

ISSN 1026–2237

DOI 10.18522/1026–2237

ИЗВЕСТИЯ  
ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

*Северо-Кавказский  
регион*

---

ЕСТЕСТВЕННЫЕ

НАУКИ

2022

1

## Журнал основан в 1972 г. Ю.А. Ждановым

### Главная редакция:

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

### Редакционная коллегия:

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

### Учредители:

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

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

Подписано в печать 28.03.2022. Выход в свет 31.03.2022. Формат 60×84 1/8. Бумага офсетная.  
Шрифт Times. Усл. печ. л. 13,71. Уч.-изд. л. 13,86. Тираж 250 экз. Заказ № 8464.

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](mailto:izvestiya@sfedu.ru), адрес в Интернете: [www.izvestiya.sfedu.ru](http://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) 247-80-51

**Journal was founded in 1972 by Yu.A. Zhdanov**

**Main Edition:**

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

**Editorial Board:**

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

**The Founders**

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

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

Signed print March 28, 2022. The publication March 31, 2022. Format 60×84 1/8. Offset paper. Font Times.  
Conv. print. sheets 13.71. Publ. sign. 13.86. Edition 250 copies. Order number 8464.

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

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

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

# ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ. СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ РЕГИОН

## BULLETIN OF HIGHER EDUCATIONAL INSTITUTIONS. NORTH CAUCASUS REGION

doi 10.18522/1026-2237-2022-1

*Свидетельство о регистрации  
ПИ № ФС 77 – 77252 от 25.11.2019,  
выдано Федеральной службой по надзору  
в сфере связи, информационных технологий  
и массовых коммуникаций  
Научный журнал  
Издаётся с 1973 г.  
Периодичность серии 4 номера в год  
№ 1 (213) 2022 г.*

*Registration certificate  
PI No. FS 77 - 77252 dated 25.11.2019  
issued Federal Service for Supervision  
of Communications, Information Technology,  
and Mass Media  
Science magazine  
Published since 1973.  
4 issues per a year  
No. 1 (213) 2022*

### ЕСТЕСТВЕННЫЕ НАУКИ

### NATURAL SCIENCE

#### СОДЕРЖАНИЕ

#### CONTENTS

##### ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ

##### PHYSICAL AND MATHEMATICAL SCIENCES

- Дроботов Ю.Е., Вакулов Б.Г.* Гладкостные свойства оператора типа потенциала Рисса с логарифмической характеристикой..... 4
- Калинина Т.И., Наседкин А.В.* Антиплоские задачи о движении осциллирующей нагрузки по границе упругой изотропной полосы при наличии поверхностных напряжений..... 12
- Омарова А.Г.* Об устойчивости и сходимости разностной схемы, аппроксимирующей краевую задачу для одного дифференциального уравнения с дробной производной Капуто ..... 23

- Drobotov Yu.E., Vakulov B.G.* Smoothness Properties of a Riesz Potential Type Operator with Logarithmic Characteristic..... 4
- Kalinina T.I., Nasedkin A.V.* Antiplane Problems about Oscillating Load Motion along the Boundary of an Elastic Isotropic Strip in the Presence of Surface Stresses..... 12
- Omarova A.G.* On the Stability and Convergence of a Different Scheme that Approximates a Boundary Value Problem for One Differential Equation with a Fractional Caputo Derivative..... 23

##### НАУКИ О ЗЕМЛЕ

##### SCIENCES OF EARTH

- Дегтярева Т.В.* Формирование микроэлементного состава черноземов обыкновенных Центрального Предкавказья..... 28
- Дубинина М.Н., Безуглова О.С.* Влияние гуминового препарата на фракционно-групповой состав фосфатов в черноземе обыкновенном карбонатном ..... 38
- Иванов Е.Н.* Современное состояние ледниковых ландшафтов горных регионов юга Восточной Сибири 49
- Лобченко Е.Е., Ничипорова И.П., Оленникова Н.Н., Романюк О.Л., Лямперт Н.А.* Пространственно-временные изменения содержания загрязняющих веществ в поверхностных водах бассейна Северной Двины ..... 57
- Салихов Ш.К., Гасанов Г.Н., Асварова Т.А., Яхьяев М.А., Гимбатова К.Б.* Азот в почвах склоновых экосистем среднегорья Дагестана ..... 66

- Degtyareva T.V.* Formation of the Microelement Composition of Ordinary Chernozems in the Central Caucasian Region..... 28
- Dubinina M.N., Bezuglova O.S.* The Impact of a Humic Preparation on the Fractional Composition of Phosphates in Calcic Chernozem ..... 38
- Ivanov E.N.* The Current State of Glacial Landscapes of Mountain Regions of Eastern Siberia's South..... 49
- Lobchenko E.E., Nichiporova I.P., Olennikova N.N., Romanyuk O.L., Lampert N.A.* Spatio-Time Changes in the Content of Pollutants in the Surface Waters of the Northern Dvina Basin..... 57
- Salikhov Sh.K., Gasanov G.N., Asvarova T.A., Yahyayev M.A., Gimbatova K.B.* Nitrogen in the Soils of Slope Ecosystems of the Middle Mountains of Dagestan ..... 66

|   |    |  |    |
|---|----|--|----|
| <i>Сальник Н.В., Горбов С.Н., Безуглова О.С., Шерстнев А.К., Скрипников П.Н.</i> Распределение микроэлементов в естественных почвах Ростовской агломерации под различными типами растительных сообществ | 71 | <i>Salnik N.V., Gorbov S.N., Bezuglova O.S., Sherstnev A.K., Skripnikov P.N.</i> Microelement Distribution in Native Soils of Rostov Agglomeration under Different Groups of Plant Communities | 71 |
| <i>Усольцева А.Н.</i> Зарубежный и российский опыт организации экологического туризма на особо охраняемых территориях   | 80 | <i>Usoltseva A.N.</i> Foreign and Russian Experience in Organizing Ecological Tourism in Protected Areas   | 80 |
| <i>Хлопкова М.В., Гасанова А.Ш., Гусейнов К.М.</i> Конхилиофауна хазарских комплексов дагестанского побережья Каспия  | 90 | <i>Khlopkova M.V., Gasanova A.Sh., Guseynov K.M.</i> Conchyliofauna of Khazar Complexes of the Dagestan Coast of the Caspian Sea   | 90 |
| <i>Щербина В.Г.</i> Аллелопатический режим почвы после разовой рекреационной нагрузки в лесных экосистемах Сочинского Причерноморья   | 96 | <i>Scherbina V.G.</i> Allelopathic Soil Regime After a One-Time Recreational Load in the Forest Ecosystems of the Sochi Black Sea Region   | 96 |

#### БИОЛОГИЧЕСКИЕ НАУКИ

|   |     |  |     |
|---|-----|--|-----|
| <i>Тания И.В., Мустафина А.Н., Абрамова Л.М.</i> Морфологические особенности редкого вида <i>Scilla monanthos</i> С. Koch. в Ритинском реликтовом национальном парке (Республика Абхазия) | 107 | <i>Taniya I.V., Mustafina A.N., Abramova L.M.</i> Morphological Features of the Rare Species <i>Scilla Monanthos</i> C. Koch. in the Ritsa Relic National Park (Abkhazia Republic) | 107 |
|---|-----|--|-----|

#### НАШИ ЮБИЛЯРЫ

|  |     |   |     |
|--|-----|---|-----|
| <i>Скляренко Г.Ю., Назаренко О.В.</i> Владимир Евгеньевич Закруткин (к 75-летию со дня рождения) | 114 | <i>Sklyarenko G.Yu., Nazarenko O.V.</i> Vladimir Evgenievich Zakrutkin (on the Occasion of His 75th Birthday) | 114 |
| <i>Ватульян А.О., Карякин М.И.</i> Яков Михайлович Ерусалимский (к 75-летию со дня рождения)     | 116 | <i>Batulyan A.O., Karyakin M.I.</i> Yakov Mikhailovich Erusalimsky (on the Occasion of His 75th Birthday)     | 116 |

#### BIOLOGICAL SCIENCES

#### OUR PERSONS

## ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ

## PHYSICAL AND MATHEMATICAL SCIENCES

Научная статья

УДК 517.5

doi: 10.18522/1026-2237-2022-1-4-11

ГЛАДКОСТНЫЕ СВОЙСТВА ОПЕРАТОРА ТИПА ПОТЕНЦИАЛА РИССА  
С ЛОГАРИФМИЧЕСКОЙ ХАРАКТЕРИСТИКОЙЮрий Евгеньевич Дроботов<sup>1✉</sup>, Борис Григорьевич Вакулов<sup>2</sup><sup>1</sup>Северо-Кавказский центр математических исследований Владикавказского научного центра Российской академии наук, Владикавказ, Республика Северная Осетия-Алания, Россия<sup>1, 2</sup>Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, Россия<sup>1</sup>yu.e.drobotov@yandex.ru✉<sup>2</sup>bvak1961@bk.ru

**Аннотация.** Риссовы ядра обобщают ядра классической теории, а свёртка с ними реализует отрицательные дробные степени оператора Лапласа. Наряду с гиперсингулярными интегралами операторы типа потенциала Рисса возникают в новых областях анализа и его приложений, например в разнообразных задачах математической физики. При исследовании таких задач значительную роль играют условия разрешимости соответствующих многомерных интегральных уравнений в тех или иных функциональных пространствах – зачастую неклассических, но постулирующих требуемые аналитические свойства решений. В настоящей работе доказана теорема типа Харди – Литтлвуда об ограниченности потенциала со степенно-логарифмическим ядром и плотностью, суммируемой по Лебегу с конкретным степенным весом. Показано, что при больших порядках потенциала образ функции из этого класса принадлежит весовому обобщённому пространству Гёльдера со степенно-логарифмической характеристикой. Рассмотрено также действие данного оператора в самих пространствах обобщённой гёльдеровости с весом из шкалы степенных, в том числе доказаны изоморфизмы этих пространств в частных случаях. В работе применяются стереографическая проекция и теоремы, доказанные для сферического потенциала типа Рисса. В качестве следствия получены условия разрешимости уравнения типа Пуассона с отрицательной дробной степенью оператора Лапласа.

**Ключевые слова:** оператор типа потенциала, потенциал Рисса, гладкость, обобщённые пространства Гёльдера, теоремы об ограниченности, изоморфизм, уравнение Пуассона, риссово дробное интегродифференцирование, гиперсингулярный интеграл

**Благодарности:** исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда № 21-19-00423, <https://www.rscf.ru/project/21-19-00423>, в Южном федеральном университете.

**Для цитирования:** Дроботов Ю.Е., Вакулов Б.Г. Гладкостные свойства оператора типа потенциала Рисса с логарифмической характеристикой // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. 2022. № 1. С. 4–11.

