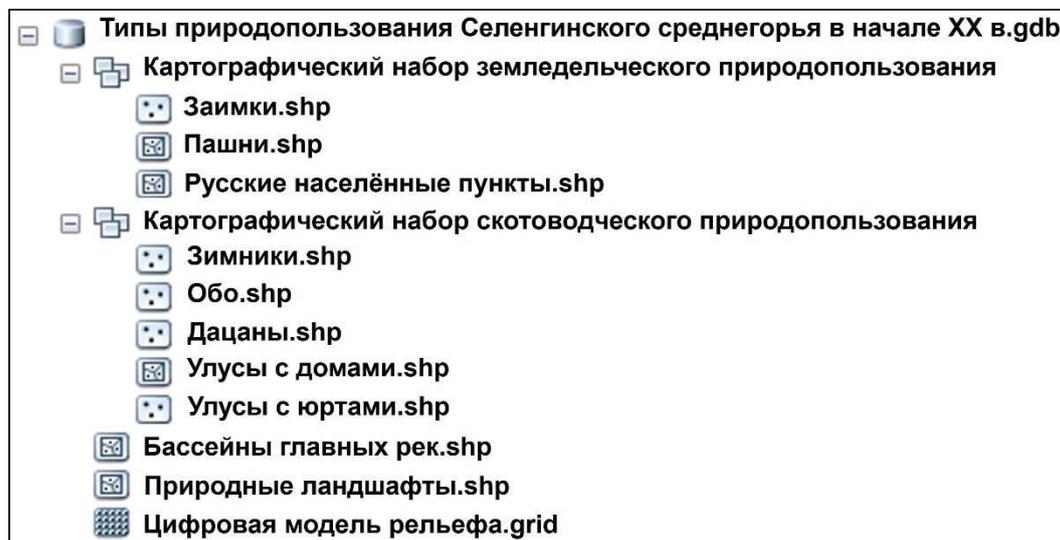


Рис. 1. Файловая база геоданных / Fig. 1. File geodatabase

Обсуждение результатов

В результате послойного картографирования объектов природопользования в ЦМР и на ландшафтной основе установлена территория первичного хозяйственного освоения региона бурят-монгольским этносом (рис. 2).

Пространственно-временная структура жизнеобеспечения коренного населения определяется ландшафтами и рельефом региона, ареалы скотоводческого природопользования компактно размещаются в котловинах забайкальского типа [17]. Освоенные местности были адаптивно встроены в пространственную структуру выделов ранга ландшафта и сопряжены с элементами их внутренней неоднородности. Воздействие на почвенный слой осуществлялось посредством мобильной пастьбы скота и сезонного сенокоса при минимальной нагрузке на геосистемы.

Все кочевые скотоводы жили на левом берегу р. Селенги хаотично расположенными отдельными юртами или группами юрт по родовому признаку, далеко отстоящими одна от другой (рис. 2): летом – в районе летней пастьбы, ближе к реке, колодцам, а зимой – в районе покосов. При организации нового стойбища одни домохозяева ставили свои юрты особняком, другие соединялись по два, три и более хозяйства. Таким образом, населённого пункта в точном смысле слова кочевая община не имеет: летние юрты кочевников распространены по всей территории пастбищ, зимой – по всей территории покосов. Такие зимники устраиваются исключительно при сенокосных местах и имеют целью избежать перевозки сена с дальних покосов в селение. Кочевники кочуют всегда по одной и той же территории и при каждой перемене стойбища ставят юрту на известном месте [18].

Важными объектами природопользования являются культовые места *обо*, представляющие особые святы пространства – места поклонения территориальным духам – хозяевам данной местности (в шаманизме). Каждая родовая община имеет своё *обо*, которое служит природным алтарём для жертвоприношений и исполнения религиозных обрядов, возле которого и происходят зимовки. *Обо* располагаются на выдающихся местах – около перекрёстков дорог, на горных

перевалах, вершинах, около озёр и минеральных источников, на берегах рек – и представляют собой кучи из камней или дерева, украшенные ленточками и флажками, они выполняют сакральные и пограничные функции, служат ориентирами на местности.

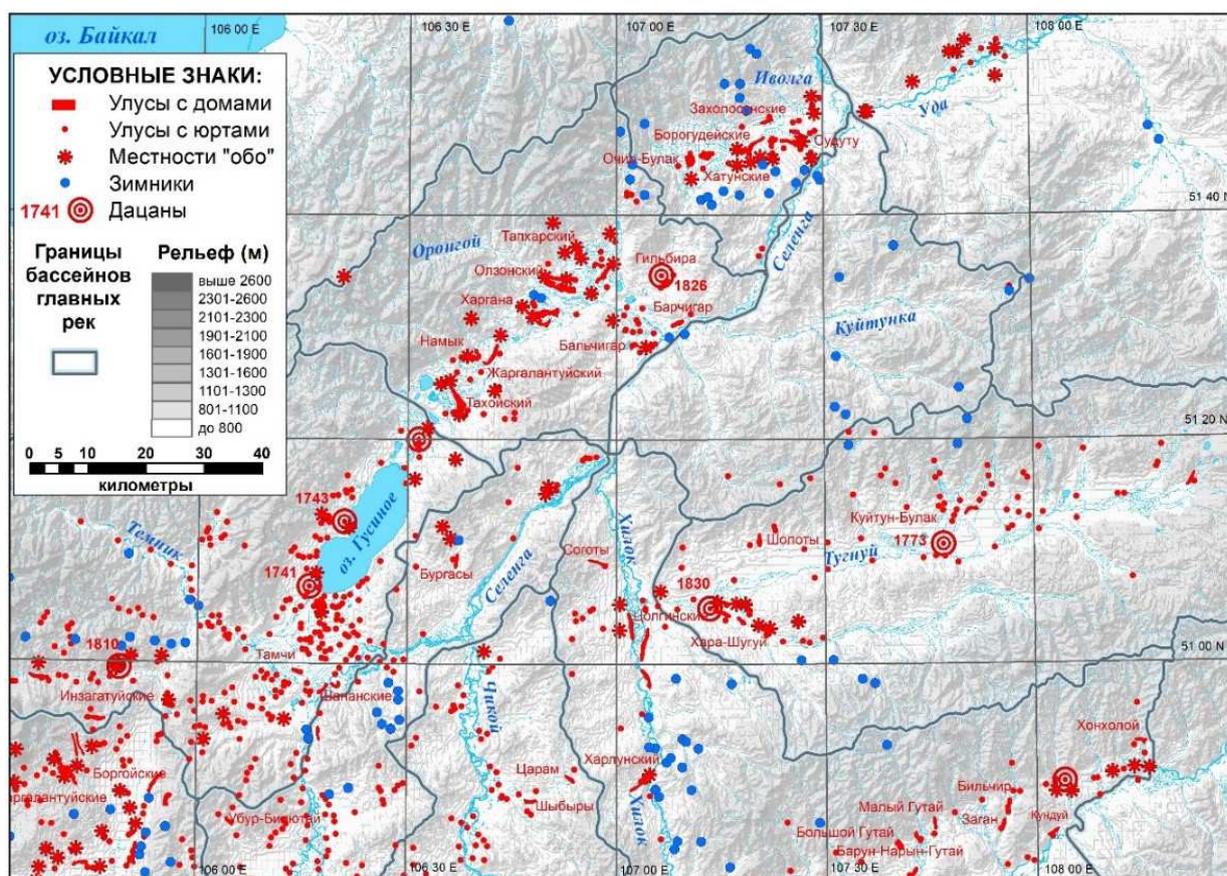


Рис. 2. Реконструкция объектов скотоводческого природопользования
 / Fig. 2. Reconstruction of objects of cattle-breeding nature management

Вся территория общины подразделяется на два вида угодий – покосы и пастбища. Территория общины большей частью состоит из одной или нескольких падей, верховья которых заняты покосами, а низовья – пастбищем; покосы от выгона отделяются изгородью – поскотиной; на покосах находятся зимники, на пастбищах – летники; пашни, если таковые имеются, располагаются отдельными ареалами среди покосов преимущественно по склонам падей.

Экономическая политика Российского государства способствовала внедрению земледельческого природопользования. По мере продвижения русских переселенцев по территории Забайкалья создавались постоянные населенные пункты вдоль крупных речных артерий Селенги с ее притоками – Чикой, Хилок, Джида. В 50–60-е гг. XVII в. до Забайкалья докатилась волна переселенцев из числа старообрядцев, имеющих многовековой опыт земледелия [19]. При наличии отдельных распаханых участков крестьян-старожилов и бурят старообрядцы значительно увеличили площадь пашни, образовали земледельческие центры Забайкалья – бассейны рек Куйтунка, Тугнуй, Хилок (рис. 3).

Освоение природных ландшафтов начиналось с выбора места под пашню, что в дальнейшем и определяло развитие селитбы и дорожной сети. В Забайкалье часто использовался долинный способ застройки, при котором дома и приусадебная территория выстраивались в относительно прямолинейном порядке – в ряд или несколько рядов, как правило, вдоль основной реки. Пашни выбирались на свободных землях, вблизи рек и ручьев. Переселенцы, селившиеся в лесостепной полосе, подыскивали поляны, чтобы уменьшить необходимость расчистки леса. Вверх и вниз от

селения, вдоль реки и по всем падам, выходящим в долину реки и лежащим в районе владений селения, находились покосы, а по склонам падей полосой размещены пашни, поднимающиеся иногда до самой вершины хребтов (рис. 3).

Важной особенностью инвазивного расселения являлось развитие заимочной жизни, влияющее и на характер хозяйства, и на склад землевладения (рис. 3). Заимка как форма расселения сыграла при освоении Забайкалья существенную роль. Постепенно из заимки вырастал новый поселок. Наряду с такими заимками существовали и заимки временные, имевшие только хозяйственное значение. На период исследования заимка играла вспомогательную роль – это жилье на пашне или покосе, куда хозяева переезжают только в определенное время года, не теряя связи с селением, где находится все их хозяйство.

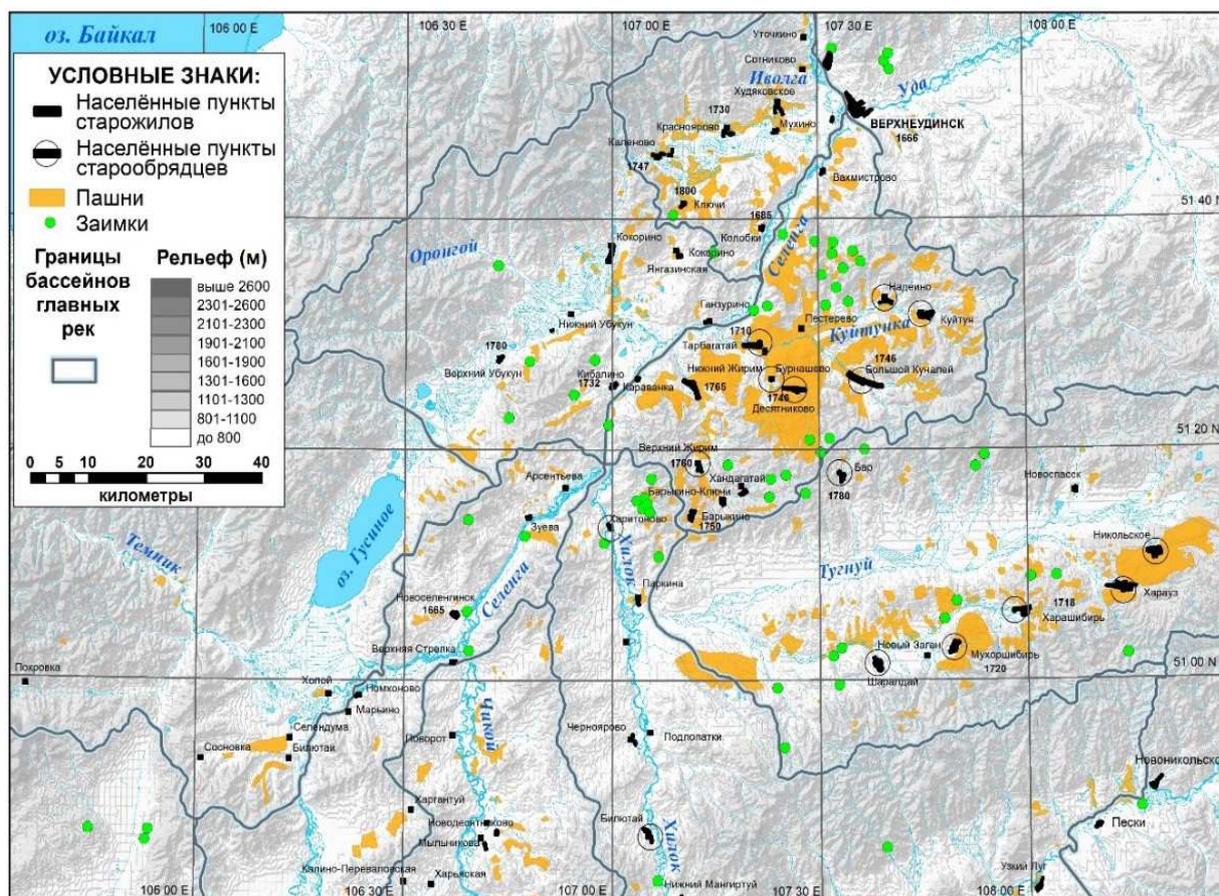


Рис. 3. Реконструкция объектов сельскохозяйственного природопользования / Fig. 3. Reconstruction of objects of agricultural nature management

Совмещение картографических наборов природопользования с ландшафтной основой позволило выявить хозяйственные функции используемых геосистем и дифференцированно оценить воздействие каждого типа природопользования на природную среду каждого освоенного речного бассейна. Традиционное скотоводческое природопользование не предполагает преобразования земной поверхности и характеризуется непрерывной восстановительной динамикой природных ландшафтов. Напротив, инвазивное природопользование основано на нарушении почвенного покрова, что в дальнейшем приведёт к появлению ареалов водной и ветровой эрозии. Установлено, что в первую очередь были распаханы динамичные склоновые травяные геосистемы с подлеском из рододендрона даурского около 500 км² и склоновые каменистые низкотравные около 300 км², а также остепнённые террасы и некоторые пологосклоновые и долинные геомы (рис. 4).

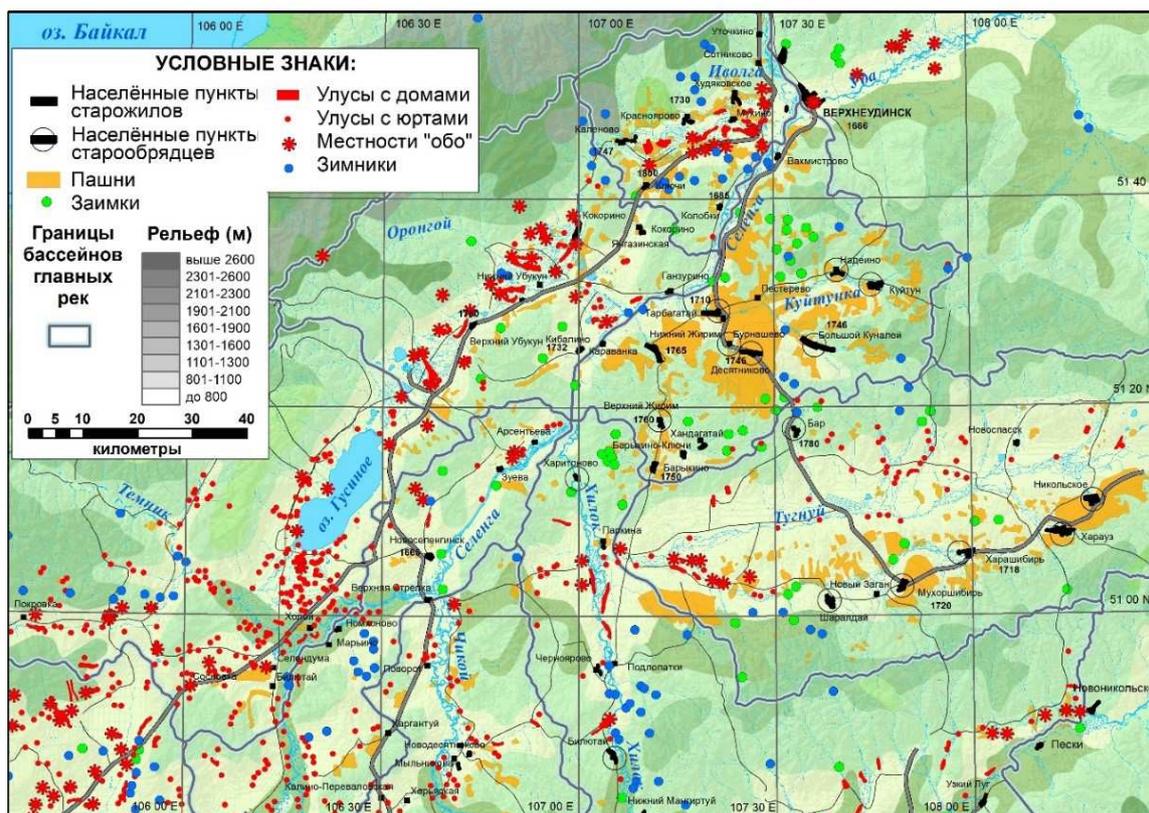


Рис. 4. Картографическая реконструкция природопользования на ландшафтной основе / Fig. 4. Cartographic reconstruction of nature management on a landscape basis

Заключение

Разделение элементов содержания ретроспективных топографических карт обеспечивает послойную цифровую визуализацию объектов разных типов природопользования и временных срезов, возможность ретроспективного послойного моделирования ретроспективной геоситуации с различными современными тематическими слоями – ландшафтами, почвами, растительностью и др. Использование именно ретроспективных карт для декомпозиции позволяет установить физико-географические закономерности раздельного функционирования традиционного скотоводческого и инвазивного земледельческого природопользования, выявить их особенности и ареалы взаимодействия. Установлено, что хозяйственное освоение территории на исследуемый период характеризуется наибольшими различиями скотоводческих и земледельческих пространственно-временных структур природопользования. Значимым процессом для исследуемого периода является переход коренного населения на оседлость. При этом у кочевых и полукочевых скотоводов усадебная оседлость тяготеет по преимуществу к покосам и развивается от зимнего стойбища, у пришлых земледельцев – к пашням.

Предлагаемый подход является новым картографическим приёмом на базе геоинформационной технологии для междисциплинарных географических исследований динамики регионального природопользования и антропогенного изменения природных ландшафтов региона. Файловые базы данных информационной среды ArcGIS дают единовременный многопользовательский доступ к созданным картографическим ресурсам и обработке больших объёмов пространственных данных.

Список источников

1. Ермошин В.В., Ганзей С.С., Мишина Н.В. Старые топографические карты как информационный ресурс при геоэкологическом картографировании // Геоинформационное картографирование в регионах России : сб. материалов. Воронеж: Истоки, 2009. С. 79–83.

2. Постников А.В. Старые карты как источник информации для изучения влияния хозяйства на среду (на примере Центральной России XVIII–XIX вв.) // Изв. РГО. 1980. Т. 112, № 5. С. 419–424.
3. Силаев А.В. Картографический анализ состояния селитебных и распаханых территорий Тункинской котловины за последнее столетие // Вестн. Иркутского гос. техн. ун-та. 2013. № 2 (73). С. 80–84.
4. Хромых О.В., Хромых В.В., Хромых В.С. Естественная и антропогенная динамика ландшафтов поймы Томи в окрестностях г. Томска // Вестн. Томского гос. ун-та. 2015. № 400. С. 426–433.
5. Telbisz T., Bottlik Z., Mari L., Kőszegi M. The impact of topography on social factors, a case study of Montenegro // J. of Mountain Science. 2014. Vol. 11, № 1. P. 131–141.
6. Молоткова Ж. Старые карты – летопись катастроф // Энергия: экономика, техника, экология. 2004. № 2. С. 66–68.
7. Носовский Г.В., Фоменко А.Т. Старые карты Великой русской империи (Птолемей и Ортелиус в свете новой хронологии). М.: АСТ, 2010. 685 с.
8. Постников А.В. Развитие картографии и вопросы использования старых карт. М.: Изд-во МГУ, 1985. 215 с.
9. Черепанова Е.С. Картографирование лесных ресурсов на разновременных картах XIX–XXI вв. (территория Пянтежской лесной дачи) // Геоинформационное обеспечение пространственного развития Пермского края : сб. материалов. Пермь: Пермский гос. нац. исслед. ун-т, 2013. С. 100–103.
10. Каргаполова И.Н. Использование старых русских карт для изучения динамики русел рек // Геодезия и картография. 2007. № 12. С. 10–20.
11. История Бурят-Монгольской АССР / под ред. П.Т. Хаптаева. Улан-Удэ: Бурят-Монгол. кн. изд-во, 1954. 644 с.
12. Иметхенов А.Б. Природа переходной зоны на примере Байкальского региона. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1997. 232 с.
13. Бешенцев А.Н. Картографический мониторинг природопользования // Геодезия и картография. 2011. № 3. С. 14–18.
14. Бешенцев А.Н. Автоматизация и использование ретроспективных карт земельного учёта // Вестн. СГУГиТ. 2017. Т. 22, № 2. С. 120–129.
15. Петерсон Н. Материалы Комиссии для исследования землевладения и землепользования в Забайкальской области. СПб., 1898. 165 с.
16. Михеев В.С., Ряшин В.А. Ландшафты юга Восточной Сибири: карта. М.: ГУГиК, 1977. 4 л.
17. Батуев А.Р., Буянтуев А.Б., Снытко В.А. Геосистемы и картографирование эколого-географических ситуаций приселенгинских котловин Байкальского региона. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2000. 164 с.
18. Кроль М.А. О забайкальских бурятах // Записки Читинского отделения Приамурского отдела РГО. Чита, 1896. Вып. 1.
19. Рагулина М.В. Культурная география: теории, методы, региональный синтез. Иркутск: Изд-во Ин-та географии СО РАН, 2004. 171 с.

References

1. Ermoshin V.V., Ganzei S.S., Mishina N.V. Old topographic maps as an information resource in geocological mapping. *Geoinformation mapping in the regions of Russia: collection of materials*. Voronezh: Istoki Publ.; 2009:79-83. (In Russ.).
2. Postnikov A.V. Old maps as a source of information for studying the impact of agriculture on the environment (on the example of Central Russia of the 18th-19th centuries). *Izv. RGO = Proceedings of the Russian Geographical Society*. 1980;112(5):419-424. (In Russ.).
3. Silaev A.V. Cartographic analysis of the state of residential and plowed territories of the Tunka basin over the last century. *Vestn. Irkutskogo gos. tekhn. un-ta = Bulletin of Irkutsk State Technical University*. 2013;(2):80-84. (In Russ.).
4. Khromykh O.V., Khromykh V.V., Khromykh V.S. Natural and anthropogenic dynamics of landscapes of the Tom floodplain in the vicinity of Tomsk. *Vestn. Tomskogo gos. un-ta = Tomsk State University Journal*. 2015;(400):426-433. (In Russ.).
5. Telbisz T., Bottlik Z., Mari L., Kőszegi M. The impact of topography on social factors, a case study of Montenegro. *Journal of Mountain Science*. 2014;11(1):131-141.
6. Molotkova Zh. Old maps – chronicle of catastrophes. *Energiya: ekonomika, tekhnika, ekologiya = Energy: Economics, Technology, Ecology*. 2004;(2):66-68. (In Russ.).
7. Nosovsky G.V., Fomenko A.T. *Old maps of the Great Russian Empire (Ptolemy and Ortelius in the light of the new chronology)*. Moscow: AST Publ.; 2010. 685 p. (In Russ.).
8. Postnikov A.V. *The development of cartography and the use of old maps*. Moscow: Moscow State University Press; 1985. 215 p. (In Russ.).

9. Cherepanova E.S. Mapping of forest resources on multi-time maps of the 19th-21st centuries (the territory of the Pyanteg forest dacha). *Geoinformation support of spatial development of the Perm Region: collection of materials*. Perm: Perm State National Research University Press; 2013:100-103. (In Russ.).
10. Kargapolova I.N. Using old Russian maps to study the dynamics of riverbeds. *Geodeziya i kartografiya = Geodesy and Cartography*. 2007;(12):10-20. (In Russ.).
11. Khaptaev P.T., ed. *History of the Buryat ASSR*. Ulan-Ude: Buryat-Mongolian Publishing House; 1954. 644 p. (In Russ.).
12. Imetkhenov A.B. *The nature of the transition zone on the example of the Baikal region*. Novosibirsk: Siberian Branch RAS Press; 1997. 232 p. (In Russ.).
13. Beshentsev A.N. Cartographic monitoring of nature management. *Geodeziya i kartografiya = Geodesy and Cartography*. 2011;(3):14-18. (In Russ.).
14. Beshentsev A.N. Automation and use of retrospective maps of land accounting. *Vestn. SGUGiT = Vestnik of the Siberian State University of Geosystems and Technologies*. 2017;22(2):120-129. (In Russ.).
15. Peterson N. *Materials of the Commission for the Study of Land Ownership and Land Use in the Trans-Baikal region*. St. Petersburg, 1898. 165 p. (In Russ.).
16. Mikheev B.C., Ryashin V.A. *Landscapes of the South of Eastern Siberia*. Map. Moscow: The Main Directorate of Geodesy and Cartography Press; 1977. 4 sh. (In Russ.).
17. Batuev A.R., Buyantuev A.B., Snytko V.A. *Geosystems and mapping of ecological and geographical situations of the Selenga basins of the Baikal region*. Novosibirsk: Siberian Branch RAS Press; 2000. 164 p. (In Russ.).
18. Krol M.A. About the Trans-Baikal Buryats. *Notes of the Chita branch of the Amur Department of the Russian Geographical Society*. Chita, 1896;(1). (In Russ.).
19. Ragulina M.V. *Cultural geography: theories, methods, regional synthesis*. Irkutsk: Institute of Geography Siberian Branch RAS Press; 2004. 171 p. (In Russ.).

Информация об авторах

Андрей Николаевич Бешенцев – доктор географических наук, профессор РАН, заведующий лабораторией геоинформационных систем.

Татьяна Анатольевна Борисова – кандидат географических наук, старший научный сотрудник лаборатории геоинформационных систем.

Александр Александрович Лубсанов – ведущий инженер лаборатории геоинформационных систем.

Дарима Гармаевна Будаева – кандидат географических наук, научный сотрудник лаборатории геоинформационных систем.

Сергей Алексеевич Петров – инженер лаборатории геоинформационных систем.

Information about the authors

Andrew N. Beshentsev - Doctor of Science (Geography), Professor, RAS, Head of Laboratory of Geoinformation Systems.

Tatyana A. Borisova - Candidate of Science (Geography), Senior Researcher, Laboratory of Geoinformation Systems.

Alexander A. Lubсанov - Leading Engineer, Laboratory of Geoinformation Systems.

Darima G. Budaeva - Candidate of Science (Geography), Researcher, Laboratory of Geoinformation Systems.

Sergey A. Petrov - Engineer, Laboratory of Geoinformation Systems.

Статья поступила в редакцию 25.04.2023; одобрена после рецензирования 12.05.2023; принята к публикации 20.06.2023.
The article was submitted 25.04.2023; approved after reviewing 12.05.2023; accepted for publication 20.06.2023.

Научная статья

УДК 911.2:556.11

doi: 10.18522/1026-2237-2023-3-80-92

КОНЦЕНТРАЦИЯ И ЭМИССИЯ МЕТАНА И СЕРОВОДОРОДА В ОЗЕРЕ БАСКУНЧАК, РУЧЬЕ БАЛКИ УЛАН-БЛАГ И ДЕГАЗИРУЮЩИХ ИСТОЧНИКАХ ПОДЗЕМНЫХ ВОД В ВЕСЕННИЙ ПЕРИОД

Д.Н. Гарькуша¹, Ю.А. Фёдоров², Р.Г. Трубник³✉, Б.В. Талпа⁴, Е.А. Ковалев⁵

^{1, 2, 3, 4, 5} Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, Россия

¹gardim1@yandex.ru

²fedorov@sfedu.ru

³truroman@sfedu.ru✉

⁴bvtalpa@sfedu.ru

⁵evkova@sfedu.ru

Аннотация. Впервые изучено распределение метана в рапе и донных отложениях озера Баскунчак, а также его притока – ручья Улан-Благ, в балке которого происходит разгрузка восходящих дегазирующих источников подземных вод. В различных горизонтах (до 35 см) отложений ручья, помимо CH_4 , определены концентрации суммарного сероводорода ($\Sigma\text{H}_2\text{S}$), значения Eh и pH, влажность и плотность. В рапе озера и ручья определены концентрации CH_4 , главных ионов и значения pH. На одном из дебитных полей, где происходит разгрузка дегазирующих источников, проведены экспериментальные измерения эмиссии CH_4 камерным методом. Минерализация рапы в озере Баскунчак составляет 312 г/дм^3 , что в 2,1 раза больше, чем в ручье Улан-Благ; класс вод в ручье и озере хлоридный, группа натриевая, тип, соответственно, II и III. Потоки CH_4 в атмосферу с поверхности исследованного дегазирующего источника варьируются в пределах $1,97\text{--}2,07 \text{ мг/(м}^2\cdot\text{ч)}$. В рапе дегазирующих источников фиксируется высокая концентрация CH_4 (до 215 мкл/дм^3), что на 1–2 порядка выше, чем в рапе озера. Низкие концентрации CH_4 в рапе озера обусловлены незначительным его потоком из донных отложений в воду из-за наличия соляной корки, препятствующей эмиссии газа, а также вследствие небольших его концентраций в верхних слоях отложений ($0,01 \text{ мкг/г}$). Низкие концентрации CH_4 , несмотря на восстановительные условия, также характерны для отложений устья ручья Улан-Благ ($0,04\text{--}0,32 \text{ мкг/г}$), что при высоких концентрациях в них $\Sigma\text{H}_2\text{S}$ ($0,06\text{--}1,32 \text{ мг/г}$), вероятно, вызвано подавлением в отложениях метаногенеза сульфатредукцией. В целом распределение CH_4 и $\Sigma\text{H}_2\text{S}$ по вертикали отложений достаточно синхронно ($r = 0,64$) и коррелирует с распределением значений Eh.

Ключевые слова: солеродный бассейн, рапа, донные отложения, катион-анионный состав, Eh, pH, метан, сероводород, распределение, эмиссия

Благодарности: исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-27-00330, <https://rscf.ru/project/23-27-00330/>, в Южном федеральном университете.

Авторы благодарят с.н.с. лаборатории методов и технических средств анализа вод Гидрохимического института Н.С. Тамбиеву за определение концентраций CH_4 и $\Sigma\text{H}_2\text{S}$.

Для цитирования: Гарькуша Д.Н., Фёдоров Ю.А., Трубник Р.Г., Талпа Б.В., Ковалев Е.А. Концентрация и эмиссия метана и сероводорода в озере Баскунчак, ручье балки Улан-Благ и дегазирующих источниках подземных вод в весенний период // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2023. № 3. С. 80–92.

Статья опубликована на условиях лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY 4.0).

Original article

CONCENTRATION AND EMISSION OF METHANE AND HYDROGEN SULFIDE IN LAKE BASKUNCHAK, ULAN-BLAG BEAM CREEK AND DEGASSING GROUNDWATER SOURCES IN SPRING

D.N. Gar'kusha¹, Yu.A. Fedorov², R.G. Trubnik³✉, B.V. Talpa⁴, E.A. Kovalev⁵

^{1, 2, 3, 4, 5} Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia

¹gardim1@yandex.ru

²fedorov@sfedu.ru

³truroman@sfedu.ru ✉

⁴bvtalpa@sfedu.ru

⁵evkova@sfedu.ru

Abstract. For the first time, the distribution of methane in the brine and bottom sediments of Lake Baskunchak, as well as its tributary, the Ulan-Blag stream, in the beam of which the discharge of ascending degassing groundwater sources takes place, was studied. In addition to CH₄, concentrations of total hydrogen sulfide (ΣH_2S), Eh and pH values, humidity and density were determined in various horizons (up to 35 cm) of stream sediments. Concentrations of CH₄, major ions and pH values were determined in the brine of the lake and stream; experimental measurements of CH₄ emission by the chamber method were carried out on one of the debit fields where degassing sources are discharged. Brine mineralization in Lake Baskunchak is 312 g/dm³, which is 2.1 times more than in the Ulan-Blag stream; the water class in the stream and lake is chloride, the sodium group, type II and III, respectively. The fluxes of CH₄ into the atmosphere from the surface of the studied degassing source vary in the range of 1.97–2.07 mg/(m² h). In the brine of degassing sources, a high concentration of CH₄ (up to 215 $\mu\text{l}/\text{dm}^3$) is recorded, which is 1-2 orders of magnitude higher than in the brine of the lake. Low concentrations of CH₄ in the brine of the lake are due to its insignificant flow from bottom sediments into the water due to the presence of a salt crust that prevents gas emission, as well as due to its small concentrations in the upper layers of sediments (0.01 $\mu\text{g}/\text{g}$). Low concentrations of CH₄, despite the reducing conditions, are also characteristic of the sediments of the mouth of the Ulan-Blag creek (0.04–0.32 $\mu\text{g}/\text{g}$), which, at high concentrations of ΣH_2S in them (0.06–1.32 mg/g), is probably caused by the suppression of methanogenesis in the sediments by sulfate reduction. In general, the distribution of CH₄ and ΣH_2S along the vertical of deposits is quite synchronous ($r = 0.64$) and correlates with the distribution of Eh values.

Keywords: salt basin, brine, bottom sediments, cation-anionic composition, Eh, pH, methane, hydrogen sulfide, distribution, emission

Acknowledgments: the study was supported by a grant from the Russian Science Foundation No. 23-27-00330, <https://rscf.ru/project/23-27-00330/>, at the Southern Federal University.

The authors thank Senior Researcher of the Laboratory of Methods and Technical Means for Water Analysis of the Hydrochemical Institute N.S. Tambieva for determining the concentrations of CH₄ and ΣH_2S .

For citation: Gar'kusha D.N., Fedorov Yu.A., Trubnik R.G., Talpa B.V., Kovalev E.A. Concentration and Emission of Methane and Hydrogen Sulfide in Lake Baskunchak, Ulan-Blag Beam Creek and Degassing Groundwater Sources in Spring. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2023;(3):80-92. (In Russ.)

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC-BY 4.0).

Введение

Озеро Баскунчак – это бессточное самосадочное соленое озеро, расположенное в пределах Боткульско-Баскунчакской депрессии, входящей в состав Прикаспийской низменности, примерно в 270 км к северу от Каспийского моря, в 53 и 50 км к востоку от р. Волги и от г. Ахтубинска соответственно. Вблизи озера находятся поселки Верхний Баскунчак, Средний Баскунчак и Нижний Баскунчак. Административно озеро относится к Ахтубинскому району Астраханской области.

Озеро Баскунчак, одно из самых больших известных соляных озер мира. Его площадь – около 96 км², длина береговой линии – 42 км. Озеро вытянуто с северо-запада на юго-восток на 16,5 км, максимальная ширина – до 9 км. Урез воды (рапы) в озере находится на 21 м ниже уровня моря. Во влажные периоды года (весна и осень) оз. Баскунчак представляет собой «рапное» озеро с максимальным уровнем рапы до 1 м [1].

Озеро Баскунчак возникло в западной части Прикаспийской низменности в результате солянокупольной тектоники – как компенсационная впадина (мульда), расположенная между соляными куполами и имеющая мощность озерных отложений четвертичного возраста свыше 270 м [2]. Эти отложения представляют собой чередование терригенных пород морского генезиса и хемогенных соляных пород, образовавшихся в периоды континентальных перерывов [2]. Соляные купола данного района имеют сходное строение и представлены толщей галита (по геофизическим данным их мощность превышает 800 м), перекрытой в кровле гипсовыми отложениями мощностью от первых десятков до 80 м. Глубина залегания «гипсовой шляпы» меняется от 0 до 50 м [2].

Соленость оз. Баскунчак в среднем составляет около 300 г/л, что связано как с поступлением в озеро высокоминерализованных вод водотоков, так и с аридным климатом, обуславливающим высокую испаряемость воды [3]. Многие авторы, изучавшие оз. Баскунчак, выделяли разное количество источников поступления вод в озеро [4]. По итогам современных мониторинговых работ 2004–2007 гг., организованных геологическим факультетом СПбГУ совместно с ВНИИ Галургии [4], выявлено 22 водотока и сухих русла, наибольший интерес из которых представляют ручьи, разгружающиеся с северо-западной, северной и северо-восточной сторон оз. Баскунчак и отвечающие за 95 % поверхностного стока. Особенно крупные ручьи формируются на северо-западном и северном побережье озера (ручьи Улан-Благ и Северный), а также на восточном побережье озера в балке Горький Ерик (р. Горькая) за счет мощных восходящих источников, связанных с сильнозакарстованными гипсами кунгурского яруса (нижний отдел пермской системы). Данные источники выходят в виде дегазирующих грифонов, а также сосредоточенными струями различной мощности как из трещиноватых гипсов, так и на дне небольших карстовых воронок, а также в заиленных днищах балочных долин [5]. Источники располагаются в основании склонов озера, а также непосредственно в устьевых частях балок и на некотором удалении от них (500–800 м выше устьев) [5]. Эти подземные источники, как правило, несут высокоминерализованные воды. Их минерализация из года в год несколько варьируется, при этом связи между общим уменьшением дебитов источников в последние годы и изменениями минерализации не наблюдается [5]. Высокая соленость вод подземных источников обусловлена тем, что, проходя сквозь соляные линзы, находящиеся под слоем осадочных пород, подземные воды растворяют их, насыщаясь солью и на поверхность выходят солеными.

Следует отметить, что, по мнению [6], гидрологический режим оз. Баскунчак в настоящее время в течение большей части года в основном зависит от изменения количества поступающих осадков на акваторию озера и величины испарения, поскольку поступление воды с поверхности водосбора купируется плотинами и задерживается дамбами, расположенными на основных притоках водоема. Данные сооружения были построены во второй половине XX в. – в период значительно большей водности, чем сейчас. В частности, для р. Горькой – одного из основных притоков оз. Баскунчак – имеет место полное перекрытие поступления воды из ее бассейна в результате возведения в ее устье глухой плотины, перед которой образовалось замкнутое водохранилище. Для других крупнейших притоков – ручья Улан-Благ и Северной группы ручьев – наблюдается значительное затруднение стока из-за возведенных в их нижнем течении дамб. Водопропускные отверстия в дамбах этих ручьев не обеспечивают беспрепятственного стока воды в период весеннего половодья, вследствие чего перед ними с внешней от озера стороны образуются обширные разливы воды, по существу, представляющие собой дополнительные «испарительные бассейны». И только в период низкой воды обеспечивается свободный сток Северной группы ручьев и ручья Улан-Благ в оз. Баскунчак [6].