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

Original article

SMOOTHNESS PROPERTIES OF A RIESZ POTENTIAL TYPE OPERATOR  
WITH LOGARITHMIC CHARACTERISTIC

© Дроботов Ю.Е., Вакулов Б.Г., 2022

**Yuri E. Drobotov<sup>1✉</sup>, Boris G. Vakulov<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>North Caucasus Center for Mathematical Research, Vladikavkaz Scientific Centre, Russian Academy of Sciences, Vladikavkaz, Republic of North Ossetia-Alania, Russia

<sup>1, 2</sup>Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia

<sup>1</sup>yu.e.drobotov@yandex.ru<sup>✉</sup>

<sup>2</sup>bvak1961@bk.ru

**Abstract.** Marcel Riesz kernels generalize the ones of classical theory, and convolution with them implements the negative fractional powers of the Laplace operator. Along with hypersingular integrals, the Riesz potential type operators arise in new areas of analysis and its applications, for example, in various problems of mathematical physics. In the study of such problems, a significant role is played by the conditions of solvability of the corresponding multidimensional integral equations in certain function spaces, often non-classical but postulating the required analytical properties of solutions. In the presented paper, the Hardy-Littlewood type theorem is proved, considering the boundedness conditions for the potential with a power-logarithmic kernel and a density, integrable by Lebesgue with a specific power weight. It is shown that for the higher orders of potential, the image of a function from this class belongs to the weighted generalized Hölder space with a power-logarithmic characteristic. The action of this operator in the generalized Hölder spaces with a weight from the scale of power functions is also considered, including the isomorphisms of these spaces in special cases. Stereographic projection and theorems proved for the spherical Riesz potential type operators are applied. Consequently, the solvability conditions of a Poisson-type equation with a negative fractional power of the Laplace operator are obtained.

**Keywords:** potential type operator, Riesz potential, smoothness, generalized Hölder spaces, boundedness theorems, isomorphisms, Poisson equation, fractional calculus, hypersingular integral

**For citation:** Drobotov Yu.E., Vakulov B.G. Smoothness Properties of a Riesz Potential Type Operator with Logarithmic Characteristic. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2022;(1):4-11. (In Russ.).

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

Настоящая работа посвящена исследованию условий гладкости операторов типа потенциала вида

$$I_{\Omega}^{\alpha, \nu} f(x) = c_{\alpha} \int_{\Omega} \frac{f(y)}{|x-y|^{n-\alpha}} \ln^{\nu} \frac{r}{|x-y|} dy, \quad x \in \Omega, \quad \operatorname{Re} \alpha > 0, \quad (1)$$

с вещественными  $\nu$ ,  $c_{\alpha}$  и  $r \geq 2$ , где в качестве множества  $\Omega$  рассматриваются  $S^n := \{x \in \mathbb{R}^{n+1} : |x| = 1\}$ ,  $\dot{R}^n := \{x \in \mathbb{R}^{n+1} : x_{n+1} = 0\} \cup \{\infty\}$  – соответственно, гиперсфера и компактифицированная гиперплоскость евклидова пространства  $\mathbb{R}^{n+1}$ ,  $n \geq 2$ , вещественных векторов с метрикой и скалярным произведением, заданными выражениями

$$|x-y| = \left\{ \sum_{k=1}^{n+1} (x_k - y_k)^2 \right\}^{1/2}, \quad x \cdot y = \sum_{k=1}^{n+1} x_k y_k, \quad x, y \in \mathbb{R}^{n+1}.$$

Отметим, что для точек  $\xi, \sigma \in S^n$  тождество параллелограмма приводит к следующему соотношению между метрикой и скалярным произведением:  $|\xi - \sigma| = \sqrt{2} \sqrt{1 - \xi \cdot \sigma}$ , что позволяет рассматривать (1) в случае  $\Omega = S^n$  как оператор сферической свёртки вида  $K f(\xi) = \int_{S^n} k(\xi \cdot \sigma) f(\sigma) d\sigma$ ,  $\xi \in S^n$ , и использовать богатую теорию рядов Фурье – Лапласа для описания его аналитических свойств хотя бы при частных значениях параметра  $\nu$ . Так, спектральный анализ  $I_{S^n}^{\alpha, 0}$  и  $I_{S^n}^{\alpha, 1}$  в их разложениях по ортонормированной системе сферических гармоник позволяет сформулировать ожидаемый вид обратных операторов как композиций с гиперсингулярным интегралом

$$D^{\alpha} f(\xi) = \frac{1}{\gamma_n(-\alpha)} \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \int_{|\xi - \sigma| \geq \varepsilon} \frac{f(\sigma) - f(\xi)}{|\xi - \sigma|^{n+\alpha}} d\sigma, \quad 0 < \operatorname{Re} \alpha < 2,$$

$$\gamma_n(\alpha) = -2^\alpha \pi^{\frac{n-2}{2}} \Gamma\left(\frac{\alpha}{2}\right) \Gamma\left(\frac{\alpha-n+2}{2}\right) \sin \frac{(\alpha-n)\pi}{2}, \quad (2)$$

а именно

**Теорема 1.** Структура обратных операторов к  $I_{S^n}^{\alpha,0}$  и  $I_{S^n}^{\alpha,1}$  имеет вид

$$\left(I_{S^n}^{\alpha,0}\right)^{-1} = c_\alpha E + D^\alpha, \quad \left(I_{S^n}^{\alpha,1}\right)^{-1} = \left(I_{S^n}^{\alpha,0}\right)^{-1} A, \quad (3)$$

где  $E f = f$  – тождественный оператор,

$$c_\alpha = \Gamma\left(\frac{n+\alpha}{2}\right) / \Gamma\left(\frac{n-\alpha}{2}\right),$$

и  $A$  – оператор сферической свёртки

$$(A f)(\xi) = \int_{S^n} a(\xi \cdot \sigma) f(\sigma) d\sigma, \quad \xi \in S^n,$$

$$a(\xi \cdot \sigma) = \frac{1}{4} \pi^{-\frac{n+1}{2}} \Gamma\left(\frac{n-1}{2}\right) \sum_{m=0}^{\infty} (2m+n-1) l_m^{-1} C_m^{\frac{n-1}{2}}(\xi \cdot \sigma),$$

порождённый мультипликатором Фурье – Лапласа  $\{l_m^{-1}\}_{m=0}^{\infty}$ ,

$$l_m = -2^{\frac{n+\alpha}{2}} \pi^{\frac{n}{2}} \binom{n}{m} \binom{m+n-3}{m} \frac{(n-1)_m}{m(n/2)_m} \left(m + \frac{n-\alpha}{2}\right) \Gamma\left(\frac{\alpha}{2}\right) B^{-1}\left(\frac{n}{2}, m\right) \times \\ \times \Gamma^{-1}\left(\frac{n-\alpha+2}{2}\right) \left\{1 + \ln \frac{2}{r} \cdot \left[\psi\left(\frac{\alpha-n+2}{2}\right) + \psi\left(\frac{\alpha}{2}\right) - \psi\left(\frac{\alpha-n+2}{2} - m\right) - \psi\left(\frac{\alpha+n}{2} + m\right)\right]\right\}.$$

Использованные выше обозначения включают в себя:  $C_m^\lambda(\cdot)$  – многочлены Гегенбауэра;  $\Gamma(\cdot)$  – гамма-функция Эйлера,

$$B(z, w) = \frac{\Gamma(z)\Gamma(w)}{\Gamma(z+w)}, \quad \psi(z) = \frac{\Gamma'(z)}{\Gamma(z)} = \frac{d}{dz} \ln \Gamma(z),$$

$$(m)_k = m \cdot (m+1) \cdot \dots \cdot (m+k-1), \quad k = 1, 2, 3, \dots; \quad \binom{m}{k} = \frac{(m)_k}{k!}.$$

Первое представление в (3) получено ранее в [1, 2] и уже является классическим для риссова дробного интегродифференцирования на сфере [3, с. 160]. Второе же было доказано лишь относительно недавно в работе авторов [4].

Гладкостные свойства операторов вида (1) могут быть формализованы в терминах обобщённых пространств Гёльдера  $H^\omega(\Omega)$ .

*Определение 1.* Обобщённым пространством Гёльдера называется функциональное пространство

$$H^\omega(\Omega) := \left\{f \in C(\Omega) : \omega_f(t) \leq c \omega(t), \quad c, t > 0\right\}, \quad \Omega \subset \mathbb{R}^{n+1},$$

где  $C(\Omega)$  – пространство непрерывных на  $\Omega$  функций;  $\omega_f(t) := \sup_{\substack{x, y \in \Omega: \\ |x-y| \leq t}} |f(x) - f(y)|$  – модуль непрерывности функции  $f(\cdot)$ .

Пространство  $H^\omega(\Omega)$  банахово относительно нормы  $\|f\|_{H^\omega(\Omega)} = \|f\|_{C(\Omega)} + \sup_{t>0} \frac{\omega_f(t)}{\omega(t)}$ . Исследование

последней в случае операторов вида (1) и (2) приводит к получению оценок типа Зигмунда – интегральных конструкций от модуля непрерывности. С использованием их, а также первого представления в выражении (3), в работах [2] (для действительного  $\alpha$ ) и [5] (в случае комплексного  $\alpha$ ) доказан изоморфизм

$$I_{S^n}^{\alpha,0}\left(H^\omega(S^n)\right) = H^{\omega_\alpha}(S^n), \quad \omega_\alpha(t) = t^{\operatorname{Re} \alpha} \omega(t). \quad (4)$$



Как и многие другие результаты теории пространств обобщённой гёльдеровости, соответствующая теорема сформулирована в терминах функционального класса Бари – Стечкина.

**Определение 2.** Пусть  $\omega(\cdot)$  – функция типа модуля непрерывности на некотором вещественном интервале  $[0, l]$ , т.е. непрерывная, неотрицательная и почти возрастающая на  $[0, l]$  функция,  $\omega(0) = 0$ . Она принадлежит классу  $\Phi_\beta^\delta$ ,  $\beta > \delta \geq 0$ , если выполнены условия

$$\int_0^\tau \left(\frac{\tau}{t}\right)^\delta \frac{\omega(t)}{t} dt \leq c_1 \omega(\tau), \quad \int_\tau^l \left(\frac{\tau}{t}\right)^\beta \frac{\omega(t)}{t} dt \leq c_2 \omega(\tau),$$

где константы  $c_1$  и  $c_2$  независимы от  $\tau \in (0, l/2)$ .

Для потенциала с логарифмическим ядром  $I_{S^n}^{\alpha, \nu}$  имеет место

**Теорема 2.** Пусть  $0 < \operatorname{Re} \alpha < 1$ . Если  $\omega \in \Phi_{1-\operatorname{Re} \alpha}^0$ , то оператор  $I_{S^n}^{\alpha, \nu}$  ограничен из  $H^\omega(S^n)$  в  $H^{\omega_{\alpha, \nu}}(S^n)$ , где

$$\omega_{\alpha, \nu}(t) = \omega_\alpha(t) \ln^\nu \frac{l}{t}.$$

В случае  $\nu = 1$  имеет место изоморфизм

$$I_{S^n}^{\alpha, 1}(H^\omega(S^n)) = H^{\omega_{\alpha, 1}}(S^n).$$

Первое утверждение доказано в [6], в то время как второе непосредственно следует из представления (3) и изоморфизма (4) [4]. Аналогичный результат имеет место и в

$$H_{\{\sigma_k\}}^\omega(S^n, w) = \left\{ wf \in H^\omega(S^n) : \lim_{\xi \rightarrow \sigma_k \in S^n} (wf)(\xi) = 0, \quad k = \overline{1, N} \right\}$$

– пространствах функций, исчезающих с весом в конечном числе точек сферы. Справедлива

**Теорема 3.** Пусть весовая функция имеет вид

$$w(\xi) = \prod_{k=1}^N |\xi - \sigma_k|^{\mu_j}, \quad \xi, \sigma_k \in S^n, \quad k = \overline{1, N}. \quad (5)$$

Оператор  $I_{S^n}^{\alpha, \nu}$  ограничен, а при  $\nu \in \{0, 1\}$  – изоморфен при отображении из  $H_{\{\sigma\}}^\omega(S^n, w)$  в  $H_{\{\sigma\}}^{\omega_{\alpha, \nu}}(S^n, w)$ , если:

а) при  $0 < \operatorname{Re} \alpha < \mu_j < n$ ,  $j = \overline{1, N}$ , характеристика  $\omega \in \Phi_{\min\{1, \mu_j\} - \operatorname{Re} \alpha}^0$ ;

б) при  $n \leq \mu_j < n - \operatorname{Re} \alpha + 1$ ,  $j = \overline{1, N}$ ,  $\omega \in \Phi_{1 - \operatorname{Re} \alpha}^{\max\{\mu_j\} - n}$ .