Изменчивость минерализации, катион-анионного состава и дебита вод наиболее крупных восходящих подземных источников, питающих притоки оз. Баскунчак, рассмотрена в ряде работ [4, 5, 7–9]. В них отмечается, что во многих этих подземных источниках, наряду с разгрузкой вод, наблюдается выделение струй газов различной интенсивности. Однако в научной литературе мы не встретили работ, посвященных изучению состава выделяющихся газов, их концентраций и потоков, что не позволяет установить потенциал подземных источников, питающих притоки

оз. Баскунчак, к эмиссии парниковых газов в атмосферу. Последнее имеет важное практическое значение для оценки региональных потоков парниковых газов в атмосферу с поверхности наземных и аквальных ландшафтов юга европейской части России.

В настоящей работе проанализированы результаты экспедиционных исследований, проведенных в весенний период и направленных на изучение распределения концентраций метана в воде (рапе) и донных отложениях и оценку его потоков в атмосферу в одном из наиболее крупных притоков оз. Баскунчак – ручье балки Улан-Благ, а также непосредственно в оз. Баскунчак, вне влияния восходящих подземных источников.

Объекты, материалы и методы исследования

Экспедиционные исследования проводились в северо-западной (ст. 1) и западной (ст. 2) прибрежной зонах оз. Баскунчак (рис. 1). В период наблюдений (21–22 мая) температура воздуха варьировалась от +12 (ночью) до +29 °С (днем). В дневной период, как правило, была ясная погода, ближе к вечеру появлялись облака (облачность до 50 %). Грунтовые дороги, обеспечивающие подъезд к озеру, были сухими и достаточно легко проезжаемыми.

Станция 1 расположена на северо-западном берегу озера, в нижнем течении ручья балки Улан-Благ. В верховье, в среднем и нижнем течении данной балки по космоснимкам фиксируются крупные и мелкие водные поверхности субизометричной формы, дешифрируемые как карстовые колодцы и/или воронки с восходящими подземными источниками, питающими ручей.

В нижнем течении ручья балки Улан-Благ (рис. 2) по космоснимкам дешифрируются как минимум три подземных источника (т. 1-2, 1-3 и 1-4), один из которых (т. 1-4) имеет наибольший диаметр карстовой воронки (10–15 м) среди всех источников, распознанных в балке. Авторами в ходе маршрутных наблюдений были обследованы восходящие подземные источники № 1 и 2 (т. 1-2 и 1-3), наиболее близко расположенные к прибрежной зоне озера – в 140 и 360 м соответственно. Вода этих источников во время наблюдений имела температуру 18 °С и была соленая на вкус.



Рис. 1. Карта-схема местоположения точек отбора проб в озере Баскунчак / Fig. 1. Map-diagram of the location of sampling points in Lake Baskunchak

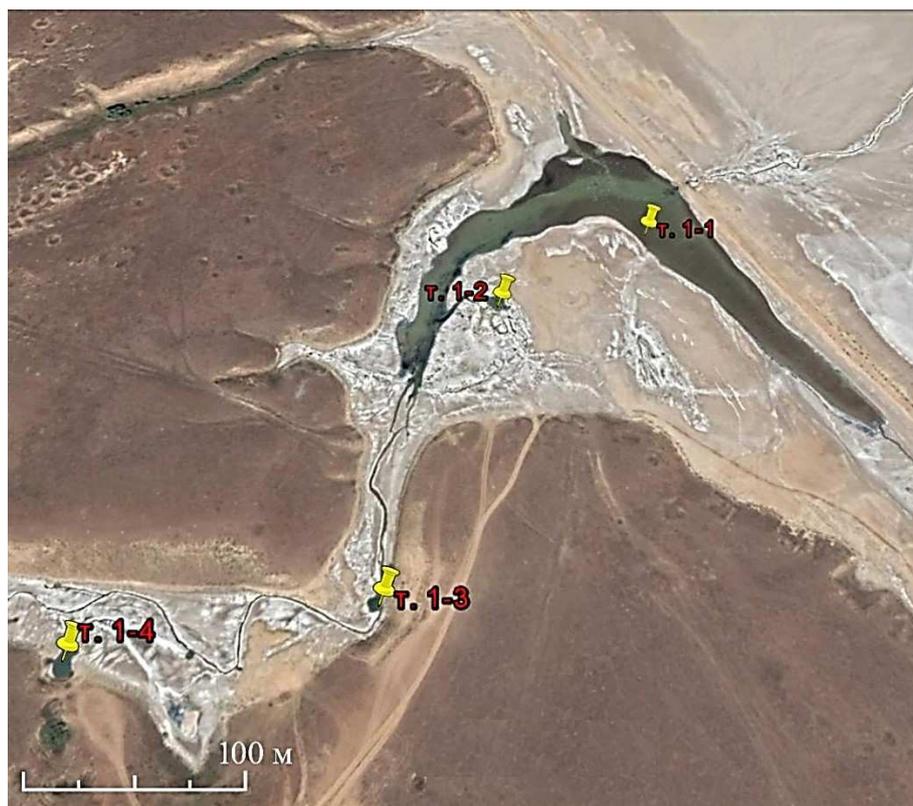


Рис. 2. Космоснимок (Google Earth) нижнего течения ручья балки Улан-Благ (ст. 1)
/ Fig. 2. Satellite image (Google Earth) of the lower course of the Ulan-Blag beam creek (station 1)

Обследованный подземный источник № 2 (т. 1-3), представленный карстовым колодезем диаметром до 6 и глубиной более 5 м, обладает высоким дебитом прозрачной воды. В данном источнике в период наблюдений с глубины поднимались несколько крупных водных струй, с которыми периодически на поверхность выбрасывались газовые пузыри различного размера. Борта этого источника сложены черными маслянистыми тонкозернистыми илами с сильным запахом сероводорода. Здесь (т. 1-3) над одной из восходящих водно-газовых струй отобраны пробы рапы для определения концентраций метана.

В 220 м ниже этого источника, ближе к прибрежной зоне озера выявлена неглубокая карстовая воронка диаметром 6–8 м с 15–20 отдельными родниками различного дебита. В этом дебитном поле (подземный источник № 1, т. 1-2) большинство родников имеют очень низкий дебит и 3 родника – высокий дебит. Последние образуют конусовидные грифоны диаметром 0,5–1 м, а родники с небольшим дебитом – грифоны диаметром 0,1–0,3 м. Из грифонов, кроме воды, на поверхность выделялись газовые пузырьки, при поднесении горячей спички к которым воспламенения не происходило. У малых грифонов отмечены постоянные выделения пузырьков, у крупных грифонов – периодические выделения с частотой от 2–3 до 5–6 мин. Борта грифонов сложены черными маслянистыми тонкозернистыми илами с резким запахом сероводорода. В дебитном поле (т. 1-2) над одним из малых грифонов отобраны пробы рапы для определения концентраций метана, а также вблизи него установлена стационарная накопительная камера – ловушка для оценки скорости потока метана в атмосферу.

Из-за возведенной в устье ручья Улан-Благ дамбы с водопропускным отверстием, не обеспечивающим беспрепятственный сброс его вод в оз. Баскунчак [6], с внешней от озера стороны вследствие разлившихся вод ручья образовался обширный водоем с прозрачной водой и слабым течением (т. 1-1). Глубина этого водоема не превышает 15 см. Нижние горизонты донных отложений в данном водоеме представлены бурыми, коричнево-бурыми тугопластичными засоленными глинами, для которых материнской породой, вероятно, являются суглинки, обнажающиеся в основании прибрежных склонов озера. По резкой границе над глинами залегают черные мягкопластичные маслянистые засоленные тонкозернистые илы с сильным запахом сероводорода и

включениями кристаллов соли песчаной и гравийной размерности. При высыхании воды на поверхности вышеописанных отложений образуется соляная корка, состоящая из мелко-, средне- и крупнозернистого галита, выполняющего отрицательные формы дна бассейна, покрывая сплошным чехлом донные отложения и закрывая их от воздействия кислорода воздуха. При полном высыхании вследствие испарения воды на поверхности соляного чехла за счет усадки подстилающих глинистых отложений образуются трещины (такыры), которые заполняются крупнокристаллическим галитом.

В устьевой части ручья балки Улан-Благ (т. 1-1) отобраны пробы рапы для определения концентраций метана и главных ионов (HCO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-} , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+), сухого остатка, значений pH и температуры, а также установлена стационарная накопительная камера – ловушка для оценки скорости потока метана в атмосферу. Кроме этого, с различных горизонтов донных отложений (до глубины 35 см) отобраны пробы, в которых, помимо концентраций метана и общего содержания сульфидной серы (далее суммарного сероводорода – $\Sigma\text{H}_2\text{S}$), определены значения Eh и pH, влажность (φ) и плотность (ρ).

Станция 2 расположена на западном берегу озера Баскунчак, в 1,2–1,5 км южнее п. Нижний Баскунчак, в районе разрушившейся старинной соледобычи. На удалении 0,25–0,3 км от береговой линии озера (т. 2-1) отобраны пробы прозрачной рапы температурой 11 °С для определения концентраций метана и главных ионов (HCO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-} , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+), сухого остатка, значений pH и температуры. Мощность рапы в точке отбора проб не превышает 15 см. Дно устлано коркой 1–2 см твердого крупнозернистого галита от чисто-белого до светло-серого цвета. Под коркой соли, подстилаемой слоем 0,1 см коричневого ила, залегает черный влажный тонкозернистый ил без запаха сероводорода, в поверхностном горизонте (0–2 см) которого отобрана проба для определения концентраций метана. Кроме этого, определение концентраций метана выполнено в рапе оз. Баскунчак на участке старинной соледобычи (т. 2-2) и воде небольшого солоноватого водоема, образуемого ручьем Динамитка, стекающим в озеро (т. 2-3).

Донные отложения отбирали с помощью специальной пластиковой трубки длиной 500 мм и диаметром 45 мм с остро заточенными краями и фторопластовым поршнем для выдавливания керна. Отбор, транспортировка, хранение проб и последующее определение метана и сероводорода проводили согласно аттестованным методикам [10–12]. Определение концентрации метана в пробах воды и донных отложений проведено на газовом хроматографе «Хроматэк-Кристалл 5000.2» с дозатором равновесного пара на пламенно-ионизационном детекторе. Выполнение измерений массовой доли сульфидной серы ($\Sigma\text{H}_2\text{S}$) основано на переводе сульфидов донных отложений в сероводород действием соляной кислоты и последующей отдувкой сероводорода азотом особой чистоты в раствор гидроксида натрия и определения сульфид-ионов фотометрическим методом с N,N-диметил-п-фенилендиамином [10]. Определение газов производилось в донных отложениях при их естественной влажности и выражалось в мкг/г и мг/г влажного осадка (вл. о.) для метана и сероводорода соответственно. Одновременно с отбором проб в заранее взвешенные и пронумерованные бюксы отбирали навеску донных отложений для определения их влажности и плотности. Измерение значений pH, Eh и температуры выполнено с помощью электродов портативного pH-метра-иономера «Экотест 2000» сразу после отбора проб. Концентрации главных ионов и сухой остаток в рапе определены по общепринятым в системе Росгидромета стандартным методикам [13].

Стационарные накопительные камеры – ловушки, установленные для оценки скорости потока метана в атмосферу в устьевой части ручья балки Улан-Благ (т. 1-1), а также над одним из малых грифонов карстового дебитного поля (т. 1-2), представляют собой пластиковые (поликарбонатные) емкости с открытым основанием и герметичной крышкой со специальным отверстием для забора газовой фазы [14, 15]. Объем воздушной фазы в ловушках составляет 3000 см³, площадь основания – 539 см². Сразу (экспозиция 0 мин – «холостая» проба) и через 150 мин после установки ловушек шприцем через специальное отверстие из ловушек отбирали 2 см³ пробы газовой смеси и вводили в стандартные стеклянные флаконы для парофазного анализа с консервантом [11]. При этом каждый отбор проб проводили в двух повторностях (параллельные пробы). Определение концентрации метана в газовой смеси стандартного флакона выполняли с помощью парофазного анализа по методике [11].

Для характеристики сопряженного распределения CH_4 и $\sum \text{H}_2\text{S}$ в донных отложениях использован коэффициент «метанизации», представляющий собой процентное содержание CH_4 от суммы концентраций, мг/г, восстановленных газов – $\sum \text{H}_2\text{S}$ и CH_4 [16].

Результаты исследования и их обсуждение

Минерализация воды (рапы) в устье ручья балки Улан-Благ (т. 1-1), по данным проведенных экспедиционных исследований, составляет 149,86 г/дм³ (рассолы) (табл. 1). По химическому составу вода этого озера в соответствии с классификацией О.А. Алекина [17] относится к классу хлоридных вод, группе натриевых вод, второму типу (формула $\text{Cl}_{II}^{\text{Na}}$). Для вод ручья формула Курлова, в которой указываются только ионы, присутствующие в воде в количестве больше чем 12,5 % экв. (из расчета к 50 % сумм анионов и катионов раздельно), имеет следующий вид:

$$M_{149,9} = \frac{(\text{Cl})_{47,60}}{(\text{Na})_{47,47}} \text{pH}7,1.$$

Таблица 1 / Table 1

Результаты исследований рапы в устьевой части ручья балки Улан-Благ и западной части оз. Баскунчак / The results of brine studies in the estuary of the Ulan-Blag gulch stream and the western part of Lake Baskunchak

№ точки отбора проб	Ca ²⁺ , мг/дм ³	Mg ²⁺ , мг/дм ³	Na ⁺ , мг/дм ³	K ⁺ , мг/дм ³	HCO ₃ ⁻ , мг/дм ³	SO ₄ ²⁻ , мг/дм ³	Cl ⁻ , мг/дм ³	∑ ионов, мг/дм ³	Сухой остаток, мг/дм ³	Жесткость, мг-экв/л / Щелочность, мг-экв/л
1-1	1979	275,0	54 420	191,6	201,4	5783	87 008	149 858,0	156 567	$\frac{121,4}{3,3}$
2-1	6442	14 667,9	94 253	1 114,5	48,8	12	195 757	312 295,2	370 425	$\frac{1529,0}{0,8}$

Полученные в ходе настоящих исследований данные о минерализации и соотношении основных ионов в подземных водах, разгружающихся в балке Улан-Благ, согласуются с ранее опубликованными сведениями [7].

Минерализация рапы в озере Баскунчак (т. 2-1) составляет 312,3 г/дм³ (рассолы), что в 2,1 раза превышает минерализацию ручья балки Улан-Благ (т. 1-1). Более высокая минерализация рапы озера, вероятно, обусловлена интенсивной испаряемостью в жаркий период. Рапа озера так же, как и ручья балки Улан-Благ, относится к классу хлоридных вод, группе натриевых вод, но третьему типу (формула $\text{Cl}_{III}^{\text{Na}}$). Формула Курлова для вод оз. Баскунчак имеет следующий вид:

$$M_{312,31} = \frac{(\text{Cl})_{49,99}}{(\text{Na})_{36,23}} \text{pH}6,8.$$

Основные физико-химические показатели исследованного слоя донных отложений (35 см) в устье ручья балки Улан-Благ (т. 1-1) следующие: влажность – 15,3–26,6 %; плотность – 1,90–2,47 г/см³; рН – 6,16–6,93 (слабокислая – нейтральная среда), Eh – 51,3...–250,0 мВ (восстановительная среда).

Концентрация метана в рапе восходящих подземных источников в балке Улан-Благ варьируется в пределах 46,9–215,0 мкл/дм³ (в среднем 146,7 мкл/дм³) с максимальными значениями в дегазирующем подземном источнике № 2 (207,0–215,0 мкл/дм³), почти в 2 раза превышающими его концентрации в дегазирующем подземном источнике № 1 (табл. 2).

Концентрация метана в рапе устья ручья балки Улан-Благ (т. 1-1), который питают восходящие подземные источники, снижается до 47,1–84,3 мкл/дм³ (в среднем 65,7 мкл/дм³). Уменьшение концентрации, вероятно, обусловлено преобладанием в балансе метана в рапе устья ручья процессов его окисления и эмиссии в атмосферу над поступлением из донных отложений, характеризующихся относительно низкими концентрациями исследуемого газа. Так, концентрация метана в донных отложениях устья ручья балки Улан-Благ варьирует в пределах 0,04–0,32 мкг/г влажного осадка (в среднем 0,17 мкг/г) с максимальными значениями в нижних горизонтах (20–35 см) и минимальными в поверхностном (0–2 см) слое.

Таблица 2 / Table 2

Результаты экспедиционных исследований озера Баскунчак в весенний период
 / The results of the expedition studies of Lake Baskunchak in the spring

№ точки отбора проб и ее местоположение. Координаты, с.ш/в.д.	Рапа (вода)		Донные отложения					Визуальное описание донных отложений	
	T, °C / pH	Концентрация CH ₄ , мкл/дм ³ / Потоки CH ₄ в атмосферу, мг CH ₄ /(м ² ·ч)	Горизонт, см	pH / Eh, мВ	ρ, г/см ³ вл.о. / φ, %	Концентрация CH ₄ , мкг/г / ΣH ₂ S, мг/г	K _{CH₄} , %		
1-1. Устье ручья балки Улан-Благ, северо-западный берег озера Баскунчак 48°14'40.20" 46°49'16.98"	24 7,1	47,1–84,3 (2) 1,42–1,54 (2)	0–2	6,65 –84,5	1,90 24,4	0,04 0,42	0,010	Влажные черные тонкодисперсные илы, при отборе которых выделялись пузырьки газа с отчетливым запахом сероводорода	
			2–5	6,10 –98,2	2,017 23,5	0,10 0,67			0,015
			5–10	6,16 –185,5	1,991 25,9	0,09 0,66			0,014
			10–15	6,16 –199,4	2,126 25,8	0,11 0,80			0,014
			15–20	6,33 –227,8	2,071 26,6	0,13 1,32			0,010
			20–25	6,40 –127,8	1,915 25,6	0,29 1,14			0,025
			25–30	6,56 –250,0	2,185 23,6	0,32 1,02			0,031
30–35	6,93 –51,3	2,465 15,3	0,24 0,06	0,398	Бурые плотные глинистые отложения, аналогичные суглинкам, слагающим склон берега				
1-2. Подземный источник № 1 в устье ручья балки Улан-Благ 48°14'38.34" 46°49'12.72"	18 –	46,9–118,0 (2) 1,97–2,07 (2)	–	–	–	–	–		
1-3. Подземный источник № 2 в балке ручья Улан-Благ 48°14'32.40" 46°49'10.32"	18 –	207,0–215,0 (2) –	–	–	–	–	–		
2-1. Озеро Баскунчак, западный берег, в 0,25–0,3 км от уреза рапы 48°11'51.90" 46°49'48.66"	11 6,8	0,47–1,43 (2) –	0–2	–	–	0,01	–	Влажные черные тонкодисперсные илы без запаха сероводорода, отобранные под 1 см коркой кристаллов галита	
2-2. Озеро Баскунчак, западный берег, на участке старинной соледобычи 48°12'11.28" 46°49'47.16"	–	0,71–2,85 (2) –	–	–	–	–	–	–	

Окончание табл. 2

№ точки отбора проб и ее местоположение. Координаты, с.ш/в.д.	Рапа (вода)		Донные отложения					Визуальное описание донных отложений
	Т, °С / рН	Концентрация CH ₄ , мкл/дм ³ / Потоки CH ₄ в атмосферу, мг CH ₄ /(м ² ·ч)	Горизонт, см	рН / Eh, мВ	ρ, г/см ³ вл.о. / φ, %	Концентрация CH ₄ , мкг/г / ΣH ₂ S, мг/г	K _{CH₄} , %	
2-2. Озеро Баскунчак, западный берег, на участке старинной соледобычи 48°12'11.28" 46°49'47.16"	–	0,71–2,85 (2) –	–	–	–	–	–	–
2-3. Солёный водоем, образуемый ручьем Динамитка 48°12'11.40" 46°49'38.34"	–	1,85–1,87 (2) –	–	–	–	–	–	–

Низкие концентрации и характер распределения газа по вертикали донных отложений устья ручья Улан-Благ, несмотря на восстановительную обстановку и поступление газа в составе подземных вод, могут свидетельствовать об интенсивном окислении метана консорциумом анаэробных метанооксиляющих архей и сульфатредуцирующих бактерий [18].

Концентрация ΣH₂S в донных отложениях устья ручья балки Улан-Благ изменяется в диапазоне 0,06–1,32 мг/г в.о. (в среднем 0,76 мг/г) с наиболее высокими значениями в слое 15–30 см и минимальными – в слое 30–35 см. В целом концентрации CH₄ и ΣH₂S по направлению от поверхностного слоя к нижней части разреза увеличиваются достаточно синхронно ($r = 0,64$), что коррелирует с распределением значений Eh (для CH₄ и Eh – $r = -0,42$; для ΣH₂S и Eh – $r = -0,61$) (рис. 3), значимое влияние которого на концентрации исследуемых газов установлено на примере многих водных объектов [16, 19].

Концентрация метана в рапе, отобранной непосредственно в оз. Баскунчак (т. 2-1 и 2-2) на значительном удалении от ручья балки Улан-Благ и других источников подземных вод, а также в соленом водоеме, образуемом ручьем Динамитка (т. 2-3), варьирует в пределах 0,47–2,85 мкл/дм³, в среднем составляя 1,53 мкл/дм³ (табл. 1). Эти концентрации на 1–2 порядка ниже, чем в рапе исследованных дегазирующих подземных источников, разгружающихся в нижнем течении ручья балки Улан-Благ. Концентрация метана в верхнем (0–2 см) слое черных глинистых илов, отобранных в оз. Баскунчак (т. 2-1) под 1 см коркой твердого крупнозернистого галита, также была низкой – 0,01 мкг/г влажного осадка.

Сравнение с различными пресными и минерализованными озерами России [20–28 и др.] показывает, что концентрации метана в воде оз. Баскунчак являются одними из самых низких. Это, вероятно, связано с незначительным потоком метана из донных отложений в воду из-за наличия соляной корки, препятствующей эмиссии метана, а также вследствие низких концентраций изучаемого газа в верхних горизонтах отложений озера. Последнее обусловлено тем, что в высокоминерализованных озерах, каковым является Баскунчак, вследствие термодинамического преимущества сульфатредукторов перед метаногенами [26] в донных отложениях увеличивается мощность зоны сульфатзависимого анаэробного окисления метана [16, 19], в которой метаногенез обычно подавляется [18]. Существенное доминирование процессов сульфатредукции над метаногенезом в исследованных отложениях выражается низким коэффициентом метанизации K_{CH_4} [16], который варьирует в пределах от 0,010 до 0,398 (в среднем 0,064 %), несколько возрастая к нижним горизонтам (табл. 2).

Скорость потока метана с дебитного поля грифонов (т. 1-2) по данным двух измерений составила 1,97–2,07 мг/м²·ч (в среднем 2,02 мг/(м²·ч)). В устьевой части ручья балки Улан-Благ (т. 1-1) скорость потока метана была в среднем в 1,4 раза ниже, составляя 1,42–1,54 мг/(м²·ч) (в среднем 1,48 мг/(м²·ч)). Снижение величины потока коррелирует с уменьшением (в среднем в 1,3 раза) концентраций метана в рапе устьевой части ручья (т. 1-1) относительно его концентраций в дебитном поле грифонов (т. 1-2).

Заключение

Экспериментально измеренные потоки метана в атмосферу с поверхности рапы одного из дегазирующих дебитных полей, где происходит разгрузка высокоминерализованных подземных вод, питающих ручей Улан-Благ (минерализация 149,9 г/дм³), варьируют в пределах 1,97–2,07 мг/(м²·ч). Концентрация метана в рапе исследованных подземных дегазирующих источников составляет 46,9–215,0 мкл/дм³, что превышает на 1–2 порядка его концентрацию (0,47–2,85 мкл/дм³) в рапе оз. Баскунчак (минерализация 312,3 г/дм³).

Сопоставление с другими озерами России показывает, что концентрации метана в воде оз. Баскунчак характеризуются одними из самых низких значений. Это, вероятно, связано с незначительным потоком метана из донных отложений в воду из-за наличия соляной корки, препятствующей его эмиссии, а также вследствие низких концентраций данного газа в верхних горизонтах отложений озера (0,01 мкг/г влажного осадка). Низкие концентрации метана, несмотря на восстановительные условия, также характерны для отложений устья ручья Улан-Благ (0,04–0,32 мкг/г), что при относительно высоких концентрациях в них $\Sigma\text{H}_2\text{S}$ (0,06–1,32 мг/г), по всей видимости, обусловлено подавлением в донных отложениях образования метана процессом сульфатредукции. Вышесказанное свидетельствует о второстепенной роли современных отложений в формировании высоких концентраций метана в рапе исследованных дегазирующих подземных источников. В целом распределение концентраций CH_4 и $\Sigma\text{H}_2\text{S}$ по вертикали отложений достаточно синхронно ($r = 0,64$) и коррелирует с распределением значений Eh.

Список источников

1. Еремин Н.И. Неметаллические полезные ископаемые. М.: МГУ; Академкнига, 2007. 459 с.
2. Куриленко В.В., Зеленковский П.С. Месторождение минеральных солей оз. Баскунчак: геология, особенности современного соленакопления, механизмы природо- и недропользования // Вестн. Санкт-Петербургского ун-та. Серия 7: Геология. География. 2008. № 3. С. 17–32.
3. Литовский В.В. Гравиогеография соленых озер Урала и сопредельных территорий. III: Особенности геохимии и генезиса // Геогр. вестн. 2018. № 4 (47). С. 11–20.
4. Зеленковский П.С., Куриленко В.В. Природно-техногенная система соляного озера Баскунчак и особенности эксплуатации её ресурсов // Вестн. Санкт-Петербургского ун-та. Серия 7: Геология. География. 2013. № 4. С. 33–52.

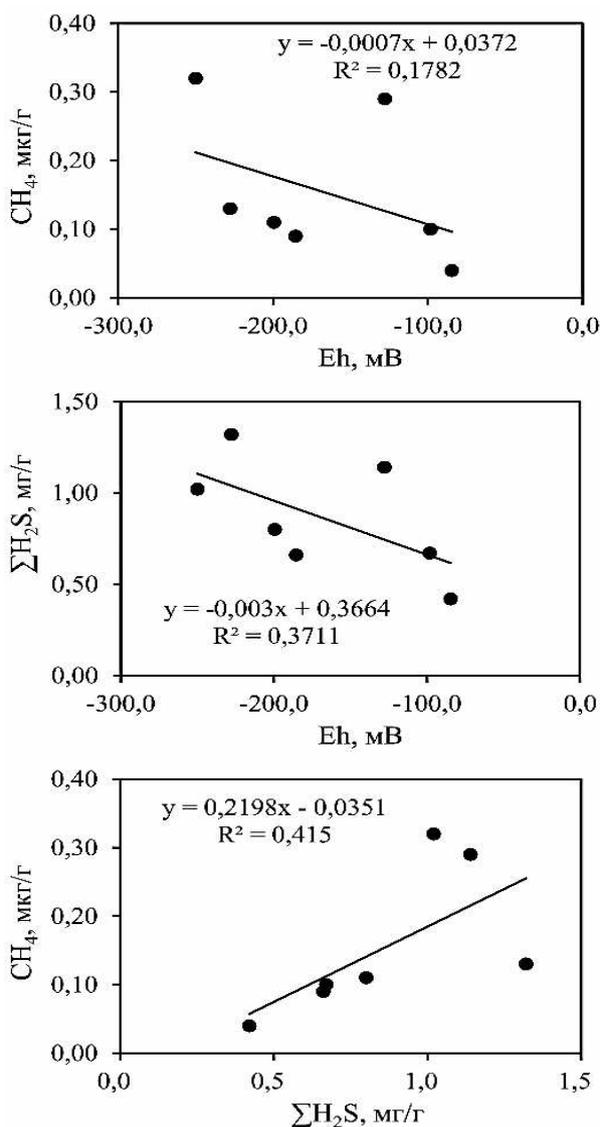


Рис. 3. Зависимость между концентрациями CH_4 и $\Sigma\text{H}_2\text{S}$ и величинами Eh в донных отложениях устья ручья Улан-Благ / Fig. 3. Dependence between concentrations of CH_4 and $\Sigma\text{H}_2\text{S}$ and Eh values in bottom sediments of the mouth of the Ulan-Blag stream

5. Кучерук Т.А., Амельченко В.Н. Подземные трещинно-карстовые воды кунгурского яруса // Геология, география и глобальная энергия. 2008. № 4 (31). С. 73–75.
6. Поздняков Ш.Р., Иванова Е.В., Лапенков А.Е., Гузева А.В., Ревунова А.О. Современное гидрологическое состояние озера Баскунчак // Изв. Алтайск. отд-ния РГО. 2020. № 4 (59). С. 58–67.
7. Мязина Н.Г. Генезис и геохимия карстовых вод района озера Баскунчак // Южн-Рос. вестн. геологии, географии и глобальной энергии. 2006. № 4 (17). С. 170–172.
8. Головачев И.В., Ермолина А.В. Гидрогеологическая характеристика карстовых вод в окрестностях озера Баскунчак // Геология, география и глобальная энергия. 2018. № 4 (71). С. 25–32.
9. Умралиева А.С., Кутлусурина Г.В. Качественный состав водных объектов Богдинско-Баскунчакского заповедника // Настоящее и будущее современных научных направлений. Геология, география: сб. материалов Междунар. науч.-практ. конф. Кемерово: ЗапСибНЦ, 2020. С. 31–34.
10. РД 52.24.525-2011. Массовая доля сульфидной серы в донных отложениях. Методика выполнения измерений фотометрическим методом с N,N-диметил-п-фенилендиамином. Ростов н/Д.: Гидрохим. ин-т, 2011. 26 с.
11. РД 52.24.512-2012. Объемная концентрация метана в водах. Методика измерений газохроматографическим методом с использованием анализа равновесного пара. Ростов н/Д.: Гидрохим. ин-т, 2012. 23 с.
12. РД 52.24.511-2013. Массовая доля метана в донных отложениях. Методика измерений газохроматографическим методом с использованием анализа равновесного пара. Ростов н/Д.: Гидрохим. ин-т, 2013. 19 с.
13. Руководство по химическому анализу поверхностных вод суши / под ред. Л. В. Боевой. Ростов н/Д.: НОК, 2009. Ч. 1. 1037 с.
14. Гарькуша Д.Н., Федоров Ю.А., Плигин А.С. Эмиссия метана на основных этапах технологического цикла очистки сточных вод канализации Ростовской станции аэрации (по экспериментальным данным) // Метеорология и гидрология. 2011. № 7. С. 40–48.
15. Гарькуша Д.Н., Фёдоров Ю.А., Тамбиева Н.С. Расчет элементов баланса метана в водных экосистемах Азовского моря и Мирового океана на основе эмпирических формул // Метеорология и гидрология. 2016. № 6. С. 48–58.
16. Гарькуша Д.Н., Федоров Ю.А. Метан и сероводород в донных отложениях водохранилищ и прудов бассейна Азовского моря // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2022. № 3. С. 37–53.
17. Алекин О.А. Основы гидрохимии. Л., 1970. 444 с.
18. Knittel K., Wegener G., Boetius A. Anaerobic methane oxidizers // Microbial Communities Utilizing Hydrocarbons and Lipids: Members, Metagenomics and Ecophysiology. Ed. T.J. McGenity. Cham: Springer, 2018. P. 1–21.
19. Гарькуша Д.Н., Федоров Ю.А., Трубник Р.Г., Доценко Н.В. Метан и сероводород в донных отложениях лиманов Азово-Черноморского бассейна // Антропогенная трансформация природной среды. 2022. Т. 8, № 1. С. 6–20.
20. Иванов М.В., Русанов И.И., Пименов Н.В., Байрамов И.Т., Юсупов С.К., Саввичев А.С., Леин А.Ю., Сапожников В.В. Микробные процессы цикла углерода и серы в озере Могильном // Микробиология. 2001. Т. 70, № 5. С. 675–686.
21. Фёдоров Ю.А., Тамбиева Н.С., Гарькуша Д.Н. Метан как показатель экологического состояния пресноводных водоёмов (на примере озёр Валдай и Ужин) // Метеорология и гидрология. 2004. № 6. С. 88–96.
22. Федоров Ю.А., Тамбиева Н.С., Гарькуша Д.Н. Влияние природных и антропогенных факторов и процессов на распределение концентрации метана в воде и донных отложениях Ладожского озера // Геоэкология. 2006. № 5. С. 412–424.
23. Федоров Ю.А., Тамбиева Н.С., Гарькуша Д.Н., Хорошевская В.О. Метан в водных экосистемах. Ростов н/Д.; М.: Ростиздат, 2007. С. 179–230.
24. Федоров Ю.А., Гарькуша Д.Н., Доценко И.В., Афанасьев К.А. Метан и сероводород в лечебных сульфидных грязях (на примере озера Большой Тамбукан) // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2014. № 3. С. 102–109.
25. Гарькуша Д.Н., Фёдоров Ю.А., Тамбиева Н.С., Андреев Ю.А., Аджиев Р.А. Распределение метана по акватории и глубине озера Байкал // Водные ресурсы. 2023. Т. 50, № 3. С. 308–328.
26. Schönheit P., Kristjansson J.K., Thauer R.K. Kinetic mechanism for the ability of sulfate reducers to out-compete methanogens for acetate // Arch. Microbiol. 1982. Vol. 132. P. 285–288.
27. Гарькуша Д.Н., Фёдоров Ю.А. Особенности распределения содержания метана в прибрежных участках Петрозаводской губы Онежского озера // Водные ресурсы. 2015. Т. 42, № 3. С. 288–297.
28. Гальченко В.Ф., Дулов Л.Е., Крамер Б., Конова Н.И., Барышева С.В. Биогеохимические процессы цикла метана в почвах, болотах и озёрах Западной Сибири // Микробиология. 2001. Т. 70, № 2. С. 215–225.

References

1. Eremin N.I. *Nonmetallic minerals*. Moscow: Moscow State University Press; Akademkniga Publ.; 2007. 459 p. (In Russ.).
2. Kurilenko V.V., Zelenkovsky P.S. Mineral salt deposit of Lake Baskunchak: geology, features of modern salt accumulation, mechanisms of natural and subsurface use. *Vestn. Sankt-Peterburgskogo un-ta. Seriya 7: Geologiya. Geografiya = Bulletin of the St. Petersburg University. Series 7. Geology. Geography*. 2008;(3):17-32. (In Russ.).
3. Litovsky V.V. Graviogeography of the salt lakes of the Urals and adjacent territories. III: Features of geochemistry and genesis. *Geogr. vestn. = Geographical Bulletin*. 2018;(4):11-20. (In Russ.).
4. Zelenkovsky P.S., Kurilenko V.V. The natural-technogenic system of the Baskunchak salt lake and the peculiarities of exploitation of its resources. *Vestn. Sankt-Peterburgskogo un-ta. Seriya 7: Geologiya. Geografiya = Bulletin of the St. Petersburg University. Series 7. Geology. Geography*. 2013;(4):33-52. (In Russ.).
5. Kucheruk T.A., Amelchenko V.N. Underground fractured karst waters of the Kungursky tier. *Geologiya, geografiya i global'naya energiya = Geology, Geography and Global Energy*. 2008;(4):73-75. (In Russ.).
6. Pozdnyakov Sh.R., Ivanova E.V., Lapenkov A.E., Guzeva A.V., Revunova A.O. *Modern hydrological state of Lake Baskunchak. Izv. Altaisk. otd-niya RGO = Bulletin of the Altay Branch of the Russian Geographical Society*. 2020;(4):58-67. (In Russ.).
7. Myazina N.G. Genesis and geochemistry of karst waters of the Baskunchak Lake area. *Yuzhn.-Ros. vestn. geologii, geografii i global'noi energii = South-Russian Bulletin of Geology, Geography and Global Energy*. 2006;(4):170-172. (In Russ.).
8. Golovachev I.V., Ermolina A.V. Hydrogeological characteristics of karst waters in the vicinity of Lake Baskunchak. *Geologiya, geografiya i global'naya energiya = Geology, Geography and Global Energy*. 2018;(4):25-32. (In Russ.).
9. Umralieva A.S., Kutlurina G.V. Qualitative composition of water bodies of the Bogdinsk-Baskunchak reserve. *Present and future of modern scientific directions. Geology, geography: collection of materials of the International Scientific and Practical Conference*. Kemerovo: West Siberian Scientific Center Press; 2020:31-34. (In Russ.).
10. RD 52.24.525-2011. *The mass fraction of sulfide sulfur in bottom sediments. The method of performing measurements by photometric method with N,N-dimethyl-p-phenylenediamine*. Rostov-on-Don: Hydrochemical Institute Press; 2011. 26 p. (In Russ.).
11. RD 52.24.512-2012. *The volume concentration of methane in the waters. Measurement technique by gas chromatographic method using equilibrium vapor analysis*. Rostov-on-Don: Hydrochemical Institute Press; 2012. 23 p. (In Russ.).
12. RD 52.24.511-2013. *The mass fraction of methane in bottom sediments. Measurement technique by gas chromatographic method using equilibrium vapor analysis*. Rostov-on-Don: Hydrochemical Institute Press; 2013. 19 p. (In Russ.).
13. Boeva L. V., ed. *Manual on chemical analysis of surface waters of the land*. Rostov-on-Don: NOK Publ.; 2009. Part 1. 1037 p. (In Russ.).
14. Garkusha D.N., Fedorov Yu.A., Pligin A.S. Methane emission at the main stages of the technological cycle of sewage treatment of the Rostov aeration station (according to experimental data). *Meteorologiya i gidrologiya = Meteorology and Hydrology*. 2011;(7):40-48. (In Russ.).
15. Garkusha D.N., Fedorov Yu.A., Tambieva N.S. Calculation of methane balance elements in aquatic ecosystems of the Sea of Azov and the World Ocean based on empirical formulas. *Meteorologiya i gidrologiya = Meteorology and Hydrology*. 2016;(6):48-58. (In Russ.).
16. Garkusha D.N., Fedorov Yu.A. Methane and hydrogen sulfide in bottom sediments of reservoirs and ponds of the Azov Sea basin. *Izv. vuzov. Sev.-Kavk. region. Estestv. nauki = Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science*. 2022;(3):37-53. (In Russ.).
17. Alekin O.A. *Fundamentals of hydrochemistry*. Leningrad, 1970. 444 p. (In Russ.).
18. Knittel K., Wegener G., Boetius A. Anaerobic methane oxidizers. *Microbial Communities Utilizing Hydrocarbons and Lipids: Members, Metagenomics and Ecophysiology*. Ed. T.J. McGenity. Cham: Springer Publ.; 2018:1-21.
19. Garkusha D.N., Fedorov Yu.A., Trubnik R.G., Dotsenko N.V. Methane and hydrogen sulfide in bottom sediments of estuaries of the Azov-Black Sea basin. *Antropogennaya transformatsiya prirodnoi sredy = Anthropogenic Transformation of the Natural Environment*. 2022;8(1):6-20. (In Russ.).
20. Ivanov M.V., Rusanov I.I., Pimenov N.V., Bayramov I.T., Yusupov S.K., Savvichev A.S., Lein A.Yu., Sapozhnikov V.V. Microbial processes of the carbon and sulfur cycle in Lake Mogilny. *Mikrobiologiya = Microbiology*. 2001;70(5):675-686. (In Russ.).

21. Fedorov Yu.A., Tambieva N.S., Garkusha D.N. Methane as an indicator of the ecological state of freshwater reservoirs (on the example of lakes Valdai and Uzhin). *Meteorologiya i gidrologiya = Meteorology and Hydrology*. 2004;(6):88-96. (In Russ.).

22. Fedorov Yu.A., Tambieva N.S., Garkusha D.N. The influence of natural and anthropogenic factors and processes on the distribution of methane concentration in the water and bottom sediments of Lake Ladoga. *Geoekologiya = Geoecology*. 2006;(5):412-424. (In Russ.).

23. Fedorov Yu.A., Tambieva N.S., Garkusha D.N., Khoroshevskaya V.O. *Methane in aquatic ecosystems*. Rostov-on-Don; Moscow: Rostizdat Publ.; 2007:179-230. (In Russ.).

24. Fedorov Yu.A., Garkusha D.N., Dotsenko I.V., Afanasyev K.A. Methane and hydrogen sulfide in therapeutic sulfide mud (on the example of Lake Bolshoy Tambukan). *Izv. vuzov. Sev.-Kavk. region. Estestv. nauki = Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science*. 2014;(3):102-109. (In Russ.).

25. Garkusha D.N., Fedorov Yu.A., Tambieva N.S., Andreev Yu.A., Adzhiev R.A. Distribution of methane in the water area and depth of Lake Baikal. *Vodnye resursy = Water Resources*. 2023;50(3):308-328. (In Russ.).

26. Schönheit P., Kristjansson J.K., Thauer R.K. Kinetic mechanism for the ability of sulfate reducers to out-compete methanogens for acetate. *Arch. Microbiol.* 1982;132:285-288.

27. Garkusha D.N., Fedorov Yu.A. Features of the distribution of methane content in the coastal areas of the Petrozavodsk Bay of Lake Onega. *Vodnye resursy = Water Resources*. 2015;42(3):288-297. (In Russ.).

28. Galchenko V.F., Dulov L.E., Kramer B., Konova N.I., Barysheva S.V. Biogeochemical processes of the methane cycle in soils, swamps and lakes of Western Siberia. *Mikrobiologiya = Microbiology*. 2001;70(2):215-225. (In Russ.).

Информация об авторах

Дмитрий Николаевич Гарькуша – кандидат географических наук, доцент, кафедра физической географии, экологии и охраны природы, Институт наук о Земле.

Юрий Александрович Фёдоров – доктор географических наук, профессор, заведующий кафедрой физической географии, экологии и охраны природы, Институт наук о Земле.

Роман Геннадьевич Трубник – научный сотрудник, Институт наук о Земле.

Борис Васильевич Талпа – кандидат геолого-минералогических наук, доцент, кафедра физической географии, экологии и охраны природы, Институт наук о Земле.

Евгений Анатольевич Ковалев – аспирант, специалист по учебно-методической работе, кафедра физической географии, экологии и охраны природы, Институт наук о Земле.

Information about the authors

Dmitry N. Gar'kusha - Candidate of Science (Geography), Associate Professor, Department of Physical Geography, Ecology and Environment Protection, Institute of Earth Sciences.

Yuri A. Fedorov - Doctor of Science (Geography), Professor, Head of Department of Physical Geography, Ecology and Environment Protection, Institute of Earth Sciences.

Roman G. Trubnik - Researcher, Institute of Earth Sciences.

Boris V. Talpa - Candidate of Science (Geology and Mineralogy), Associate Professor, Department of Physical Geography, Ecology and Environment Protection, Institute of Earth Sciences.

Evgeny A. Kovalev – Postgraduate Student, Specialist in Educational and Methodical Work, Department of Physical Geography, Ecology and Environment Protection, Institute of Earth Sciences.

Статья поступила в редакцию 23.04.2023; одобрена после рецензирования 24.05.2023; принята к публикации 20.06.2023.
The article was submitted 23.04.2023; approved after reviewing 24.05.2023; accepted for publication 20.06.2023.

Исторический обзор
УДК 553.04(470.66)
doi: 10.18522/1026-2237-2023-3-93-99

НЕФТЕГАЗОВАЯ ОТРАСЛЬ ЧЕЧЕНСКОЙ РЕСПУБЛИКИ: ИСТОРИЯ И СОВРЕМЕННОСТЬ (К 130-ЛЕТИЮ ПРОМЫШЛЕННОЙ ДОБЫЧИ НЕФТИ)

Арун Абалханович Даукаев

Комплексный научно-исследовательский институт им. Х.И. Ибрагимова, Грозный, Чеченская Республика, Россия
daykaev@mail.ru

Аннотация. Статья посвящена периоду интенсивного развития нефтедобычи в Грозненском районе, являющемся одним из старейших нефтегазоносных регионов России. Освещены вопросы становления, неоднократных реорганизаций «Грознефти», отмечена ее роль как градообразующей отрасли промышленности, в частности, в развитии г. Грозного, решении социальных и жилищных вопросов нефтяников в трудные 1920–1930-е гг., строительстве кирпичных домов для рабочих-нефтяников в Старо-промысловском районе г. Грозного, создании условий для отдыха и лечения и т.д. Отмечено постепенное совершенствование способов бурения и добычи нефти, внедрение более эффективных методов и методик поисков и разведки месторождений нефти и газа, позволивших освоение глубокозалегающих меловых горизонтов.

Ключевые слова: Центральное нефтяное управление, «Грознефть», нефтепромыслы, Грозный, месторождения нефти, добыча нефти, геолого-разведочные работы

Для цитирования: Даукаев А.А. Нефтегазовая отрасль Чеченской Республики: история и современность (к 130-летию промышленной добычи нефти) // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2023. № 3. С. 93–99.

Статья опубликована на условиях лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY 4.0).

Historical overview

OIL AND GAS INDUSTRY OF THE CHECHEN REPUBLIC: HISTORY AND MODERNITY (TO THE 130TH ANNIVERSARY OF INDUSTRIAL OIL PRODUCTION)

Arun A. Daukaev

Ibragimov Comprehensive Research Institute. RAS, Grozny, Chechen Republic, Russia
daykaev@mail.ru

Abstract. This article is devoted to the period of intensive development of oil production in the Grozny region, which is one of the oldest oil and gas regions in Russia. The issues of the formation, repeated reorganizations of “Grozneft” are highlighted, its role as a city-forming industry, in particular, in the development of the city of Grozny, in solving social and housing issues of oil workers in the difficult years of 1920–1930 is noted, construction of brick houses for oil workers in the Staropromyslovsky district of Grozny, creation of conditions for rest and treatment, etc. It was noted about the gradual improvement of methods for drilling and oil production, the introduction of more efficient methods and techniques for prospecting and exploration of oil and gas fields, which made it possible to develop deep-lying chalk horizons.

© Даукаев А.А., 2023

Keywords: Central Oil Administration, “Grozneft”, oilfields, Grozny, oil fields, oil production, geological exploration

For citation: Daukaev A.A. Oil and Gas Industry of the Chechen Republic: History and Modernity (to the 130th Anniversary of Industrial Oil Production). *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2023;(3):93-99. (In Russ.).

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC-BY 4.0).

Введение

В этом году исполняется 130 лет со дня начала промышленной добычи в Грозненском районе. В октябре 1893 г. в скважине № 1-1, заложенной на Алхан-Юртовском участке фирмой Ахвердова, был получен первый нефтяной фонтан (рис. 1). Значительную роль в социально-экономическом и промышленном развитии Чечено-Ингушетии до 1992 г. и особенно г. Грозного сыграла нефтедобывающая организация «Грознефть», сформированная в 1922 г. На протяжении нескольких десятилетий нефтяная промышленность являлась одной из градообразующих отраслей Чечено-Ингушской Республики. В ее развитии выделяется несколько этапов, различающихся по стратиграфическому объекту, способам и объемам нефтедобычи. В данной работе акцентируется внимание на двух этапах: этапах нефтедобычи из миоценовых песчаных пластов и меловых отложений (мезозойский комплекс).

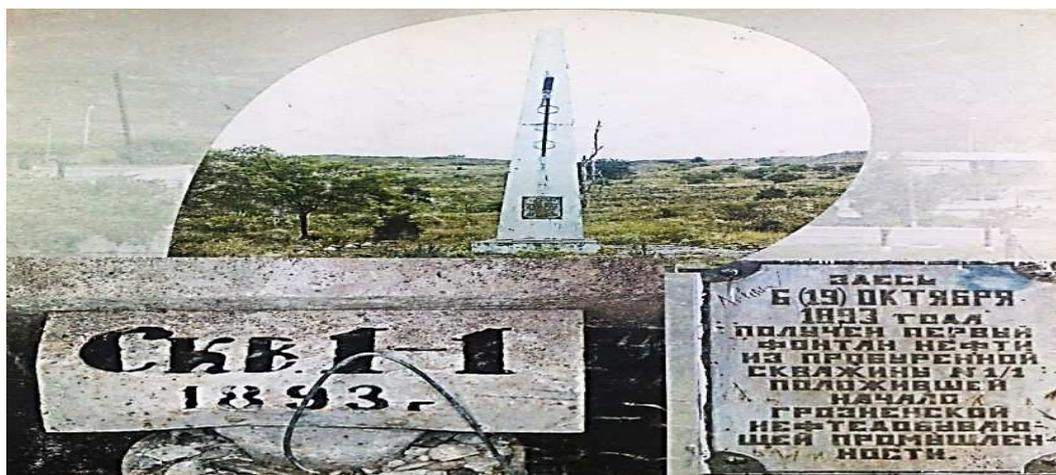


Рис. 1. Первая продуктивная скважина, заложенная на Алхан-Юртовском участке
/ Fig. 1. First productive well, Alkhan-Yurtovskiy area

Результаты и обсуждение

Этап нефтедобычи из миоценовых отложений. В 1920 г. для координации работ по воссозданию нефтяной отрасли и дальнейшему ее развитию было создано Центральное нефтяное управление (ЦНУ) во главе с И.В. Косиором. В его состав включили Старогрозненские и Новогрозненские нефтепромыслы, нефтезаводы, геолого-разведочные и товаротранспортные отделы [1, 2]. В 1921 г. при ЦНУ было создано единое геологическое бюро для планирования и проведения геолого-разведочных работ с целью наращивания ресурсной базы углеводородного сырья. В мае 1922 г. ЦНУ было преобразовано в «Грознефть». Восстановление грозненской нефтяной отрасли по сравнению с другими нефтяными регионами шло более высокими темпами. Уже к концу 1922 г. годовая добыча нефти достигла дореволюционного уровня, а к концу 1925 г. составила более 2 млн т [3]. В конце 1923 г. после завершения восстановительного этапа начинается этап технической реконструкции грозненской нефтяной промышленности. Был внедрен вращательный способ бурения и осуществлен переход от тартального способа добычи нефти к насосной эксплуатации. Трест «Грознефть» получает средства на техническую реконструкцию нефтепромыслов. На данном этапе руководство «Грознефти» одновременно с добы-

чей нефти из караган-чокракских залежей в пределах ранее открытых месторождений уделяет большое внимание и поискам новых. Геологи комитета по грозненским разведкам при Московской горной академии и «Грознефти» (К.А. Прокопов, Н.Н. Тихонович, Н.М. Леднев, А.А. Хуциев, М.М. Чарыгин, Н.Д. Елин и др.) начали проводить геолого-съёмочные и буровые работы с охватом всей территории Чечни, Ингушетии и Южного Дагестана с целью уточнения строения ранее установленных и выявления новых залежей нефти и газа в третичных отложениях [2]. В эти трудные годы «Грознефть» уделяла внимание также социальным и жилищным вопросам нефтяников. Правлением Центральной ревизионной комиссии для «Грознефти» были выпущены ордера на отпуск товаров работникам разных номинаций: в 1922 г. – 1, 3, 5, 50 копеек; в 1923 г. – 1, 2, 3, 5 руб. (рис. 2). С 1922 по 1925 г. шла застройка двухэтажными кирпичными домами для рабочих-нефтяников городков г. Грозного (Иваново, Бутенко, Катаяма и др.), которые сохранились до сегодняшнего дня (рис. 3). От станции Грознефтяная до Старых и Новых промыслов была построена железная дорога [1, 4].



Рис. 2. «Грозненские деньги». Расчетные ордера «Грознефти». 1922 г.
/ Fig. 2. “Grozny money”. Settlement orders of “Grozneft”. 1922



Рис. 3. Двухэтажные дома рабочего поселка на Старых промыслах
/ Fig. 3. Two-storey houses of the working settlement on the Old oil fields

Нефтяная промышленность стала базовой отраслью для экономического и социального развития всего Северного Кавказа. За короткое время были построены новые и отремонтированы старые жилые дома, школы, лечебные, культурные и другие учреждения. Вместе с тем с развитием нефтедобывающей отрасли высокими темпами в конце 1920-х – начале 1930-х гг. связаны и негативные последствия. Характерной особенностью развития нефтяной отрасли в эти годы являлось то, что значительное внимание уделялось увеличению добычи нефти. С целью досрочного выполнения необоснованно увеличенного пятилетнего плана добычи нефти главная роль отводилась фонтанной добыче, характеризующейся значительно меньшими расходами средств. Чрезмерное увлечение фонтанной добычей с одновременным сокращением разведочного бурения обусловило последующее резкое сокращение годовых по-

казателей из-за падения дебитов эксплуатационных скважин и несвоевременной подготовки новых разведанных запасов нефти [3].

Создание единой системы нефтегазового производства Северного Кавказа. В 1927–1928 гг. происходят изменения в организационной структуре «Грознефти». С включением в «Грознефть» Кубано-Черноморских промыслов ее переименовывают в трест грозненской и кубано-черноморской нефтяной и газовой промышленности. Был утвержден новый устав организации. Соответственно, значительно расширился район деятельности прежнего государственного общесоюзного треста. Здание «Грознефти» находилось на проспекте Революции. В новую структуру «Грознефти», кроме Старогрозненских, Октябрьских и Вознесенских промыслов, вошли Кубано-Черноморские и Майкопские нефтепромыслы, завод «Красный молот», нефтеперегонный завод, парафиновый завод, материально-транспортная контора, ГрозНИИ, другие вспомогательные организации [5]. Общее число работающих в тресте составляло около 12 000 чел., в том числе рабочих – около 10 000, служащих – 1100 и т.д. Управляющим трестом был назначен С.М. Ганшин (таблица). «Грознефть» оказывала значительное влияние на социально-экономическое развитие Северо-Кавказского региона. Ежегодно в бюджет субъектов края, в том числе Чечни, «Грознефть» отчисляла определенный процент денежных средств от прибыли [6]. В начале 1929 г. произошло важное событие в Чеченской автономной области, связанное с включением в ее состав г. Грозного и Сунженского округа. В 1931 г. после вывода из треста Кубано-Черноморских промыслов в Грозном остается объединение грозненской нефтяной промышленности «Грознефть». Грозненская нефть была высококачественной и наиболее дешевой. В результате в конце 1920-х – начале 1930-х гг. ее добыча стала быстрыми темпами расти. В 1931 г. трестом «Грознефть» было добыто около 8 млн т нефти, что составляло 36,3 % всей добычи СССР и 4,2 % мировой добычи.

Руководители «Грознефти» с 1920 по 1992 г.

ФИО	Должность	Годы
Косиор И.В.	Председатель ЦНУ	1920–1926
Розин Ф.А.	Управляющий «Грознефтью»	1927
Ганшин С.М.	Управляющий «Грознефтью»	1928–1930
Чамров Ф.П.	Управляющий «Грознефтью»	1930–1933
Рябовол К.С.	Управляющий «Грознефтью»	1933–1935
Рохблат А.М.	Управляющий трестом «Грознефтекомбинат»	1935–1937
Розиноер С.Л.	Управляющий трестом «Грознефтекомбинат»	1937
Федоров В.С.	Трест «Грознефтекомбинат»	1943–1945
Апраткин С.С.	Трест «Грознефтекомбинат»	1945
Назаретов М.Б.	Начальник объединения «Грознефть»	1955–1965
Назаров В.Б.	Начальник объединения «Грознефть»	1965
Сорокин В.А.	Начальник объединения «Грознефть»	
Свинцов В.С.	Начальник объединения «Грознефть»	1978
Хачатуров Р.М.	Руководитель ПО «Грознефть»;	1980–1992

Производство бензина ПО «Грознефть» составляло 73 % всей выработки СССР [7]. На нее приходилось около 40 % нефтяного экспорта страны. Указом Президиума ЦИК СССР трест «Грознефть» был награжден орденом Ленина за выполнение плана первой пятилетки по добыче нефти за два с половиной года. Торжественное вручение награды состоялось в начале апреля 1931 г. во вновь построенном здании Дворца культуры в Заводском районе г. Грозного [1]. В 1937 г. трест «Грознефть» преобразовывают в «Грознефтекомбинат», управляющим которого был назначен С.Л. Розиноер. В следующем году «Грознефтекомбинат» разделяют на 2 самостоятельные объединения – «Грознефтедобыча» и «Грознефтепереработка». Но уже в 1940 г. их снова объединяют в организацию с прежним названием.

Военные годы и начало освоения мезозойских отложений (1940–1970-е гг.). Несмотря на все трудности, в первый год войны грозненские нефтяники выполнили план по добыче нефти, но уже в 1942 г. годовая добыча снизилась до 1,5 млн т. Поисково-разведочные и промысловые работы примерно до середины 1943 г. были прекращены. В 1944 г. в пределах Ташкалинского

участка Старогрозненского месторождения нефти были установлены залежи нефти в песчаных пластах миоценовых отложений. В 1945 г. на базе «Грознефтекомбината» снова создали два самостоятельных объединения: «Грознефть» и «Грознефтезаводы».

С начала 1950-х гг. в связи с постепенным истощением длительно разрабатываемых миоценовых залежей и отсутствием новых подготовленных запасов нефти начинается освоение глубокозалегающих горизонтов мела в пределах существующих месторождений. В конце 1950-х гг. А.И. Рагулиным и другими опытными грозненскими геологами были составлены проекты по доразведке существующих месторождений. В результате работ были открыты высокопродуктивные залежи в верхнемеловых отложениях, за счет освоения которых с конца 1960-х гг. высокими темпами начался рост годовой добычи нефти ПО «Грознефть». В начале 1970-х гг. годовая добыча нефти достигла максимальной величины – 21,6 млн т. Относительно высокий уровень добычи сохранялся примерно до середины 1970-х гг. Вместе с тем интенсификация нефтедобычи и отставание темпов развития геолого-разведочных работ (ГРР) от темпов роста нефтедобычи привели к снижению кратности разведанных запасов углеводородов. Прирост запасов снизился почти в 2,5 раза. В этих условиях широко разворачиваются ГРР на нефть и газ (сейсморазведочные работы, глубокое бурение и др.) по всей территории Восточного Предкавказья, в том числе на рассматриваемой территории [2, 8]. Последовательное совершенствование сейсморазведочных работ с внедрением более эффективных методов и методик и увеличение их объемов позволили выявить и подготовить к бурению целый ряд новых нефтегазоперспективных погребенных структур в меловых отложениях, в пределах которых были открыты залежи нефти и газа. В целом в мезозойских отложениях были установлены около 30 залежей нефти и газа, в том числе одна в верхнеюрских подсолевых отложениях (оксфордский ярус), что имело принципиально важное значение в плане оценки нефтегазоносности последних. По результатам дальнейших исследований карбонатных пород оксфорда было установлено наличие в подошвенной части оксфордских отложений толщи водорослевых биогермных известняков, с которыми в целом ряде регионов связаны крупные залежи нефти. По данным сейсмостратиграфического анализа и глубокого бурения отмечена приуроченность биогермных образований оксфордских отложений к узлам пересечения глубинных разломов, соответственно, с последними связывают участки повышенной трещиноватости пород [9–12].

Развитие нефтяной отрасли Чеченской Республики (ЧР) с 1980-х гг. Данный этап характеризуется стабильным развитием нефтяной промышленности (ежегодная добыча стабилизировалась на уровне 4–5 млн т), чему способствовало существование на одном месте (на территории ЧР) целой системы нефтегазового производства, в состав которой входили нефтедобывающие, буровые и тематические организации «Грознефти» (НГДУ, УБР, ТЭГ), объединение «Грознефтегеофизика», научно-исследовательские институты «СевКавНИПИнефть», НИИГИ. Генеральным директором ПО «Грознефть» являлся Р.М. Хачатуров.

Сотрудниками научных лабораторий геологического отдела «СевКавНИПИнефти» проводились исследования, имеющие большое теоретическое и практическое значение: разработка приоритетных направлений, планирование и проектирование ГРР на нефть и газ в пределах Северного Кавказа, оценка эффективности геофизических работ при подготовке к бурению перспективных геологических объектов (П.Е. Пчелинцев, В.Д. Талалаев, Н.Е. Меркулов, С.А. Аветисянц, Н.Н. Волгин, Н.И. Кононов, П.П. Лысенков, Н.Ш. Яндарбиев, А.И. Киселев, А.А. Даукаев и др.); исследования по дешифрированию аэроснимков с целью изучения разломной тектоники и прогнозирования локальных нефтегазоперспективных структур (Л.Н. Шалаев, З.Х. Моллаев, В.В. Доценко и др.); исследования в области разработки зонального и локального прогнозов нефтегазоносности мезозойских отложений по комплексу гидрогеологических данных (Г.П. Волобуев, Л.Е. Сокирко, В.Д. Негиевич и др.). Вышеупомянутые и многие другие исследовательские работы, выполненные научными подразделениями «СевКавНИПИнефти» в тесном сотрудничестве с производственными организациями, способствовали выбору правильных направлений и рациональных комплексов ГРР, ориентировке их на наиболее перспективные объекты с целью наращивания ресурсной базы нефтегазовой отрасли и в целом обусловили устойчивое и стабильное развитие нефтяной промышленности Северного Кавказа в данный период. В 1990-е гг. в тяжелейших условиях сотрудники геологических подразделений инсти-

тута «СевКавНИПИнефть» продолжали исследования в соответствии с тематическим планом НИОКР.

Трагические события 1991–2000 гг. наложили отпечаток на развитие нефтяной промышленности ЧР и отраслевую науку. Данный период был одним из самых тяжелых за всю историю развития нефтяной индустрии республики. Практически полностью была разрушена вся инфраструктура отрасли. В конце 2000 г. постановлением Правительства Российской Федерации было создано ОАО «Грознефтегаз» в качестве дочерней организации «НК «Роснефть», которое владеет лицензиями на геологическое изучение, поиски, разведку и добычу нефти на территории ЧР. С 2000 г. одновременно с ликвидацией открытых нефтяных фонтанов (более 100) шло восстановление нефтяного хозяйства – пунктов сбора, подготовки, хранения и транспортировки нефти, бездействующих эксплуатационных скважин и т.д. За счет оперативного восстановления и ввода в эксплуатацию фонтанных скважин к 2005 г. годовую добычу нефти подняли до более 2 млн т. Однако из-за отставания ГРП, тематических и научно-исследовательских работ на нефть и газ (начаты только с 2006 г. и в небольших объемах) в последующие годы происходит падение добычи нефти.

Учитывая важность дальнейшего наращивания ресурсной базы углеводородного сырья, с 2006 г. на территории ЧР разными производственными и научными организациями начали проводить ГРП (бурение и сейсморазведка), тематические и научно-исследовательские работы на углеводородное сырье.

В результате анализа, обобщения и комплексной переинтерпретации геолого-геофизических и промысловых материалов по меловым, нижнемайкопским и миоценовым отложениям были охарактеризованы геологические особенности региона, уточнено глубинное строение территории, выявлены перспективные объекты для постановки нефтепоисковых работ. Были даны конкретные рекомендации по первоочередным геологическим объектам для постановки ГРП на нефть и газ, возвратных работ в пределах длительно разрабатываемых месторождений и др., реализация которых позволила бы получить существенный прирост запасов и ресурсов углеводородов и в определенной степени стабилизировать падающую добычу нефти.

Заключение

Таким образом, динамичное развитие нефтегазовой отрасли ЧР за период с конца 1920-х по 1980-е гг. в основном было обусловлено проведением в достаточных объемах геолого-геофизических и буровых работ, постоянным совершенствованием способов добычи, методов и методик ГРП по мере усложнения решаемых задач по наращиванию ресурсной базы. Вместе с тем развитие нефтедобычи характеризуется выраженной неравномерностью, связанной с форсированным отбором нефти в краткосрочные периоды (в конце 1920-х – начале 1930-х гг., 1960-е – начале 1970-х гг.) и отставанием темпов развития ГРП от темпов роста нефтедобычи. Перспективы дальнейшего развития нефтегазодобывающей отрасли ЧР связаны с доразработкой существующих месторождений с применением вторичных и третичных методов воздействия на продуктивные пласты, поисками новых залежей углеводородов в глубоководных горизонтах, в том числе в верхнеюрских подсолевых отложениях, где прогнозируются крупные антиклинальные складки.

Список источников

1. Даукаев А.А., Кусаев А.Д. Исторические параллели в развитии нефтегазового производства и г. Грозного // К 80-летию образования Чеченского государственного университета и 200-летию основания г. Грозный. Грозный: Чеченский гос. ун-т, 2019. 156 с.
2. Даукаев А.А. История и перспективы развития геолого-разведочных и научно-исследовательских работ на нефть и газ на Северном Кавказе (XIX–XXI вв.). М.: Спутник, 2018. 224 с.
3. Эльбзуджаева Т.У. Чечня и Ингушетия в 20–30-е годы XX века: опыт модернизации. М.: Парнас, 2011. 464 с.
4. Джафаров К.И., Джафаров Ф.К. История Грозненских нефтяных промыслов. М.: Газоил пресс, 2010. 384 с.
5. Ершов Г.А., Тонконогов П.М., Ермоленко А.П. Чудесный источник. Очерки о нефтяниках Чечено-Ингушетии. Грозный: Чечингиздат, 1971. 327 с.

6. Чеченский архив: сборник материалов по истории чеченского народа. Грозный: Парнас, 2010. Вып. 3. 420 с.
7. Захарова Е.В., Шахов М.А. История индустриализации Северного Кавказа (1926–1932 гг.): документы и материалы. Грозный, 1971. 564 с.
8. Даукаев А.А. Особенности нефтегазодобычи и геолого-разведочных работ на Северном Кавказе с 20 годов XX века // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2012. № 2. С. 105–107.
9. Коновалов В.И., Кононов Н.И., Станулис В.А., Хлуднев В.Ф. Новые представления о геологическом строении и перспективах нефтегазоносности Черногорской тектонической зоны ЧИАССР // Геология нефти и газа. 1986. № 9. С. 30–35.
10. Сахаров А.С. Литофации и коллектора оксфорда Терско-Каспийского краевого прогиба // Геология и нефтегазоносность Восточного Предкавказья: сб. науч. тр. СевКавНИПИнефти. Грозный, 1992. С. 14–21.
11. Хеллем Э. Интерпретация фаций и стратиграфическая последовательность. М.: Мир, 1983. 328 с.
12. Bashaeva T.Kh., Daukaev A.A., Kerimov I.A., Shaipov A.A. Upper Jurassic Subsalt Complex of the Terek-Caspian Trough Due to Oil and Gas Content (WoS) // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2019 th International Symposium on Earth Sciences: History, Contemporary Issues and Prospects. 2019. Vol. 359. P. 012026. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/17551315/350/1/012026/pdf> (дата обращения: 15.10.2022).

References

1. Daukaev A.A., Kusaev A.D. Historical parallels in the development of oil and gas production and the city Grozny. *To the 80th anniversary of the formation of the Chechen State University and the 200th anniversary of the founding of Grozny*. Grozny: Chechen State University Press; 2019. 156 p. (In Russ.).
2. Daukaev A.A. *History and prospects for the development of exploration and research works for oil and gas in the North Caucasus (19th-21st centuries)*. Moscow: Sputnik Publ.; 2018. 224 p. (In Russ.).
3. Elbuzdukaeva T.U. *Chechnya and Ingushetia in the 20-30s of the 20th century: the experience of modernization*. Moscow: Parnas Publ.; 2011. 464 p. (In Russ.).
4. Jafarov K.I., Jafarov F.K. *History of the Grozny oilfields*. Moscow: Gasoil Press Publ.; 2010. 384 p. (In Russ.).
5. Ershov G.A., Tonkonogov P.M., Ermolenko A.P. *An excellent source. Essays on the oilmen of Checheno-Ingushetia*. Grozny: Chechingizdat Publ.; 1971. 327 p. (In Russ.).
6. *Chechen archive. Collection of materials on the history of the Chechen people*. Grozny: Parnas Publ.; 2010. Iss. 3. 420 p. (In Russ.).
7. Zakharova E.V., Shakhov M.A. *History of the industrialization of the North Caucasus (1926-1932)*. Documents and materials. Grozny, 1971. 564 p. (In Russ.).
8. Daukaev A.A. Peculiarities of oil and gas production and geological exploration in the North Caucasus since the 20s of the 20th century. *Izv. vuzov. Sev.-Kavk. region. Estestv. nauki = Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science*. 2012;(2):105-107. (In Russ.).
9. Kononov V.I., Kononov N.I., Stanulis V.A., Khudnev V.F. New ideas about the geological structure and prospects of oil and gas potential of the Black Mountain tectonic zone CHIASSR. *Geologiya nefi i gaza = Geology of Oil and Gas*. 1986;(9):30-35. (In Russ.).
10. Sakharov A.S. Lithofacies and reservoir Oxfordian of the Terek-Caspian foredeep. *Geology and oil and gas potential of the Eastern Ciscaucasia*. Collection of scientific works of SevKavNIPIneft. Grozny, 1992:14-21. (In Russ.).
11. Hellem E. *Interpretation of facies and stratigraphic sequence*. Moscow: Mir Publ.; 1983. 328 p. (In Russ.).
12. Bashaeva T.Kh., Daukaev A.A., Kerimov I.A., Shaipov A.A. Upper Jurassic subsalt Complex of the Terek-Caspian Trough Due to Oil and Gas Content (WoS). *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2019 th International Symposium on Earth Sciences: History, Contemporary Issues and Prospects*. 2019;359:012026. Available from: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/17551315/350/1/012026/pdf> [Accessed 15th October 2022].

Информация об авторе

А.А. Даукаев – доктор геолого-минералогических наук, заведующий отделом ТЭК и рационального природопользования.

Information about the author

A.A. Daukaev - Doctor of Science (Geology and Mineralogy), Head of the Department of Fuel and Energy Complex and Environmental Management.

Статья поступила в редакцию 03.04.2023; одобрена после рецензирования 23.05.2023; принята к публикации 20.06.2023.
The article was submitted 03.04.2023; approved after reviewing 23.05.2023; accepted for publication 20.06.2023.

Научная статья

УДК 913+796.5

doi: 10.18522/1026-2237-2023-3-100-105

ПРИРОДНЫЕ ТУРИСТСКО-РЕКРЕАЦИОННЫЕ РЕСУРСЫ СЕВЕРО-ВОСТОЧНОГО КАВКАЗА

*Хава Шахидовна Забураева*¹ , *Хава Абдул-Вахидовна Алиева*²,
*Аминат Амирхановна Шаипова*³

^{1, 2, 3} Комплексный научно-исследовательский институт им. Х.И. Ибрагимова РАН, Грозный,
Чеченская Республика, Россия

^{2, 3} Грозненский государственный нефтяной технический университет им. акад. М.Д. Миллионщикова,
Грозный, Чеченская Республика, Россия

¹ evegne@mail.ru 

² xavaalieva@mail.ru

³ aminashaipova393@mail.ru

Аннотация. Исследован рекреационный потенциал Северо-Восточного Кавказа в качестве совокупности природных, культурно-исторических и социально-экономических ресурсов. Выявлены благоприятные природно-климатические, эколого-геоморфологические, геологические и культурно-исторические предпосылки для развития рекреации и туризма. Велика рекреационная роль биологических ресурсов (леса, травянистые растения и др.) и гидрологических объектов (реки, озера, родники, водопады и др.), включая целебные минеральные источники. На Северо-Восточном Кавказе встречаются практически все бальнеологические группы минеральных вод.

Исследована региональная специфика рекреационной деятельности как результат взаимодействия множества факторов и условий (природные, социальные, геополитические, геоэкологические). Обоснованы возможности и необходимость расширения действующей санаторно-курортной базы как для удовлетворения внутренних потребностей, так и для привлечения иногородних рекреантов. К перспективным направлениям отнесены сельский, этнографический, гастрономический, лечебно-оздоровительный, экстремальный, медицинский туризм, спелеотуризм и др. Предложено сочетание традиционных и инновационных (фототуризм, научный туризм, экотуризм) форм рекреации и туризма. В числе важнейших факторов развития туристско-рекреационной сферы признано пробуждение у местного населения интереса к новым перспективным для них формам деятельности.

Ключевые слова: рекреационные ресурсы, потенциал, регионы Северо-Восточного Кавказа, туризм, рекреация, историко-культурные ресурсы

Благодарности: исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-17-00218 «Экологический туризм и рекреационное природопользование на Северо-Восточном Кавказе».

Для цитирования: Забураева Х.Ш., Алиева Х.А.-В., Шаипова А.А. Природные туристско-рекреационные ресурсы Северо-Восточного Кавказа // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2023. № 3. С. 100–105.

Статья опубликована на условиях лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY 4.0).

Original article

NATURAL TOURIST AND RECREATION RESOURCES OF THE NORTH-EASTERN CAUCASUS

Khava Sh. Zaburaeva^{1✉}, Khava A.-V. Alieva², Aminat A. Shaipova³

^{1, 2, 3} Ibragimov Complex Institute of the Russian Academy of Sciences, Grozny, Chechen Republic, Russia

^{2, 3} Millionshchikov Grozny State Oil Technical University, Grozny, Chechen Republic, Russia

¹ eveggne@mail.ru ✉

² xavaalieva@mail.ru

³ aminashaipova393@mail.ru

Abstract. The recreational potential of the North-Eastern Caucasus as a combination of natural, cultural, historical and socio-economic resources was investigated. Favorable natural and climatic, ecological and geomorphological, geological and cultural and historical prerequisites for the development of recreation and tourism have been identified. The recreational role of biological resources (forests, herbaceous plants, etc.) and hydrological objects (rivers, lakes, springs, waterfalls, etc.), including healing mineral springs, is great. In the North-Eastern Caucasus, almost all balneological groups of mineral waters are found.

The regional specifics of recreational activities were investigated as a result of the interaction of many factors and conditions (natural, social, geopolitical, geoecological). The possibilities and the need to expand the existing sanatorium and resort base are justified both to meet internal needs and to attract nonresident vacationers. Promising areas of tourism include: rural, ethnographic, gastronomic, medical and health, extreme, medical, speleotourism, etc. A combination of traditional and innovative (phototourism, scientific tourism, ecotourism) forms of recreation and tourism is proposed. Among the most important factors in the development of the tourist and recreational sphere is the awakening of interest among the local population in new forms of activity promising for them.

Keywords: recreational resources, potential, regions of the North-Eastern Caucasus, tourism, recreation, historical and cultural resources

Acknowledgments: this work was supported by the Russian Science Foundation under grant No. 23-17-00218 «Ecological tourism and recreational nature management in the North-Eastern Caucasus».

For citation: Zaburaeva Kh.Sh., Alieva Kh.A.-V., Shaipova A.A. Natural Tourist and Recreation Resources of the North-Eastern Caucasus. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2023;(3):100-105. (In Russ.).

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC-BY 4.0).

Введение

Выявление и описание рекреационных ресурсов – достаточно сложный и трудоемкий процесс, включающий ряд последовательных и взаимосвязанных этапов [1, 2]. Их социальную, экономическую и геоэкологическую роль сложно переоценить [3]. При этом до сих пор не выработан единый подход к определению рекреационных ресурсов, что, возможно, сопряжено с применением обсуждаемого понятия в различных областях знаний и для разных целей [4]. В энциклопедическом словаре «Геоэкология» они трактуются в качестве природных ресурсов, обеспечивающих отдых и восстановление здоровья человека [5].

В формировании рекреационного потенциала территории основная роль принадлежит природно-климатическим факторам, ландшафтному разнообразию, особо охраняемым природным территориям и объектам, гидроминеральным, лесным и другим ресурсам, включая бальнеологические. Однако рекреационная ценность региона (страны) определяется также объектами историко-культурного наследия, логистической и социальной инфраструктуры, материальной базы социально-культурного и санаторно-курортного сервиса и туризма.

В условиях горных регионов Кавказа туристско-рекреационная сфера находится в числе приоритетных (наряду с сельскохозяйственным и промышленным производством) направлений развития [6].

Материалы и методы исследования

Информационной основой работы послужили статистические материалы Федеральной службы государственной статистики, региональных министерств культуры и туризма, периодические издания. Использовались методы анализа и синтеза, обобщения, контент-анализа, экспертных оценок, сравнительно-географический метод, системный и геоситуационный подходы.

Результаты и обсуждение

Теоретико-методологическую основу изучения рекреационных ресурсов составляет совокупность принципов, подходов, концепций и методов. Классификация рекреационных ресурсов имеет как теоретическое, так и прикладное значение. В научной литературе встречаются классификации по различным критериям – от вида происхождения и использования до возможностей экономического восполнения и замены другими ресурсами [4]. К примеру, классификация на основе выделения природных, культурно-исторических, социально-экономических и информационных ресурсов. Основу рекреационного потенциала территории составляют природные ресурсы. Они включают биоресурсы (флора, фауна, почва) и физические ресурсы (климатические, геоморфологические, геологические, гидрологические).

Уникальность и разнообразие природно-климатических ресурсов в горных регионах Кавказа создают благоприятные условия для комфортного проживания и осуществления круглогодичной рекреационной деятельности. Физико-химические параметры среды (температура, влажность, атмосферное давление, уровень солнечной радиации и др.) варьируют в широких пределах. Высотная поясность обуславливает разнообразие природных комплексов – от полупустынных и пустынных на севере до нивальных на юге.

Рельеф – важный природный ресурс, определяющий эстетическую привлекательность ландшафтов. Несмотря на незначительную площадь территории в Дагестане и Чечне, отмечается дифференцированный характер рельефа. Здесь гармонично сочетаются низменности (включая участки земной поверхности с абсолютными отметками ниже уровня моря), возвышенности, предгорья и горы (местами высотой свыше 4 тыс. м над уровнем моря). Эколого-геоморфологические, геологические, гидрологические рекреационные ресурсы характеризуются психолого-эстетическими и инженерно-геологическими свойствами и в совокупности с другими ресурсами формируют региональные природно-территориальные рекреационные системы [7].

На северо-востоке Кавказа особый интерес представляют геологические памятники, палеонтологические и стратиграфические объекты. К примеру, останцы Арка, Братья, место первой скважины (пробуренной в Грозненском нефтеносном районе в Чечне), Салтинское ущелье и Алмакский каньон в Дагестане и др.

Значительной рекреационной ценностью обладают гидрологические объекты (реки, озера, родники, водопады и др.). В их числе – трансграничное озеро (памятник природы Дагестана и Чечни) Кезеной-Ам, расположенное на склоне Андийского хребта на площади порядка 2 км² [7]. Его также именуют жемчужиной Северного Кавказа. В исследуемых регионах встречаются озера различного происхождения (запрудные, оползневые, ледниковые, карстовые и др.), которые зачастую привлекают рекреантов близостью к населенным пунктам и быстрой прогреваемостью. В равнинной части гидрологических памятников природы значительно меньше. Дагестан выделяется наличием морских рекреационных ресурсов.