Существенный интерес представляют также условия ограниченности операторов вида (1) при отображении пространств  $L^p(\Omega, w)$ ,  $\Omega \subset \mathbb{R}^{n+1}$ , определяемых нормой

$$\|f\|_{L^p(\Omega, w)} = \left\{ \int_\Omega w(x) |f(x)|^p dx \right\}^{\frac{1}{p}}, \quad 1 \leq p < \infty, \quad \|f\|_{L^\infty(\Omega, w)} = \operatorname{ess\,sup}_{x \in \Omega} \{w(x) |f(x)|\}.$$

При  $1 \leq p < n/\alpha$  ограниченность потенциала внутри  $L^p$ -пространств составляет классический результат [7, с. 364]. Для больших  $\alpha$  образ суммируемой функции является гладким, что было получено для  $I_{S^n}^{\alpha, \nu}$  в безвесовом случае в работе авторов [8]:

**Теорема 4.** Если выполнено условие

$$2 \leq n < \alpha p, \quad 1 \leq p \leq \infty, \quad (6)$$

то найдётся  $m > 2$  такое, что  $I_{S^n}^{\alpha, \nu}$  ограничен из  $L^p(S^n)$  в  $H^{\omega_{\alpha, \nu}}(S^n)$ , где

$$\omega_{\alpha, \nu}(t) = t^{\alpha - n/p} \ln^\nu \frac{m}{t}. \quad (7)$$

Дальнейшее изложение ставит целью распространение условий представленных теорем на случай  $\Omega = \dot{R}^n$ .

Точки  $\xi \in S^n$  и  $x \in \dot{R}^n$  связаны стереографической проекцией – взаимно однозначным отображением, осуществляемым по формулам

$$\xi_k = \frac{2x_k}{|x|^2 + 1}, \quad k = \overline{1, n}; \quad \xi_{n+1} = \frac{|x|^2 - 1}{|x|^2 + 1}. \quad (8)$$

При этом справедливы следующие преобразования метрики и элемента площади сферы [9]:

$$|\xi - \sigma| = \frac{2|x - y|}{\sqrt{|x|^2 + 1}\sqrt{|y|^2 + 1}}, \quad d\sigma = 2^{n-1}(|y|^2 + 1)^{-n} dy. \quad (9)$$

В то время как в теории аналитических функций, при  $n = 2$ , формулы (8) и (9) являются стандартным приёмом замены переменных под знаком интеграла, в анализе функций многих вещественных переменных они осуществляют преобразование поверхностного интеграла в объёмный, изменение порядка сингулярности, а также переопределение самих функциональных пространств.

Так, пространства  $H^\omega$  определены условием на локальный модуль непрерывности своих элементов, который, в свою очередь, задан в терминах евклидовой метрики. Преобразование (9) ставит в соответствие евклидовой метрике на сфере некоторое новое расстояние на гиперплоскости, которое тем не менее эквивалентно евклидову, что легко проверяется. Поэтому основным вопросом является определение весовых коэффициентов, с которыми  $I_{\dot{R}^n}^{\alpha, \nu} f$  принадлежит пространству обобщённой гёльдеровости, полностью отвечающему определению 1 с одной из характеристик, введённых ранее. В предшествующих работах такая задача решалась для  $I_{\dot{R}^n}^{\alpha, 0}$  сперва в случае вещественных [10], а затем и комплексных [11] значений  $\alpha$ .

Стереографическую проекцию будем понимать как оператор  $\Pi[f(\xi)] := f_*(x)$ ,  $\xi \in S^n$ ,  $x \in \dot{R}^n$ , действующий по формулам (8). Введём также обобщение оператора (1) в пространственном случае:

$$K_\theta^\alpha \phi(x) := \int_{\dot{R}^n} \frac{\theta(x, y)\phi(y)}{|x - y|^{n-\alpha}} dy, \quad x \in \dot{R}^n,$$

где функция  $\theta(\cdot)$  носит название характеристики. Очевидно,  $K_\theta^\alpha = I_{\dot{R}^n}^{\alpha, \nu}$  при  $\theta(x, y) = \ln^\nu \frac{r}{|x - y|}$ . Для

проекции оператора  $I_{S^n}^{\alpha, \nu}$  имеет место

**Лемма 1.** Пусть  $f_*(x) = \Pi[f(\xi)]$ ,  $\xi \in S^n$ ,  $x \in \dot{R}^n$ . Тогда

$$\Pi I_{S^n}^{\alpha, \nu} f = w_\Pi^{\frac{n-\alpha}{2}} K_{\theta_\Pi}^\alpha \left( w_\Pi^{\frac{n+\alpha}{2}} f_* \right), \quad w_\Pi(x) := 1 + |x|^2, \quad \theta_\Pi(x, y) := 2^{\alpha-2\nu} \ln^\nu \left[ \frac{r}{2} \cdot \frac{w_\Pi(x) w_\Pi(y)}{|x - y|} \right]. \quad (10)$$

*Доказательство.* Применив формулы (9), получаем

$$\Pi \left[ I_{S^n}^{\alpha, \nu} f(\xi) \right] = 2^\alpha \left( |x|^2 + 1 \right)^{\frac{n-\alpha}{2}} \int_{\dot{R}^n} \frac{f_*(y)}{|x - y|^{n-\alpha}} \left( 1 + |y|^2 \right)^{\frac{n+\alpha}{2}} \ln^\nu \frac{r \sqrt{|x|^2 + 1} \sqrt{|y|^2 + 1}}{2|x - y|} dy,$$

что эквивалентно утверждению (10).

В частных случаях возможно представление проекции  $\Pi I_{S^n}^{\alpha, \nu}$  композицией операторов  $I_{\dot{R}^n}^{\alpha, \nu}$ :

**Следствие 1.** Пусть  $a(x) := \ln w_\Pi(x)$ . Тогда для неотрицательных целых  $\nu$  проекция оператора  $I_{S^n}^{\alpha, \nu}$  может быть записана как

$$\Pi I_{S^n}^{\alpha, \nu} f = w^{\frac{n-\alpha}{2}} \sum_{\substack{k_j \geq 0: \\ k_1 + \dots + k_4 = \nu}} \binom{\nu}{k_1, \dots, k_4} \frac{\ln^{k_1} 1/2}{2^{k_2 k_3}} \cdot a^{k_2} I_{\dot{R}^n}^{\alpha, k_4} \left( a^{k_3} f_* \right), \quad (11)$$

где суммирование производится по всем композициям числа  $v$  из четырёх частей,  $I_{\dot{R}^n}^{\alpha, k_4}$  определены с константой  $c_\alpha = 2^\alpha$ .

*Доказательство.* По полиномиальной теореме имеем

$$\begin{aligned} & \left( \ln \frac{1}{2} + \ln \sqrt{|x|^2 + 1} + \ln \sqrt{|y|^2 + 1} + \ln \frac{r}{|x-y|} \right)^v = \\ & = \sum_{\substack{k_j \geq 0: \\ k_1 + \dots + k_4 = v}} \binom{v}{k_1, \dots, k_4} \frac{\ln^{k_1} 1/2}{2^{k_2 k_3}} \ln^{k_2} (|x|^2 + 1) \ln^{k_3} (|y|^2 + 1) \ln^{k_4} \frac{1}{|x-y|}. \end{aligned}$$

Используя это в выражении (10), получаем представление (11).

Наконец, сформулируем результаты об обобщённой гёльдеровости оператора  $K_{\theta_\Pi}^\alpha$  в условиях гёльдеровости либо суммируемости его плотности  $\phi(\cdot)$ :

**Теорема 5.** Пусть  $0 < \text{Re } \alpha < 1$ , характеристика  $\omega_{\alpha, v}(\cdot)$  имеет вид (7), вес  $w_\Pi(\cdot)$ , а также характеристика  $\theta(\cdot)$  оператора  $K_\theta^\alpha$  определены в (10). При  $\omega \in \Phi_{1-\text{Re } \alpha}^0$  справедливо вложение

$$K_{\theta_\Pi}^\alpha \left( H^{\omega_\alpha} \left( \dot{R}^n, w_\Pi^{-\frac{n+\alpha}{2}} \right) \right) \subseteq H^{\omega_{\alpha, v}} \left( \dot{R}^n, w_\Pi^{\frac{n-\alpha}{2}} \right).$$

**Теорема 6.** Пусть  $\mu \in \mathbb{R}^N$  и  $\mu_k > 0$ ,  $k = \overline{1, N}$ . В условиях теоремы 3 имеет место вложение

$$K_{\theta_\Pi}^\alpha \left( H_{\{s_k\}}^{\omega_\alpha} \left( \dot{R}^n, w_{\varepsilon_1} \right) \right) \subseteq H_{\{s_k\}}^{\omega_{\alpha, v}} \left( \dot{R}^n, w_{\varepsilon_2} \right), \quad s_k \in \dot{R}^n, \quad k = \overline{1, N},$$

где

$$\varepsilon_1 = -\frac{n+\alpha}{2}, \quad \varepsilon_2 = \frac{n-\alpha}{2},$$

$$w_\varepsilon(x) := 2^{\|\mu\|} [w_\Pi(x)]^{\varepsilon - \|\mu\|/2} \prod_{k=1}^N \frac{|x-s_k|^{\mu_k}}{w_\Pi^{\mu_k/2}(s_k)}, \quad \|\mu\| = \sum_{k=1}^N \mu_k.$$

*Доказательство* теорем 5 и 6 проводится аналогичными методами. Положив  $\phi(x) = f_*(x)$ , достаточно воспользоваться выражениями (10) и тем фактом, что оператор стереографической проекции сохраняет обобщённую гёльдеровость. Преобразовав вес (5) по формуле (9), обозначим произведение результата и весовой функции  $w_\Pi^\varepsilon(x)$  как  $w_\varepsilon(x)$ . Таким образом, условия теорем индуцированы соответствующими условиями для  $I_{S^n}^{\alpha, v}$ .

**Замечание 1.** При  $v \in \{0, 1\}$  приведённые вложения превращаются в равенства.

Гладкостные свойства оператора  $I_{\dot{R}^n}^{\alpha, v}$  особенно интересны в терминах гёльдеровских пространств с весами, привязанными к нулю и бесконечности. Действительно, порядок сингулярности потенциала меньше размерности пространства, и интеграл в (1) расходится на бесконечности, в то время как гиперсингулярный интеграл (2), выражающий обратный к оператору (1) в частных случаях, имеет 0 особой точкой.

**Следствие 2.** Пусть  $w_\varepsilon(\mu, x) = 2^{\mu_1 + \mu_2} |x|^{\mu_2} [w_\Pi(x)]^{2\varepsilon - (\mu_1 + \mu_2)/2}$ ,  $\mu \in \mathbb{R}^2$ .

Утверждение теоремы 5 распространяется на пространства  $H_{\{0\}}^{\omega_\alpha}(\dot{R}^n, w_\varepsilon)$  с  $\mu = (\mu_1, 0)$ ,  $H_{\{\infty\}}^{\omega_\alpha}(\dot{R}^n, w_\varepsilon)$  с  $\mu = (0, \mu_2)$  и  $H_{\{0, \infty\}}^{\omega_\alpha}(\dot{R}^n, w_\varepsilon)$  с  $\mu = (\mu_1, \mu_2)$ .

Следствие 2 было получено в [12] независимо на основании результатов для гёльдеровских пространств с весом  $w(\xi) = |\xi - e_n|^{\mu_1} |\xi + e_n|^{\mu_2}$ ,  $e_n := (0, \dots, 0, 1) \in \mathbb{R}^n$ .

**Теорема 7.** Пусть выполнено условие (6). Тогда оператор  $K_0^{\alpha, \nu}$  ограничен из  $L^p(\dot{R}^n, w_0)$  в  $H^{\omega_{\alpha, \nu}}(\dot{R}^n, w_{\Pi}^{(n-\alpha)/2})$ , где характеристика  $\omega_{\alpha, \nu}(\cdot)$  дана в (7) и  $w_0(x) := 2^{p(n-1)} [w_{\Pi}(x)]^{\frac{n(2p-1)-\alpha}{2}-p}$ .

*Доказательство* данной теоремы аналогично доказательству теоремы 5, но заметим, что стереографическая проекция переводит  $L^p(S^n)$  в пространство  $L^p(\dot{R}^n, w)$  с весом  $w^{1/p}(x) = 2^{n-1} w_{\Pi}^{1-n}(x)$ . В произведении с весовой функцией  $w_{\Pi}^{-(n+\alpha)/2}(x)$ , выделенной в выражении (10), он продуцирует представленный выше вес  $w_0(x)$ .

В завершение рассмотрим некоторые практические следствия установленных теоретических результатов. Напомним, что операторы вида (1) возникают в дробном интегрировании функций многих вещественных переменных как реализация отрицательных дробных степеней оператора Лапласа [7, с. 357–363]:

$$(-\Delta)^{-\alpha/2} f = I_{R^n}^{\alpha, \nu} f, \quad \nu = \begin{cases} 0, & \alpha \neq n + 2k, \\ 1, & \alpha = n + 2k, \end{cases} \quad k \in \mathbb{N}_0. \quad (12)$$

Тогда из теорем 2 и 3 возможно получить следующие сведения относительно обратной задачи для уравнения Пуассона:

**Теорема 8.** Уравнение  $(-\Delta)^{-\alpha/2} f = g$ ,  $\operatorname{Re} \alpha > 0$ , однозначно разрешимо в весовых пространствах обобщённой гёльдеровости. При этом весовые функции получаются редукцией выражения (11) на случай  $\nu \in \{0, 1\}$ .

Отметим, что при этом значения параметров  $\alpha$  и  $\nu$  сохраняют обозначенную в выражении (12) взаимосвязь. Интересен тот факт, что в случае отрицательных вещественных значений  $\alpha$  приведённое выше уравнение активно изучается в задачах дробной диффузии [13], электростатики [14] и других областях математической физики. Дробный лапласиан в этом случае реализуется гиперсингулярным интегралом (2).

#### Список источников

1. Павлов П.М., Самко С.Г. Описание пространств  $L_p^\alpha(S_{n-1})$  в терминах сферических гиперсингулярных интегралов // Докл. АН СССР. 1984. № 276, № 3. С. 546–550.
2. Вакулов Б.Г. Оператор типа потенциала на сфере в обобщенных классах Гёльдера // Изв. вузов. Математика. 1986. № 11. С. 66–69.
3. Samko S.G. Hypersingular integrals and their applications. London; New York: Taylor & Francis, 2002. Vol. 5. P. 359.
4. Vakulov B.G., Drobotov Yu.E. Riesz Potential with Logarithmic Kernel in Generalized Hölder Spaces: Theorems on Inversion and Isomorphisms // Recent Applications of Financial Risk Modelling and Portfolio Management. Hershey, PA, IGI Global, 2021. P. 275–296.
5. Вакулов Б.Г., Карапетянц Н.К., Шанкишвили Л.Д. Сферические потенциалы комплексного порядка в обобщённых пространствах Гёльдера с весом // Докл. РАН. 2002. Т. 382, № 3. С. 301–304.
6. Вакулов Б.Г., Карапетянц Н.К., Шанкишвили Л.Д. Операторы сферической свертки со степенно-логарифмическим ядром в обобщенных пространствах Гёльдера // Изв. вузов. Математика. 2003. № 2. С. 3–14.
7. Самко С.Г., Килбас А.А., Маричев О.И. Интегралы и производные дробного порядка и некоторые их приложения. Минск: Наука и техника, 1987. 688 с.
8. Vakulov B.G., Drobotov Yu.E. The Riesz Potential Type Operator with a Power-Logarithmic Kernel in the Generalized Hölder Spaces on a Sphere // Springer Proceedings in Materials. 2021. Vol. 10. P. 147–159.
9. Михлин С.Г. Многомерные сингулярные интегралы и интегральные уравнения. М.: ГИФМЛ, 1962. 258 с.
10. Вакулов Б.Г. О действии риссова потенциала по  $R^n$  в гёльдеровских пространствах с некоторыми степенными весами // Актуальные вопросы теории функций. Ростов н/Д.: Изд-во РГУ, 1987. С. 153–155.
11. Вакулов Б.Г. Сферические операторы типа потенциала в обобщённых пространствах Гёльдера с весом на сфере // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 1999. № 4. С. 5–10.
12. Вакулов Б.Г. О действии оператора риссова потенциала комплексного порядка по  $R^n$  в весовых пространствах Гёльдера // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2001. № 4. С. 47–49.
13. Золотарев В.М., Учайкин В.В., Саенко В.В. Супердиффузия и устойчивые законы // Журн. эксперим. и теор. физики. 1999. Т. 115, № 4. С. 1411–1425.

14. Li Y.-Y., Zhao Y., Xie G.-N., Baleanu D., Yang X.-J., Zhao K. Local Fractional Poisson and Laplace Equations with Applications to Electrostatics in Fractal Domain // *Advances in Mathematical Physics*. 2014. Vol. 2014. P. 1–5.

### References

1. Pavlov P. M., Samko S. G. Description of spaces  $L_p^\alpha(S_{n-1})$  in terms of spherical hypersingular integrals. *Dokl. Akad. Nauk SSSR = Reports of the USSR Academy of Sciences*. 1984;276(3):546-550. (In Russ.).
2. Vakulov B. G. An operator of potential type on a sphere in generalized Hölder classes. *Soviet Math. (Iz. VUZ)*. 1986;30(11):90-94.
3. Samko S.G. *Hypersingular integrals and their applications*. London, New York: Taylor & Francis; 2002;5:359.
4. Vakulov B. G., Drobotov Yu. E. Riesz Potential with Logarithmic Kernel in Generalized Hölder Spaces: Theorems on Inversion and Isomorphisms. *Recent Applications of Financial Risk Modelling and Portfolio Management*. Hershey, PA, IGI Global, 2021:275-296.
5. Vakulov B. G., Karapetyants N. K., Shankishvili L. D. Spherical potentials of complex order in generalized Hölder spaces with weight. *Dokl. Akad. Nauk SSSR = Reports of the USSR Academy of Sciences*. 2002;382(3):301-304. (In Russ.).
6. Vakulov B. G., Karapetyants N. K., Shankishvili L. D. Spherical convolution operators with a power-logarithmic kernel in generalized Hölder spaces. *Russian Math. (Iz. VUZ)*. 2003;47(2):1-12.
7. Samko S.G., Kilbas A.A., Marichev O.I. *Integrals and derivatives of fractional order and some of their applications*. Minsk: Nauka i tekhnika Publ.; 1987. 688 p. (In Russ.).
8. Vakulov B. G., Drobotov Yu. E. The Riesz Potential Type Operator with a Power-Logarithmic Kernel in the Generalized Hölder Spaces on a Sphere. *Springer Proceedings in Materials*, 2021;10:147-159.
9. Mikhlina S. G. *Higher-dimensional singular integrals and integral equations*. Moscow: GIFML Publ., 1962. 258 p. (In Russ.).
10. Vakulov B. G. On the action of the Riesz potential on  $R^n$  in Hölder spaces with specific power weights. *Topical Issues of the Theory of Functions*. Rostov-on-Don: RSU Press; 1987:153-155. (In Russ.).
11. Vakulov B. G. Spherical potential-type operators in generalized Hölder spaces with weight on a sphere. *Izvestiya vuzov. Severo-Kavkazskii region. Estestvennye nauki = Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science*. 1999;(4):5-10. (In Russ.).
12. Vakulov B. G. On the action of the Riesz potential operator of complex order on  $R^n$  in Hölder weight spaces. *Izvestiya vuzov. Severo-Kavkazskii region. Estestvennye nauki = Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science*. 2001;(4):47-49. (In Russ.).
13. Zolotarev V. M., Uchaikin V. V., Saenko V. V. Superdiffusion and stable laws. *Journal of Experimental and Theoretical Physics*. 1999;88(4):780-787.
14. Li Y.-Y., Zhao Y., Xie, G.-N., Baleanu D., Yang X.-J., Zhao K. Local Fractional Poisson and Laplace Equations with Applications to Electrostatics in Fractal Domain. *Advances in Mathematical Physics*. 2014;2014:1-5.

### Информация об авторах

Дроботов Ю.Е. – младший научный сотрудник, аспирант, магистрант, Институт математики, механики и компьютерных наук им. И. И. Воровича; младший научный сотрудник, Северо-Кавказский центр математических исследований ВЦ РАН.

Вакулов Б.Г. – кандидат физико-математических наук, доцент, Институт математики, механики и компьютерных наук им. И. И. Воровича.

### Information about the authors

Drobotov Yu.E. - Junior Researcher, Postgraduate, Master's Student, Vorovich Institute of Mathematics, Mechanics and Computer Sciences; Junior Researcher, North Caucasus Center for Mathematical Research, Vladikavkaz Scientific Centre, Russian Academy of Sciences.

Vakulov B.G. - Candidate of Science (Physics and Mathematics), Associate Professor, Vorovich Institute of Mathematics, Mechanics and Computer Sciences.

Статья поступила в редакцию 14.12.2021; одобрена после рецензирования 18.01.2022; принята к публикации 16.03.2022.  
The article was submitted 14.12.2021; approved after reviewing 18.01.2022; accepted for publication 16.03.2022.