Дифференцированный характер природно-климатических и геоморфологических условий в исследуемых регионах обусловил значительное биологическое разнообразие. Во флорах Чечни, Ингушетии и Дагестана много видов животных и растений, занесенных в Красную книгу России. В Красную книгу Чечни занесены 74 вида беспозвоночных и 115 видов позвоночных животных (из них 55 – птицы и 26 – млекопитающие), Ингушетии – около 20 видов и подвидов рыб, 7 видов земноводных, 23 – пресмыкающихся, 75 видов млекопитающих и свыше 280 видов птиц, а Дагестана – 90 видов беспозвоночных и 116 видов позвоночных животных [7]. В регионе зарегистрировано 89 видов млекопитающих, 350 видов птиц, 40 – пресмыкающихся, 7 – земноводных, 134 вида и подвидов рыб, около 50 тыс. видов насекомых [8]. При этом уровень биоразнообразия доминирует в горных и высокогорных районах, в меньшей степени подверженных антропогенному воздействию.

Растительность в исследуемых регионах характеризуется выраженной высотной поясностью и значительным разнообразием растительных сообществ, среди которых немало обладающих целебными свойствами. Флора Чечни и Дагестана насчитывает свыше 2200 и 4500 видов растений соответственно. Степень их вовлечённости в рекреационную деятельность может варьировать в значительных диапазонах – от зрительного восприятия до удовлетворения материальных потребностей (сбор ягод, грибов, лекарственных трав и др.).

Большую ценность в рекреационном отношении имеют лесные ресурсы. По данным Росстата, в Чечне, к примеру, площадь покрытых лесом земель составляет 324 тыс. га. Лесистость (19,8 %), как и в Ингушетии (21,7 %), значительно выше, чем в Дагестане (7,2 %). Однако здесь находится уникальный массив реликтовых умеренно субтропических лиановых лесов, именуемый Самурским.

Данные факторы в совокупности с другими возможностями предопределили оптимальные условия для развития санаторно-курортной отрасли и многих видов рекреации и туризма в горных районах Кавказа. История становления и развития курортного дела в России свидетельствует о появлении первых курортов именно на Кавказе и в Крыму [9].

На территории Северо-Восточного Кавказа встречаются практически все бальнеологические группы минеральных вод (углекислые, соляно-щелочные, сульфатно-кальциевые сероводородные, сероводородно-хлоридно-натриевые, щелочные сероводородные термальные, йодобромные и борные, сульфатные, кремнистые, железистые, слаборадоновые и др.), лечебные грязи [10]. По уровню обеспеченности бальнеологическими ресурсами и охвату качественных характеристик бесспорным лидером является Республика Дагестан. Здесь выявлено и описано более 300 целебных минеральных источников. Эксплуатируются скважины Махачкалинского месторождения и курортных местностей (Талги, Каспийск, Каякент и др.). Курорт Талги – единственная в мире бальнеолечебница, функционирующая на основе сульфидных вод с содержанием сероводорода [11].

Однако исследуемые регионы по сравнению с другими регионами Северного Кавказа слабо оснащены санаторно-курортными учреждениями, хотя за последние годы в Чечне отмечено незначительное расширение этой базы (таблица). Здесь продолжается работа по восстановлению разрушенных и вводу в эксплуатацию новых объектов туристско-рекреационной сферы.

Число санаторно-курортных организаций в регионах Северного Кавказа (составлена авторами по данным Росстата) / Number of health resort organizations in the regions of the North Caucasus (compiled by the authors according to Rosstat)

Регион	Год				
	2017	2018	2019	2020	2021
Дагестан	20	20	18	18	18
Ингушетия	1	1	1	1	1
Чечня	1	2	3	4	4
Кабардино-Балкария	17	17	18	18	18
Карачаево-Черкесия	7	7	6	7	7
Северная Осетия – Алания	6	6	6	6	6
Ставропольский край	116	118	115	117	124

Историко-культурные рекреационные ресурсы включают археологические и архитектурно-исторические памятники истории и культуры, этнографические комплексы, музеи и др. В реестры объектов историко-культурного наследия включено порядка 7,5 тыс. памятников истории и культуры, из них 6474 объекта в Дагестане, 750 – в Чечне и 437 – в Ингушетии [12].

Туристско-рекреационный потенциал исследуемых регионов позволяет развивать здесь широкий спектр различностей рекреации и туризма – от спортивно-оздоровительного и лечебного до экстремального и научного [13, 14]. Наблюдается положительная динамика в развитии туристско-рекреационной отрасли и ее роли в экономике. Так, по официальным данным за последние два десятилетия численность лиц, размещенных в коллективных средствах размещения (гостиницы, аналогичные средства размещения, санаторно-курортные организации и др.), возросла в Дагестане в 3,8 раза, в Ингушетии – в 5,8 раза. В Чечне период 2000–2005 гг. был геополитически напряженным ввиду известных событий конца 1990-х гг., и эти данные отсутствуют. Но в настоящее время значения данного показателя (138 тыс. чел.) сопоставимы с аналогичным показателем в Дагестане (143 тыс. чел.) в 2021 г., несмотря на то что Чечня значительно уступает этой приморской республике по площади территории.

Выводы

Природные рекреационные ресурсы регионов Северо-Восточного Кавказа в сочетании с другими благоприятными предпосылками (социальные, экономические и др.) позволяют развивать здесь различные направления рекреации и туризма, включая этнографический, гастрономический, сельский, спортивный, горнолыжный, экстремальный, пляжный, познавательный, экологический, лечебно-оздоровительный туризм и др. С позиций геоэкологической безопасности приоритет следует отдавать щадящим формам рекреации и туризма. В их числе – экологический туризм, который часто связывают с системой особо охраняемых природных территорий и объектов [15].

За последние годы наблюдается положительная динамика во многих отраслях рекреации и туризма. Однако масштабное развитие рекреационного природопользования требует дальнейших инвестиций в материально-техническую базу туристско-рекреационной индустрии. Данный этап развития предполагает пробуждение у местного населения интереса к новым перспективным для них формам деятельности (этнографический, рыболовный, сельский, лечебно-оздоровительный, научный, медицинский туризм, фототуризм и др.) [12]. Необходимо расширить санаторно-курортную базу, так как она не позволяет покрыть даже внутренние потребности в лечении и оздоровлении населения.

В перспективе туристско-рекреационная сфера может стать высокодоходным, приоритетным сектором экономики горных регионов Северо-Восточного Кавказа. Экономически рентабельное и экологически безопасное рекреационное природопользование позволит решить проблемы отдыха и оздоровления коренного населения и развивать внутренний и международный туризм.

Список источников

1. Букреев И.А. Теоретические и методические особенности оценки природных ресурсов туристско-рекреационного назначения // Журн. эконом. теории. 2019. Т. 16, № 1. С. 101–110.
2. Tribe J. The economics of Recreation, Leisure and Tourism. Routledge, 2020. 496 p.
3. Carter M.J., Van Andel G.E. Therapeutic Recreation: A Practical Approach. Waveland Press, 2019. 367 p.
4. Шошинова Т.Д. Теоретические понятия рекреационных ресурсов // Современные научные исследования и разработки. 2018. Т. 3, № 12 (29). С. 140–142.
5. Прозоров Л.Л. Энциклопедический словарь «Геоэкология». М.: Научный мир, 2004. 396 с.
6. Забураева Х.Ш. Приоритетные направления туризма в контексте устойчивого развития туристской дестинации // Шаг в науку – 2021: сб. науч. тр. по материалам Всерос. науч.-практ. конф. Нальчик: КБНЦ РАН, 2021. С. 31–34.
7. Забураева Х.Ш. Привлекательность территории Северо-Восточного Кавказа для развития туризма // Курортно-рекреационный комплекс в системе регионального развития: инновационные подходы. 2013. № 1. С. 133–138.
8. Шахмарданов З.А. Биоразнообразие и устойчивое развитие экосистем в Дагестане // Естеств. и точн. науки. 2009. № 2 (7). С. 85–89.
9. Петрова Н.Н. География рекреационных ресурсов России: методический аспект // Педагогическое искусство. 2022. № 1. С. 42–51.
10. Султанов Р.М. Рекреационные ресурсы бальнеологического курорта Ахты (Республика Дагестан) // Вопросы структуризации экономики. 2010. № 4. С. 140–143.
11. Матюгина Э.Г., Пожарницкая О.В., Вусович О.В. Природный потенциал как основа формирования туристско-рекреационного профиля территории (на примере Республики Дагестан) // Юг России: экология, развитие. 2019. Т. 14, № 2. С. 132–149.
12. Забураева Х.Ш. Рекреационное природопользование на Северо-Восточном Кавказе: современное состояние и пути оптимизации // Вестн. КНИИ РАН. Естеств. и техн. науки. 2022. № 2 (10). С. 100–108.
13. Аракелян И.С., Бондаренко Н.Г., Парфенюк Т.Н. Развитие сферы туризма на Северном Кавказе (на примере республик Ингушетия и Дагестан) // Способы, модели и алгоритмы управления модернизационными процессами: сб. тр. по материалам науч.-практ. конф. Уфа, 2021. С. 59–62.
14. Арсанова Р.М. Перспективы использования рекреационных ресурсов в формировании туристско-рекреационных комплексов Чеченской Республики // Вестн. Алтайской академии экономики и права. 2021. № 7-2. С. 112–117.
15. Усольцева А.Н. Зарубежный и российский опыт организации экологического туризма на особо охраняемых природных территориях // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2022. № 1. С. 80–89.

References

1. Bukreev I.A. Theoretical and methodological features of the assessment of natural resources for tourism and recreation purposes. *Zhurnal ekonomicheskoi teorii = Journal of Economic Theory*. 2019;16(1):101-110. (In Russ.).
2. Tribe J. *The economics of Recreation, Leisure and Tourism*. Routledge, 2020. 496 p.
3. Carter M.J., Van Andel G.E. *Therapeutic Recreation: A Practical Approach*. Waveland Press; 2019. 367 p.
4. Shoshinova T.D. Theoretical concepts of recreational resources. *Sovremennye nauchnye issledovaniya i razrabotki = Modern Scientific Researches and Innovations*. 2018;3(12):140-142. (In Russ.).
5. Prozorov L.L. *Encyclopedic Dictionary "Geoecology"*. Moscow: Nauchnyi mir Publ.; 2004. 396 p. (In Russ.).
6. Zaburaeva Kh.Sh. Priority areas of tourism in the context of sustainable development of the tourist destination. *Step into science-2021*. Collection of scientific papers based on the materials of the All-Russian Scientific and Practical Conference. Nalchik: Kabardino-Balkar Scientific Center of the Russian Academy of Sciences Press; 2021:31-34. (In Russ.).
7. Zaburaeva Kh.Sh. Attractiveness of the territory of the North-East Caucasus for the development of tourism. *Kurortno-rekreatsionnyi kompleks v sisteme regional'nogo razvitiya: innovatsionnye podkhody = Resort and Recreational Complex in the Regional Development System: Innovative Approaches*. 2013;(1):133-138. (In Russ.).
8. Shakhmardanov Z.A. Biodiversity and sustainable ecosystem development in Dagestan. *Estestvennye i tochnye nauki = Natural and Exact Sciences*. 2009;(2):85-89. (In Russ.).
9. Petrova N.N. Geography of recreational resources of Russia: methodological aspect. *Pedagogicheskoe iskustvo = Pedagogical Art*. 2022;(1):42-51. (In Russ.).
10. Sultanov R.M. Recreational resources of the balneological resort of Akhta (Republic of Dagestan). *Voprosy strukturizatsii ekonomiki = Issues of Structuring the Economy*. 2010;(4):140-143. (In Russ.).
11. Matyugina E.G., Pozharnitskaya O.V., Vusovich O.V. Natural potential as the basis for the formation of the tourist and recreational profile of the territory (on the example of the Republic of Dagestan). *Yug Rossii: ekologiya, razvitie = South of Russia: Ecology, Development*. 2019;14(2):132-149. (In Russ.).
12. Zaburaeva Kh.Sh. Recreational nature management in the North-Eastern Caucasus: current status and optimization paths. *Vestnik KNII RAN. Seriya: Estestvennye i tekhnicheskie nauki = Bulletin of the KNII RAS. Series: Natural and Technical Sciences*. 2022;(2):100-108. (In Russ.).
13. Arakelyan I.S., Bondarenko N.G., Parfenyuk T.N. Development of tourism in the North Caucasus (using the example of the republics of Ingushetia and Dagestan). *Methods, models and algorithms for controlling modernization processes*. Collection of papers based on the materials of the Scientific and Practical Conference. Ufa, 2021:59-62. (In Russ.).
14. Arsanova R.M. Prospects for the use of recreational resources in the formation of tourist and recreational complexes of the Chechen Republic. *Vestnik Altaiskoi akademii ekonomiki i prava = Bulletin of the Altai Academy of Economics and Law*. 2021;(7-2):112-117. (In Russ.).
15. Usoltseva A.N. Foreign and Russian experience in organizing ecological tourism in specially protected natural areas. *Izv. vuzov. Sev.-Kavk. region. Estestv. nauki = Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural science*. 2022;(1):80-89. (In Russ.).

Информация об авторах

Х.Ш. Забураева – доктор географических наук, главный научный сотрудник.

Х.А.-В. Алиева – аспирант, Комплексный научно-исследовательский институт им. Х.И. Ибрагимова РАН; ассистент, Институт нефти и газа, Грозненский государственный нефтяной технический университет им. акад. М.Д. Миллионщикова.

А.А. Шаипова – аспирант, Комплексный научно-исследовательский институт им. Х.И. Ибрагимова РАН; ассистент, Институт нефти и газа, Грозненский государственный нефтяной технический университет им. акад. М.Д. Миллионщикова.

Information about the authors

Kh.Sh. Zaburaeva - Doctor of Science (Geography), Main Researcher.

Kh.A.-V. Alieva - Postgraduate Student, Ibragimov Complex Institute of the Russian Academy of Sciences; Assistant, Institute of Oil and Gas, Millionshchikov Grozny State Oil Technical University.

A.A. Shaipova - Postgraduate Student, Ibragimov Complex Institute of the Russian Academy of Sciences; Assistant, Institute of Oil and Gas, Millionshchikov Grozny State Oil Technical University.

Статья поступила в редакцию 01.05.2023; одобрена после рецензирования 12.05.2023; принята к публикации 20.06.2023. The article was submitted 01.05.2023; approved after reviewing 12.05.2023; accepted for publication 20.06.2023.

Научная статья

УДК 631.861

doi: 10.18522/1026-2237-2023-3-106-116

ВЛИЯНИЕ ГУМИНОВЫХ ПРЕПАРАТОВ НА АЗОТНОЕ ПИТАНИЕ ОЗИМОЙ ПШЕНИЦЫ И УРЕАЗНУЮ АКТИВНОСТЬ ЧЕРНОЗЕМА ОБЫКНОВЕННОГО КАРБОНАТНОГО

Владислав Александрович Матюгин¹, Ольга Степановна Безуглова²

^{1, 2}Федеральный Ростовский аграрный научный центр, Рассвет, Ростовская область, Россия

¹vlad.matyugin@mail.ru

²osbesuglova@sfedu.ru

Аннотация. Исследована эффективность обработок посевов озимой пшеницы жидкими гуминовыми препаратами «ЭКОСС» и «ВЮ-Дон». Гуминовые препараты применяли в виде рабочего раствора с концентрацией 0,002 % (по углероду). Листовой аппарат озимой пшеницы обрабатывался однократно (в фазу кущения) и двукратно (в фазу кущения и колошения). Контролем являлся вариант без внесения гуминовых препаратов на фоне среднего уровня минерального питания $N_{40}P_{40}K_{40}$ с применением принятых для этой культуры в приазовской зоне Ростовской области технологий обработки почвы и приемов возделывания. Отборы почвенных образцов проводили 4 раза – в фазы кущения (дважды), колошения и сразу после уборки в течение 2021–2022 гг. Применение гуминовых препаратов сопровождалось ростом активности уреазы. В различные по погодным условиям года активность уреазы отличается, но всегда увеличивается с начала весенней вегетации до момента уборки. В благоприятный по погодным условиям 2021 г. активность уреазы слабее, чем в засушливый 2022 г., что указывает на положительное адаптогенное влияние гуминовых препаратов в условиях стресса. Двукратная обработка лучше повлияла на азотное питание растений. При этом на азотный режим растений больше подействовал гуминовый препарат «ЭКОСС», чем «ВЮ-Дон».

Ключевые слова: ферментативная активность, уреазы, минеральный азот, гуминовый препарат, «ВЮ-Дон», «ЭКОСС», реакция среды, фолиарная обработка

Для цитирования: Матюгин В.А., Безуглова О.С. Влияние гуминовых препаратов на азотное питание озимой пшеницы и уреазную активность чернозема обыкновенного карбонатного // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2023. № 3. С. 106–116.

Статья опубликована на условиях лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY 4.0).

Original article

EFFECT OF HUMIC PREPARATIONS ON WINTER WHEAT NITROGEN NUTRITION AND CALCIC CHERNOZEM UREASE ACTIVITY

Vladislav A. Matyugin¹, Olga S. Bezuglova²

^{1, 2}Federal Rostov Agrarian Research Center, Rassvet, Rostov Region, Russia

¹vlad.matyugin@mail.ru

²osbesuglova@sfedu.ru

Abstract. The effectiveness of treatments of winter wheat crops with liquid humic preparations “EKOSS” and “BIO-Don” has been studied. Humic preparations were used as a working solution with a concentration of 0.002% (by carbon). The leaf apparatus of winter wheat was processed once (during the tillering phase) and twice (during the tillering and heading phases). The control was the variant without the introduction of humic preparations against the background of an average level of mineral nutrition $N_{40}P_{40}K_{40}$ with the use of soil treatment technologies and cultivation methods adopted for this crop in the region. Soil sampling was carried out 4 times during the tillering (twice), heading phases and after harvest during 2021-2022. The use of humic preparations was accompanied by an increase in the activity of urease. In different weather conditions of the year, urease activity differs, but always increases from the beginning of the spring vegetation until the moment of harvesting. In favorable weather conditions in 2021, urease activity is weaker than in dry 2022, which indicates a positive effect of humic preparations under stressful conditions, where they show their adaptogenic properties. Double treatment had a better effect on the nitrogen nutrition of plants. At the same time, the humic preparation “EKOSS” had a greater effect on the nitrogen regime of plants than “BIO-Don”.

Keywords: enzymatic activity, urease, mineral nitrogen, humic preparation, “BIO-Don”, “EKOSS” pH, foliar treatment

For citation: Matyugin V.A., Bezuglova O.S. Effect of Humic Preparations on Winter Wheat Nitrogen Nutrition and Calcic Chernozem Urease Activity. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2023;(3):106-116. (In Russ.).

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC-BY 4.0).

Введение

Почвенная энзимология на сегодняшний день становится все более востребованной областью мониторинговых исследований и по оценке биологических свойств почвы. Однако получаемые результаты нередко имеют диаметрально противоположные значения или трактовку. К примеру, вспашка чернозема снижает активность каталазы, а инвертазную активность увеличивает, в то же время на каштановые почвы оказывает противоположное воздействие [1]. Поэтому необходимо дальнейшее изучение ферментативной активности и её изменений под влиянием технологических приемов, тем более когда такие приемы включают обработку растений физиологически активными препаратами, к каковым относятся и гуминовые вещества. Это и предопределило цель нашего исследования: изучение динамики уреазной активности и минерального азота в черноземе обыкновенном карбонатном при обработке посевов озимой пшеницы гуминовыми препаратами. Задачи, которые решались для достижения цели: выявление влияния кратности внесения гуминовых препаратов различного состава и генезиса на динамику уреазной активности и минерального азота в черноземе обыкновенном карбонатном.

Азот – основной биогенный элемент, который входит в такие важные структуры для растений, как белок, аминокислоты, хлорофилл. Большая часть азота представлена в растениях в форме простых и сложных белков и нуклеиновых кислот, играющих важную роль в жизнедеятельности организма.

Для растений азотное питание – гарантия полноценного роста и развития, основным источником азотного питания являются нитраты и аммонийные соединения, но для построения аминокислот растения используют только аммиак. Недостаток элемента негативно влияет на развитие листьев, ухудшается формирование и развитие репродуктивных органов и налив зерна. В то же время избыток азота приводит к аккумуляции больших доз нитратов в продукции растений, что негативно сказывается на людях и животных. Пополнение запасов азота в почве происходит из минеральных азотных удобрений, органических удобрений, включая сидераты, за счет деятельности азотфиксирующих и аммонифицирующих микроорганизмов. Влияют на динамику минерального азота погодные условия, особенности сельскохозяйственной культуры, внесение удобрений и различные приемы обработки почвы [2].

Связывание молекулярного азота растением – это многоступенчатый процесс, который осуществляется при участии микроорганизмов, его конечной стадией является включение азота в

состав белковых молекул растений. Белки – незаменимая и необходимая для жизни форма высокомолекулярных органических соединений. Содержание белков в вегетативных органах различно, но растения являются основным источником белка, и агроприемы направлены на увеличение его количества и качества в растительном сырье, так как он нужен для кормления сельскохозяйственных животных и питания населения.

При изучении азота главным образом стоит обратить внимание на его минеральные соединения: нитратные, обменные и необменные аммонийные формы. Каталитическая скорость их трансформаций и поглощения растениями регулируется действием различных групп гидролитических, протеолитических, окислительно-восстановительных ферментов, таких как протеаза, уреазы, нуклеаза и др. Ферментативная активность зависит от множества факторов: типа почвы, качества и количества органического вещества, внесения органических удобрений, теплового режима, содержания почвенной влаги, обеспеченности воздухом корнеобитаемого слоя, состояния микроорганизмов, а также характеристики возделываемой культуры, фазы вегетации и способа обработки почвы.

Уреазы принимают участие в процессе разложения мочевины, в результате гидролиза разрывается связь между азотом и углеродом (CO-NH), и мочевина переходит в легкоусвояемую для растений аммонийную соль [3]. Мочевина попадает в почву путем внесения навоза, азотных удобрений, разложения растительных остатков.

Исследования показывают, что ферментативная активность уреазы отличается в разных типах почвы и зависит от типа землепользования (целина или пашня). Так, например, в черноземах активность фермента тем меньше, чем ниже уровень плодородия почвы. Каштановые почвы в целом характеризуются низкой активностью уреазы. Но при выведении чернозема из целины под сельскохозяйственное использование активность фермента увеличивается, а в каштановых почвах при распашке она снижается [1]. Оказывает влияние и степень гумусированности почвы: чем она выше, тем активнее фермент, а самая высокая активность гидролитических ферментов, к которым относится и уреазы, проявляется в гумусовом горизонте [4].

При этом на уреазу влияет и вид обработки почвы [5]. При возделывании чернозема обыкновенного более высокая активность фермента наблюдается при дисковании тяжелой бороной на глубину 8–10 см, на втором месте стоит No-till, а более низкие значения имеет почва при использовании отвальной вспашки на глубину 20 см [1].

Объекты и методы

Исследование было проведено в период 2020–2022 гг. В работе рассматривается применение одно- и двукратной фолитарной обработки озимой пшеницы гуминовыми препаратами в критические для культуры фазы: кущения и колошения. Применяли гуминовые препараты в рекомендованных производителями дозировках на фоне среднего уровня минерального питания $N_{40}P_{40}K_{40}$, принятых для этой культуры в данном регионе технологий обработки почв и приемов возделывания.

Опыт в условиях полевого стационара ФГБНУ ФРАНЦ (Аксайский район Ростовской области) был заложен по следующей схеме (табл. 1).

Таблица 1 / Table 1

Схема опыта / Scheme of experience

Вариант	Гуминовый препарат / концентрация, %	Фаза внесения	
		Кущение	Колошение
Контроль (фон)	–	–	–
«ВЮ-Дон-1»	«ВЮ-Дон» 0,002	+	–
«ВЮ-Дон-2»	«ВЮ-Дон»-2×0,002	+	+
«ЭКОСС-1»	«ЭКОСС» 0,002	+	–
«ЭКОСС-2»	«ЭКОСС» 2×0,002	+	+

Согласно схеме, обработку гуминовыми препаратами проводили однократно (в фазу кущения) и двукратно (в фазы кущения и колошения) по вегетирующим растениям в баковой смеси с гербицидами, что делает их применение эргономичным и экономически малозатратным.

Отборы образцов почвы проводили в следующие сроки:

- 1) после возобновления весенней вегетации (кущение);
- 2) через 2 недели после обработки гуминовыми препаратами в фазу кущения;
- 3) через 2 недели после обработки гуминовыми препаратами в фазу колошения;
- 4) после уборки урожая.

Почва исследуемого стационара представлена черноземом обыкновенным карбонатным.

Гуминовый препарат «ВЮ-Дон» производится путем щелочной обработки вермикомпоста, полученного в ходе переработки навоза крупного рогатого скота калифорнийским червем. Биогумат «ЭКОСС» произведен на основе переработки навоза крупного рогатого скота и растительных остатков полеводства, прошедших две стадии ускоренной природной гумификации. После стадии ускоренного компостирования в биодинамических ферментерах из полученного субстрата экстрагируют по особой технологии с применением воды жидкий препарат.

Сорт озимой пшеницы Золушка селекции ФГБНУ ФРАНЦ.

Отбор почвенных образцов по вариантам опыта произведен по ГОСТ 17.4.4.02-2017 [6], определение подвижных форм азота – по ГОСТ 26489-85 [7], 26951-86 [8], определение активности уреазы – по Галстяну [9] в модификации Наими [10], определение pH водной почвенной вытяжки – по ГОСТ 26423-85 [11].

Погодно-климатические условия в годы исследований характеризовались крайней неоднородностью распределения атмосферной влаги по вегетационному периоду. Если в 2020–2021 гг. основная масса осадков приходилась на весенне-летний период, то в 2021–2022 гг. благоприятные по содержанию влаги условия сложились в период появления всходов и осеннего кущения, а весенне-летний период характеризовался засушливостью. По температурному режиму периоды близки к средним многолетним значениям [12].

Результаты исследования

Активность уреазы тесно сопряжена с содержанием в почве аммонийного и нитратного азота. Так как эти формы азота в результате микробной деятельности переходят одна в другую, мы оценивали суммарное содержание аммония и нитратов.

Рассмотрим динамику уреазной активности в вегетационном периоде 2020–2021 гг. Следует обратить внимание на разницу в активности фермента между первым и вторым отборами по всем вариантам (рис. 1).

Так как второй отбор происходил непосредственно перед второй обработкой, а значит, все варианты опыта, кроме контроля, были обработаны к этому времени всего один раз, поэтому разница в полученных результатах весьма важна. Казалось бы, должны быть схожие тенденции в вариантах с одинаковым гуминовым препаратом. Однако это не так.

На контроле значения между первым и вторым отбором статистически незначимы. В варианте с «ВЮ-Дон-1» наблюдается достоверное снижение активности уреазы по сравнению как с контролем, так и с активностью уреазы на этом варианте до обработки препаратом «ВЮ-Дон». В то же время в варианте «ВЮ-Дон-2» такого снижения активности фермента не наблюдается, напротив, можно отметить тенденцию к некоторому увеличению показателя. В обоих вариантах с обработкой растений «ЭКОСС» активность фермента увеличивается, причем в варианте «ЭКОСС-2» этот рост достоверен. Такой разброс значений обусловлен динамичностью показателя. В целом можно констатировать, что все значения уреазного пула лежат в пределах 5,7–8,9 мг NH₃ на 10 г за 24 ч, что позволяет оценить почву как бедную этим ферментом [13].

Сравнивая между собой варианты с одинаковым удобрением, но с разной кратностью обработок, можно заметить, что, например, при однократной обработке препаратом «ЭКОСС» наблюдается равномерный, но статистически незначимый рост активности фермента вплоть до 3-го отбора, но к уборке активность фермента резко снижается на статистически значимую величину. В варианте «ЭКОСС-2» после первой обработки активность уреазы резко и достоверно возрастает, а вот через две недели после второй обработки активность фермента так же резко снижается и остается низкой до самой уборки.

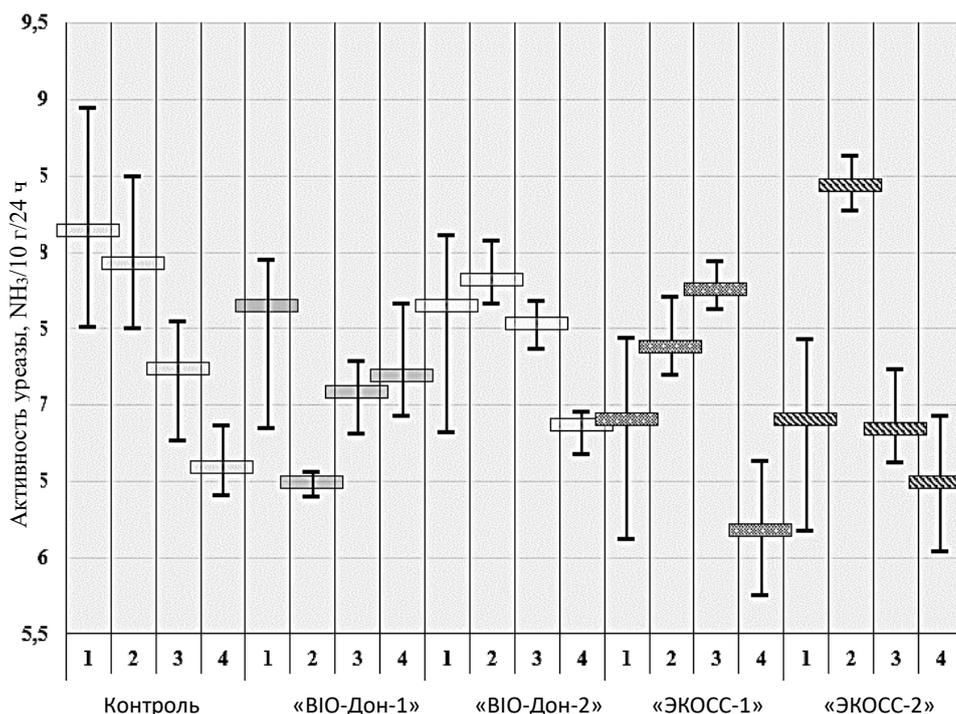


Рис. 1. Динамика уреазной активности по вариантам опыта в вегетационном периоде 2020–2021 гг.
 / Fig. 1. Dynamics of urease activity according to the variants of the experiment in the growing season 2020-2021

Динамика средних значений уреазной активности между 1–4-м отборами на контроле сходна с вариантом «ВЮ-Дон-2», однако разброс значений на контроле гораздо больше, активность уреазы в варианте «ВЮ-Дон-2» находится примерно на одном уровне, несмотря на то что есть незначительные увеличение и уменьшение значений. Разброс средних значений между 1–4-м отборами на остальных вариантах меньше по сравнению с контролем.

Контроль показывает, как изменяется активность уреазы на протяжении вегетационного периода без воздействия гуминовыми препаратами: идет равномерное снижение активности от весны к лету. А данные остальных вариантов убеждают, что применение гуминовых препаратов является фактором, изменяющим активность фермента. «ВЮ-Дон» не показывает такой заметной динамики значений, как варианты с «ЭКОСС». При этом однократная обработка «ЭКОСС» мало влияет на динамику показателя, а двукратная приводит к достоверным различиям по сравнению с контролем. Обусловлено такое явление воздействием гуминовых препаратов на физиологические процессы растения и активизацией корневых выделений, в свою очередь стимулирующих активность микроорганизмов [14, 15].

Количество доступного азота в течение вегетационного периода снижается во всех вариантах опыта. Однако в большинстве вариантов опыта наблюдается незначительный рост после уборки урожая, что и понятно, так как потребление азота растениями прекратилось, исключением является вариант «ЭКОСС-1», в нем продолжается некоторое снижение, что, возможно, обусловлено расходом азота на деятельность микроорганизмов ризосферы (рис. 2).

Одинаковое проявление тенденции к снижению содержания доступных форм азота говорит об активном поглощении его растениями. Разница между вариантами заключается в интенсивности этого процесса на различных стадиях его развития. Рассмотрим каждый вариант снижения их значений. На контроле наблюдается уменьшение содержания доступных форм азота ко второму отбору на 65,7 %, к третьему отбору тенденция сохранилась и произошло снижение еще на 20,2 %.

В варианте «ВЮ-Дон-1» отмечаются аналогичные процессы и суммарное понижение сопоставимо с контролем: на 41 % в фазу кущения и 48,2 % в фазу колошения. В варианте «ВЮ-Дон-2» картина иная: соответственно по фазам снижение содержания доступных форм азота составило 23,7 и 67,5 %.

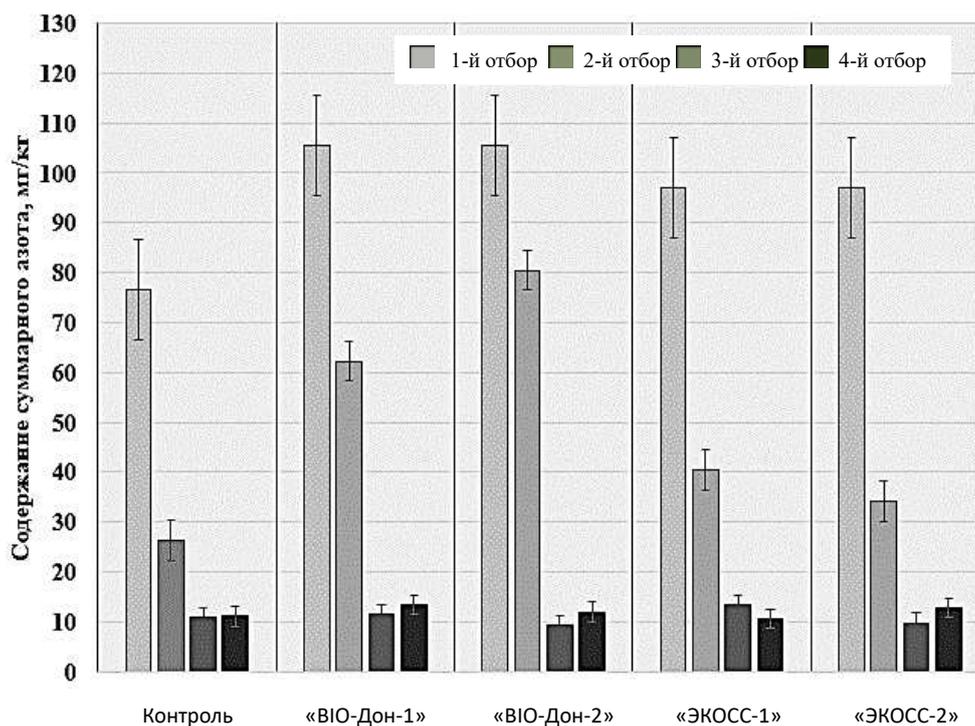


Рис. 2. Динамика подвижных соединений азота по вариантам опыта в вегетационном периоде 2020–2021 гг.
 / Fig. 2. Dynamics of mobile nitrogen compounds according to experimental variants in the growing season 2020-2021

В вариантах с препаратом «ЭКОСС» интенсивность уменьшения содержания подвижного азота примерно похожая: при однократной обработке «ЭКОСС-1» – 58,3 и 27,9 %, при двукратной («ЭКОСС-2») – 64,8 и 25,1 %.

В целом на первом месте по уменьшению доступного азота в период наблюдений стоит вариант «ВЮ-Дон-2» (снижается на 91,2 %), затем «ЭКОСС-2» (89,9 %) и «ВЮ-Дон-1» (89,2), а наименьшее снижение наблюдается в варианте «ЭКОСС-1» (86,2) и на контроле (85,9 %).

Разница между этими тремя позициями составляет 2–4 %, но тем не менее наблюдается зависимость от кратности применения гуминовых препаратов: при двукратной обработке проявляется более интенсивное снижение количества азота. В этом снижении интересен тот факт, что во всех вариантах сохраняется примерно одинаковый уровень содержания подвижного азота в почве после уборки – 10,57–13,40 мг/кг. То есть существует минимальный уровень, ниже которого количество подвижного азота в данном эксперименте не опускается.

Абсолютная величина снижения показывает, что больше всего азота вынесли растения, обработанные «ВЮ-Дон» (94,16 и 96,33 мг), немного меньшее его количество вынесли растения на вариантах с «ЭКОСС» (83,67 и 87,28), а меньше всего – на контроле (65,79 мг). Такая разница объясняется изначальным количеством азота, как доступным для растений, так и потенциально доступным. В начале вегетационного периода больше всего доступного азота было в вариантах с «ВЮ-Дон», а меньше всего на контроле. То есть чем больше было бы доступного азота, тем больше было бы поглощено растением, тем потенциально выше урожайность.

Между «ВЮ-Дон» и «ЭКОСС» есть разница в интенсивности снижения доступного азота. Оба варианта с «ВЮ-Дон» характеризуются меньшим снижением ко второму отбору и большим к третьему (в варианте с «ВЮ-Дон-1» – это 41,5 и 23 %, а «ВЮ-Дон-2» – 23,7 и 67,5 %). В вариантах с «ЭКОСС» идет значительное снижение ко второму и небольшое к третьему отбору («ЭКОСС-1» – 58,3 и 27,9 %; «ЭКОСС-2» – 64,8 и 25,1 %). При этом на вариантах с «ЭКОСС» отмечена идентичная с контролем динамика.

На количество азота влияет активность уреазы. Так, в вариантах с контролем наблюдается постоянное снижение активности фермента. В начале вегетационного периода более высокие

значения уреазы позволили поглотить больше азота, чем в его конце, когда активность снизилась. В вариантах с «ЭКОСС», как уже было упомянуто, наблюдается повышение активности фермента ко второму отбору. Причем двукратная обработка в большей степени повышает активность уреазы, чем однократная, соответственно, наблюдается и большее снижение содержания подвижного азота в варианте с двукратной обработкой.

В варианте с однократной обработкой «ЭКОСС» повышение активности уреазы происходит до третьего отбора, однако поглощение азота снижается.

Обработка посевов препаратом «ВЮ-Дон» способствует снижению активности уреазы ко второму отбору на варианте с однократной обработкой и почти не изменяет ее значения в варианте с двукратной обработкой, при этом колебания активности уреазы во всех отборах маленькие. В варианте с однократной обработкой наблюдается практически одинаковое снижение азота между первым и вторым и между вторым и третьим отборами, а в варианте с двукратной обработкой больше азота поглощается между 2-м и 3-м отборами.

В 2021–2022 гг. активность уреазы увеличивалась на протяжении всего вегетационного периода во всех вариантах опыта (рис. 3).