Научная статья

УДК 519.6: 537.2

doi: 10.18522/1026-2237-2022-1-12-22

## АНТИПЛОСКИЕ ЗАДАЧИ О ДВИЖЕНИИ ОСЦИЛЛИРУЮЩЕЙ НАГРУЗКИ ПО ГРАНИЦЕ УПРУГОЙ ИЗОТРОПНОЙ ПОЛОСЫ ПРИ НАЛИЧИИ ПОВЕРХНОСТНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ

Тамара Ипполитовна Калинина<sup>1✉</sup>, Андрей Викторович Наседкин<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Южно-Российский государственный политехнический университет имени М.И. Платова, Новочеркасск, Россия

<sup>2</sup>Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, Россия

<sup>1</sup>kalinina-toma@yandex.ru✉

<sup>2</sup>nasedkin@math.sfedu.ru

**Аннотация.** Рассматриваются симметричная и антисимметричная антиплоские задачи о движении с постоянной дозвуковой скоростью осциллирующей нагрузки по границе упругой изотропной нанотонкой полосы. Учет наноразмерности толщины полосы осуществляется введением поверхностных напряжений по теории Гуртина – Мурдоха. Согласно этой теории, принимается, что на торцах слоя помимо внешних нагрузок действуют также поверхностные напряжения, которые описываются поверхностным законом Гука. В результате свойства упругого материала полосы с наноразмерной толщиной становятся отличными от свойств материала тела обычной размерности. Для решения использовалась стандартная техника, включающая применение принципа предельного поглощения, преобразования Фурье по бесконечно протяженной координате и теории вычетов для нахождения обратного преобразования Фурье. При различных толщинах полосы были получены решения в виде рядов по собственным волнам, изучены дисперсионные соотношения и построены графики амплитуд перемещений по толщине. Проведенный анализ показал, что при фиксированных значениях частоты и скорости движения источника значения неотрицательных вещественных волновых чисел больше при наличии поверхностных напряжений, чем значения волновых чисел для классического случая задач без поверхностных напряжений. Отмечено, что поверхностные напряжения оказывают существенное влияние только при уменьшении толщины полосы до наноразмеров.

**Ключевые слова:** установившиеся колебания, движущаяся нагрузка, дисперсионное уравнение, фазовая скорость, упругая полоса, нанотолщина, поверхностные напряжения, модель Гуртина – Мурдоха

**Для цитирования:** Калинина Т.И., Наседкин А.В. Антиплоские задачи о движении осциллирующей нагрузки по границе упругой изотропной полосы при наличии поверхностных напряжений // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. 2022. № 1. С. 12–22.

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

Original article

## ANTIPLANE PROBLEMS ABOUT OSCILLATING LOAD MOTION ALONG THE BOUNDARY OF AN ELASTIC ISOTROPIC STRIP IN THE PRESENCE OF SURFACE STRESSES

Тамара И. Калинина<sup>1✉</sup>, Андрей В. Наседкин<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI), Novocherkassk, Russia

<sup>2</sup>Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia

<sup>1</sup>kalinina-toma@yandex.ru✉

<sup>2</sup>nasedkin@math.sfedu.ru

© Калинина Т.И., Наседкин А.В., 2022

**Abstract.** In this paper, symmetric and antisymmetric antiplane problems about the motion with a constant subsonic velocity of an oscillating load along the boundary of an elastic isotropic nanoscale strip are considered. The nanoscale strip thickness is considered by introducing surface stresses in accordance with the Gurtin-Murdoch theory. According to this theory, it is assumed that, in addition to external loads, surface stresses act on the layer boundaries, which are described by Hooke's surface law. As a result, the properties of the elastic material of the strip with nanoscale thickness become different from the material properties of a regular-sized body. A standard technique was used for the solution, including the application of limiting absorption principle, the Fourier transform over infinitely extended coordinate and the theory of residues for finding the inverse Fourier transform. For various strip thicknesses, solutions were obtained in the form of series in natural waves, dispersion relations were studied, and graphs of the displacement amplitudes along the thickness were plotted. The analysis showed that for fixed values of frequency and velocity of the source, the values of non-negative real wave numbers are greater in the presence of surface stresses than the values of the wave numbers for the classical case of the problem without surface stresses. It is noted that surface stresses have a significant effect only when the strip thickness decreases to nanosizes.

**Keywords:** steady-state oscillations, moving load, dispersion equation, phase velocity, elastic layer, nanoscale thickness, surface stresses, Gurtin-Murdoch model

**For citation:** Kalinina T.I., Nasedkin A.V. Antiplane Problems about Oscillating Load Motion along the Boundary of an Elastic Isotropic Strip in the Presence of Surface Stresses. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2022;(1):12-22. (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

В последние годы интенсивно разрабатываются новые наноразмерные устройства, в том числе ультратонкие пленочные структуры. Это определяет актуальность исследований динамических задач наномеханики для полугораниченных тел. Такие задачи существенно отличаются от соответствующих задач для тел обычных размеров, поскольку масштабный фактор, как было отмечено во многих экспериментальных и теоретических исследованиях, приводит к изменению механических свойств [1–3]. Для описания наноразмерных эффектов разработаны различные теоретические и инженерные подходы: теория, основанная на методах молекулярной динамики, градиентная теория упругости, нелокальные теории и различные модели поверхностной упругости. Среди этих теорий одной из наиболее простых и популярных является модель поверхностных напряжений Гуртина – Мурдоха [4, 5], которая, как и другие аналогичные модели, отражает размерный фактор, связанный с увеличением отношения поверхности тела к его объему при переходе на наноуровень.

В [1–3, 6, 7] проанализированы различные математические модели поверхностной упругости, позволяющие учитывать масштабные факторы, обсуждены свойства тел с неидеальной поверхностью или покрытием. Показано, что эти свойства в значительной степени зависят от микроструктуры поверхностей или покрытий. Было отмечено, что распространение поверхностных и объемных волн при наличии поверхностной упругости имеет большое значение в области тонкопленочных приложений, например для микроэлектронных и микроэлектромеханических систем.

В [5–16] исследованы задачи о распространении волн в упругих полубесконечных средах с учетом поверхностных напряжений по теории Гуртина – Мурдоха. В большинстве этих работ изучались антиплоские задачи об установившихся колебаниях. Волны Лява в полупространстве и слое, сцепленном с полупространством, рассматривались в [6–8, 10, 12, 14], а сдвиговые волны в слое и составном слое – в [11, 13]. При этом в [8] кроме поверхностных напряжений предполагался также неидеальный контакт на интерфейсной границе, а в [14] интерфейсная поверхность была шероховатой. Плоские двумерные задачи изучались в [5, 9, 10, 15, 16]. В [5, 15] рассматривалось отражение плоских волн на границах с поверхностными напряжениями, в [10, 16] изучались волны Рэлея и Стоунли в полупространстве, а в [9] – волны Лэмба в полосе.

Проведенные исследования позволили оценить влияние поверхностных напряжений на поверхностные волны. Было отмечено, что при учете поверхностных эффектов могут появиться типы волн, отсутствующие в соответствующих классических задачах, и все поверхностные волны являются дисперсионными.

В настоящей работе в продолжение [17] изучаются антиплоские симметричные и антисимметричные задачи для ультратонкой полосы с поверхностными напряжениями Гуртина – Мурдоха. В обеих задачах на границах полосы действуют осциллирующие источники сдвиговых волн, которые могут также перемещаться вдоль полосы с постоянной скоростью.

Следуя [18], задачи, в которых источник волн движется с постоянной скоростью  $w$  и одновременно осциллирует с частотой  $\omega$ , будем называть задачами  $B$ . Если же  $w = 0$ ,  $\omega \neq 0$ , то имеем классические задачи об установившихся колебаниях, которые будем называть задачами  $A$ . Как и для обычных задач теории упругости с подвижными источниками без поверхностных напряжений, будем использовать принцип соответствия между задачами  $A$  и  $B$ , известный для аналогичных задач с макроразмерными параметрами [18]. Этот подход позволяет исследовать задачу  $B$ , используя дисперсионные свойства более простой задачи  $A$  [18].

### Постановка задачи

Обозначим через  $O\xi_1\xi_2\xi_3$  неподвижную систему координат, отнесенную к рассматриваемой упругой полосе. Пусть  $\tau$  – время;  $\mathbf{u}(\xi_1, \xi_2, \xi_3, \tau)$  – вектор перемещений. Предположим, что упругая изотропная среда с модулем сдвига  $\mu$  и плотностью  $\rho$  занимает объем  $V = \{|\xi_1| \leq \infty, |\xi_2| \leq \infty, -h/2 < \xi_3 < h/2\}$ .

Будем считать, что в плоскости  $O\xi_1\xi_3$  существует возможность постановки антиплоской задачи при действии на границах полосы  $\xi_3 = \pm h/2$  нагрузки  $\mathbf{f}_2^\pm = \{0, f_2^\pm, 0\}$ ,  $f_2^\pm = f_2^\pm(\xi_1, \tau)$ , распределённой внутри отрезка  $|\xi_1| \leq a$ , т.е.  $f_2^\pm = 0$  при  $|\xi_1| > a$ .

Тогда в полосе генерируется поле перемещений, зависящее от переменных  $\xi_1, \xi_3, \tau$ , причем у вектора механических перемещений имеется только одна ненулевая компонента в направлении, перпендикулярном плоскости  $O\xi_1\xi_3$ :  $\mathbf{u} = \{0, u_2, 0\}$ ,  $u_2 = u_2(\xi_1, \xi_3, \tau)$ .

Уравнение движения для антиплоской задачи будет иметь вид

$$\partial_1\sigma_{21} + \partial_3\sigma_{23} = \rho\ddot{u}_2, \quad (1)$$

где  $\partial_j = \partial/\partial\xi_j$ ,  $j = 1, 3$ , а компоненты напряжений  $\sigma_{21}$  и  $\sigma_{23}$  связаны с перемещением  $u_2$  по обычным формулам антиплоской задачи:  $\sigma_{21} = \mu \partial_1 u_2$ ,  $\sigma_{23} = \mu \partial_3 u_2$ .

В соответствии с теорией Гуртина – Мурдоха [4, 5] примем следующие граничные условия:

$$\pm\sigma_{23} = \partial_1\sigma_{21}^s - \rho^s\ddot{u}_2 + f_2^\pm, \quad \xi_3 = \pm h/2. \quad (2)$$

В условии (2) предполагается наличие на границе полосы поверхностных напряжений  $\sigma_{21}^s$  и поверхностных инерционных нагрузок для среды с поверхностной плотностью  $\rho^s$  на границах. Поверхностные напряжения  $\sigma_{21}^s$  связаны с компонентой перемещения  $u_2$  поверхностным законом Гука  $\sigma_{21}^s = \mu^s \partial_1 u_2$ , где  $\mu^s$  – поверхностный модуль сдвига.

Будем рассматривать два вида граничных условий. Для симметричной задачи примем, что  $f_2^+ = f_2^- = f_2$ , а для антисимметричной задачи будем считать, что  $f_2^\pm = \pm f_2$ .