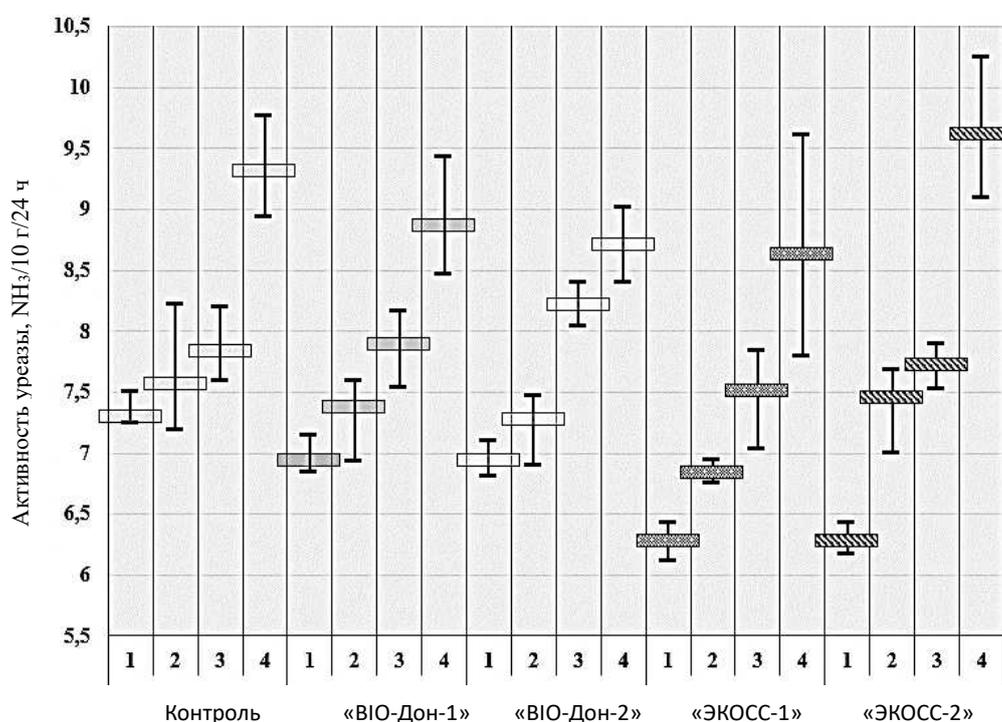


Рис. 3. Динамика уреазной активности по вариантам опыта в вегетационном периоде 2021–2022 гг.
 / Fig. 3. Dynamics of urease activity according to the variants of the experiment in the growing season 2021–2022

Поэтому рассматривать разницу между первым и вторым отбором не имеет смысла, но вот разобраться в том, насколько сильно повлияли на этот процесс гуминовые препараты, можно. Самое большое увеличение активности фермента при сравнении результатов 1-го и 4-го отбора в варианте «ЭКОСС-2». Однако мы видим, что активность уреазы в образцах почвы 4-го отбора в варианте «ЭКОСС-2» и на контроле близки друг другу, но начальные значения различны, и на контроле активность фермента немного выше на начало вегетационного периода. Также активность уреазы на контроле выше, чем во всех остальных вариантах, и ни на одном из них, кроме варианта «ЭКОСС-2», активность уреазы не достигла значений контроля по 4-му отбору. Самую высокую прибавку активности уреазы дает гуминовый препарат «ЭКОСС» при двукратной обработке растений, в этом варианте к моменту уборки по активности уреазы чернозем можно оценить как среднеобогатенный [12]. Однократная обработка данным препаратом лишь немного отличается от контроля, в то время как «ВЮ-Дон» показал себя как сдерживающий фактор роста активности фермента.

Сравнивая два года опыта, можно заметить, что активность уреазы снизилась к началу второго года исследования по сравнению с началом первого. На контроле это уменьшение составило 10,4, а во всех остальных вариантах – 9,2 %. А вот значения уреазы в ее пик активности увеличились: на контроле и в варианте «ЭКОСС-2» – на 12,4, в варианте с «ВЮ-Дон-2» и «ЭКОСС-1» – на 10,2, а на «ВЮ-Дон-1» – на 13,8 %. Что касается минимальных значений, то на контроле и «ВЮ-Дон-1» они выросли на 9,7 и 6,4 % соответственно. «ВЮ-Дон-2» и «ЭКОСС-1» не изменились, а минимальное значение у варианта «ЭКОСС-2» немного уменьшилось – на 3,4 %.

Засушливый 2022 г. характеризуется изменениями в количестве доступного азота, характер которых во всех вариантах опыта очень существенно отличается от картины предыдущего года. Так, в контрольном варианте наблюдается пик по количеству доступного элемента во втором отборе. Его содержание увеличивается между первым и вторым отбором, затем происходит резкий спад к третьему отбору и снова накопление к 4-му отбору (рис. 4). При этом уреазная активность в первые три отбора несколько повышается, но ее состояние лучше описать как плато, а затем идет резкое увеличение к 4-му отбору. Сказать, что изменение ее активности повлияло на содержание азота, нельзя, но стоит учитывать и тот факт, что изначальное содержание подвижного азота в почве контрольного варианта равнялось в 2021 г. 76,58, а в 2022 – 20,62 мг/кг. В образцах почвы второго отбора (спустя 2 недели после первой обработки растений гуминовыми препаратами) наблюдался рост доступных форм азота, который может быть связан с преобладанием скорости трансформации азота в доступные формы над его поглощением растениями. Для понимания процессов увеличения скорости трансформации стоит рассмотреть изменение показателя рН (табл. 2) с учетом того, что оптимальным для уреазы является диапазон 6,5–7 [3].

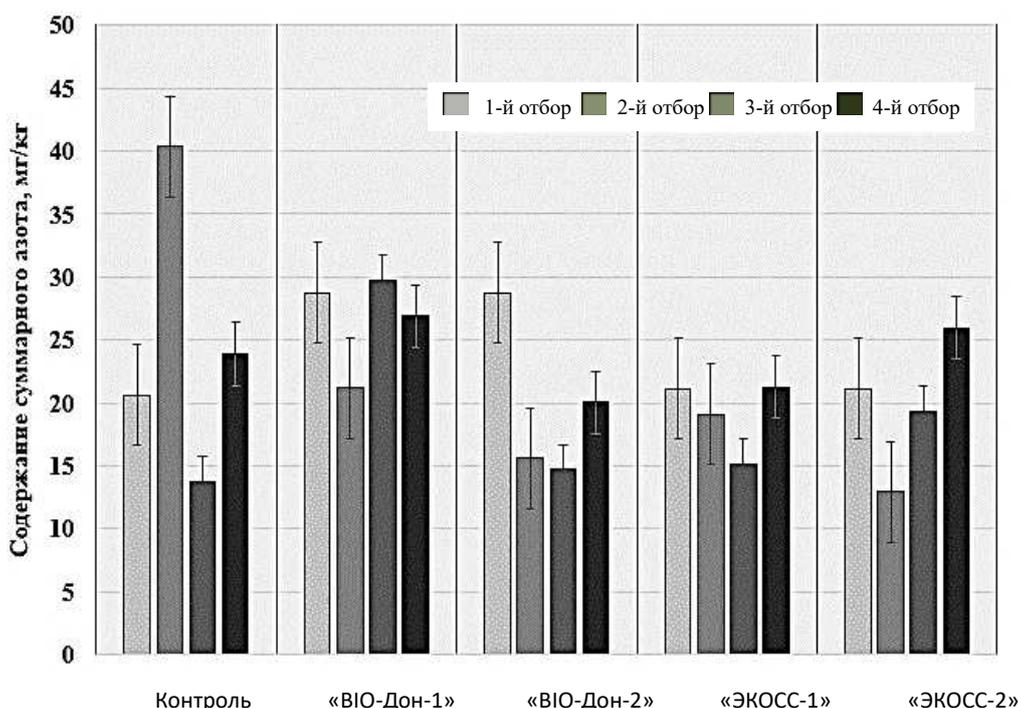


Рис. 4. Динамика подвижных соединений азота по вариантам опыта в вегетационном периоде 2021–2022 гг.
 / Fig. 4. Dynamics of mobile nitrogen compounds according to experimental variants in the growing season 2021-2022

Из табл. 2 видно, что самым высоким значением рН на контроле характеризовалась почва в 1-й отбор, а самым оптимальным для проявления активности уреазы – во 2-й отбор, близкое к оптимуму по этому показателю было состояние почвы в 3-й и 4-й отборы. Поэтому мы видим здесь явное влияние рН среды на активность уреазы, и это объясняет распределение азота на контрольном варианте. В варианте с «ВЮ-Дон-1» самым высоким значением рН характеризова-

лась почва через 2 недели после первой обработки гуминовым препаратом, что сказалось на количестве азота: его было меньше всего в этом отборе. Затем наблюдалось увеличение его содержания к третьему отбору, где pH был оптимальным.

Таблица 2 / Table 2

**Динамика pH в течение вегетационного периода 2021–2022 гг.
/ pH dynamics during the growing season 2021–2022 (НСР₀₅=0,05)**

Вариант опыта	Отбор 1		Отбор 2		Отбор 3		Отбор 4		Изменения к концу опыта
	Среднее	Разница с контролем	Среднее	Разница между отборами	Среднее	Разница между отборами	Среднее	Разница между отборами	
Контроль	7,42	–	6,98	–0,44	7,25	0,28	7,10	–0,15	–0,32
«ВЮ-Дон-1»	7,15	–0,27	7,26	0,11	6,85	–0,40	7,03	0,18	–0,12
«ВЮ-Дон-2»	7,15	–0,27	7,06	–0,09	6,85	–0,22	7,02	0,17	–0,13
«ЭКОСС-1»	7,29	–0,13	7,18	–0,11	7,19	0,01	6,82	–0,38	–0,47
«ЭКОСС-2»	7,29	–0,13	7,32	0,03	7,23	–0,08	7,18	–0,06	–0,11

Реакция почвенной среды в варианте «ВЮ-Дон-2» характеризуется близкими к оптимуму значениями, кроме первого отбора, активность уреазы возрастает на протяжении всего вегетационного периода. Исходя из этих данных, можно заранее предположить, что ко второму отбору количество доступного азота станет меньше. Это связано с тем, что почвенные условия по состоянию активности водородных ионов (pH) улучшаются, и активность уреазы увеличивается, а значит, и поглощение азота происходит интенсивнее, что и видно на графике. Второй и третий отборы по количеству азота не сильно отличаются, значение pH почвы во втором отборе близко к оптимальному, в третьем отборе – оптимальное, соответственно, активность уреазы растет, и наблюдается увеличение содержания доступного азота к четвертому отбору.

Самое большое увеличение активности фермента уреазы в 2022 г. наблюдалось в вариантах с «ЭКОСС». Эти варианты характеризуются сначала уменьшением количества доступного азота, а затем его увеличением, причем максимальное увеличение приурочено к варианту с двукратной обработкой, при однократной наблюдается постоянное снижение в течение первых трех отборов и увеличение только после уборки урожая.

На такое распределение оказывает заметное влияние pH. В варианте с «ЭКОСС-1» неоптимальные значения pH были в период с первого по третий отбор, влияние этого мы видим в характере уменьшения азота, описанном выше. На вариантах с «ЭКОСС-2» в почве были неоптимальные значения pH только в образцах первого и второго отбора. Самыми оптимальными значениями pH почва в вариантах с «ЭКОСС» характеризовалась в период после уборки (четвертый отбор), в это же время наблюдаются самые высокие величины ферментативной активности, и благодаря сумме этих факторов увеличивается количество доступного азота. Однако данный факт может быть обусловлен и тем, что потребность растений в этом элементе питания к моменту уборки стремится к минимуму.

Заключение

Динамика подвижных соединений азота в черноземе обыкновенном карбонатном определяется фазой развития растений, погодными условиями вегетационного сезона, особенностями гуминового препарата и количеством обработок. В более благоприятный по гидротермическим условиям год содержание азота снижается по мере формирования и созревания озимой пшеницы, соответственно, уреазная активность возрастает, что обусловлено высокими потребностями растений. В засушливый 2022 г. активность уреазы была высокой, начиная с момента возобновления вегетации и до уборки, что обусловлено недостатком в почве влаги и пониженной подвижностью азота. Двукратная обработка посевов озимой пшеницы гуминовыми препаратами пролонгирует повышенное потребление азота, что сопряжено и с большей активностью фермента. Гуминовый препарат «ЭКОСС» отличается более выраженным воздействием на азотный режим по сравнению с «ВЮ-Доном».

Список источников

1. Романов В.Н., Заушинцева А.В., Кожневиков Н.В. Применение показателей активности ферментов для оперативной диагностики экологического состояния агрогенных почв // Достижения науки и техники АПК. 2019. Т. 33, № 7. С. 44–47.
2. Medvedeva A.M., Biryukova O.A., Ilchenko Y.I., Minkina T.M., Kucherenko A.V., Bauer T.V., Mandzhieva S.S., Mazarji M. Nitrogen state of Haplic Chernozem of the European part of Southern Russia in the implementation of resource-saving technologies // J. of the Science of Food and Agriculture. 2021. Vol. 101, № 6. P. 2312–2318. Doi: 10.1002/jsfa.10852.
3. Хазиев Ф.Х. Системно-экологический анализ ферментативной активности почв. М.: Наука, 1982. 203 с.
4. Бурлакова Л.М., Ананьева Ю.С. Влияние экспозиции склона на ферментативную активность агрогенных черноземов Алтайского Приобья // Вестн. Алтайского гос. аграр. ун-та. 2010. № 11 (73). С. 16–20.
5. Пронько В.В., Журавлев Д.Ю., Ескова В.С., Ярошенко Т.М., Климова Н.Ф. Ферментативная активность черноземных и каштановых почв в агроландшафтах Среднего Поволжья // Новые методы и результаты исследований ландшафтов в Европе, Центральной Азии и Сибири: в 5 т. / под ред. В.Г. Сычева, Л. Мюллера. М.: ВНИИА им. Д.Н. Прянишникова, 2018. Т. I. С. 208–211.
6. ГОСТ 17.4.4.02-2017. Охрана природы. Почвы. Методы отбора и подготовки проб для химического, бактериологического, гельминтологического анализа. М.: Стандартинформ, 2018. 10 с.
7. ГОСТ 26489-85. Почвы. Определение обменного аммония по методу ЦИНАО. М.: Гос. комитет СССР по стандартам, 1986. 5 с.
8. ГОСТ 26951-86. Почвы. Определение нитратов ионометрическим методом. М.: Гос. комитет СССР по стандартам, 1986. 8 с.
9. Хазиев Ф.Х. Методы почвенной энзимологии. М.: Наука, 2005. 256 с.
10. Наими О.И. О методе определения активности уреазы в почве // Высокие технологии и инновации в науке: сб. избр. ст. Междунар. науч. конф., Санкт-Петербург, 27 ноября 2019 г. СПб.: Гум. нац. исслед. ин-т «Нацразвитие», 2019. С. 17–20.
11. ГОСТ 26423-85. Почвы. Методы определения удельной электрической проводимости, рН и плотного остатка водной вытяжки. М.: Гос. комитет СССР по стандартам, 1985. 7 с.
12. Клименко А.И., Парамонов А.В., Гринько А.В., Целуйко О.А., Бахматова Г.А., Гуленок Р.А. Мониторинг метеоданных ФГБНУ ФРАНЦ. Рассвет: АзовПринт, 2022. 44 с.
13. Звягинцев Д.Г. Биологическая активность почв и шкалы для оценки некоторых ее показателей // Почвоведение. 1978. № 6. С. 48–54.
14. Хомяков Ю.В. Роль корневых выделений растений в формировании биохимических свойств корнеобитаемой среды: автореф. дис. ... канд. биол. наук. СПб., 2009. 22 с.
15. Bezuglova O.S., Gorovtsov A.V., Polienko E.A., Zinchenko V.E., Grinko A.V., Lykhman V.A., Dubinina M.N., Demidov A. Effect of humic preparation on winter wheat productivity and rhizosphere microbial community under herbicide-induced stress // J. Soils Sediments. 2019. Vol. 19, iss. 6. P. 2665–2675, <https://doi.org/10.1007/s11368-018-02240-z>.

References

1. Romanov V.N., Zaushintsena A.V., Kozhevnikov N. V. Application of indicators of enzyme activity for operational diagnostics of the ecological state of agrogenic soils. *Dostizheniya nauki i tekhniki APK = Achievements of Science and Technology of AICis*. 2019;33(7):44-47. (In Russ.).
2. Medvedeva A.M., Biryukova O.A., Ilchenko Y.I., Minkina T.M., Kucherenko A.V., Bauer T.V., Mandzhieva S.S., Mazarji M. Nitrogen state of Haplic Chernozem of the European part of Southern Russia in the implementation of resource-saving technologies. *J. of the Science of Food and Agriculture*. 2021;101(6):2312-2318, doi: 10.1002/jsfa.10852.
3. Khaziev F.H. *System-ecological analysis of enzymatic activity of soils*. Moscow: Nauka Publ.; 1982. 203 p. (In Russ.).
4. Burlakova L.M., Ananyeva Yu. S. The influence of slope exposure on the enzymatic activity of agrogenic chernozems of the Altai Ob region. *Vestn. Altaiskogo gos. agrar. un-ta = Bulletin of Altai State Agricultural University*. 2010;(11):16-20. (In Russ.).
5. Pronko V.V., Zhuravlev D.Yu., Eskova V.S., Yaroshenko T.M., Klimova N.F. Enzymatic activity of chernozem and chestnut soils in agricultural landscapes of the Middle Volga region. *New methods and results of landscape studies in Europe, Central Asia and Siberia*: in 5 vols. Ed. by V.G. Sychev, L. Muller. Vol. I. Moscow: Pryanishnikov All-Russian Research Institute of Agrochemistry Press; 2018:208-211. (In Russ.).
6. *GOST 17.4.4.02-2017. Nature protection. Soil. Methods of sampling and preparation of samples for chemical, bacteriological, helminthological analysis*. Moscow: Standartinform Publ.; 2018. 10 p. (In Russ.).

7. GOST 26489-85. Soil. Determination of exchange ammonium by the Central Research Institute of Agrochemical Service of Agriculture method. Moscow: USSR State Committee on Standards Press; 1986. 5 p. (In Russ.).
8. GOST 26951-86. Soils. Determination of nitrates by ionometric method. Moscow: USSR State Committee on Standards Press; 1986. 8 p. (In Russ.).
9. Khaziev F.H. *Methods of soil enzymology*. Moscow: Nauka Publ.; 2005. 256 p. (In Russ.).
10. Naimi O.I. On the method of determining the activity of urease in the soil. *High technologies and innovations in science: A collection of selected articles of the International Scientific Conference, St. Petersburg, November 27, 2019*. St. Petersburg: Humanitarian National Research Institute "National Development" Press; 2019:17-20. (In Russ.).
11. GOST 26423-85. Soil. Methods for determining the specific electrical conductivity, pH and dense residue of water extract. Moscow: USSR State Committee on Standards Press; 1985. 7 p. (In Russ.).
12. Klimenko A.I., Paramonov A.V., Grinko A.V., Tseluiko O.A., Bakhmatova G.A., Gulenok R.A. *Monitoring of meteorological data of Federal State Budgetary Scientific Institution "Federal Rostov Agrarian Scientific Center"*. Rassvet: AzovPrint Publ.; 2022. 44 p. (In Russ.).
13. Zvyagintsev D.G. Biological activity of soils and scales for assessing some of its indicators. *Pochvovedenie = Eurasian Soil Science*. 1978;(6):48-54. (In Russ.).
14. Khomyakov Yu.V. *The role of plant root secretions in the formation of the biochemical properties of the root environment*. Dissertation Thesis. St. Petersburg, 2009. 22 p. (In Russ.).
15. Bezuglova O.S., Gorovtsov A.V., Polienko E.A., Zinchenko V.E., Grinko A.V., Lykhman V.A., Dubinina M.N., Demidov A. Effect of humic preparation on winter wheat productivity and rhizosphere microbial community under herbicide-induced stress. *J. Soils Sediments*. 2019;19(6):2665-2675, <https://doi.org/10.1007/s11368-018-02240-z>.

Информация об авторах

В.А. Матюгин – аспирант, младший научный сотрудник.

О.С. Безуглова – доктор биологических наук, профессор, главный научный сотрудник.

Information about the authors

V.A. Matyugin – Postgraduate Student, Junior Researcher.

O.S. Bezuglova - Doctor of Science (Biology), Professor, Main Researcher.

*Статья поступила в редакцию 20.04.2023; одобрена после рецензирования 20.05.2023; принята к публикации 20.06.2023.
The article was submitted 20.04.2023; approved after reviewing 20.05.2023; accepted for publication 20.06.2023.*

Научная статья

УДК 551.510.528(047), 551.524.7:551.509.314

doi: 10.18522/1026-2237-2023-3-117-131

О СЕЗОННОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ ХАРАКТЕРИСТИК ТРОПОПАУЗЫ В ПРЕДГОРНЫХ РАЙОНАХ СЕВЕРНОГО КАВКАЗА ПО ДАННЫМ ERA-5 (COPERNICUS) И MERRA-2 (NASA)

Анатолий Анатольевич Радионов^{1✉}, Василий Юрьевич Тимченко²

^{1, 2} Южный математический институт Владикавказского научного центра РАН, Владикавказ,
Республика Северная Осетия – Алания, Россия

¹aar200772@mail.ru[✉]

²timchenko.vasily@mail.ru

Аннотация. На основе базы данных реанализа ERA-5 (Copernicus) проведен анализ сезонной изменчивости высоты и мощности тропопазы в атмосфере для предгорного района вблизи города Владикавказ, РСО-Алания, РФ. Используются два алгоритма определения границ тропопазы и ее мощности (здесь это вертикальное расстояние между верхней и нижней границами тропопазы), основанные на определении холодной точки и градиентного определения Всемирной метеорологической организации. Показано, что в летний сезон тропопауза расположена выше и характеризуется меньшей мощностью, а в холодные сезоны тропопауза ниже и имеет значительную мощность (иногда фиксируются две тропопазы). Проведено сравнение наблюдаемой сезонной изменчивости высоты тропопазы и вычисляемой теоретически для адиабатической температуры. Наблюдается удовлетворительное соответствие некоторых характеристик тропопазы. Проведены статистические оценки трендов изменения высоты и температуры холодной точки тропопазы, которые удовлетворительно согласуются с соответствующими трендами, вычисленными теоретически на основании трендов изменения приземной температуры по данным реанализа MERRA-2 (NASA) в исследуемом районе.

Ключевые слова: тропопауза, сезонная изменчивость, тренды изменения температуры, холодная точка тропопазы

Для цитирования: Радионов А.А., Тимченко В.Ю. О сезонной изменчивости характеристик тропопазы в предгорных районах Северного Кавказа по данным ERA-5 (Copernicus) и MERRA-2 (NASA) // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2023. № 3. С. 117–131.

Статья опубликована на условиях лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY 4.0).

Original article

ON SEASONAL VARIABILITY OF TROPOPAUSE CHARACTERISTICS IN FOOTHILL REGIONS OF THE NORTH CAUCASUS ACCORDING TO ERA-5 (COPERNICUS) И MERRA-2 (NASA) REANALYSIS DATA

Anatoly A. Radionoff^{1✉}, Vasily Yu. Timchenko²

^{1, 2}Southern Mathematical Institute – Branch of Vladikavkaz Scientific Center, Russian Academy of Sciences,
Vladikavkaz, Republic of North Ossetia-Alania, Russia

¹aar200772@mail.ru[✉]

²timchenko.vasily@mail.ru

© Радионов А.А., Тимченко В.Ю., 2023

Abstract. Based on the ERA-5 (Copernicus) reanalysis database, the seasonal variability of the height and thickness of the tropopause in the atmosphere is shown for the foothill region near the city of Vladikavkaz, North Ossetia-Alania, Russia. Two algorithms are used to determine the boundaries of the tropopause and its thickness (here it is the vertical distance between the upper and lower boundaries of the tropopause), based on the definition of the cold point and the gradient definition of the World Meteorological Organization. It is shown that in the summer season the tropopause is higher and less thick, while in cold seasons the tropopause is lower and has a significant thickness (sometimes two tropopauses are recorded). The observed seasonal variability of the tropopause height is compared with that calculated theoretically for the adiabatic temperature. Satisfactory correspondence of some characteristics of the tropopause is observed. Statistical estimates of the trends in changes in the height and temperature of the cold point of the tropopause are calculated, which are in satisfactory agreement with the corresponding trends calculated theoretically on the basis of trends in changes in surface temperature according to the MERRA-2 (NASA) reanalysis data in the study area.

Keywords: tropopause, seasonal variability, temperature trends, cold point of the tropopause

For citation: Radionoff A.A., Timchenko V. Yu. On Seasonal Variability of Tropopause Characteristics in Foothill Regions of the North Caucasus According to ERA-5 (Copernicus) и MERRA-2 (NASA) Reanalysis Data. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2023;(3):117-131. (In Russ.).

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC-BY 4.0).

Введение

Одним из важных феноменов атмосферной климатической системы являются процессы возникновения и изменчивости тропопаузы. Так называется высотный слой атмосферы, расположенный между тропосферой и стратосферой и разделяющий эти два слоя с существенно различающимися характеристиками. В тропопаузе охлаждение воздуха с высотой останавливается и меняется на нагрев воздуха с ростом высоты [1–7]. Через тропопаузу происходит динамическое, химическое и радиационное взаимодействие между стратосферой и тропосферой, которое влияет на изменения в глобальной климатической системе [8, 9]. Знание пространственно-временной структуры тропопаузы актуально как для фундаментальной науки, так и для прикладных задач, а изменения, происходящие в области высот тропопаузы, влияют на климатическую систему.

Важная роль тропопаузы в глобальных климатообразующих процессах отражается во множестве используемых определений этого слоя. Часто используются определения тропопаузы по температуре, критерию устойчивости, самой холодной точке профиля, динамическим или химическим особенностям, основанные на содержании влаги или льда, также имеются другие определения [2, 10, 11]. Для модельных задач могут использоваться упрощенные аппроксимации определения тропопаузы, например, уровень 100 мбар, хотя упрощенные определения не описывают многих характеристик тропопаузы.

По определению Всемирной метеорологической организации (<https://public.wmo.int/en>), тропопаузой называется самый нижний уровень, на котором градиент температуры воздуха уменьшается до значения 2 К/км, причем средний градиент между этим уровнем и всеми вышележащими уровнями в пределах 2 км не превышает 2 К/км. Это определение предполагает, что тропопауза занимает определенный интервал высот, т.е. имеет некоторую мощность. Часто изменение знака градиента температуры наблюдается не в одной точке по высоте в пределах тропопаузы и превышает 2 К/км, в этом случае говорят, что имеется несколько тропопауз. Неравномерное изменение градиента температуры в пределах тропопаузы позволяет говорить о ее переменной мощности. Тропопауза рассматривается как вертикальный слой, а не внезапный переход между тропосферой и стратосферой в работах [9, 12].

Тропопауза не занимает строго фиксированного положения и демонстрирует широтную, годовую и сезонную изменчивость [2, 6, 8, 9]. Отмечается, что характеристики тропической тропопаузы различаются для Северного и Южного полушарий. Также высота тропопаузы реагирует на краткосрочные воздействия, такие как циклоническая циркуляция, вызывающая ее некоторый подъем или опускание. В некоторых случаях отмечается, что сильные тропические циклоны могут высоко поднимать тропопаузу, что приводит к массообмену между стратосферой и тропопаузой.

Изучению тропической тропопаузы посвящено множество работ проекта SPARC, размещенных на сайте <https://www.sparc-climate.org/>, где также собраны актуальные источники данных измерений и литература о взаимодействии тропических стратосферы и тропосферы. Мощность тропопаузы также демонстрирует сезонную и широтную изменчивость [13, 14].

Свойствам тропопаузы умеренных широт и для территории РФ посвящено множество работ [6, 10, 11]. Представлены общие и региональные особенности эпизодов глубоких стратосферных вторжений для территории РФ, также обнаружена тенденция к увеличению контрастности тропопаузы в Арктике в период 1990–2007 гг. и оценены стратосферный и тропосферный вклад в эту тенденцию.

С появлением крупных баз данных (MERRA-2 (NASA); ERA-5 (Copernicus), NCEP), содержащих как непосредственно измерения характеристик атмосферы, так и измерения, содержащиеся в моделях реанализа, стало возможным детальное изучение изменчивости тропопаузы для разных географических широт [15–17]. Доступны также базы данных, содержащие радиозондовые измерения профилей характеристик атмосферы (CRABS, IGRA, «АЭРОСТАБ», SPARC), но их покрытие по поверхности Земли недостаточно плотное.

Использование данных, имеющих достаточно подробное временное и пространственное разрешение, позволяет провести детальные исследования и выявить значимые статистические закономерности климатических изменений тропопаузы. Среди основных результатов необходимо отметить обнаруженные тренды тропосферного потепления и стратосферного похолодания [18–23]. На основе анализа за последние десятилетия наблюдений отмечается различие между трендами температур у поверхности Земли и в тропосфере: вблизи поверхности Земли наблюдается положительный тренд температуры (глобально около $0,17\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ лет}$), а в тропосфере наблюдается ее отрицательный тренд (глобально около $-0,05\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ лет}$). Сообщается о положительном тренде увеличения высоты тропопаузы, который составляет в умеренных широтах порядка 10 м/год [24, 25].

В базе ERA-5 (Copernicus) [15, 16] собран один из наиболее подробных банков данных, включающий информацию по измеренным профилям характеристик атмосферы. Данные реанализа покрывают Землю сеткой $0,25^{\circ} \times 0,25^{\circ}$ (для широт Северного Кавказа линейное расстояние порядка 30 километров) и дают вертикальное разрешение в 37 слоев по уровню давления, начиная от высоты $\sim 50\text{ км}$ (слой № 0 банка данных ERA-5, соответствует уровню давления 1 мбар) и до условной поверхности (слой № 36 банка данных ERA-5, соответствует уровню давления 1000 мбар). Реанализ охватывает период с 1950 г. (на основе архивных данных отработавших искусственных спутников Земли и наземных наблюдений, а также актуальных метеоданных с 1979 г. по настоящее время) и представлен для нескольких часов в сутки.

В настоящей работе показана сезонная изменчивость тропопаузы и ее мощности над Владикавказом, расположенным в центральной части Северного Кавказа, на основе данных реанализа ERA-5, с использованием двух алгоритмов вычисления высоты тропопаузы: 1) тропопауза как слой выше и ниже холодной точки профиля температуры; 2) по определению Всемирной метеорологической организации. Также представлено сравнение данных реанализа с теоретическими профилями адиабаты и проводится статистический анализ трендов изменения высоты тропопаузы для Владикавказа, как следующих из теоретических представлений, так и полученных из данных реанализа.

Исходные данные

Использованы данные реанализа ERA-5 за период 1997–2021 гг. в виде ежедневных измерений в момент времени 13:00 каждого дня двух параметров: профиль высоты, соответствующий уровню давления в миллибарах (37 уровней), и значение температуры на этом уровне давления. Доступ к данным и статистическая обработка выполнены с использованием библиотек с открытым исходным кодом для языка Python.

Ряды ежедневных данных температуры на высоте 2 м над поверхностью доступны на информационном портале POWER [17], которые базируются на измерениях ближайших наземных пространственно разнесенных метеостанций, спутниковых наблюдениях и данных моделирования (модель реанализа MERRA-2). Ежедневные данные по температуре загружены для Владикавказа за период с 01.01.2003 по 31.12.2021 г.

Методика

Чтобы исследовать сезонную изменчивость высот нижней и верхней границ тропопаузы, а также вариации температуры внутри тропопаузы, использовались два независимых алгоритма.

Алгоритм холодной точки состоит из двух шагов: 1) определяется минимальная температура в столбе воздуха и выбирается некоторый интервал температур, который считается доверительным. Использовался 5-градусный доверительный интервал; 2) от поверхности (уровень 36) и от максимальной высоты (уровень 0) просматривается профиль температуры вверх и вниз. То есть точки профиля, где температура профиля превышает минимальную температуру на 5 градусов, считаются границами тропопаузы в том случае, если выше/ниже температура не опускается вновь ниже доверительной отметки. Таким образом, случай возникновения двух тропопауз учитывается этим алгоритмом как увеличенная мощность одной тропопаузы и внутренняя структура не выделяется.

Второй алгоритм определения границ тропопаузы соответствует определению Всемирной метеорологической организации. Алгоритм определения коридора по изменению величины градиента температуры между модельными уровнями (без интерполяции) больше 2,5 К/км аналогичен, и его отличает только критерий доверительного интервала.

Алгоритм определения границ тропопаузы применяется для профиля каждого дня года, в результате определяются три высоты: высота холодной точки, минимальная и максимальная высоты тропопаузы. Профили температуры столба атмосферы и определенные на них точки с границами тропопаузы представлены на рис. 1, на котором построены профили температуры через каждые 15 дней, остальные рисунки строились для ежедневных профилей. Дискретных уровней давления в базе данных 37 и алгоритм вычисления высоты холодной точки и верхней/нижней границ тропопаузы выбирает ближайший дискретный уровень, удовлетворяющий выбранному критерию без использования интерполяции. Высота определяется из уровня давления по гипсометрической формуле.

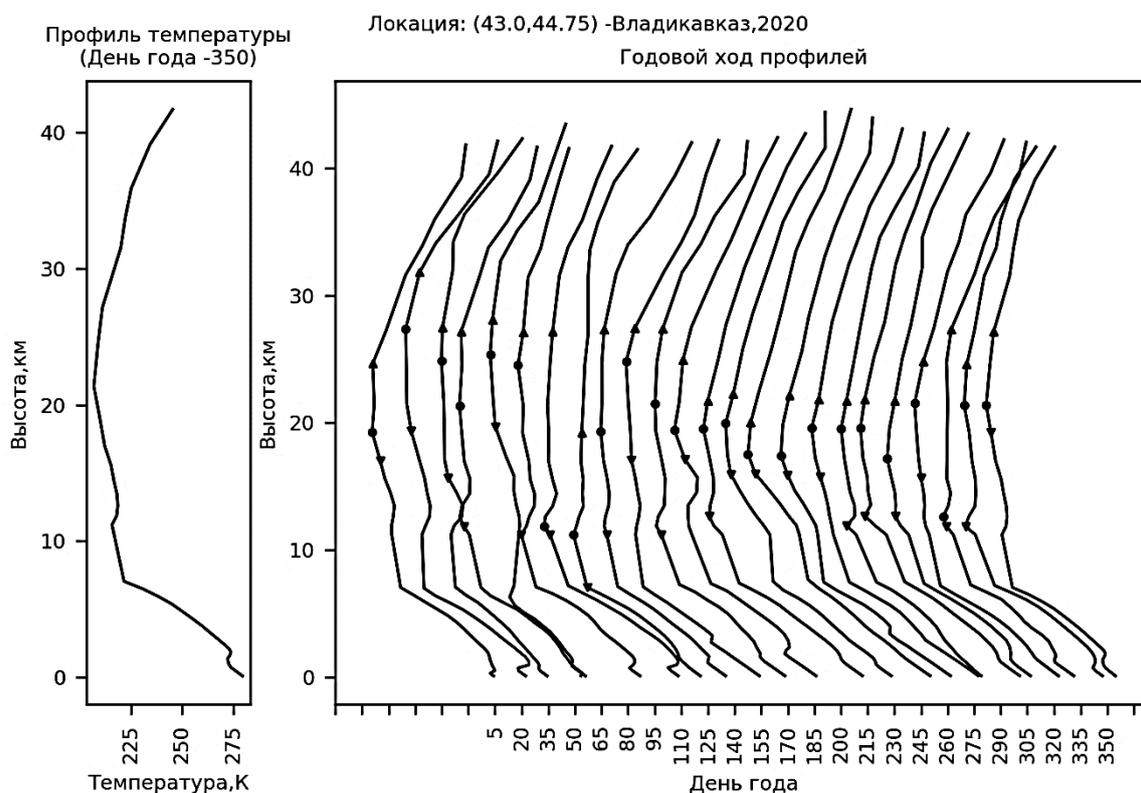


Рис. 1. Алгоритм определения коридора по равноудаленному от минимума превышению температуры +5 К / Fig. 1. Algorithm for determining the equidistant temperature interval +5 K

В работе приводятся результаты исследования различных алгоритмов определения границ тропопаузы, полученные на основе реанализа ERA-5 с 1997 по 2021 г. для г. Владикавказ, а также сравнение с теоретическими значениями профиля адиабатической температуры, который имеет расположенный в области высот тропопаузы острый минимум [26].

Результаты

Довольно сложные профили температуры выше 20-го слоя данных реанализа (≈ 10 км) и случаи возникновения двух тропопауз в осенне-зимний сезон, несколько реже весной и отсутствие этих случаев летом показаны на рис. 1. Профили температуры выше 20-го уровня подвержены значительным суточным вариациям, особенно в зимний сезон. Для некоторых из этих профилей температуры вторая тропопауза формируется в полной мере, но для большинства профилей критерий, при котором выделяется вторая тропопауза, не удовлетворяется и профиль остается характеризующим одну мощную тропопаузу. По этой причине здесь не анализируются отдельно случаи возникновения второй тропопаузы.

Годовая изменчивость тропопаузы и ее мощность, определенные по алгоритму 1, изображены на рис. 2. Сверху сплошной, штрихпунктирной и точечной линиями отмечены высота минимальной температуры (холодная точка), верхняя и нижняя границы тропопаузы соответственно, значения отсчитываются по правой шкале в километрах, шкала неравномерная. На том же рис. 2 снизу сплошной, штрихпунктирной и точечной кривыми показаны температуры, наблюдаемые на соответствующих уровнях, отсчитываемые по левой шкале в Кельвинах. Кривые границ тропопаузы и их температуры сглаживались по времени при помощи алгоритма скользящей средней за 10 дней, сплошная кривая показана несглаженной.

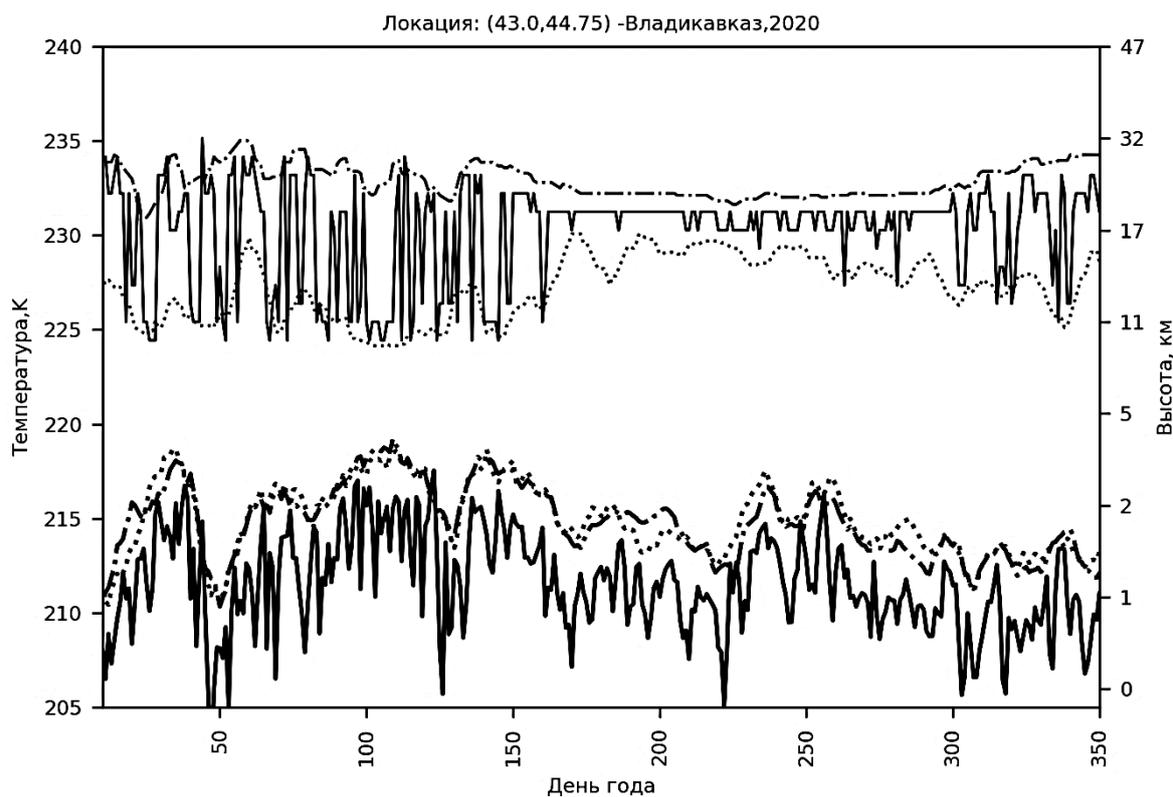


Рис. 2. Интервал высот тропопаузы (сверху, правая шкала) и температура тропопаузы (снизу, левая шкала) для Владикавказ за 2020 г. по данным ERA-5. Алгоритм определения коридора по превышению температуры над минимумом +5 К сверху и снизу / Fig. 2. Tropopause height interval (top, right scale) and tropopause temperatures (bottom, left scale) for Vladikavkaz for 2020 according to ERA-5 data.
Algorithm for determining the equidistant temperature interval +5 K

Нижняя граница тропопаузы (дни со 150-го по 250-й) расположена выше в летний сезон (рис. 2). При этом верхняя граница летней тропопаузы практически совпадает или даже несколько ниже среднегодовой верхней границы. При установлении летнего режима тропопаузы (приблизительно на 150-й день) с довольно малой мощностью в интервале 50–110 мбар (13–22 км) наблюдается уменьшение ее температуры на 5–7 градусов. При разрушении летнего режима тропопаузы (в районе 250-го дня) ее температура увеличивается приблизительно на 5 градусов. Однако высота и температура тропопаузы подвержены влиянию различных флуктуаций, и эти переходные режимы сохраняются менее 10 дней.

Мощность зимней тропопаузы в несколько раз больше, она занимает интервал высот от 10 до 250 мбар (от ~11 до 31 км) и так же подвержена суточным вариациям. Зимой/весной, до 150-го дня года, а также осенью/зимой, после 270-го дня года, в некоторые дни наблюдаются две тропопаузы (рис. 1, 2) и флуктуации границ тропопаузы, которые, вероятно, связаны с явлениями, приводящими к возникновению/исчезновению второй тропопаузы.

Возникновения двух тропопауз летом (со 150-го до 250-го дня года) не наблюдается, а в остальное время года они наблюдаются спорадически, что видно на рис. 1, 2 как увеличение мощности тропопаузы. Гораздо чаще наблюдается мощный слой порядка 10–20 км с приблизительно постоянной температурой. Можно предположить, что случаи возникновения второй тропопаузы (или увеличения мощности одной тропопаузы) связаны с термическим режимом вблизи поверхности, где в летние месяцы отмечается сухая погода, а в остальное время года вблизи поверхности зачастую имеется достаточно влаги.

Сезонная изменчивость мощности тропопаузы, построенная по градиентному алгоритму, представлена на рис. 3. Обозначения на рис. 3 аналогичны рис. 2. В отличие от рис. 2 здесь тропопауза гораздо мощнее и не видно выраженной летней тропопаузы, также верхняя и нижняя границы не показывают сезонной изменчивости. Эти отличия связаны с другим критерием определения мощности тропопаузы, сезонная изменчивость холодной точки совпадает с рис. 2. Тропопауза расположена между 3 и 22 мбар (9–43 км) в зимний период и между 8 и 12 мбар (10–31 км) в летний период.

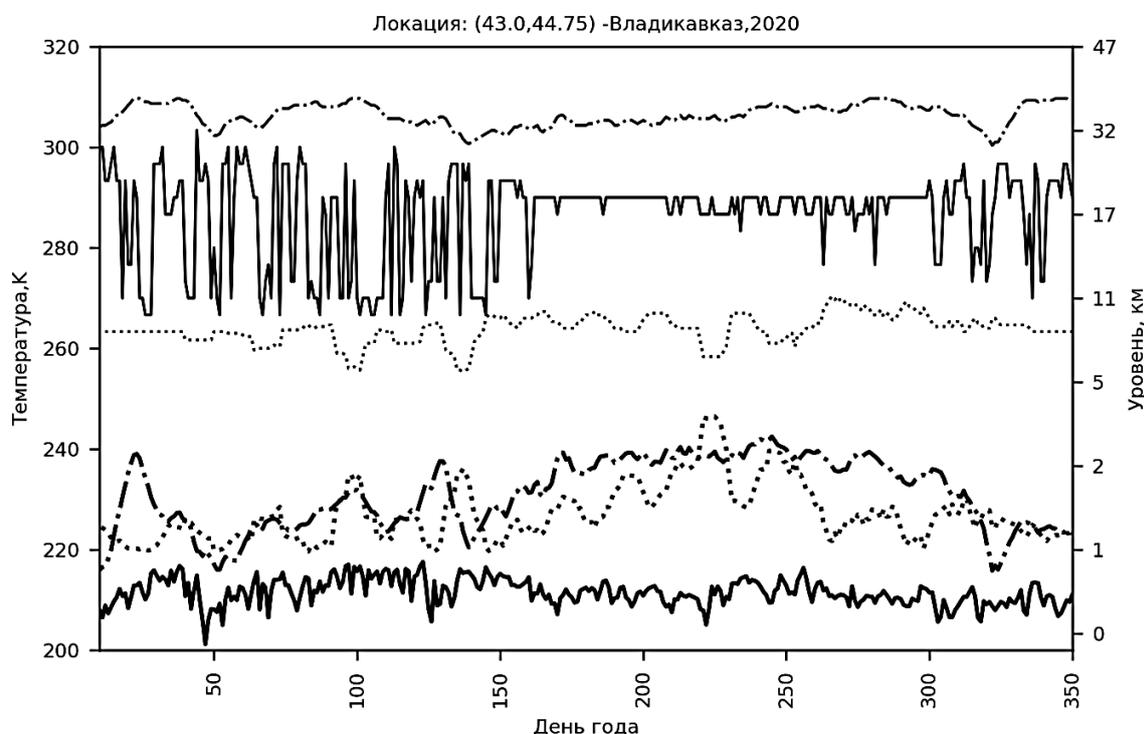


Рис. 3. Интервал высот тропопаузы и температура тропопаузы для Владикавказа за 2020 г. по данным ERA-5. Градиентный алгоритм. Обозначения аналогичны рис. 2 / Fig. 3. Tropopause height interval and tropopause temperatures for Vladikavkaz for 2020 according to ERA-5 data. Gradient algorithm. Designations are similar to Fig. 2

Теоретическая сезонная изменчивость тропопаузы

Для адиабаты $T(z, t)$ столба сжимаемой атмосферы справедливо выражение [26, формула (16)], которое имеет вид

$$T = \exp\left(-z \frac{g(\gamma-1)+\sqrt{\delta}}{2\gamma c_0^2}\right) \left[\frac{\gamma^2 c_0^4}{\delta} \left(C_1 \exp\left(\frac{z\sqrt{\delta}}{(\gamma-1)c_0^2}\right) - C_2 \right) \right]^{\frac{\gamma-1}{2\gamma}}, \quad (1)$$

где $\delta = g^2(\gamma - 1)^2$,

$$C_1 = T_b^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \left(\frac{T_{zb}}{T_b} + \frac{g(\gamma-1)+\sqrt{\delta}}{2\gamma c_0^2} \right), C_2 = T_b^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \left(\frac{T_{zb}}{T_b} + \frac{g(\gamma-1)-\sqrt{\delta}}{2\gamma c_0^2} \right),$$

$T_b(t)$ и $T_{zb}(t)$ – граничные условия для температуры вблизи поверхности и ее приземного градиента; $\gamma = 1,4$ – показатель адиабаты для атмосферного воздуха; $c_0^2 = \gamma R_a T$ – квадрат скорости звука; R_a – универсальная газовая постоянная атмосферного воздуха; g – ускорение свободного падения.

Примеры профилей адиабаты (1) изображены на рис. 4 сплошной и пунктирными линиями. Сплошная кривая (рис. 4) соответствует минимальной суточной температуре 14,0 °С для 15 июля 2020 г. для Владикавказа, а пунктирная кривая – максимальной суточной температуре 23,45 °С для того же дня. Высоты острых минимумов этих кривых разнесены на высоту 990 м и составляют 14 590 и 15 580 м соответственно (рис. 4), вычисления проводились при постоянной скорости звука $c_0 = 340$ м/с и граничном условии $T_{zb} = -0,0098$ К/м. Точечная прямая на рис. 4 соответствует линейной адиабате [1, 4].

Все профили T непрерывны и положительны на высотах до 100 км. Высота, на которой расположен острый минимум профиля (1), приблизительно соответствует высоте холодной точки тропопаузы и зависит от граничных условий T_b и T_{zb} для температуры и ее градиента на поверхности и скорости звука c_0 .

Высота острого минимума (1) определяется в основном приземной температурой при неизменном сухадиабатическом приземном градиенте температуры. Приземные температуры в течение суток непрерывно и относительно плавно меняются в диапазоне от минимальной ночной температуры до максимальной дневной и обратно. Соответственно, и высота точки минимума непрерывно в течение суток меняется от $\approx 14\,590$ до $\approx 15\,580$ м. Средняя высота, на которой находится острый минимум адиабаты, составляет 15 085 м. Эта высота удовлетворительно соответствует наблюдаемым высотам холодной точки тропопаузы.

Годовые изменения высот острых минимумов (1), вычисленных с использованием минимальных, средних и максимальных поверхностных температур для Владикавказа в 2020 г., показаны на рис. 5. Адиабата T зависит от параметра c_0^2 , с увеличением которого высота острого минимума уменьшается, а с уменьшением – увеличивается.

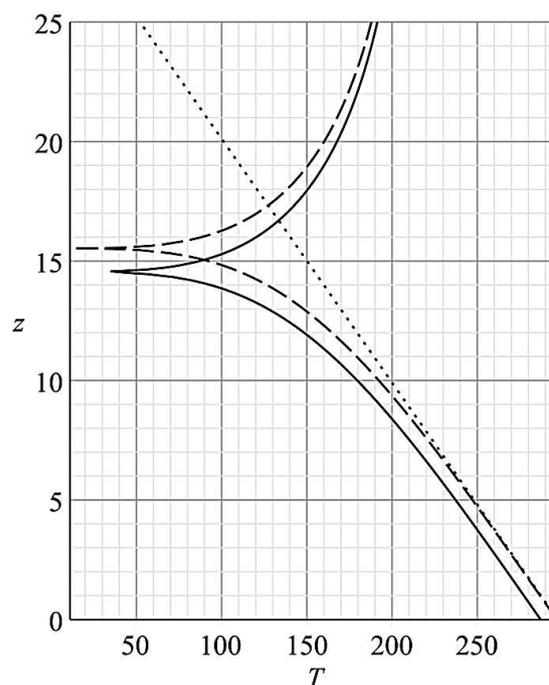


Рис. 4. Профили адиабаты (1) при различных значениях приземной температуры T_b , выбранной из измерений для 15 июля 2020 г. для Владикавказа. Сплошная кривая – минимальная суточная температура (14,0 °С), пунктирная кривая – максимальная суточная температура (23,45 °С). По оси абсцисс – температура, К, по оси ординат – высота, км. Использовалось граничное условие $T_{zb} = -0,0098$ К/м. Точечная прямая – линейная адиабата для максимальной суточной температуры / Fig. 4. Profiles (1) at various surface temperatures T_b from measurements for July 15, 2020 for Vladikavkaz. The solid curve is the minimum daily temperature (14.0 °С), the dotted curve is the maximum daily temperature (23.45 °С). The abscissa is the temperature, Kelvin, the ordinate is the altitude, km. The boundary condition $T_{zb} = -0.0098$ K/m is used. The dotted line is the linear adiabat for the maximum daily temperature



Рис. 5. Сезонная изменчивость высоты, км, острых минимумов адиабаты (1), вычисленных для минимальных (сплошная кривая), максимальных (кривая с тонким пунктиром) и средней (пунктирная кривая) температур на высоте 2 км по данным MERRA-2 для Владикавказа за 2020 г.
/ Fig. 5. Seasonal height variability, km, of sharp adiabatic minima (1) calculated for the minimum (solid curve), maximum (thin curve) and average (dashed curve) temperatures at a height of 2 km according to MERRA-2 data for Vladikavkaz for 2020

На рис. 5 показана сезонная изменчивость средней (сплошная кривая), минимальной (пунктирная кривая) и максимальной (точечная кривая) высот острого минимума адиабаты (1). Летом они располагаются выше, а зимой – ниже. Сезонные различия составляют порядка 2 км. Также видно, что интервал высот, занимаемый минимальной и максимальной высотами особой точки (1), практически не меняется в летние месяцы и составляет порядка 1000 м, а в некоторые дни осенне-зимне-весеннего сезона этот интервал может уменьшаться до 500 м и менее. Наблюдаются также суточные вариации как высоты тропопаузы, так и ее мощности, связанные с изменением температурного режима атмосферы вблизи поверхности. Качественно сезонная изменчивость нижней границы тропопаузы, построенной по алгоритму холодной точки (рис. 2), ведет себя так же, как и нижняя граница теоретической кривой (рис. 5).

Абсолютная (измеряемая) температура столба атмосферы подчиняется уравнению теплопроводности, которое для этого случая записано в [26]. Для решения этого уравнения требуется задание не только начального условия в виде профиля абсолютной температуры атмосферы в некоторый момент времени, но и двух граничных условий (температуры поверхности и ее градиента), отслеживающих температуру воздуха вблизи поверхности достаточно подробно во времени на большой площади ($0,25^\circ \times 0,25^\circ$), с учетом осадков, влажности, мощности источников/стоков тепла в атмосфере и турбулентности.

Не располагая столь подробной информацией за исследуемый период, ограничимся качественным анализом первого слагаемого в правой части уравнения теплопроводности. Это слагаемое описывает источники/стоки тепла, действующие в атмосфере, и представляет собой скорость изменения T . В тропосфере ниже 10 км адиабата (1) мало отличается от линейного профиля (рис. 4, точечная прямая). На высотах тропопаузы T имеет острый минимум, который имеет суточную и годовую скорость изменения и существенно зависит от влажности вблизи поверхности.

Из рис. 5 видно, что высоты острых минимумов (1) пропорциональны поверхностным температурам. Также суточные изменения температуры поверхности могут являться одной из причин вариаций высоты холодной точки тропопаузы. Влияние приземного градиента температуры на адиабату также значительно.

Статистический анализ

По данным ERA-5 (за период с 25.01.1997 по 30.01.2021 г.) вычислялись тренды минимальной температуры и высоты холодной точки тропопаузы, использовалась линейная регрессия. Линейные тренды вычислялись для каждого месяца, для каждого сезона и для всего ряда данных отдельно. Результаты этих вычислений сведены в табл. 1–2.

Таблица 1 / Table 1

Высота холодной точки тропосферы (H_{\min} , м) по результатам регрессионного анализа (линейная гипотеза) для Владикавказа / The height of the cold point of the troposphere (H_{\min} , m) according to the results of regression analysis (linear hypothesis) for Vladikavkaz

Период	Значение (y-пересечение)	Уклон тренда (в год)	Коэффициент корреляции Пирсона	Стандартная ошибка
Весь период	17995	0,0672	0,04054	0,0177
Декабрь – январь – февраль	19317	0,1497	0,01678	0,1918
Март – апрель – май	17304	0,228	0,0287	0,1691
Июнь – июль – август	18025	0,2626	0,0732	0,0761
Сентябрь – октябрь – ноябрь	17444	0,3504	0,0869	0,086
Январь	19765	1,1686	0,0420	1,01
Февраль	19160	-0,8003	-0,0268	1,1535
Март	17534	1,737	0,0675	0,942
Апрель	17118	0,2924	0,0118	0,9266
Май	17208	0,1206	0,0059	0,7505
Июнь	17319	1,7099	0,1034	0,6137
Июль	18627	0,3477	0,0479	0,2663
Август	18118	0,3344	0,0633	0,1935
Сентябрь	17711	0,5457	0,0939	0,2158
Октябрь	17248	1,4743	0,1349	0,3974
Ноябрь	17388	1,0809	0,0636	0,6325
Декабрь	19134	0,3910	0,0174	0,8242

Для выяснения сезонной изменчивости трендов и значений высоты холодной точки строились ряды данных в эти сезоны, например, для сезона декабрь – январь – февраль строился ряд ежедневных значений в эти месяцы последовательно для каждого года, потом по построенному ряду проводился анализ. Вычислялись также тренды для верхней и нижней границ тропопаузы, построенные по алгоритму 1, они незначительно отличаются от приведенных в таблице значений.

Из табл. 1 видно, что высота холодной точки тропопаузы за весь период наблюдений имеет положительный тренд $\approx 0,067$ м в год. Сезонные тренды в 2–4 раза больше и также положительны. Зимой холодная точка тропопаузы расположена выше, а в другие сезоны – ниже, при этом в весенний и осенний периоды ниже, чем в летний период. Более подробную картину показывает анализ, проведенный для каждого месяца. Месячные тренды достигают значений 1,7 м/год. Отметим, что с сентября по ноябрь для Владикавказа холодная точка тропопаузы расположена ниже, чем она наблюдается в июле-августе. Наиболее низкое значение наблюдается в апреле, несколько большее – в мае, июне, октябре и ноябре.

Таблица 2 Table 2

Температура холодной точки тропосферы (T_{\min} , К) по результатам регрессионного анализа (линейная гипотеза) для Владикавказа / Temperature of the cold point of the troposphere (T_{\min} , К) according to the results of regression analysis (linear hypothesis) for Vladikavkaz

Период	Значение (y-пересечение)	Уклон тренда (в год)	Коэффициент корреляции Пирсона	Стандартная ошибка
Весь период	210,75	-0,00001	-0,00834	0,00001
Декабрь – январь – февраль	208,43	0,000256	0,049	0,00011
Март – апрель – май	211,2	0,000009	0,0019	0,00010
Июнь – июль – август	211,99	-0,00021	-0,0539	0,00008
Сентябрь – октябрь – ноябрь	211,26	-0,00014	-0,03657	0,00008
Январь	208,31	-0,00033	-0,0218	0,00056
Февраль	208,62	0,002088	0,10923	0,00073
Март	209,88	0,000084	0,00551	0,00056
Апрель	211,46	-0,00057	-0,0405	0,00052
Май	212,44	0,000076	0,006468	0,00043
Июнь	213,03	-0,000368	-0,04218	0,00032
Июль	212,23	-0,000626	-0,06404	0,00035
Август	210,57	-0,000382	-0,03058	0,00046
Сентябрь	210,91	0,000003	0,00025	0,00045
Октябрь	212,34	-0,00096	-0,0952	0,00037
Ноябрь	210,43	-0,00014	-0,01278	0,00040
Декабрь	208,34	0,000922	0,076	0,00044

Из табл. 2 видно, что минимальная температура тропопаузы за весь период наблюдений имеет слабый отрицательный тренд $-0,00001$ К в год. Сезонные тренды гораздо больше и разнонаправлены: зимой и весной они преимущественно положительны, а летом и осенью – отрицательны.

Также в табл. 1–2 показана связь между трендами высоты и температуры холодной точки: в летние и осенние месяцы температура имеет отрицательный тренд (за исключением сентября, где почти нулевой тренд), а высота, на которой она расположена, нарастает. Весной и зимой такая связь не просматривается и поведение трендов более сложное.

Увеличение высоты холодной точки тропопаузы (в летний сезон) составляет $0,37$ – $1,71$ м/год ($3,7$ – $17,1$ м/10 лет), что меньше величины, найденной другими исследователями [25]. При этом уменьшение минимальной температуры тропопаузы по данным ERA-5 составило $-0,000368 \div -0,000626$ К/год, или $-0,005$ К/10 лет, что совпадает по знаку, но по модулю меньше найденного ранее в [24].

Теоретические тренды высоты тропопаузы строятся с использованием трендов приземной температуры на высоте 2 м для Владикавказа, вычисленные по данным MERRA-2 (NASA), которые приведены в работе [27]. Тренд температуры на высоте 2 м равен $0,0445$ К/год, или $\approx 0,45$ К/10 лет. С помощью этих данных несложно вычислить тренды изменения высоты холодной точки тропопаузы, используя формулу для адиабаты (1). Увеличение приземной температуры на $0,045$ К/год приводит к подъему высоты острого минимума адиабаты T на $\approx 4,5$ м при температуре поверхности 287 К. Таким образом, тренд высоты острого минимума адиабаты (1) является положительным. Качественное соответствие теоретических и измеренных трендов годовых изменений высоты холодной точки тропопаузы является удовлетворительным. Вычисленные значения трендов высоты холодной точки тропопаузы и теоретически вычисленные значения трендов удовлетворительно соответствуют ранее опубликованным данным для умеренных широт РФ по радиозондовым данным [25].

Обсуждение

Сложность и важность процессов, происходящих на высотах тропопаузы в умеренных широтах, требуют тщательного и всестороннего изучения и привлекают внимание исследователей по всему миру. Основным методом исследования климатических изменений в области тропопаузы

являются данные наземных, радиозондовых и спутниковых измерений и построенных на их основе моделей реанализа.

В этой работе используются данные ERA-5 для анализа сезонной изменчивости тропопаузы на Северном Кавказе, вблизи города Владикавказа. Кроме того, для понимания механизмов сезонной изменчивости тропопаузы привлекается аналитическое решение для адиабатических процессов в столбе сжимаемой атмосферы [26].

На рис. 5 представлено теоретическое предсказание сезонной изменчивости высоты тропопаузы на основании данных о температуре поверхности. Сравнение измеренной и теоретически вычисленной сезонной изменчивости нижней границы тропопаузы показывает удовлетворительное совпадение (рис. 2, 5). Эта изменчивость объясняется сезонными изменениями температуры поверхности. Только летом наблюдения показывают относительное постоянство высоты холодной точки тропопаузы, в остальное время границы тропопаузы подвержены влиянию флуктуаций и высота холодной точки и верхней/нижней границ не являются постоянной на интервале времени более суток. Причины такого поведения могут быть найдены в характере суточных изменений приземной температуры, на основании которой вычислены высоты на рис. 5. Отличия отмечаются в предсказании мощности слоя тропопаузы.

Сезонная изменчивость верхней границы отличается от теоретической, также отличается и сезонная изменчивость мощности слоя тропопаузы во все сезоны, за исключением летнего. Эти отличия могут быть обусловлены возникновением второй тропопаузы и объясняться сложным пространственным распределением наиболее часто встречающихся граничных условий для температуры и ее градиента на поверхности.

Для сложной подстилающей поверхности горных и предгорных районов Северного Кавказа данные реанализа MERRA-2, из которых получены приземные температуры, имеют шаг сетки $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ (и, соответственно, данные усреднены по площади $\approx 30 \times 30$ км), что не позволяет исключить существование различных граничных условий на поверхности. Несомненно, на части поверхности имеются граничные условия, отличающиеся от принятых при построении рис. 5 значений, особенно это вероятно в осенние, зимние и весенние месяцы, когда вблизи поверхности влагосодержание значительно. Адиабата T существенно зависит от приземного градиента температуры, который является вторым граничным условием. Приземный градиент температуры, несомненно, характеризуется неоднозначностью для столь большого участка сложной поверхности (при построении рис. 5 использовалась константа, равная сухоадиабатическому градиенту). В результате совместного действия сложно распределенных по поверхности двух граничных условий можно ожидать возникновения нескольких профилей (1) с острым минимумом на разной высоте. Следовательно, и измеряемая абсолютная температура для этой площади будет формироваться множеством профилей T , характеризующих острыми минимумами на разных высотах.

Можно предположить, что случаи возникновения второй тропопаузы (и случаи увеличения мощности одной тропопаузы) связаны с термическим режимом на нижней границе, поскольку летние месяцы характеризуются сухой погодой, а в остальное время года вблизи поверхности зачастую имеется достаточно влаги.

Например, при увеличении влагосодержания приземный градиент температуры увеличивается от сухоадиабатического T_{zb} до влажно-адиабатического $T'_{zb} \approx -0,007$ К/м при насыщенном влагой воздухе. Увеличение приземного градиента температуры приводит к увеличению высоты острого минимума адиабаты T до $\approx 50-60$ км. А при неизменной температуре поверхности T_b изменение приземного градиента температуры от сухоадиабатического градиента $T_{zb} = -0,0098$ К/м до значения $T_{zb}^* = -0,0092$ К/м приводит к увеличению высоты острого минимума на ≈ 2000 м.

Такие и большие значения градиента вполне можно ожидать в затененных и влажных/заснеженных ложбинах, склонах и других подобных участках сложного рельефа. При градиенте $T_{zb}^{**} = -0,0078$ К/м адиабата (1) показывает возникновение острого минимума на высоте $\approx 27\ 600$ м для суточного изменения температуры от 14 до 23,45 °С. При этом суточные изменения высоты острого минимума профиля (1) охватывают гораздо больший интервал высот, порядка 3560 км, охлаждая более мощный слой атмосферы на больших высотах.

Если в части территории площадью $\approx 30 \times 30$ км имеются участки рельефа, характеризующиеся в среднем двумя различными приземными градиентами температуры, то над такой территорией могут наблюдаться две тропопаузы. Аналогичные рассуждения можно провести и при описании механизма возникновения трех или большего количества тропопауз.

В рамках теоретического описания находят качественное объяснение довольно слабо выраженные процессы охлаждения холодной точки тропопаузы при установлении летнего режима (180-й день, рис. 2) и некоторого нагрева тропопаузы при его разрушении (≈ 280 -й день, рис. 2). Действительно, если при установлении летнего режима тропопаузы на большей части площади $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ формируется одно граничное условие $T_{zb} = -0,0098$ К/м над всей площадью, то на высоте тропопаузы действует один сток тепла вида (1) в уравнении теплопроводности, приводящий к более сильному выхолаживанию тропопаузы. С началом осенних дождей вновь возникает несколько граничных условий и летний режим тропопаузы разрушается. При этом в части площади территории возникает граничное условие $T_{zb}^* \neq T_{zb}$, которое приводит к появлению второй тропопаузы или увеличению мощности одной тропопаузы, в результате один острый минимум T , соответствующий T_{zb} , наблюдается реже, и соответствующая холодная точка тропопаузы теплеет. Ежедневные пульсации как высоты тропопаузы, так и ее температуры приводят к выравниванию температуры тропопаузы в течение нескольких дней.

Для влажно-адиабатического приземного градиента температуры $T'_{zb} \approx -0,007$ К/м высота острого минимума T приходится на 50–60 км. При дальнейшем увеличении приземного градиента температуры острый минимум T исчезает. При этом исчезает также и рост адиабатической температуры выше острого минимума. Адиабата T чувствительна к точности задания градиента температуры и имеет зависимость от скорости звука, принимаемой здесь константой для всего столба атмосферы. На основании адиабаты T величина температуры холодной точки оценена быть не может, это можно сделать только в результате решения уравнения теплопроводности.

Заключение

Показана сезонная изменчивость высоты тропопаузы над г. Владикавказом, РСО-Алания, РФ. Применены два алгоритма вычисления высоты и мощности тропопаузы, которые отражают основные ее свойства. Проведено сравнение наблюдаемой высоты холодной точки тропопаузы и с прогнозом на основании теоретической адиабаты, показывающее удовлетворительное согласие. Наблюдаемые тренды высоты (табл. 1) и температуры холодной точки тропопаузы удовлетворительно соответствуют теоретическим значениям, полученным на основе формулы для адиабаты (1). Теоретически вычисленная сезонная изменчивость нижней границы тропопаузы качественно соответствует наблюдаемой нижней границе (рис. 2). Вычисленные тренды изменений высоты холодной точки тропопаузы удовлетворительно соответствуют трендам, вычисленным на основе теоретических представлений. Это показывает возможность использования простых формул для описания некоторых характеристик тропопаузы.

Список источников

1. Скорер Р. Аэрогидродинамика окружающей среды. М.: Мир, 1980. 551 с.
2. Моханкумар К. Взаимодействие стратосферы и тропосферы. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2011. 452 с.
3. Эккарт К. Гидродинамика океана и атмосферы. М.; Ижевск: Регулярная и хаотическая динамика, 2004. 238 с.
4. Гилл А. Динамика атмосферы и океана: в 2 т. М.: Мир, 1986. Т. 1. 396 с. Т. 2. 415 с.
5. Salby M.L. Fundamentals of Atmospheric Physics. San Diego: Elsevier Science, Academic Press, 1996. 627 p.
6. Маховер З.М. Климатология тропопаузы. Л.: Гидрометеоиздат, 1983. 254 с.
7. Makhover Z.M. Features of the tropopause distribution over the globe // Meteor. Geophys. 1979. Vol. 12. P. 33–39.
8. Holton J.R., Haynes P.H., McIntyre M.E., Douglass A.R., Rood R.B., Pfister L. Stratosphere-troposphere exchange // Rev. Geophys. 1995. Vol. 33. P. 403–439.
9. Hoinka K.P. Temperature, humidity, and wind at the global tropopause // Mon. Weather Rev. 1999. Vol. 127. P. 2248–2265.
10. Иванова А.Р. Тропопауза – многообразие определений и современные подходы к идентификации // Метеорология и гидрология. 2013. № 12. С. 23–36.
11. Иванова А.Р. Динамика внутритропической тропопаузы Северного полушария: автореф. дис. ... д-ра физ.-мат. наук. М.: Гидрометеор. науч.-исслед. центр, 2011.
12. Highwood E.J., Hoskins B.J. The tropical tropopause // Quart. J. Roy. Meteor. Soc. 1998. Vol. 124. P. 1579–1604.

13. Muhsin M., Sunilkumar S.V., Venkat Ratnam M., Krishna Murthy B.V., Parameswaran K. Seasonal and Diurnal Variations of Tropical Tropopause Layer (TTL) Over the Indian Peninsula // *J. of Geophysical Research: Atmospheres*. 2017. P. 12672–12687. Doi: 10.1002/2017JD027056.

14. Zhang J. Tropopause Characteristics Based on Long-Term ARM Radiosonde Data: A Fine-Scale Comparison at the Extratropical SGP Site and Arctic NSA Site // *Atmosphere*. 2022. Vol. 13 (965). P. 1–15. Doi: 10.3390/atmos13060965.

15. Muñoz-Sabater J., Dutra E., Agustí-Panareda A., Albergel C., Arduini G., Balsamo G., Boussetta S., Choulga M., Harrigan S., Hersbach H., Martens B., Miralles D.G., Piles M., Rodríguez-Fernández N.J., Zsoter E., Buontempo C., Thépaut J.-N. ERA5-Land: A state-of-the-art global reanalysis dataset for land applications // *Earth Syst. Sci. Data*. 2021. Vol. 13 (9). P. 4349–4383, <https://doi.org/10.5194/essd-2021-82>.

16. Hersbach H., Bell B., Berrisford P., Biavati G., Horányi A., Muñoz Sabater J., Nicolas J., Peubey C., Radu R., Rozum I., Schepers D., Simmons A., Soci C., Dee D., Thépaut J.-N. ERA5 hourly data on pressure levels from 1959 to present // Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS). 2018. Doi: 10.24381/cds.bd0915c6.

17. MERRA-2 (NASA's Modern Era Retrospective Analysis for Research and Applications). URL: <https://gmao.gsfc.nasa.gov/reanalysis/MERRA-2/>. Doi: 10.5067/VJAFPLI1CSIV.

18. Hurrell J. W., Trenberth K.E. Difficulties in obtaining reliable temperature trends: Reconciling the surface and satellite microwave sounding unit records // *J. Climate*. 1998. Vol. 11. P. 945–967.

19. Seidel D.J., Randel W.J. Variability and trends in the global tropopause estimated from radiosonde data // *J. Geophys. Res.* 2006. Vol. 111. D21101. Doi:10.1029/2006JD007363.

20. Randel W.J., Wu F., Gaffen D.J. Interannual variability of the tropical tropopause derived from radiosonde data and NCEP reanalyses // *J. Geophys. Res.* 2000. Vol. 105. 15.509–15.524.

21. Santer B.D., Wehner M.F., Wigley T.M.L., Sausen R., Melhl G.A., Taylor K.E., Ammann C., Arblaster J., Washington W.M., Boyle J.S., Brüggemann W. Contributions of anthropogenic and natural forcing to recent tropopause height changes // *Science*. 2003. Vol. 301, № 5632. P. 479–483.

22. Sausen R., Santer B. Use of changes in tropopause height to detect human influences on climate // *Meteorolog. Z.* 2003. № 12. P. 131–136.

23. Звягинцев А.М., Крученицкий Г.М., Черников А.А. Изменчивость трендов вертикального распределения озона в стратосфере и их связи с долговременными изменениями высоты тропопаузы // *Изв. РАН. ФАО*. 2005. Т. 41, № 4. С. 476–486.

24. Стерин А.М. О чувствительности оценок трендов температуры тропосферы и нижней стратосферы по данным радиозондирования. 1. Выбор массива данных, длины ряда и методов анализа // *Метеорология и гидрология*. 2004. № 5. С. 21–36.

25. Козлова Л.Ф., Стерин А.М. Исследование многолетней изменчивости параметров тропопаузы над территорией РФ по радиозондовым данным // *Труды Всерос. науч.-исслед. ин-та гидрометеорологической информации – мирового центра данных*. 2014. № 178. С. 47–60.

26. Радионов А.А. Математическая модель равновесия столба сжимаемой атмосферы. Часть 1: Стационарные решения для температуры // *Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки*. 2022. № 3. С. 79–90. Doi: 10.18522/1026-2237-2022-3-79-90.

27. Каменецкий Е.С., Радионов А.А., Тимченко В.Ю., Панаэтова О.С. Изменчивость аэрозольной оптической толщины в горных и предгорных районах Северной Осетии по данным спутниковых измерений // *Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки*. 2021. № 3. С. 51–63. Doi: 10.18522/1026-2237-2021-3-51-63.

References

1. Skorer R. *Aerohydrodynamics of the environment*. Moscow: Mir Publ.; 1980. 551 p. (In Russ.).
2. Mohankumar K. *Interaction of the stratosphere and the troposphere*. Moscow: FIZMATLIT Publ.; 2011. 452 p. (In Russ.).
3. Eckart C. *Hydrodynamics of the ocean and atmosphere*. Moscow; Izhevsk: Regul'yarnaya i khaoticheskaya dinamika Publ.; 2004. 238 p. (In Russ.).
4. Gill A. *Dynamics of the atmosphere and ocean*: in 2 vols. Moscow: Mir Publ.; 1986. Vol. 1. 396 p. Vol. 2. 415 p. (In Russ.).
5. Salby M. L. *Fundamentals of Atmospheric Physics*. San Diego: Elsevier Science, Academic Press; 1996. 627 p.
6. Makhover Z. M. *Tropopause climatology*. Leningrad: Gidrometeoizdat Publ.; 1983. 254 p. (In Russ.).
7. Makhover Z. M. Features of the tropopause distribution over the globe. *Meteor. Geophys.* 1979;12:33-39.
8. Holton J. R. Haynes P.H., McIntyre M.E., Douglass A.R., Rood R.B., Pfister L. Stratosphere-troposphere exchange. *Rev. Geophys.* 1995;33:403-439.
9. Hoinka K.P. Temperature, humidity, and wind at the global tropopause. *Mon. Weather Rev.* 1999;127:2248-2265.

10. Ivanova A. R. Tropopause - a variety of definitions and modern approaches to identification. *Meteorologiya i gidrologiya = Meteorology and Hydrology*. 2013;(12):23-36. (In Russ.).
11. Ivanova A. R. *Dynamics of the extratropical tropopause of the Northern Hemisphere*. Dissertation Thesis. Moscow: Hydrometeorological Research Center Press; 2011. (In Russ.).
12. Highwood E. J., Hoskins B. J. The tropical tropopause. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.* 1998;124:1579-1604.
13. Muhsin M., Sunilkumar S. V., Venkat Ratnam M., Krishna Murthy B. V., Parameswaran K. Seasonal and Diurnal Variations of Tropical Tropopause Layer (TTL) Over the Indian Peninsula. *J. of Geophysical Research: Atmospheres*. 2017:12672-12687, doi: 10.1002/2017JD027056.
14. Zhang J. Tropopause Characteristics Based on Long-Term ARM Radiosonde Data: A Fine-Scale Comparison at the Extratropical SGP Site and Arctic NSA Site. *Atmosphere*. 2022;13:1-15, doi: 10.3390/atmos13060965.
15. Muñoz-Sabater J., Dutra E., Agustí-Panareda A., Albergel C., Arduini G., Balsamo G., Boussetta S., Choulga M., Harrigan S., Hersbach H., Martens B., Miralles D. G., Piles M., Rodríguez-Fernández N. J., Zsoter E., Buontempo C., Thépaut J.-N.: ERA5-Land: A state-of-the-art global reanalysis dataset for land applications, *Earth Syst. Sci. Data Discuss*. 2021;13(9):4349-4383, <https://doi.org/10.5194/essd-2021-82>.
16. Hersbach H., Bell B., Berrisford P., Biavati G., Horányi A., Muñoz Sabater J., Nicolas J., Peubey C., Radu R., Rozum I., Schepers D., Simmons A., Soci C., Dee D., Thépaut J.-N. ERA5 hourly data on pressure levels from 1959 to present. *Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS)*. 2018, doi: 10.24381/cds.bd0915c6.
17. *MERRA-2 (NASA's Modern Era Retrospective-Analysis for Research and Applications)*. Available from: <https://gmao.gsfc.nasa.gov/reanalysis/MERRA-2/>, doi: 10.5067/VJAFPLI1CSIV.
18. Hurrell J. W., Trenberth K. E. Difficulties in obtaining reliable temperature trends: Reconciling the surface and satellite microwave sounding unit records. *J. Climate*. 1998;11:945-967.
19. Seidel D. J., Randel W. J. Variability and trends in the global tropopause estimated from radiosonde data. *J. Geophys. Res.* 2006;111:D21101, doi: 10.1029/2006JD007363.
20. Randel W.J., Wu F., Gaffen D.J. Interannual variability of the tropical tropopause derived from radiosonde data and NCEP reanalyses. *J. Geophys. Res.* 2000;105:15.509-15.524.
21. Santer B.D., Wehner M.F., Wigley T.M.L., Sausen R., Melhl G.A., Taylor K.E., Ammann C., Arblaster J., Washington W.M., Boyle J.S., Brüggemann W. Contributions of anthropogenic and natural forcing to recent tropopause height changes. *Science*. 2003;301(5632):479-483.
22. Sausen R., Santer B. Use of changes in tropopause height to detect human influences on climate. *Meteorolog. Z.* 2003;(12):131-136.
23. Zvyagintsev A.M., Kruchenitsky G. M., Chernikov A. A. Variability in trends in the vertical distribution of ozone in the stratosphere and their connection with long-term changes in the height of the tropopause. *Izv. RAS, FAO = Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2005;41(4):476-486. (In Russ.).
24. Sterin A.M. On the sensitivity of estimates of troposphere and lower stratosphere temperature trends from radiosounding data. 1. Selection of data array, series length and analysis methods. *Meteorologiya i gidrologiya = Meteorology and Hydrology*. 2004;(5):21-36. (In Russ.).
25. Kozlova L.F., Sterin A.M. Study of long-term variability of tropopause parameters over the territory of the Russian Federation according to radiosonde data. *Proceedings of the All-Russian Research Institute of Hydrometeorological Information - World Data Center*. 2014;(178):47-60. (In Russ.).
26. Radionoff A. A. Mathematical model of equilibrium of the column of compressible atmosphere. Part 1. Stationary solution for temperature. *Izv. vuzov. Sev.-Kavk. region. Estestv. nauki = Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science*. 2022;(3):79-90, doi: 10.18522/1026-2237-2022-3-79-90. (In Russ.).
27. Kamenetsky E. S., Radionoff A. A., Timchenko V. U., Panaetova O. S. On variability of aerosol optical thickness in mountain, foothill and plain areas of the Northern Caucasian based on satellite measurements MODIS. *Izv. vuzov. Sev.-Kavk. region. Estestv. nauki = Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science*. 2021;(3):51-63, doi: 10.18522/1026-2237-2021-3-51-63.