Предположим, что источник колебаний  $f_2$  движется с постоянной скоростью  $w$  вдоль оси  $\xi_1$  и одновременно осциллирует с частотой  $\omega$  и амплитудой колебаний  $f(\xi_1 - w\tau)$

$$f_2 = f_2(\xi_1, \tau) = f(\xi_1 - w\tau)e^{i\omega\tau}. \quad (3)$$

Введём в рассмотрение подвижную систему координат  $Ox_1x_2x_3$ , движущуюся относительно неподвижной системы координат со скоростью источника  $w$ . Время в подвижной системе координат обозначим через  $t$ . Эти две системы координат связаны между собой следующим образом:

$$x_1 = \xi_1 - w\tau, \quad x_2 = \xi_2, \quad x_3 = \xi_3, \quad t = \tau, \quad (4)$$

$$\partial/\partial\xi_j = \partial/\partial x_j = \partial_j, \quad \partial_\tau = \partial_t - w \partial_1. \quad (5)$$

Будем считать, что при действии источника (3) для перемещений  $u_2$  в подвижной системе координат (4) существует режим установившихся колебаний:

$$u_2 = v(x_1, x_3)e^{i\omega t}.$$

В (1), (2) перейдем к подвижной системе координат (4), (5). Тогда для амплитуды перемещений  $v$  с учетом объемного и поверхностного законов Гука получим краевую задачу

$$\mu(\partial_{11}v + \partial_{33}v) = \rho(i\omega - w \partial_1)^2 v, \quad (6)$$

$$\mu^s \partial_{11}v = \pm\mu \partial_3 v + \rho^s(i\omega - w \partial_1)^2 v - f^\pm, \quad x_3 = \pm h/2, \quad (7)$$

где  $\partial_{jj} = \partial^2/\partial x_j^2$ .



Отметим, что при  $\mu^s = 0, \rho^s = 0$  имеем обычную задачу об антиплоских колебаниях полосы без поверхностных эффектов, решение которой хорошо известно. Анализ размерности показывает, что величины  $\mu^s$  и  $\rho^s$  отличаются от соответствующих величин  $\mu$  и  $\rho$  в объеме по размерности. Так, в системе Си  $\mu$  измеряется в Н/м<sup>2</sup>,  $\rho$  – в кг/м<sup>3</sup>, тогда как  $\mu^s$  измеряется в Н/м, а  $\rho^s$  – в кг/м<sup>2</sup>. Экспериментальные данные показывают, что значения соответствующих поверхностных и объемных величин различаются так, что они оказываются сопоставимыми  $\mu \sim \mu^s/d, \rho \sim \rho^s/d$  при характерных пространственных размерах  $d$  порядка  $10^{-9}$  (м) и меньше. В рассматриваемой задаче таким параметром  $d$  является толщина полосы  $h$ , и поэтому следует ожидать, что поверхностные эффекты будут оказывать влияние при наноразмерных толщинах полосы.

Для удобства дальнейшего анализа перейдем в (6), (7) к безразмерным величинам:  $\tilde{x}_i = x_i/h, \tilde{v} = v/h, \tilde{\mu} = 1, \tilde{\omega} = \omega h/c, c = \sqrt{\mu/\rho}, \tilde{w} = w/c, \tilde{c} = 1, \tilde{\rho} = 1, \tilde{\mu}^s = \mu^s/(\mu h), \tilde{\rho}^s = (\rho^s c^2)/(\mu h), \tilde{f} = f/\mu$ . Как видно, поверхностные коэффициенты  $\tilde{\mu}^s$  и  $\tilde{\rho}^s$  обратно пропорциональны толщине, и поэтому будут существенны только при малых  $h$ .

Знак «тильда» далее будем опускать, и тогда задача (6), (7) примет вид

$$\partial_{11}v + \partial_{33}v = (i\omega - w\partial_1)^2v, \tag{8}$$

$$\mu^s \partial_{11}v = \pm \partial_3v + \rho^s (i\omega - w\partial_1)^2v - f^\pm, \quad x_3 = \pm 1/2. \tag{9}$$

Для выделения единственного решения задачи (8), (9) используем принцип предельного поглощения [18], согласно которому перейдем к  $\varepsilon$ -задаче, заменив в (8), (9)  $\omega$  на  $\omega_\varepsilon = \omega - i\varepsilon, 0 < \varepsilon \ll 1$ , а  $v$  на  $v_\varepsilon$ . По принципу предельного поглощения под решением задачи будем понимать предел решения  $\varepsilon$ -задачи:  $v = \lim_{\varepsilon \rightarrow +0} v_\varepsilon$ .

### Аналитические решения

Применив к  $\varepsilon$ -задаче интегральное преобразование Фурье по координате  $x_1$   $V_\varepsilon(\alpha, x_3) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} v_\varepsilon(x_1, x_3) e^{i\alpha x_1} dx_1$ , из (8), (9) получим

$$\partial_{33}V_\varepsilon - \gamma_\varepsilon^2 V_\varepsilon = 0, \tag{10}$$

$$-\mu^s \alpha^2 V_\varepsilon = \pm \partial_3 V_\varepsilon - \rho^s \Omega_\varepsilon^2 V_\varepsilon - F^\pm(\alpha), \quad x_3 = \pm 1/2, \tag{11}$$

где  $\gamma_\varepsilon = \sqrt{\alpha^2 - \Omega_\varepsilon^2}, \quad \Omega_\varepsilon = \omega_\varepsilon + w\alpha, \quad F^+(\alpha) = F^-(\alpha) = F(\alpha)$  (для симметричной задачи),  $F^\pm(\alpha) = \pm F(\alpha)$  (для антисимметричной задачи),  $F(\alpha) = \int_{-a}^a f(x_1) e^{i\alpha x_1} dx_1$ .

Решение уравнения (10) будем искать в виде  $V_\varepsilon = \text{Ach}(\gamma_\varepsilon x_3) + \text{Bsh}(\gamma_\varepsilon x_3)$ . Используя граничные условия (11), для антисимметричной задачи находим коэффициенты  $A$  и  $B$  в виде  $A = 0, B = \frac{F(\alpha)}{D_a^B(\alpha, \omega_\varepsilon)}$ ,

$$D_a^B(\alpha, \omega_\varepsilon) = \gamma_\varepsilon \text{ch}\left(\frac{1}{2}\gamma_\varepsilon\right) + (\mu^s \alpha^2 - \rho^s \Omega_\varepsilon^2) \text{sh}\left(\frac{1}{2}\gamma_\varepsilon\right).$$

Аналогично для симметричной задачи  $A = \frac{F(\alpha)}{D_s^B(\alpha, \omega_\varepsilon)}, B = 0$ ,

$$D_s^B(\alpha, \omega_\varepsilon) = \gamma_\varepsilon \text{sh}\left(\frac{1}{2}\gamma_\varepsilon\right) + (\mu^s \alpha^2 - \rho^s \Omega_\varepsilon^2) \text{ch}\left(\frac{1}{2}\gamma_\varepsilon\right).$$

Тогда решение  $\varepsilon$ -задачи находится в результате обратного преобразования Фурье и для антисимметричного случая будет иметь вид

$$v_\varepsilon(x_1, x_3) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{F(\alpha) \text{sh}(\gamma_\varepsilon x_3)}{D_a^B(\alpha, \omega_\varepsilon)} e^{-i\alpha x_1} d\alpha, \tag{12}$$

а для симметричной задачи получаем формулу

$$v_\varepsilon(x_1, x_3) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{F(\alpha) \text{ch}(\gamma_\varepsilon x_3)}{D_s^B(\alpha, \omega_\varepsilon)} e^{-i\alpha x_1} d\alpha. \tag{13}$$

Дисперсионные уравнения записываются обычно при отсутствии поглощения и, следовательно, имеют вид

$$D^B(\alpha, \omega) = 0, \tag{14}$$

где  $D^B(\alpha, \omega) = D_a^B(\alpha, \omega)$  или  $D^B(\alpha, \omega) = D_s^B(\alpha, \omega)$ .

Для примера изучим поведение решения (12) при  $x_1 > a$ . Так как подынтегральная функция не имеет точек ветвления, то решение задачи можно найти в результате вычисления обратного преобразования Фурье и применения методов теории функции комплексного переменного в виде суммы вычетов в нулях дисперсионного уравнения (14) для  $\varepsilon$ -задачи:

$$v(x_1, x_3) = \lim_{\varepsilon \rightarrow +0} v_\varepsilon = i \sum_{k=0}^m Y_k^0(x_3) e^{-i\alpha_k^0 x_1} + i \sum_{k=0}^\infty Y_k^p(x_3) e^{-i\alpha_k^p x_1},$$

$$Y_k^c = Y_k^c(x_3) = \frac{F(\alpha_k^c) \text{sh}(\gamma_k^c x_3)}{A^c + B^c w},$$

$$A^c = \frac{\alpha_k^c}{\gamma_k^c} \text{ch}\left(\frac{1}{2} \gamma_k^c\right) \left(1 + \frac{1}{2} (\mu^s (\alpha_k^c)^2 - \rho^s \Omega^2)\right) + \alpha_k^c \text{sh}\left(\frac{1}{2} \gamma_k^c\right) \left(2\mu^s + \frac{1}{2}\right),$$

$$B^c = \frac{\Omega}{\gamma_k^c} \text{ch}\left(\frac{1}{2} \gamma_k^c\right) \left(\frac{1}{2} (-\mu^s (\alpha_k^c)^2 + \rho^s \Omega^2) - 1\right) - \Omega \text{sh}\left(\frac{1}{2} \gamma_k^c\right) \left(2\rho^s + \frac{1}{2}\right),$$

где  $c = 0, p$ ;  $\alpha_k^0$  и  $\alpha_k^p$  – вещественные и комплексные нули  $\alpha$  дисперсионного уравнения (14);  $\text{Im}\alpha_k^p < 0$ ;  $\gamma_k^0 = \sqrt{(\alpha_k^0)^2 - \Omega^2}$ ,  $\gamma_k^p = \sqrt{(\alpha_k^p)^2 - \Omega^2}$ ,  $\Omega = \Omega(\alpha) = \omega + w\alpha$ .

Решение симметричной задачи находится из (13) аналогичным образом.

Отметим, что справедливы известные соотношения, связывающие дисперсионные уравнения и групповые скорости задач  $A$  и  $B$ :

$$D^B(\alpha, \omega) = D^A(\alpha, \Omega) = D^A(\alpha, \omega + w\alpha), c_g^B|_{\alpha=\alpha_k} = c_g^A|_{\alpha=\alpha_k} - w, \quad (15)$$

где  $\Omega = \omega + w\alpha$ ;  $D^A(\alpha, \omega) = 0$  – дисперсионное уравнение задачи  $A$ ;  $c_g^A = -\partial_\alpha D^A / \partial_\omega D^A$ ,  $c_g^B = -\partial_\alpha D^B / \partial_\omega D^B$  – групповые скорости в задачах  $A$  и  $B$ ;  $\alpha_k$  – один из нулей дисперсионного уравнения. Соотношения (15) позволяют исследовать дисперсионные уравнения задач  $B$  по дисперсионным уравнениям задач  $A$  и определять смещения корней дисперсионных уравнений в комплексную плоскость при введении малого трения [18].

### Численные результаты

Следуя проведенным исследованиям задачи  $A$  [13, 17], примем, что материал полосы характеризуется упругими константами:  $\mu = 6,98 \cdot 10^{10}$  Н/м<sup>2</sup>;  $\rho = 7000$  кг/м<sup>3</sup>;  $\mu^s = 2.5$  Н/м и  $\rho^s = 7 \cdot 10^{-6}$  кг/м<sup>2</sup>. В качестве внешнего источника (3) будем рассматривать сосредоточенную силу с безразмерной амплитудой, равной единице:  $f(x_1) = \delta(x_1)$ .

Находя из (14), (15) корни дисперсионных уравнений, можно для задач  $A$  при  $w = 0$  построить зависимости безразмерных вещественных волновых чисел  $\alpha$  от безразмерной частоты  $\omega = \Omega$ . Эти дисперсионные кривые показаны на рис. 1 для симметричной (а) и антисимметричной (б) задач. Пунктирные кривые здесь соответствуют задачам с поверхностными эффектами при толщине полосы  $h = 10$  нм, сплошные кривые – задачам без поверхностных напряжений.

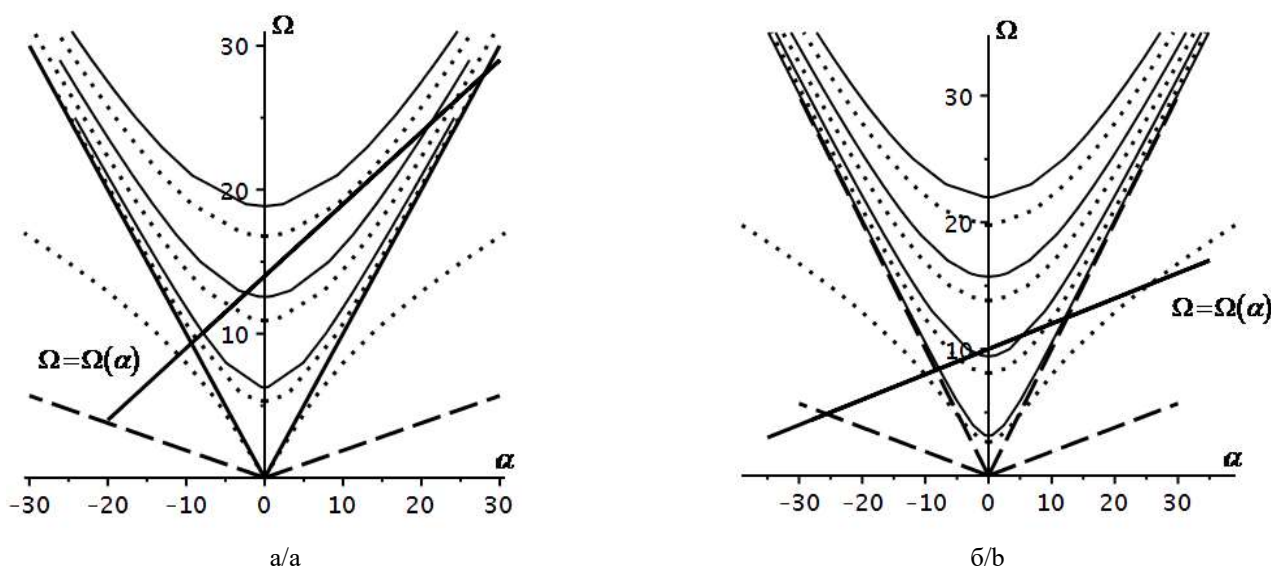


Рис. 1. Зависимость безразмерного волнового числа от безразмерной частоты для симметричной (а) и антисимметричной (б) задач / Fig. 1. The dependence of the dimensionless wavenumber on the dimensionless frequency for the symmetric (a) and antisymmetric (b) problems

Согласно принципу соответствия, для задач *B* соответствующие дисперсионные кривые можно не строить, поскольку волновые числа  $\alpha$  в задачах *B* находятся как точки пересечения дисперсионных кривых задачи *A* с прямой  $\Omega = \Omega(\alpha)$ ,  $\Omega(\alpha) = \omega_* + w\alpha$ . Эта прямая при  $\omega_* = 10$  и  $w = 0,2$  показана на рис. 1 жирной линией.

Из рис. 1 видно, что при фиксированных значениях частоты  $\omega_*$  и дозвуковой скорости движения источника наличие поверхностных напряжений приводит к возрастанию волновых чисел  $\alpha$  в области  $\alpha > 0$ . (Этот вывод отличается от результатов работы [13], в которой дисперсионное уравнение для симметричных мод задачи *A* было записано с ошибкой в знаке.)

Влияние поверхностных напряжений на дисперсионные кривые можно оценить и аналитически. Так, частоты отсечки  $\omega_k^s$ , т.е. частоты дисперсионных кривых при  $\alpha = 0$ , для малой безразмерной поверхностной плотности  $\rho^s$  сдвигаются вниз относительно соответствующих частот  $\omega_k$  классической антиплоской задачи согласно формуле  $\omega_k^s \approx \omega_k(1 - 2\rho^s)$ , где  $\omega_k = 2\pi(k - 1)$  – для симметричной задачи;  $\omega_k = \pi(2k - 1)$  – для антисимметричной. Как следует из формулы обезразмеривания для плотности  $\rho^s$ , этот сдвиг обратно пропорционален толщине полосы  $h$ .

Можно также отметить, что если в симметричной задаче *A* без поверхностных напряжений первая дисперсионная кривая является бездисперсионной (прямая сплошная линия на рис. 1 а), то в задачах с поверхностными напряжениями все дисперсионные кривые обладают дисперсией. Как видно, этот известный для задач *A* факт [13, 17] имеет место и для задач *B*.

На рис. 1 штриховыми линиями приведены еще асимптоты дисперсионных кривых  $\omega = \pm k_j \alpha$  ( $j = 1, 2, k_1 = 1, k_2 = \sqrt{\mu^s/\rho^s}$ ). При этом асимптота  $\omega = \pm k_1 \alpha$  на рис. 1а совпадает с первой дисперсионной кривой симметричной задачи *A* без поверхностных напряжений, и поэтому штриховая прямая здесь сливается со сплошной. Важно отметить появление новых асимптот  $\omega = \pm k_2 \alpha$  в задачах с поверхностными напряжениями, связанных со сдвиговыми волнами в модели Гуртина – Мурдоха [6, 7, 10, 14].

Для задач с поверхностными напряжениями представляет интерес исследование свойств дисперсионных соотношений при различных толщинах полосы. Так, на рис. 2 для симметричной (а) и антисимметричной (б) задач *A* ( $\omega = \Omega$ ) приведены первые дисперсионные кривые при различной толщине  $h$ : кривая 1 построена для случая, когда  $h = 10$  нм, кривая 2 – для  $h = 30$  нм, кривая 3 – для  $h = 100$  нм, а кривая 4 описывает классический случай без поверхностных напряжений. (Здесь используются размерные значения толщины  $h$ , влияющие на безразмерные поверхностные модули.)

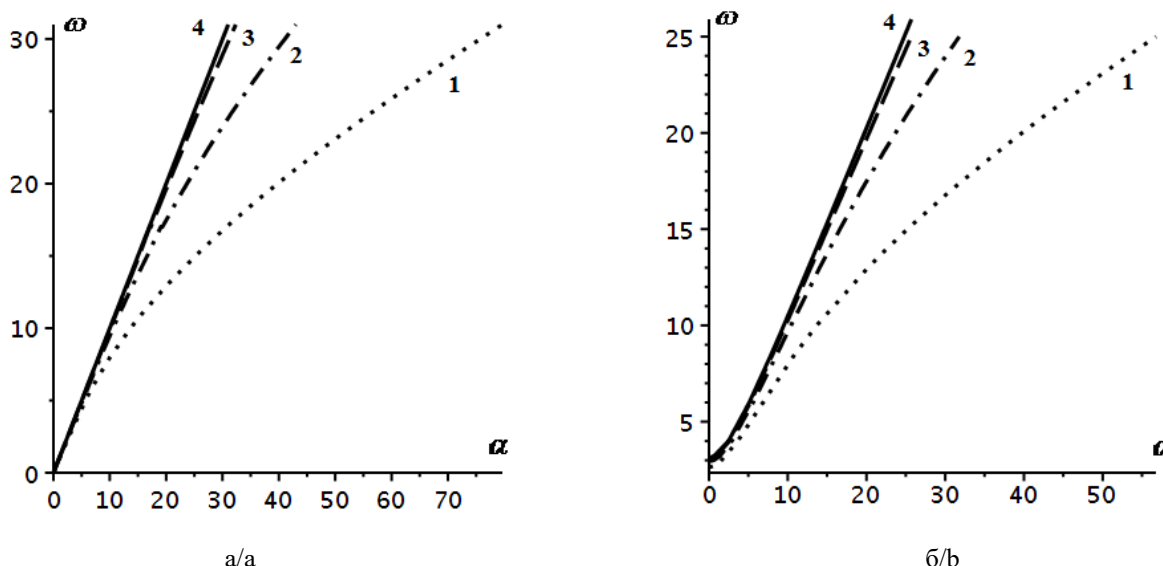


Рис. 2. Первые дисперсионные кривые для симметричной (а) и антисимметричной (б) задач при различных значениях толщины / Fig. 2. The first dispersion curves for the symmetric (a) and antisymmetric (b) problems at different thickness values

Как можно заметить из рис. 2, при увеличении толщины слоя дисперсионные кривые задач с поверхностными эффектами приближаются к соответствующим кривым классической задачи, что соответствует ожидаемому. Однако при малых толщинах (кривые 1 и 2) поверхностные эффекты оказывают уже существенную роль, и с ростом  $\omega$  или  $\alpha$  различия в дисперсионных кривых становятся достаточно заметными.

На рис. 3 изображены графики амплитуд безразмерных смещений  $Y_1^0 = Y_1^0(x_3)$  впереди источника для первой моды колебаний в зависимости от изменения толщины пластины  $h$  при фиксированном значении безразмерной частоты  $\omega = 14$  для симметричной (а) и для антисимметричной (б) задач  $B$  при  $w = 0,1$ . Номера кривых здесь соответствуют принятым для различной толщины номерам кривых из рис. 2.

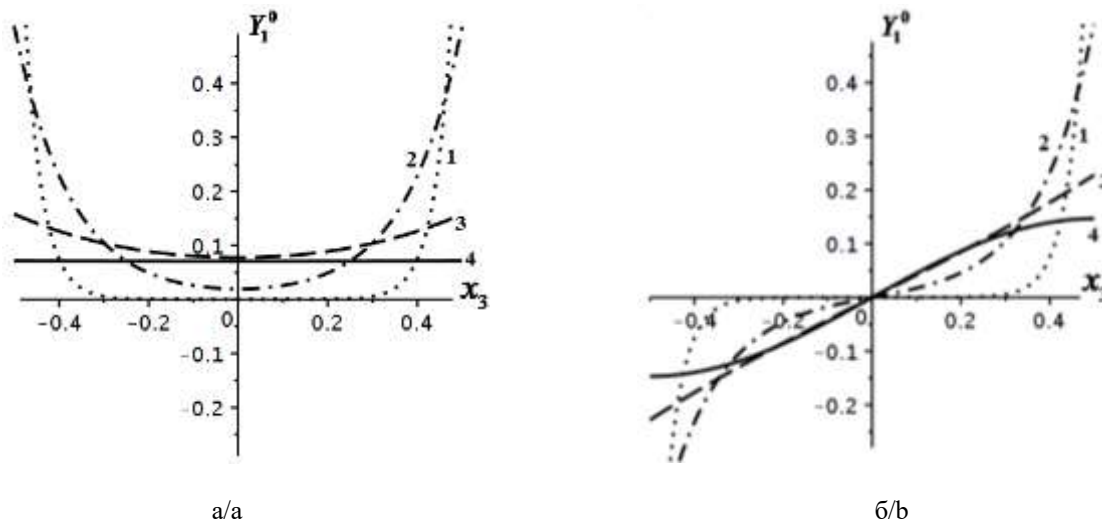


Рис. 3. Графики амплитуды первой моды смещений в зависимости от изменения толщины пластины для симметричной (а) и антисимметричной (б) задачи / Fig. 3. Graphs of the amplitude of the first displacement mode depending on the change in thickness for the symmetric (a) and antisymmetric (b) problems

Отметим, что приведенные на рис. 3 значения амплитуд  $Y_1^0(x_3)$  являются безразмерными, причем отнесенными к толщине полосы  $h$ . Поэтому для получения размерных амплитуд надо умножать соответствующие безразмерные амплитуды на толщину пластины, которая для кривых с номерами 1–4 разная. В связи с этим здесь имеет смысл анализировать относительные значения, например отношения  $\tilde{Y}_1^0(x_3) = Y_1^0(x_3)/Y_1^0(0)$ . Как можно заметить из рис. 3, значения  $\tilde{Y}_1^0(x_3)$  при наличии поверхностных напряжений оказываются локализованными у торцов полосы  $x_3 = \pm 1/2$ , причем эта локализация возрастает при уменьшении толщины полосы, что обусловлено ростом влияния поверхностных напряжений.