Информация об авторах

А.А. Радионов – кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории математического моделирования.

В.Ю. Тимченко – соискатель, лаборатория математического моделирования.

Information about the authors

A.A. Radionoff - Candidate of Science (Technical Science), Senior Researcher, Department of Mathematical Modeling.
V.Yu. Timchenko - Applicant, Department of Mathematical Modeling.

Статья поступила в редакцию 12.04.2023; одобрена после рецензирования 23.05.2023; принята к публикации 20.06.2023.
The article was submitted 12.04.2023; approved after reviewing 23.05.2023; accepted for publication 20.06.2023.

Научная статья

УДК 502.171:546.212:574.58

doi: 10.18522/1026-2237-2023-3-131-139

ОПЫТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ МЕСТ РАЗМЕЩЕНИЯ ОТХОДОВ В ВОДООХРАННЫХ ЗОНАХ

Г.И. Скрипка¹, В.В. Сапрыгин², О.В. Ивлиева³, Л.А. Беспалова⁴, В.В. Глинка⁵✉

^{1, 2, 3, 4, 5}Российский научно-исследовательский институт комплексного использования и охраны водных ресурсов, Ростов-на-Дону, Россия

^{3, 4}Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, Россия

¹skripka.grisha@yandex.ru

²vv.saprygin@gmail.com

³ivlieva.o@mail.ru

⁴bespalowaliudmila@yandex.ru

⁵vadim-glinka@mail.ru✉

Аннотация. Размещение отходов производства и потребления в водоохраных зонах водных объектов относится к нарушениям водного законодательства Российской Федерации. Использование материалов, полученных с помощью БПЛА, значительно расширяет возможности определения складированных отходов. БПЛА применяются для оперативного выявления несанкционированных мест размещения отходов в границах водоохраных зон Цимлянского водохранилища. В работе представлены возможности использования ортофотопланов и фотоматериалов, полученные в ходе натурных обследований, которые выполнены РосНИИВХ в 2019–2021 гг. По результатам исследования наибольшее скопление твердых бытовых отходов приурочено к населённым пунктам. Наибольшее количество складированных в водоохранной зоне отходов находится на территории Дубовского и Цимлянского районов Ростовской области, а также на территории Калачёвского района Волгоградской области. Обнаруженные с помощью БПЛА свалочные очаги по составу преобладающих в них отходов были разделены на пять групп: твердые бытовые отходы, строительные отходы, органические отходы, металл и неопределенного состава. До 42 % свалочных отходов в водоохранной зоне водохранилища приходится на твердые бытовые отходы, не менее 25 % свалочных очагов представлено строительными отходами и 20 % – органическими отходами.

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат, водоохранная зона, Цимлянское водохранилище, отходы производства и потребления, свалочный очаг

Для цитирования: Скрипка Г.И., Сапрыгин В.В., Ивлиева О.В., Беспалова Л.А., Глинка В.В. Опыт использования беспилотных летательных аппаратов для выявления мест размещения отходов в водоохраных зонах // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2023. № 3. С. 131–139.

Статья опубликована на условиях лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY 4.0).

Original article

USE OF UNMANNED AERIAL VEHICLES TO DETECT THE DISPOSAL SITES OF INDUSTRIAL AND CONSUMER WASTE IN WATER PROTECTION ZONES OF WATER BODIES

G.I. Skripka¹, V.V. Saprygin², O.V. Ivlieva³, L.A. Bespalova⁴, V.V. Glinka⁵✉

^{1, 2, 3, 4, 5}Russian Research Institute for the Integrated Use and Protection of Water Resources, Rostov-on-Don, Russia

^{3, 4}Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia

¹skripka.grisha@yandex.ru

²vv.saprygin@gmail.com

³ivlieva.o@mail.ru

⁴bespalowaliudmila@yandex.ru

⁵vadim-glinka@mail.ru✉

Abstract. Disposal of industrial and consumer waste in water protection zones of water bodies is a violation of water legislation of the Russian Federation. The use of materials obtained with the help of unmanned aerial vehicles (UAVs) significantly expands the possibilities for determining stored waste. UAVs are used for prompt identification of unauthorized waste disposal sites within the boundaries of the water protection zones of the Tsimlyansk reservoir. The paper presents the possibilities of using orthophotoplans and photo materials obtained during field surveys carried out by the Russian Research Institute for the Integrated Use and Protection of Water Resources in 2019-2021. According to the research results, the largest accumulation of solid household waste is localized in the water protection zone of large cities and villages. The largest amount of waste stored in the water protection zone is located in the Dubovsky and Tsimlyansk districts of the Rostov region, as well as in the Kalachyovsky district of the Volgograd region. Dumping sites detected with the help of UAVs based on the composition of the predominant waste were divided into five groups: solid household waste, construction waste, organic waste, metal, and waste of unknown composition. Up to 42 % of landfill waste in the water protection zone of the reservoir is solid domestic waste, at least 25 % of landfill sites are construction waste and 20 % are organ waste.

Keywords: unmanned aerial vehicle, water protection zone, Tsimlyansk reservoir, industrial and consumer waste, dumping site

For citation: Skripka G.I., Saprygin V.V., Ivlieva O.V., Bespalova L.A., Glinka V.V. Use of Unmanned Aerial Vehicles to Detect the Disposal Sites of Industrial and Consumer Waste in Water Protection Zones of Water Bodies. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2023;(3):131-139. (In Russ.).

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC-BY 4.0).

Введение

Размещение отходов производства и потребления в водоохраных зонах водных объектов относится к нарушениям водного законодательства Российской Федерации [1], выявление которых является одной из задач Федерального агентства водных ресурсов [2].

В ходе наземных обследований, осуществляемых подведомственными Росводресурсам территориальными подразделениями ФГБВУ «Центррегионводхоз» по согласованным маршрутам, удаётся обнаружить и задокументировать информацию только по незначительной части свалочных очагов, расположенных в водоохранной зоне.

Использование материалов, полученных с помощью беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), значительно расширяет возможности определения складированных отходов. В последние

годы для обследования мест размещения отходов всё более активно используются БПЛА [3–6]. Однако обычно речь идёт не о поиске и определении параметров скоплений отходов в водоохраных зонах водных объектов, а об обследовании достаточно крупных объектов, расположенных вблизи населённых пунктов. Для оперативного выявления несанкционированных мест размещения отходов в границах водоохраных зон водных объектов БПЛА пока активно не используются. В данной статье на примере обследования водоохранной зоны Цимлянского водохранилища показаны возможности использования БПЛА для выявления и анализа свойств свалочных очагов на территории водоохраных зон водных объектов. Представленные в статье материалы получены в ходе натурных обследований, выполненных РосНИИВХ в 2019–2021 гг. при обследовании побережья Цимлянского водохранилища.

Материалы и методы исследования

В результате наземных обследований, осуществляемых сотрудниками филиала УВРЦВ ФГБВУ «Центррегионводхоз» в 2019–2022 гг., обнаружено только 49 свалочных очагов (табл. 1). В ходе полётов, выполненных в 2019–2021 гг. на территории 5 муниципальных районов в границах водоохранной зоны, БПЛА зафиксировано 715 свалочных очагов (при этом складирование отходов на частных подворьях и территориях хозяйственных объектов не учитывалось). Наибольшее их количество находится на территории Дубовского и Цимлянского районов Ростовской области, а также Калачёвского района Волгоградской области.

Непосредственно идентификация свалочных очагов с применением БПЛА осуществлялась в ходе камеральной обработки снимков. Полученные снимки при помощи программного обеспечения Agisoft Metashape обрабатывались для получения ортофотопланов, на которых выделялись свалочные очаги, определялись их площадные характеристики и состав.

Сопоставление с данными наземных наблюдений, выполненных в ходе плановых обследований контролирующими органами, показывает, что все отмеченные ими объекты, кроме нескольких небольших скоплений твёрдых бытовых отходов (ТБО), закрытых густой кроной деревьев, были зафиксированы и с БПЛА. В то же время в большинстве районов количество мест размещения отходов, обнаруженных с помощью БПЛА, превышает, нередко многократно, число свалок, выявленных при наземных обследованиях (табл. 1). При наземных обследованиях, осуществляемых по определенному маршруту, невозможно зафиксировать всё многообразие отходов в водоохранной зоне.

Таблица 1 / Table 1

Количество мест размещения отходов, выявленных в водоохранной зоне Цимлянского водохранилища в 2019–2021 гг. / The number of waste disposal sites identified in the water protection of the Tsimlyansk reservoir in 2019-2021

Муниципальный район	Количество свалочных очагов, выявленных по материалам дистанционных обследования с БПЛА в 2019–2021 гг.	Максимальное количество свалочных очагов, выявленных в ходе наземных обследований филиала УВРЦВ ФГБВУ «Центррегионводхоз» в 2019–2022 гг.
Дубовский	115	5
Цимлянский	226	19
Котельниковский	22	2
Калачёвский	252	17
Суровикинский	98	4
Октябрьский	2	2
Итого	715	49

Результаты и их обсуждение

По результатам исследования наибольшее скопление твёрдых бытовых отходов приурочено к населённым пунктам. На правобережье Цимлянского водохранилища свалки ТБО отмечены в районе х. Крутой, х. Саркел, ст. Хорошевская, ст. Калининская, ст. Нижний Чир, х. Попов, ст. Голубинская. На левом берегу Цимлянского водохранилища в районе г. Калача-на-Дону

наблюдается также значительное скопление отходов хозяйственной деятельности, зафиксированных в границах предприятий, портов и земельных участков. Высокая степень загрязнения водоохранной зоны на левобережье водохранилища наблюдается в х. Красноярский, х. Кривский, с. Жуковская и с. Овчинников.

Выявленные места складирования отходов по материалам съёмки с БПЛА могут быть ранжированы по занимаемой ими площади, расположению относительно береговой линии водохранилища и элементов рельефа поверхности водоохранной зоны, а также морфологическому составу складированных отходов.

Обнаруженные с помощью БПЛА свалочные очаги по составу преобладающих в них отходов можно разделить на пять групп:

- свалочные очаги с заметным преобладанием в составе ТБО или комплексного состава без значительного преобладания одного из компонентов;
- свалочные очаги строительных отходов (битый кирпич или различные минеральные отходы, древесные материалы, возможно наличие небольших количеств металла и других материалов);
- свалочные очаги органических отходов (преимущественно навоз);
- свалочные очаги с резким преобладанием металлолома;
- морфологический состав свалочного очага однозначно не определён.

Для населенных пунктов, расположенных в водоохранной зоне, был осуществлен подсчет складированных отходов по их вещественному составу. На рис. 1 показан вещественный состав отходов в границах х. Карнауховский и ст. Калининская.



Рис. 1. Вещественный состав отходов в районе х. Карнауховского и ст. Калининской
/ Fig. 1. The material composition of waste in the region Karnaukhovsky, Kalininskaya

Общее количество мест несанкционированного размещения в водоохранной зоне водохранилища отходов производства и потребления на территории обследованных с использованием БПЛА муниципальных районов и разделение их по вещественному составу приведено в табл. 2.

Таблица 2 / Table 2

Количество свалочных очагов разного вещественного состава водоохранной зоны Цимлянского водохранилища, выявленных с использованием БПЛА в 2019–2021 гг. / The number of dump sites of different material composition in the water protection zone of the Tsimlyansk reservoir, identified using UAVs in 2019-2021

Муниципальный район	Всего свалок по району	Вещественный состав отходов				
		ТБО	Стройматериалы	Органические отходы	Металлолом	Неопределённого состава
Дубовский	115	60	25	19	2	9
Цимлянский	226	106	52	48	5	15
Котельниковский	22	3	5	6	–	8
Суровикинский	98	41	26	15	10	6
Октябрьский	2	2	–	–	–	–
Калачёвский	252	90	72	55	14	21
Итого	715	302	180	143	31	59

По встречаемости в вещественном составе в водоохранной зоне побережья Цимлянского водохранилища преобладают ТБО. Обычно это небольшие по размерам (площадью до нескольких десятков квадратных метров) свалочные очаги, сконцентрированные преимущественно на территории населённых пунктов или на незначительном удалении от них. Свалочные очаги ТБО широко представлены во всех обследованных районах, кроме Котельниковского. Лидируют по количеству свалочных очагов Цимлянский, Дубовский и Калачёвский районы, которые имеют наибольшее количество населённых пунктов в прибрежной зоне водохранилища.

Значительна также доля отходов строительных материалов, представленных остатками разрушенных жилых и хозяйственных строений, скоплением битого кирпича, досок и брёвен, среди которых могут встречаться в небольших количествах и отходы других групп. В большинстве районов их доля не опускается ниже 22 % от всех обнаруженных свалочных очагов (рис. 2).

Наиболее высока она в Калачёвском районе Волгоградской области – более 31 %. Размеры свалочных очагов отходов строительных материалов отличаются большим разнообразием.

По размеру занимаемой площади свалочные очаги разбиты были на три группы площадью:

- до 30 м²;
- до 300 м²;
- более 300 м².

Наряду с небольшими скоплениями встречены и максимальные для рассматриваемого региона свалки отходов, площадь которых составляет не менее 300 м² (рис. 3). Возможно, часть выявленных свалочных очагов этой группы на самом деле является строительными материалами, заготовленными для хозяйственных нужд, но беспорядочно складированными. Точная информация о составе и характере данных свалок может быть дополнена только при наземном обследовании.

Максимальную опасность для экологического состояния территории водоохранной зоны и акватории водохранилища представляют места размещения органических отходов. Чаще всего свалочные очаги органических отходов имеют площадь в несколько десятков квадратных метров. Наибольшее их количество зафиксировано в Калачёвском (55 свалочных очагов) и Цимлянском (48 свалочных очагов) районах. Значительное число мест складирования навоза зафиксировано в Дубовском (19) и Суровикинском (15) районах. На первом месте по доле складирования отходов животноводства (30 %) от общего количества выявленных свалочных очагов стоит Суровикинский район.

Особую опасность для экологического состояния водохранилища представляют скопления отходов животноводства, размещённые в балках, открывающихся в него, или расположенные на незначительном расстоянии от его побережья. Именно на их выявление и ликвидацию должно быть обращено особое внимание контролирующих органов.

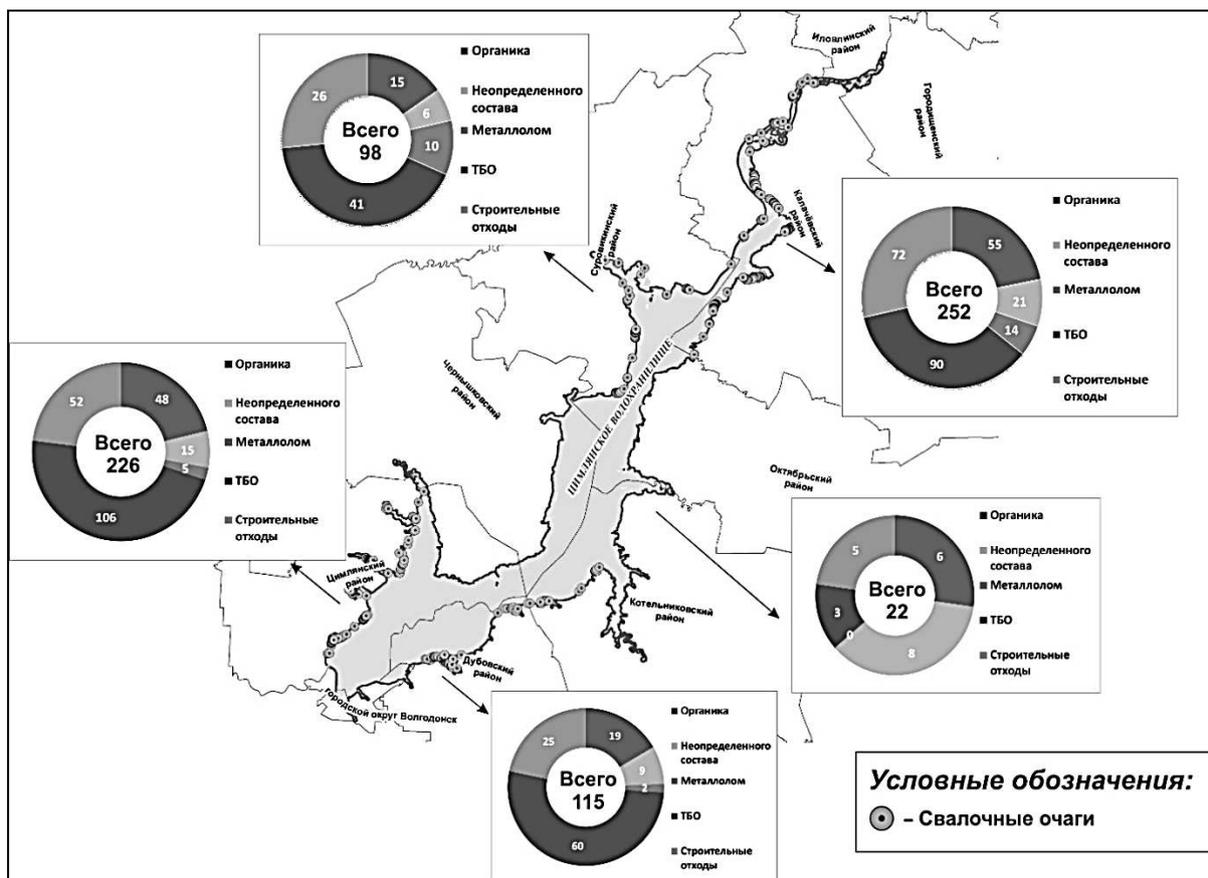


Рис. 2. Видовой состав отходов водоохранной зоны муниципальных районов Цимлянского водохранилища / Fig. 2. Species composition of waste in the water protection zone of municipal districts of the Tsimlyansk reservoir



Рис. 3. Размещение строительных отходов на берегу Цимлянского водохранилища в х. Овчинников (Дубовский муниципальный район) / Fig. 3. Placement of construction waste on the banks of the Tsimlyansk reservoir in the village Ovchinnikov (Dubovsky municipal district)

Вещественный состав отходов для 8 % свалочных очагов по материалам дистанционных обследований установить не удалось. Необходимо дообследование данных участков при выполнении наземных маршрутов. Особенно высока доля свалочных очагов, морфологический состав которых по данным дистанционных обследований установить не удалось (более 36 %), в Котельниковском районе. В остальных муниципальных районах доля свалочных очагов неопределённого состава по данным наблюдения с БПЛА составляет 6–8 %.

Материалы съёмки с БПЛА также однозначно свидетельствуют о значительном захламлении волноприбойной зоны пляжей отходами различного состава. Небольшие свалочные очаги, преимущественно состоящие из пластиковой и стеклянной тары, полиэтиленовых пакетов, консервных банок, встречены практически на всех участках прибрежной защитной полосы, используемой населением для неорганизованного отдыха или организации рыболовных станков. В промежутках между ними зачастую также отмечаются скопления пластиковой тары и других продуктов антропогенной деятельности, вынесенные сюда в результате волновой деятельности водохранилища (рис. 4). В ходе плановых наземных маршрутов эти скопления отходов, оказывающие существенное негативное воздействие на водный объект, практически никогда не обследуются.



Рис. 4. Скопление пластиковых бутылок в волноприбойной зоне Цимлянского водохранилища в Дубовском районе / Fig. 4. Accumulation of plastic bottles in the wave-cut zone of the Tsimlyansk reservoir in the Dubovsky district

Выводы

Использование БПЛА для организации мониторинга водоохранной зоны водных объектов позволяет выявить все незакрытые кроной древесной растительности свалочные очаги независимо от их расположения и дает возможность существенно дополнить информацию, полученную в результате наземных маршрутов, утверждённых для обследования.

В большинстве случаев материалы, полученные с использованием БПЛА, позволяют не только обнаружить размещение отходов, но и определить их вещественный, морфологический состав, а также точные размеры занимаемой ими площади, а в ряде случаев – и объём свалок.

Выделение на ортофотопланах свалочных очагов, определение их размеров, вещественного и морфологического состава позволяют определить степень опасности отходов для экологической обстановки прибрежной зоны и состояния водного объекта.

Наибольшее количество свалочных очагов разнообразного вещественного состава выявлено в Дубовском и Цимлянском районах Ростовской области и Калачёвском районе Волгоградской области.

По морфологическому составу резко преобладают свалочные очаги, образованные твердыми бытовыми отходами. Зачастую на них приходится до 42 % свалочных отходов в водоохранной зоне водохранилища. Не менее 25 % свалочных очагов представлено строительными отходами и 20 % представлено органическими отходами.

Наибольшую опасность для экологического состояния водных объектов представляют скопления органических отходов (навоза), расположенные в оврагах, открывающихся в сторону водного объекта.

Свалочные очаги, закрытые древесной растительностью, не могут быть выявлены с помощью БПЛА, поэтому для полного выявления свалок в водоохранной зоне водных объектов необходимо совмещать дистанционное зондирование территории с наземными обследованиями.

Список источников

1. Водный кодекс Российской Федерации: Фед. закон РФ от 03.06.2006 № 74-ФЗ (ред. с изм. и доп. от 01.05.2022) // Консультант Плюс. URL: https://consultant.ru/document/cons_doc_LAW_60683/?ysclid=cklfgzdgh245876991 (дата обращения: 20.04.2023).
2. Об утверждении Положения об осуществлении государственного мониторинга водных объектов: Постановление Правительства РФ от 10.04.2007. № 219. URL: <https://base.garant.ru/2162365/?ysclid=klflcbkrq877112013> (дата обращения: 20.04.2023).
3. Ахметзянова Л.Г., Усманов Б.М., Кузьмин Р.С., Гафуров А.М., Сироткин В.В., Курицин И.Н. Применение результатов аэрофотосъемки, полученных с использованием данных БПЛА, для оценки остаточной емкости полигона отходов на примере Республики Татарстан // Вестн. Удмуртского ун-та. Серия: Биология. Науки о Земле. 2021. Т. 31 (4). С. 404–415. Doi: 10.35634/2412-9518-2021-31-4-404-415.
4. Кушкин А.В. Обзор свободного программного обеспечения для обработки результатов маловысотной аэрофотосъемки с БПЛА // Геодезия, картография, геоинформатика кадастры. От идеи до внедрения: сб. материалов Междунар. науч.-практ. конф. (Санкт-Петербург, 11–13 ноября 2015 г.). СПб.: Политехника, 2015. С. 38–39.
5. Слюсарь Н.Н., Коротаев В.Н., Куликова Ю.В. Визуальное обследование объектов захоронения отходов с использованием беспилотных летательных аппаратов // Вестн. Пермского нац. исслед. политехн. ун-та. Прикладная экология. Урбанистика. 2017. № 4. С. 25–36. Doi: 10.15593/2409-5125/2017.04.02.
6. Титова А.Г. Оценка влияния полигона твердых коммунальных отходов на окружающую среду с использованием междисциплинарного подхода // Проблемы региональной экологии. 2019. № 2. С. 53–58. Doi: 10.24411/1728-323X-2019-112053.

References

1. *Water Code of the Russian Federation*: Federal Law of the Russian Federation of June 3, 2006 No. 74 [Last valid version with amendments and additions of May 1, 2022]. *Consultant Plus*. Available from: https://consultant.ru/document/cons_doc_LAW_60683/?ysclid=cklfgzdgh245876991 [Accessed 20th April 2023]. (In Russ.).
2. *On approval of the Regulations on the implementation of state monitoring of water bodies*: Decree of the Government of the Russian Federation of April 10, 2007 No. 219. Available from: <https://base.garant.ru/2162365/?ysclid=klflcbkrq877112013> [Accessed 20th April 2023]. (In Russ.).
3. Akhmetzyanova L.G., Usmanov B. M., Kuzmin R. S., Gafurov A. M., Sirotkin V. V., Kuritsin I. N. Application of aerial photography results, obtained using UAV data to assess the residual capacity of the waste landfill. Practice of the Republic of Tatarstan. *Vestn. Udmurtskogo un-ta. Seriya: Biologiya. Nauki o Zemle = Bulletin of Udmurt University. Series Biology. Earth Sciences*. 2021;31(4):404-415, doi: 10.35634/2412-9518-2021-31-4-404-415. (In Russ.).
4. Kushkin A.V. Review of free software for processing the results of low-altitude aerial photography from UAVs. *Geodesy, cartography, geoinformatics and cadastres. From idea to implementation*. Collection of materials of the International Scientific and Practical Conference (St. Petersburg, November 11-13, 2015). St. Petersburg: Politekhnik Publ.; 2015:38-39. (In Russ.).
5. Slyusar N.N., Korotaev V.N., Kulikova Yu.V. Visual monitoring of waste disposal sites with the use of unmanned aerial vehicles. *Vestn. Permskogo nats. issled. politekh. un-ta. Prikladnaya ekologiya. Urbanistika = PNRPU Bulletin, Applied Ecology. Urban Development*. 2017;(4):25-36, doi: 10.15593/2409-5125/2017.04.02. (In Russ.).

6. Titova A.G. Assessment of the impact of solid municipal waste landfills on the environment applying an interdisciplinary approach. *Problemy regional'noi ekologii = Regional Environmental Issues*. 2019;(2):53-58, doi: 10.24411/1728-323X-2019-112053. (In Russ.).

Информация об авторах

Григорий Иванович Скрипка – ведущий научный сотрудник.

Владислав Владимирович Сапрыгин – кандидат географических наук, старший научный сотрудник.

Ольга Васильевна Ивлиева – профессор, кафедра туризма, Южный федеральный университет; ведущий научный сотрудник, Российский научно-исследовательский институт комплексного использования и охраны водных ресурсов.

Людмила Александровна Беспалова – профессор, кафедра океанологии, Южный федеральный университет; ведущий научный сотрудник, Российский научно-исследовательский институт комплексного использования и охраны водных ресурсов.

Вадим Васильевич Глинка – младший научный сотрудник.

Information about the authors

Grigory I. Skripka - Leading Researcher.

Vladislav V. Saprygin - Candidate of Science (Geography), Senior Lecturer.

Olga V. Ivlieva - Professor, Department of Tourism, Southern Federal University; Leading Researcher, Russian-Research Institute for the Integrated Use and Protection of Water Resources.

Ludmila A. Bepalova - Professor, Department of Oceanology, Southern Federal University; Leading Researcher, Russian Research Institute for the Integrated Use and Protection of Water Resources.

Vadim V. Glinka - Junior Researcher.

Статья поступила в редакцию 12.05.2023; одобрена после рецензирования 20.06.2023; принята к публикации 20.06.2023.

The article was submitted 12.05.2023; approved after reviewing 20.06.2023; accepted for publication 20.06.2023.

БИОЛОГИЧЕСКИЕ НАУКИ

BIOLOGICAL SCIENCES

Научная статья

УДК 663.15, 66.098

doi: 10.18522/1026-2237-2023-3-140-146

ВЛИЯНИЕ pH И СОСТАВА ПИТАТЕЛЬНОЙ СРЕДЫ НА ДЕГИДРОГЕНАЗНУЮ АКТИВНОСТЬ ЭКСТРАКТОВ, ПОЛУЧЕННЫХ ИЗ *ESCHERICHIA COLI*

Мария Валерьевна Дмитриева^{1✉}, Василий Дмитриевич Мязин²,
Екатерина Викторовна Золотухина^{1,3}

^{1, 2, 3}Федеральный исследовательский центр проблем химической физики и медицинской химии РАН,
Черноголовка, Россия

²Московский государственный университет, Москва, Россия

³Московский физико-технический институт, Долгопрудный, Россия

¹angel.maria@mail.ru✉

²vasily-miazin@yandex.ru

³zolek@icp.ac.ru

Аннотация. «Грубые» экстракты – новый перспективный тип биоэлектрокатализаторов для биотопливных элементов. Способ получения «грубого» экстракта путем дезинтегрирования мембран бактериальных клеток (например, ультразвуком) в сравнении с чистыми ферментами более прост и экономичен. С научной точки зрения изучение биокаталитических свойств «грубых» экстрактов весьма интересно, поскольку дезинтегрированная биомасса содержит каскад ферментов, участвующих в метаболизме микроорганизмов, и коферменты, необходимые для окислительного/восстановительного превращения. Этот набор биоактивных веществ позволяет в искусственной среде моделировать процессы, протекающие при работе «природного» топливного элемента.

Изучено влияние pH и состава питательной среды LB, используемой при выращивании *E. coli*, на дегидрогеназную активность белковых экстрактов, полученных из данной культуры. Показано, что, подбирая pH и модифицируя состав питательной среды LB, можно увеличить значение удельной дегидрогеназной активности экстрактов практически в 9 раз (с 0,25 до 2,2 мг/мг).

Ключевые слова: биоэлектрокатализаторы, белковые экстракты, *E. coli*, дегидрогеназная активность, питательная среда LB

Благодарности: данная работа проводилась в рамках выполнения государственного задания (номер госрегистрации АААА-А19-119061890019-5). Работа М.В. Дмитриевой была поддержана стипендией Президента Российской Федерации № СП-5461.2021.1.

Для цитирования: Дмитриева М.В., Мязин В.Д., Золотухина Е.В. Влияние pH и состава питательной среды на дегидрогеназную активность экстрактов, полученных из *Escherichia coli* // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2023. № 3. С. 140–146.

Статья опубликована на условиях лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY 4.0).

© Дмитриева М.В., Мязин В.Д., Золотухина Е.В., 2023

Original article

EFFECT OF pH AND NUTRIENT MEDIUM COMPOSITION ON DEHYDROGENASE ACTIVITY OF EXTRACTS OBTAINED FROM *ESCHERICHIA COLI*

Maria V. Dmitrieva^{1✉}, **Vasily D. Myazin**², **Ekaterina V. Zolotukhina**^{1,3}

^{1, 2, 3}Federal Research Center of Problems of Chemical Physics and Medicinal Chemistry RAS, Chernogolovka, Russia

²Moscow State University, Moscow, Russia

³Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny, Russia

¹angel.maria@mail.ru ✉

²vasily-miazin@yandex.ru

³zolek@icp.ac.ru

Abstract. “Crude” extracts are a new perspective type of bioelectrocatalysts for biofuel cells. The method of obtaining a “crude” extract by disintegrating bacterial cell membranes (for example, by ultrasound) is simpler and more economical in comparison with pure enzymes. From a scientific point of view, the study of the biocatalytic properties of “crude” extracts is very interesting, since the disintegrated biomass contains a cascade of enzymes involved in the metabolism of microorganisms and coenzymes necessary for oxidative/reductive transformation. This set of bioactive substances makes it possible to simulate the processes occurring during the operation of a “natural” fuel cell in an artificial environment. The effect of the pH and composition of the LB nutrient medium used in the cultivation of *E. coli* on the dehydrogenase activity of protein extracts obtained from this culture was studied. It is shown that by selecting the pH and modifying the composition of the LB nutrient medium, it is possible to increase the value of the specific dehydrogenase activity of extracts by almost 9 times (from 0.25 to 2.2 mg/mg).

Keywords: bioelectrocatalysts, protein extracts, *E. coli*, dehydrogenase activity, LB nutrient medium

Acknowledgments: this work was carried out within the framework of the state task (state registration number AAAA-A19-119061890019-5). The work of M.V. Dmitrieva was supported by the scholarship of the President of the Russian Federation No. SP-5461.2021.1.

For citation: Dmitrieva M.V., Myazin V.D., Zolotukhina E.V. Effect of pH and Nutrient Medium Composition on Dehydrogenase Activity of Extracts Obtained from *Escherichia Coli*. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science*. 2023;(3):140-146. (In Russ.).

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC-BY 4.0).

Введение

Среди известного многообразия биологических катализаторов можно выделить три типа: чистые ферменты, микроорганизмы и биомиметики. Ранее нами был предложен новый тип биоэлектрокатализатора – «грубые» экстракты, представляющие собой дезинтегрированную биомассу микроорганизма, очищенную от клеточных мембран [1–4]. С научной точки зрения изучение биокаталитических свойств «грубых» экстрактов весьма интересно, поскольку такие экстракты содержат каскад ферментов, участвующих в метаболизме микроорганизмов, и коферменты, необходимые для окислительного-восстановительного превращения.

Для получения наибольшей каталитической активности необходима оптимизация технологии синтеза экстракта, одной из важных стадий которой является выращивание культуры микроорганизмов. Из ключевых параметров, влияющих на формирование дегидрогеназных ферментных систем, отметим рН и состав питательной среды, используемые при выращивании культуры.

Оптимальное значение рН цитоплазмы *E. coli* находится в пределах 7,6–7,8. Тем не менее *E. coli* могут жить в среде с рН в диапазоне от 5 до 9, но скорость деления клеток при этом уменьшается. Для поддержания внутреннего рН клетки задействуют различные механизмы, в частности транспорт кислот (или протонов) через мембрану, метаболизм аминокислот, регуляцию метаболизма глюкозы [5]. Соответственно, регулируя внешний рН, можно добиться оптимальных для роста и выработки дегидрогеназ условий при выращивании *E. coli*.

Следующий фактор – ионы металлов, необходимые для формирования дегидрогеназ и метаболизма клетки в целом. В [3] методом атомно-абсорбционной спектроскопии было установлено, что в экстракте *E. coli* представлены только ионы Fe (0,01 мкмоль/мл) и Mg (0,01 мкмоль/мл). Магний является одним из важнейших бивалентных катионов в клетке [6]. Важное свойство магния – его способность создавать активную форму АТФ [7], стабилизировать структуру нуклеиновых кислот и белков, выступая в роли кофактора [8].

Ферменты, для которых магний является кофактором: гексокиназа, глюкозо-6-фосфат-изомераза, фосфофруктокиназа, фосфоглицераткиназа, фосфоглицеромутаза, енолаза, пируваткиназа, пируват-дегидрогеназный комплекс, изоцитратдегидрогеназа, α -кетоглутаратдегидрогеназный комплекс и другие [9].

Ионы железа, требуемые для жизнедеятельности культуры, в зависимости от степени окисления и условий выращивания микроорганизма (аэробные, анаэробные) могут быть дефицитными или оказывать токсическое действие. Так, в анаэробных условиях железо может существовать в форме Fe^{2+} , стабильной в кислой среде. При переходе к аэробным условиям с повышенным значением рН ионы Fe^{2+} достаточно быстро превращаются в плохо растворимые, особенно при рН >4, ионы Fe^{3+} [10]. Тем не менее у клеток бактерий есть механизмы по захвату и малорастворимых комплексов железа ($3+$) путем перевода их в растворимые. Чтобы захватить плохо растворимые ионы Fe^{3+} , бактерии используют сидерофоры-комплексобразователи. Сидерофоры образуют растворимые комплексы с железом, которые бактерии захватывают. В число ферментов, использующих ионы железа, входят фумараза, аконитаза, сукцинатдегидрогеназа, белки, отвечающие за метаболизм ароматических соединений, цитохромы, ферридоксины, железо-серные белки и другие [11].

Поэтому в данной работе изучали влияние рН, добавок ионов магния и железа в состав питательной среды Lysogeny broth (LB), применяемой при выращивании *E. coli*, на дегидрогеназную активность экстрактов (ДГА), полученных из данной культуры.

Методика эксперимента

Получение белкового экстракта из E. coli. Бактерии выращивали в среде LB, содержащей 1 % (в/о) пептона Vacto™ (BD, США), 0,5 % (в/о) дрожжевого экстракта Vacto™ (BD, США), 1 % (в/о) NaCl, 0,1 % (в/о) глюкозы и различные концентрации солей металлов в зависимости от эксперимента. Питательную среду доводили до нужного значения рН с помощью 3М раствора NaOH. Затем ее стерилизовали в автоклаве Tuttnauer 3870 EL (Tuttnauer, Израиль) при 121 °С в течение 20 мин. Колонию *E. coli* ВВ, выращенную на твердой среде (LB, 2%-й агар), инокулировали в 10 мл LB для получения ночной культуры. Ночную культуру (1 мл) вносили в 100 мл LB в колбах 500 мл и выращивали при 37 °С с интенсивной аэрацией. Через 6 ч после начала выращивания бактерии осаждали центрифугированием при 1700 g и использовали для получения экстракта.

Осажденные бактерии ресуспендировали в 50 мМ калий-фосфатном буферном растворе, рН 7,2, из расчета 1 мл на 50 мл выращенной культуры. Клетки разрушали на льду, на ультразвуковом дезинтеграторе Sonoplus (Bandelin, Германия) в течение 8 мин 10 с, циклами (10 с – дезинтеграция, 10 с – перерыв) при 100%-й мощности. Экстракты осветляли центрифугированием при 15000 g в течение 15 мин.

Определение ДГА. ДГА полученных экстрактов определяли при помощи 2,3,5-трифенилтетразолия хлорида (ТТХ), который под действием дегидрогеназ восстанавливается до окрашенного ТТХ-формаза, как было описано в [4].

Определение белка в экстрактах. Определение содержания белка вели по методу Бенедикта [12], используя спектрофотометрический метод детекции с помощью спектрофотометра Multiscan sky (Thermoscientific, Германия) при длине волны 330 нм.

Результаты и обсуждение

Показана возможность использования «грубых» экстрактов *E. coli* в качестве перспективных биоэлектрокатализаторов. При этом было установлено, что для электрохимических исследований рекомендуется брать экстракт, полученный из 6-часовой культуры, соответствующей периоду экспоненциальной фазы роста *E. coli* (рис. 1) [3]. Показано, что для экстракта из 6-часовой культуры *E. coli* в отношении глюкозы (топливо для биотопливных элементов), максимальное значение удельной ДГА составляет 0,25 мг/мг [4].

ДГА экстрактов напрямую коррелирует с их электрохимической активностью [4]. Повышая значения ДГА, можно увеличить вольтамперные характеристики биоэлектрохимических систем, работающих с участием экстрактов.

Первоначально оптимизировали pH питательной среды, используемой для выращивания. С этой целью 6-часовая культура клеток *E. coli* была получена в питательной среде LB с pH от 7,20 до 8,35. Как видно из рис. 2, выход белка начинает увеличиваться от значения pH 7,56, достигая максимального значения при pH 8,17, что говорит о создании оптимальных условий по выработке наибольшего количества белков для 6-часовой культуры при таких значениях pH.

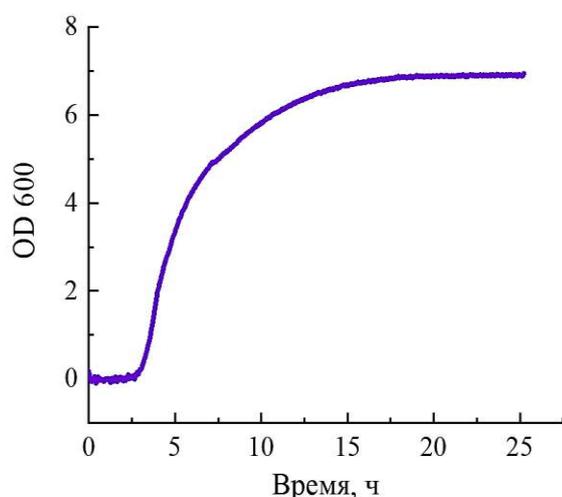


Рис. 1. Кривая роста *E. coli*.
/ Fig. 1. *E. coli* growth curve

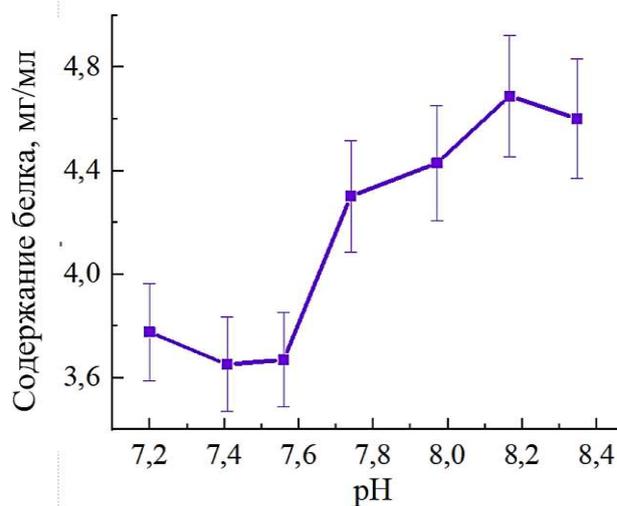


Рис. 2. Влияние pH питательной среды LB, используемой при выращивании *E. coli*, на содержание белка в экстрактах, полученных из выращенной культуры / Fig. 2. LB nutrient medium pH effect on the protein content in extracts obtained from the *E. coli* culture grown on that medium

Как видно из рис. 3, ДГА, оцениваемая количеством образовавшегося формаза, мг/мл экстракта, и удельная ДГА (ДГА, отнесенная на мг белка) повышаются в 2,7 раза для белковых экстрактов с ростом pH среды выращивания от 7,20 до 7,91, достигая максимума.

С дальнейшим повышением pH наблюдается снижение ДГА. Таким образом, можно заключить, что максимальное количество белка, вырабатываемого при более высоких pH, не означает выработку именно дегидрогеназ и не гарантирует их высокую активность. При этом следует отметить, что в процессе жизнедеятельности клетка выделяет кислоты в окружающую среду, понижая тем самым pH среды [5, 6]. Следовательно, если клетки выращиваются в течение 6 ч в зоне оптимального pH, они будут находиться наибольшее время при исходном pH среды (около 8).

Следующий фактор, который варьировали при выращивании микроорганизмов, – добавка солей магния и железа в питательную среду. Исходили из предположения, что эти добавки могут привести к увеличению ДГА, поскольку у клеток будут ресурсы для синтеза ферментов, использующих данные ионы металлов [9, 11]. В качестве добавок применяли сульфат магния и сульфат железа (II). Как видно из рис. 4, добавка 0,2 г Mg^{2+} (0,81 мМ) и 0,1 или 0,2 г Fe^{2+} (0,36 мМ и 0,72 мМ соответственно) не оказывает влияние на содержание белка в экстрактах (рис. 4).

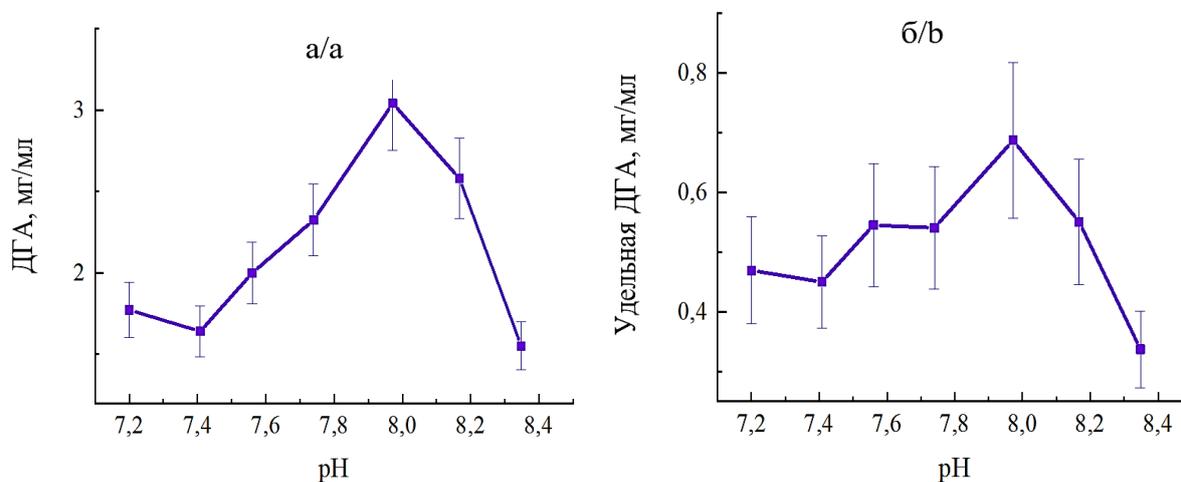
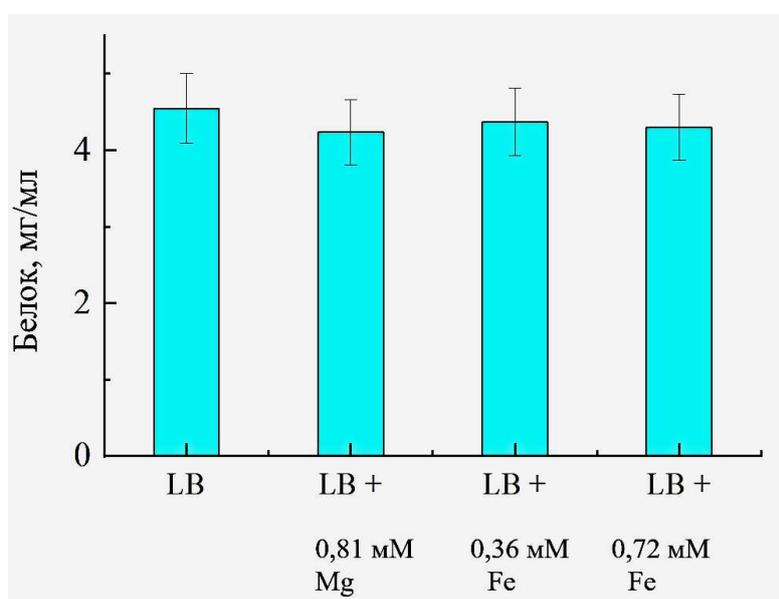


Рис. 3. Влияние pH питательной среды LB, используемой при выращивании *E. coli*, на ДГА (а) и удельную ДГА (б) в экстрактах, полученных из выращенной культуры / Fig. 3. LB nutrient medium pH effect on the dehydrogenase activity (a) and specific dehydrogenase activity (b) of extracts obtained from the *E. coli* culture grown on that medium



Состав питательной среды

Рис. 4. Влияние добавок различных солей металлов в питательную среду LB на содержание белка в экстрактах, полученных из выращенной 6-часовой культуры / Fig. 4. The effect of cation addition to LB nutrient medium on the protein content in extracts obtained from the *E. coli* culture grown on that medium

Однако добавление солей Mg^{2+} в концентрации 0,81 мМ и Fe^{2+} в концентрациях 0,36 и 0,72 мМ приводит к заметному росту удельной ДГА экстракта (рис. 5), причем наиболее выраженному для добавки 0,72 мМ Fe^{2+} . Таким образом, посредством модификации состава питательной среды LB удалось увеличить удельную ДГА в 3,2 раза.

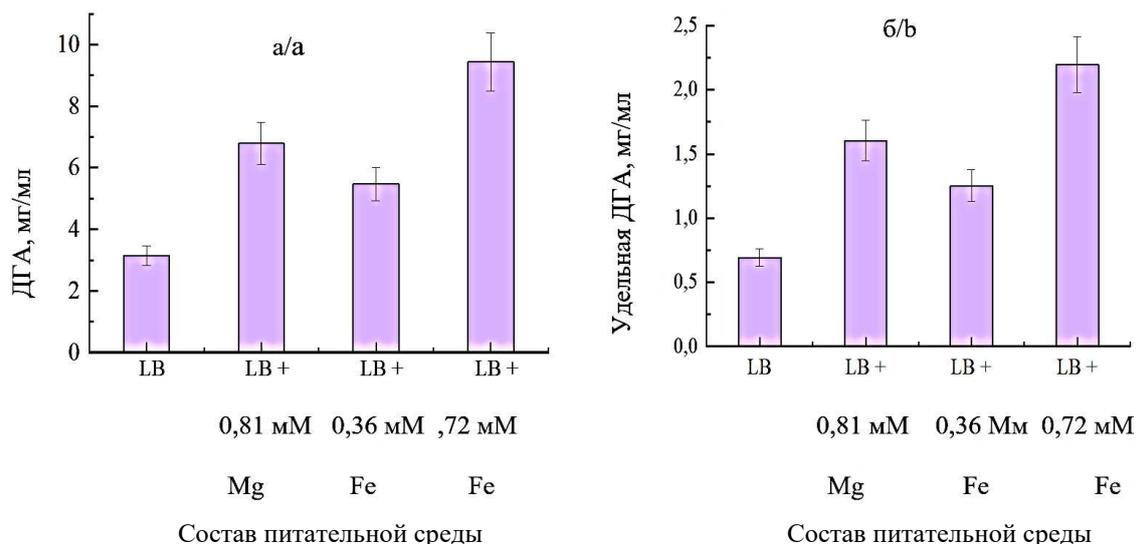


Рис. 5. Влияние добавок различных солей металлов в питательную среду LB на ДГА (а) и удельную (б) экстрактов, полученных из выращенной культуры / Fig. 5. The effect of cation addition to LB nutrient medium on the dehydrogenase activity (a) and specific dehydrogenase activity (b) of extracts obtained from the *E. coli* culture grown on that medium

Заключение

Выполненные исследования показали, что, варьируя pH и минеральный состав питательный среды, используемой для выращивания культуры *E. coli*, можно непосредственно влиять на величину удельной ДГА белковых экстрактов, получаемых из 6-часовой культуры. Найденное оптимальное значение питательной среды LB находится в диапазоне 7,9–8,2, а наиболее важной добавкой является 0,72 mM Fe²⁺. Сочетая влияние обоих факторов, удельную ДГА 6-часовой культуры *E. coli* удалось увеличить в 8,8 раза (с 0,25 до 2,2 мг/мг).

Список источников

1. Dmitrieva M.V., Zolotukhina E.V. Data describing the cofactor additives effect on bioelectrocatalytic activity of "crude" extracts // Data in brief. 2020. Vol. 30. P. 105–513.
2. Dmitrieva M.V., Shishov I.N., Shmalii S.V., Myazin V.D., Bazhenov A.Yu., Gerasimova E.V., Zolotukhina E.V. Kinetics of Mediated Bioelectrocatalytic Oxidation of Glucose by Protein Extracts of *Escherichia coli* // Russian J. of Electrochemistry. 2020. Vol. 56, № 11. P. 938–945.
3. Dmitrieva M.V., Gerasimova E.V., Terent'eva A.A., Dobrovol'skii Yu.A., Zolotukhina E.V. Electrochemical peculiarities of mediator-assisted bioelectrocatalytic oxidation of glucose by a new type of bioelectrocatalyst // Russian J. of Electrochemistry. 2019. Vol. 55, № 9. P. 889–899.
4. Dmitrieva M.V., Zolotukhina E.V., Gerasimova E.V., Terent'eva A.A., Dobrovol'skii Yu.A. Dehydrogenase and electrochemical activity of *Escherichia coli* extracts // Applied Biochemistry and Microbiology. 2017. Vol. 53, № 4. P. 458–463.
5. Maurer L.M., Yohannes T., Bondurant S.S., Radmacher M., Slonczewski J.L. pH regulates genes for flagellar motility, catabolism, and oxidative stress in *Escherichia coli* K-12 // J. of Bacteriology. 2005. Vol. 187, № 1. P. 304–319.
6. Maguire M.E., Papp-Wallace K.M. Magnesium transport and magnesium homeostasis // EcoSal Plus. 2008. Vol. 3, № 1.
7. Wacker W.E. C. The biochemistry of magnesium // Annals of the New York Academy of Sciences. 1969. Vol. 162. P. 717–726.
8. Kehres D.G., Maguire M.E. Emerging themes in manganese transport, biochemistry and pathogenesis in bacteria // FEMS Microbiology Reviews. 2003. Vol. 27, № 2–3. P. 263–290.
9. Campbell M., Farrell S. Biochemistry. 7th ed. Cengage Learning, 2012. 481 p.

10. Cao J., Woodhale M., Alvarez J., Cartron M., Andrews S. EfeUOB (YcdNOB) is a tripartite, acid-induced and CpxAR-regulated, low-pH Fe²⁺ transporter that is cryptic in *Escherichia coli* K-12 but functional in *E. coli* O157:H7 // *Molecular Microbiology*. 2007. Vol. 65, № 4. P. 857–875.
11. Andrews S.C. Iron storage in bacteria // *Advances in Microbial Physiology*. 1998. Vol. 40. P. 281–351.
12. Itzhaki R.F., Gill D.M. A micro-biuret method for estimating proteins // *Analytical Biochemistry*. 1964. Vol. 9, № 4. P. 401–410.

References

1. Dmitrieva M.V., Zolotukhina E.V. Data describing the cofactor additives effect on bioelectrocatalytic activity of “crude” extracts. *Data in Brief*. 2020;30:105-513.
2. Dmitrieva M.V., Shishov I.N., Shmalii S.V., Myazin V.D., Bazhenov A.Yu., Gerasimova E.V., Zolotukhina E.V. Kinetics of Mediated Bioelectrocatalytic Oxidation of Glucose by Protein Extracts of *Escherichia coli*. *Russian Journal of Electrochemistry*. 2020;56(11):938-945.
3. Dmitrieva M.V., Gerasimova E.V., Terentiev A.A., Dobrovol'skii Yu.A., Zolotukhina E.V. Electrochemical Peculiarities of Mediator-Assisted Bioelectrocatalytic Oxidation of Glucose by a New Type of Bioelectrocatalyst. *Russian Journal of Electrochemistry*. 2019;55(9):889-899.
4. Dmitrieva M.V., Zolotukhina E.V., Gerasimova E.V., Terentiev A.A., Dobrovol'skii Yu.A. Dehydrogenase and electrochemical activity of *Escherichia coli* extracts. *Applied Biochemistry and Microbiology*. 2017;53(4):458-463.
5. Maurer L.M., Yohannes E., Bondurant S.S., Radmacher M., Slonczewski J.L. pH Regulates Genes for Flagellar Motility, Catabolism, and Oxidative Stress in *Escherichia coli* K-12. *Journal of Bacteriology*. 2005; 187(1):304-319.
6. Maguire M.E., Papp-Wallace K.M. Magnesium Transport and Magnesium Homeostasis. *EcoSal Plus*. 2008;3(1).
7. Wacker W.E.C. The biochemistry of magnesium. *Annals of the New York Academy of Sciences*. 1969;162:717-726.
8. Kehres D.G., Maguire M.E. Emerging themes in manganese transport, biochemistry and pathogenesis in bacteria. *FEMS Microbiology Reviews*. 2003;27(2-3):263-290.
9. Campbell M.K., Farrell S.O. *Biochemistry*. 7th ed. Belmont, CA: Brooks/Cole, Cengage Learning, 2012. 481 p.
10. Cao J., Woodhall M., Alvarez J., Cartron M., Andrews S. EfeUOB (YcdNOB) is a tripartite, acid-induced and CpxAR-regulated, low-pH Fe²⁺ transporter that is cryptic in *Escherichia coli* K-12 but functional in *E. coli* O157:H7: Low pH, Fe²⁺ transporter in *E. coli*. *Molecular Microbiology*. 2007;65(4):857-875.
11. Andrews S.C. Iron Storage in Bacteria. *Advances in Microbial Physiology*. 1998;40:281-351.
12. Itzhaki R.F., Gill D.M. A micro-biuret method for estimating proteins. *Analytical Biochemistry*. 1964;9(4):401-410.

Информация об авторах

М.В. Дмитриева – младший научный сотрудник.

В.Д. Мязин – лаборант, студент.

Е.В. Золотухина – доктор химических наук, заведующая лабораторией электродных процессов в жидкостных системах.

Information about the authors

M.V. Dmitrieva - Junior Researcher.

V.D. Myazin - Laboratory Assistant, Student.

E.V. Zolotukhina - Doctor of Science (Chemistry), Head of Laboratory of Electrode Processes in Liquid Systems.

Статья поступила в редакцию 12.04.2023; одобрена после рецензирования 12.05.2023; принята к публикации 20.06.2023.
The article was submitted 12.04.2023; approved after reviewing 12.05.2023; accepted for publication 20.06.2023.

НАУЧНАЯ ЖИЗНЬ

SCIENTIFIC LIFE

Материалы конференции

doi: 10.18522/1026-2237-2023-3-147-151

XI ФЕСТИВАЛЬ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО ТУРИЗМА «ВОСПЕТАЯ СТЕПЬ»

Виктор Аркадьевич Миноранский^{1✉}, Юлия Валерьевна Тимофеевко²

¹ Ассоциация «Живая природа степи», Ростов-на-Дону, Россия

^{1, 2} Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, Россия

Для цитирования: Миноранский В.А., Тимофеевко Ю.В. XI фестиваль экологического туризма «Воспетая степь» // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2023. № 3. С. 147–151.

Conference materials

11th FESTIVAL OF ECOLOGICAL TOURISM “SINGING STEPPE”

Victor A. Minoransky^{1✉}, Yulia V. Timofeenko²

¹ Association “Wild Nature of the Steppe”, Rostov-on-Don, Russia

^{1, 2} Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia

For citation: Minoransky V.A., Timofeenko Ju.V. 11th Festival of Ecological Tourism “Singing Steppe”. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2023;(3):147-151. (In Russ.).

На Дон пришла весна, а с ней по сложившейся традиции фестиваль экологического туризма «Воспетая степь». Земля покрылась яркими красками цветущих деревьев (абрикос, алыча, вишня), кустарников (терн, миндаль весенний, сирень), трав (чистяк весенний, птицемлечник, одуванчик). Чистый воздух наполнился их запахами, теплыми солнечными лучами, криками перелетных птиц. Неудивительно, что люди ждут этого времени года и чаще посещают парки, сады, дачи, а при возможности встречают весну в походах, на экскурсиях, пикниках на природе, где все это проявляется более наглядно, красивее и лучше. В относительно далеком 2013 г. ассоциация «Живая природа степи» в своем Центре редких животных европейских степей (х. Кундрюченский Орловского р-на) для знакомства населения с природой Маныча провела фестиваль «Воспетая степь». Его поддержали заповедник «Ростовский», биологи ЮФУ, администрации Орловского и Пролетарского р-нов. Первыми экотуристами (около 300) были школьники, учителя, студенты, общественные экологические организации и население. Красивая весенняя природа, редкие животные центра (сайгак, кулан, страус, павлин, журавль, др.), природоохранная направленность и хорошая организация закончились просьбой экотуристов организовывать подобные фестивали регулярно. В 2013–2014 гг., помимо весенних, провели осенние фе-

стивали, когда участники, прежде всего школьники, наблюдали большие стаи перелетных журавлей, лебедей, гусей и других птиц. Позднее фестивали приурочили к массовому цветению диких тюльпанов и ирисов и стали проводить только весной. Они были также отчетом о деятельности ассоциации и связанных с ней структур по природоохранной работе, экологическому образованию и воспитанию населения, развитию экотуризма на Дону. В пос. Маныч при поддержке ассоциации в 2008 г. был создан экспедиционный стационар «Маныч» ЮНЦ РАН, ставший в этом районе вместе с питомником ассоциации и заповедником научной базой для работы сотрудников РАН, вузов, других научных центров страны, также принимавших участие в фестивале.



Ответственность за IV (18–19.04.2015, около 3500 участников) и последующие фестивали взяла администрация РО. Проводились они в охранной зоне заповедника, а ассоциация и заповедник остались основными исполнителями. В Год экологии и ООПТ (2017) фестиваль вошел в федеральные планы, и на VI (02–29.04.2017) присутствовали 15 тыс. человек. Для сохранения естественного биоразнообразия степи с 2018 г. количество официальных экотуристов стали ограничивать (7 тыс.). Здесь регулярно проводились природоохранные семинары для учителей, работников библиотек, журналистов, туристических фирм и иных структур. Ведущие специалисты читали лекции для школьников, казачьих кадетов и всех интересующихся природой участников. Периодически проводились научные конференции специалистов по экологическим вопросам с участием академиков РАН В.Н. Большакова, Ю.Ю. Балеги, Г.Г. Матишова, В.В. Рожнова, А.А. Чибилева, иных ведущих ученых страны. Гостями фестиваля были губернатор и министры РО, члены и председатели ЗС РО, представитель Президента России по вопросам природоохранной деятельности, экологии и транспорта С.Б. Иванов, председатель правления ОАО «Газпром» РФ А.Б. Миллер, гендиректор ООО «Газпром межрегионгаз Ростов-на-Дону», министры Минприроды РФ и транспорта РФ, член СФ РФ Т.А. Гигель, президент Сбербанка России Г.О. Греф, члены ЮНЕСКО, СИТЕС, WWF (внесена в реестр иноагентов), популяризаторы природы Н.Н. Дроздов и М.А. Ширвин, художник донской природы О.Н. Майборода, другие известные лица. Посещали Маныч М. Симоньян со съемочной группой Russia Today, В. Богма и другие корреспонденты региональных и всероссийских СМИ.



В 2023 г. весна была ранней, ветреной, и массовое цветение тюльпанов проходило с 10 по 20 апреля. Уже 12.04.2023 сотрудники ассоциации привезли сюда из Ростова-на-Дону группу туристов. В солнечный теплый день они с крутого берега любовались бесконечной гладью оз. Маныч-Гудило, стаями лебедей, уток, куликов. Им рассказали историю оз. Маныч-Гудило и связанных с ним кочевых народов. В питомнике познакомились с лошадьми Пржевальского, бизонами, сайгаками, страусами. Сделали фотографии пасущихся в степи верблюдов, буйволов, яков, антилоп канн. Около соленого оз. Грузского они наблюдали массовое цветение ирисов, тюльпанов, козлобородника, дикой герани и иных растений на зеленом ковре степной травы. На острове Водный туристы фотографировали, делали селфи с мустангами, узнали историю их появления здесь. В степи встретили гнезда жаворонков с птенцами, их поющих в небе самцов, в воздухе – стаи чаек и крачек, на земле – ящериц, пчел, полевок и других животных.

В последующие дни (13–14 апреля) был ветер, небо покрылось тучами, периодически выпал дождь. Участники знакомились с прекрасными природными экспонатами визит-центра заповедника, санаторием «Маныч», стационаром ЮНЦ РАН, работами специалистов. Вошло в традицию фестивалей одновременное проведение научных и просветительских мероприятий, на которых ведущие ученые и специалисты Дона и страны сообщают об успехах в области экологии, разумного природопользования и устойчивого развития. Здесь проходят семинары, обмен мнениями, дискуссии, а экотуристы получают ответы на интересующие их вопросы. В научно-экспедиционном центре ЮНЦ РАН «Маныч» 13–14.04.2023 состоялся научный семинар ЮНЦ РАН, ассоциации и ФНЦ агроэкологии РАН из Волгограда «Средства и методы оперативного мониторинга естественных и антропогенных экосистем засушливых территорий юга России». Директор ЮНЦ РАН, замдиректора ФНЦ агроэкологии РАН и ведущие специалисты выступили с научными докладами: «Современные физико-географические условия периодически пересыхающих акваторий юга России в условиях аридизации климата», «Анализ климатической изменчивости на примере бассейна Нижнего Дона», «Загрязнение поверхностных вод в бассейне Дона» и др. Эти важные проблемы юга страны вызвали у участников большое количество вопросов, состоялись оживленные дискуссии, споры. Все присутствующие познакомились с весенней природой Маныча.

Официальное открытие туристического сезона и XI фестиваля проходило 15.04.2023 на большой, покрытой зеленью с яркими цветами территории около визит-центра заповедника «Ростовский». Здесь присутствовали около 3 тыс. человек, располагалась сцена. Участников приветствовали известные на Дону лица, выступали творческие коллективы, специалисты и организации, внесшие значительный вклад в охрану природы. В 4 крупных шатрах (более 300 м² – каждый) размещались тематические экспозиции с модераторами, баннерами с полноцветным изображением цветущей степи, интерактивные площадки, мастер-классы, плазменные панели, генераторы и т.д. Здесь же находились экспозиции минприроды РО, заповедника, ассоциации, ЮНЦ РАН, ЮФУ и других вузов, Ростовского зоопарка, общественных и иных структур, занимающихся проблемами образования, науки и производственной деятельности с природоохранной, экологической, патриотической и культурной направленностью. Около шатров размещались фотозоны с красочным изображением ландшафтов и озер Манычской степи с её цветочным зеленым ковром, сайгаками, табунами лошадей, стаями журавлей, гнездовыми колониями пеликанов и другими редкими в наши дни картинами. В шатрах можно было увидеть плавающих в больших аквариумах осетровых, коллекции насекомых, птиц и зверей, гербарии степных трав, результаты использования природных ресурсов населением, функционирующую интерактивную площадку с описанием климата Земли, страны и донских степей, многое другое. Большое внимание уделялось различным мастер-классам, которыми активно пользовались как молодежь, так и взрослые участники.



Во Вторую мировую войну население Ростовской области в полной мере испытало ужасы оккупации и многих других жесточайшие событий, память о которых хранит земля. В наше время область является прифронтовой территорией. На фестивале было уделено внимание историческим событиям на Дону и в Приазовье. ЮНЦ РАН, донские поисковики представили книги, альбомы, схемы, военное оружие, обмундирование, карты и другие предметы военных событий разного времени.

В одном из шатров разместились экспозиции Ростовского областного отделения Русского географического общества. В 2023 г. исполняется 245 лет со дня рождения Ф.Ф. Беллинсгаузена, 235 – М.П. Лазарева, 210 – Г.И. Невельского, 160 – П.К. Козлова, 160 – В.А. Обручева, 150 – М.В. Пришвина, 150 – М.И. Сумгина. Первое русское кругосветное плавание под руководством

И.Ф. Крузенштерна и Ю.Ф. Лисянского произошло 220 лет назад. Эти юбилейные даты великих русских исследователей были отмечены большими баннерами с их фотографиями, трудами, картами и иными экспонатами, рассказами специалистов.

Параллельно шатрам на другой стороне площадки находились зоны питания и торговли продовольственными продуктами, сувенирами и поделками из природных материалов. Были установлены информационные указатели, конструкции с правилами поведения на природе. Вторая площадка, предназначенная для знакомства, бесед гостей и обсуждения ими различных экологических проблем, размещалась около соленого озера Круглое на покрытой зеленью и цветами естественных трав территории. Площадки оборудованы стоянками автомашин, зонами отдыха и питания. Фестиваль обслуживали волонтеры, дорожная полиция, пожарная служба, медицинские пункты (имелись репелленты, сыворотка от укусов змей), казаки. Было много журналистов региональных и центральных СМИ, освещающих фестиваль на каналах ТВ и радио.

Остальными площадками служила весенняя степь около соленых озер Маныч-Гудило, Лопуховатое и Грузское, питомник с ценными и редкими животными ассоциации, экспонаты визит-центра с панорамой рельефа, растительности и животного мира заповедника, другие достопримечательности Манычских степей и озер. Сюда экотуристов вывозили автомашинами, а экскурсоводы из заповедника и ассоциации рассказывали об истории, природе степей и её охране.

Большинство участников фестиваля – жители Донской земли. Присутствовали гости из Москвы, Санкт-Петербурга, Республики Калмыкии, Кубани, Ставрополя, Перми и других регионов. Интересные природные экспонаты представил национальный парк «Койгородский» Республики Коми. Кроме официально заявленных гостей, в заповеднике, питомнике, на берегах озер, минеральных источников присутствовали незарегистрированные участники – жители соседних хуторов, станиц, городов. Многие приезжают сюда ежегодно. На фестивале они познают Донскую землю, приобретают знания о её красоте и богатствах, о значении естественной природы в нашей жизни, необходимости сохранения природных ресурсов, бережного и управляемого использования. Здесь отдыхают, отвлекаются от ежедневных забот и трудностей, получают массу новых эмоциональных впечатлений.

Информация об авторах

В.А. Миноранский – доктор сельскохозяйственных наук, профессор кафедры зоологии, Южный федеральный университет; президент ассоциации «Живая природа степи».

Ю.В. Тимофеев – ассистент кафедры зоологии, Южный федеральный университет.

Information about the authors

V.A. Minoransky - Doctor of Science (Agricultural Science), Professor of the Department of Zoology, Southern Federal University; President of the Association "Wild Nature of the Steppe".

Yu.V. Timofeev - Assistant of the Department of Zoology, Southern Federal University.

НАШИ ЮБИЛЯРЫ

OUR PERSONS

doi: 10.18522/1026-2237-2023-3-152-154

ЛЕОНИД МИХАЙЛОВИЧ ЗУБОВ (80 ЛЕТ СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ)

LEONID MIKHAILOVICH ZUBOV (TO THE 80TH ANNIVERSARY)



1 сентября 2023 г. исполнилось 80 лет Леониду Михайловичу Зубову, выдающемуся российскому ученому-механику, профессору кафедры теории упругости, одному из ведущих преподавателей Института математики, механики и компьютерных наук им. И. И. Воровича Южного федерального университета.

Леонид Михайлович родился в г. Яренске Архангельской области в тяжелые военные годы. В 1966 г. он окончил физико-механический факультет, а в 1970 г. – аспирантуру Ленинградского политехнического института (ЛПИ). После успешной защиты в 1970 г. кандидатской диссертации «Бифуркация равновесия нелинейного упругого тела», выполненной под руководством чл.-корр. АН СССР, выдающегося ученого-механика А.И. Лурье, Л.М. Зубов по приглашению Иосифа Израилевича Воровича переезжает в Ростов-на-Дону и начинает работать в НИИ механики и прикладной математики и на кафедре теории упругости Ростовского государственного университета. В эти годы он успешно сочетает научную и педагогическую деятельность, готовит новые курсы по механике – по нелинейной теории упругости и пластичности, механике сплошной среды, читает лекции для студентов, активно занимается научной работой. В 1986 г. он в Ленинграде защищает докторскую диссертацию «Полуобратные и вариационные методы в нелинейной теории упругости»; в 1989 г. ему присвоено звание профессора.

Научные интересы Л.М. Зубова связаны с нелинейными проблемами теории упругости, моделями микрополярных сред, теорией устойчивости и моделями теории оболочек. В 70-е гг. XX в. он сформулировал новый вариационный принцип в нелинейной теории упругости, получивший международное признание; в отечественной и зарубежной научной литературе в области механики часто употребляется принцип Зубова. На основе активно развиваемого им полуобратного метода разработаны подходы к решению многих задач нелинейной теории упругости, создано новое научное направление – нелинейная теория дислокаций Вольтерра в упругих телах, получен ряд новых фундаментальных результатов в области континуальной теории дислокаций и дисклинаций, нелинейной теории оболочек, в теории устойчивости упругих тел.

Научные интересы Л.М. Зубова связаны с нелинейными проблемами теории упругости, моделями микрополярных сред, теорией устойчивости и моделями теории оболочек. В 70-е гг. XX в. он сформулировал новый вариационный принцип в нелинейной теории упругости, получивший международное признание; в отечественной и зарубежной научной литературе в области механики часто употребляется принцип Зубова. На основе активно развиваемого им полуобратного метода разработаны подходы к решению многих задач нелинейной теории упругости, создано новое научное направление – нелинейная теория дислокаций Вольтерра в упругих телах, получен ряд новых фундаментальных результатов в области континуальной теории дислокаций и дисклинаций, нелинейной теории оболочек, в теории устойчивости упругих тел.

Его научные и педагогические заслуги оценены научным сообществом. Л. М. Зубов – член Российского национального комитета по теоретической и прикладной механике, чл.-корр. МАН ВШ, обладатель Российской государственной научной стипендии для выдающихся учёных.

Л.М. Зубов является одним из активно работающих ведущих российских ученых в области механики деформируемого твердого тела. Им опубликовано около 400 научных работ, в том числе пять монографий: «Методы нелинейной теории упругости в теории оболочек», Nonlinear Theory of Dislocations and Disclinations in Elastic Bodies, «Механика упругих оболочек», «Основы механики вязкоупругой микрополярной жидкости», «Сильная эллиптичность в теории упругости анизотропных материалов» и учебное пособие «Тензорное исчисление: основы теории».

Он подготовил двух докторов и 23 кандидата наук, успешно руководил научными проектами по грантам ISF, РФФИ, участвовал в выполнении проектов Минобрнауки и РНФ, в настоящее время руководит проектом РНФ. Л. М. Зубов является членом редколлегии журнала «Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки».

Леонид Михайлович принимает активное участие в образовательном процессе и подготовке кадров высшей квалификации, являясь заместителем председателя диссертационного совета ЮФУ801.01.10 Южного федерального университета по механике деформируемого твердого тела.

Л.М. Зубов – один из опытнейших лекторов Института математики, механики и компьютерных наук им. И.И. Воровича Южного федерального университета. За более чем 50-летнюю педагогическую деятельность на мехмате университета им разработаны оригинальные курсы для студентов и аспирантов по механике сплошных сред, нелинейным задачам теории упругости и пластичности, по моделям ориентированных сред (в частности, в механике упругих микрополярных оболочек, в механике вязкоупругой микрополярной жидкости), по моделям стенок кровеносных сосудов, по тензорному анализу.

Леонид Михайлович принимает активное участие в подготовке новых поколений будущих исследователей в области механики, щедро делится своим богатейшим научным опытом и знаниями.

Л.М. Зубов пользуется заслуженным уважением сотрудников и студентов мехмата ЮФУ, российского и мирового научного сообщества.

Поздравляем Леонида Михайловича с юбилеем, от имени всех коллег и учеников желаем ему доброго здоровья, благополучия, дальнейших творческих успехов в научных исследованиях, талантливых учеников и учениц.

А.О. Ватulyян, М.И. Карякин

Коллектив редакции и редколлегия серии «Естественные науки» нашего журнала сердечно поздравляют своего автора, рецензента, члена редколлегии и желают ему крепкого здоровья и творческого долголетия!

Татьяна Александровна Ватульян



Татьяна Александровна Ватульян, ответственный секретарь по издательской деятельности нашего журнала, отметила свое 60-летие 6 мая 2023 г.

После окончания в 1985 г. мехмата РГУ (ныне Южный федеральный университет), отработав в разных организациях несколько лет, она вернулась, можно сказать, в родные стены, заняв должность заведующей общим отделом в журнале «Известия вузов. Северо-Кавказский регион» при РГУ, а позже – ответственного секретаря по издательской деятельности журнала.

За время работы в нашем коллективе Татьяна Александровна снискала уважение и авторитет среди коллег и многочисленных авторов, приславших статьи для публикации. Практически все материалы из портфеля журнала серий «Естественные науки» и «Общественные науки» проходят через ее руки. Татьяне Александровне часто приходится

слышать слова искренней благодарности за скрупулезное внимание к поступающим работам, и это неудивительно, так как она специалист высокого уровня, кроме того, принципиальный, порядочный человек, умный и интересный собеседник, красивая женщина.

У Татьяны Александровны прекрасная семья, она замечательная жена, мама, бабушка.

Поздравляем нашу дорогую коллегу с юбилеем, желаем ей здоровья, внимания со стороны близких, благополучия и уюта в её доме, а также дальнейших профессиональных успехов!

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

Подписано в печать 22.09.2023. Выход в свет 25.09.2023. Формат 60×84 1/8. Бумага офсетная.
Шрифт Times. Усл. печ. л. 17,90. Уч.-изд. л. 18,54. Тираж 250 экз. Заказ № 9156 .

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@sfedu.ru, адрес в Интернете: www.izvestiya.sfedu.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) 243-41-66

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

Signed print September 22, 2023. The publication September 25, 2023. Format 60×84 1/8. Offset paper. Font Times.
Conv. print. sheets 17.90. Publ. sign. 18.54. Edition 250 copies. Order number 9156 .

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@sfedu.ru, Web Address: www.izvestiya.sfedu.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) 243-41-66

**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», ИВИС, Ulrich, EBSCO, Chemical Abstracts. Журнал включен в Russian Science Citation Index на платформе Web of Science.

Авторы, сохраняя за собой авторские права на работу и передавая журналу «Известия вузов. Северо-Кавказский регион» право первой публикации, автоматически принимают на себя обязательство не печатать её ни полностью, ни частично в каком-либо издании без указания ссылки на оригинальную публикацию в этом журнале.

Издательские услуги оплачиваются организацией или автором после утверждения статьи на редколлегии.

Оформление работ осуществляется согласно правилам:

1. Представляется статья в электронном виде. Перед заголовком указать индекс УДК.
2. Статья оформляется в формате .doc или .docx (MS Word) через 1,5 интервала, шрифтом Times New Roman размером 14 пт, страницы пронумерованы.
3. Сведения об авторах с указанием автора, ответственного за переписку, на русском и английском языках. Экспертное заключение.
4. Полное название организации на русском и английском языках.
5. Название статьи и фамилии авторов на русском и английском языках.
6. Аннотация на русском и английском языках (1000–1500 знаков / 150–200 слов).
7. Ключевые слова на русском и английском языках (8–10 слов).

Журнал распространяется по подписке через объединённый каталог «Пресса России», интернет-каталог «Пресса по подписке». Подписной индекс – 70415 (подписка на полугодие).

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.

Е-mail: izvestiya@sfedu.ru

Адрес в Интернете: www.izvestiya.sfedu.ru