На рис. 4, 5 представлены графики безразмерных амплитуд смещений  $Y_1^0 = Y_1^0(x_3)$  для первой моды колебаний в зависимости от изменения скорости движения источника при фиксированных значениях безразмерной частоты  $\omega = 14$  и толщины  $h = 10$  нм для симметричной и для антисимметричной задач соответственно. При этом на рис. 4, 5а показаны смещения впереди источника, а на рис. 4, 5б – позади источника. Сплошные кривые здесь построены при  $w = 0$ , пунктирные кривые – при  $w = 0,05$ , а штриховые – при  $w = 0,1$ . Отметим, что при принятых входных данных безразмерная скорость сдвиговых волн, обусловленных поверхностными напряжениями Гуртина – Мурдоха, оказывается равной  $k_2 = 0,189$ . Таким образом, все рассматриваемые режимы движения на рис. 4, 5 с  $w \in [0, 0,1]$  являются дозвуковыми. (Мы называем режим движения источника дозвуковым, если при соответствующих значениях  $w$  не образуются медленные волны позади источника с  $\Omega(\alpha_k^0) < 0$  [19]. В рассматриваемой задаче это имеет место при  $w < k_2$ .)

Как можно заметить из рис. 4, для симметричной задачи увеличение скорости приводит к уменьшению амплитуд смещений первой формы колебаний  $Y_1^0$  в большей части полосы впереди источника. Наоборот, позади источника при увеличении скорости модули амплитуд смещений первой формы колебаний  $|Y_1^0|$  возрастают.

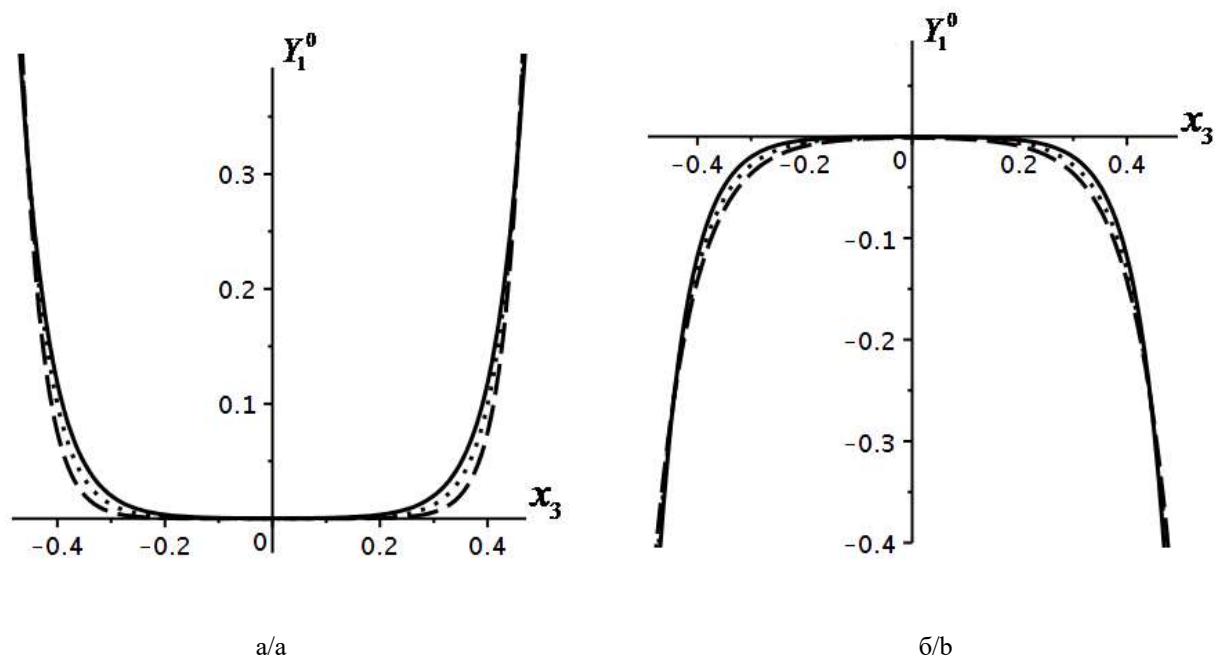


Рис. 4. Графики амплитуды первой моды смещений в зависимости от изменения скорости источника для симметричной задачи впереди (а) и позади (б) источника / Fig. 4. Graphs of the amplitude of the first displacement mode depending on the velocity change for the symmetric problem ahead (a) and behind (b) the source

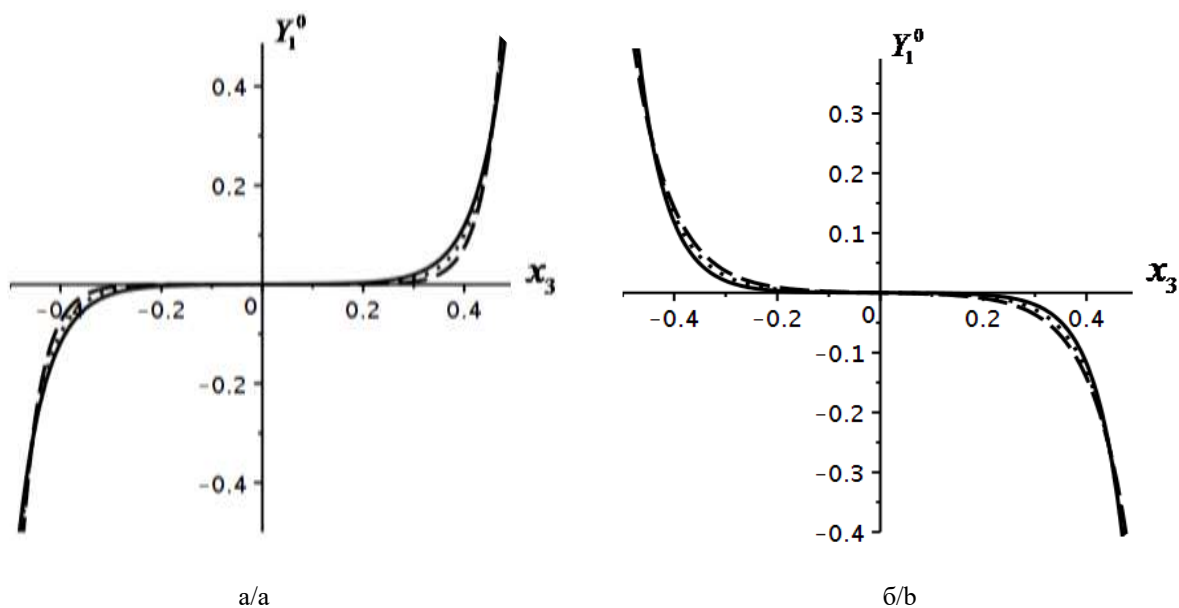


Рис. 5. Графики амплитуды первой моды смещений в зависимости от изменения скорости источника для антисимметричной задачи впереди (а) и позади (б) источника / Fig. 5. Graphs of the amplitude of the first displacement mode depending on the velocity change for the antisymmetric problem ahead (a) and behind (b) the source

Из рис. 5 видно, что аналогичные зависимости наблюдаются и для амплитуд смещений первой формы колебаний для антисимметричной задачи. Такое поведение смещений можно объяснить тем, что впереди источника смещения вычисляются при положительных волновых числах  $\alpha_1^0$ , которые возрастают при увеличении скорости, а позади источника – при отрицательных  $\alpha_1^0$ , которые по модулю уменьшаются с ростом  $w$ .

## Заклучение

Итак, в настоящей работе приведены решения симметричной и антисимметричной антиплоских задач о движении с постоянной скоростью осциллирующей нагрузки по границе упругой изотропной нанополосы. Для получения решений использовалась стандартная техника, применяемая для решения обычных динамических задач теории упругости для полуограниченных тел. Для описания наноэффектов здесь использовалась теория поверхностных напряжений Гуртина – Мурдоха, которая привела к ряду особенностей в полученных решениях. Так, при учете поверхностных напряжений все дисперсионные кривые обладают дисперсией, а также появляется дополнительная асимптота, соответствующая сдвиговой волне типа волны Лява, обусловленной поверхностными напряжениями.

Проведенные исследования подтвердили известное заключение [9, 11–13], что поверхностные эффекты оказывают заметное влияние только при существенном уменьшении толщины слоя, т.е. когда упругий слой превращается в ультратонкую нанопленку.

Отметим, что использованная методология позволяет исследовать также задачи для пьезоэлектрических полуограниченных сред с поверхностными эффектами [20–22], причем механические и электрические поверхностные поля могут быть как связанными, так и несвязанными [23].

## Список источников

1. *Eremeyev V.A.* On effective properties of materials at the nano- and microscales considering surface effects // *Acta Mech.* 2016. Vol. 227. P. 29–42. Doi: 10.1007/s00707-015-1427-y.
2. *Wang J., Huang Z., Duan H., Yu S., Feng X., Wang G., Zhang W., Wang T.* Surface stress effect in mechanics of nanostructured materials // *Acta Mech. Solida Sin.* 2011. Vol. 24, № 1. P. 52–82. Doi: 10.1016/S0894-9166(11)60009-8.
3. *Wang K.F., Wang B.L., Kitamura T.* A review on the application of modified continuum models in modeling and simulation of nanostructures // *Acta Mech. Sin.* 2016. Vol. 32, № 1. P. 83–100. Doi: 10.1007/s10409-015-0508-4.
4. *Gurtin M.E., Murdoch A.I.* A continuum theory of elastic material surfaces // *Arch. Rational Mech. Anal.* 1975. Vol. 57, № 4. P. 291–323. Doi: 10.1007/BF00261375.
5. *Gurtin M.E., Murdoch A.I.* Surface stress in solids // *Int. J. Solids Struct.* 1978. Vol. 14, № 6. P. 431–440. Doi: 10.1016/0020-7683(78)90008-2.
6. *Eremeyev V.A.* Strongly anisotropic surface elasticity and antiplane surface waves // *Phil. Trans. R. Soc. A.* 2019. Vol. 378. P. 20190100. Doi: 10.1098/rsta.2019.0100.
7. *Eremeyev V.A., Rosi G., Naili S.* Comparison of anti-plane surface waves in strain-gradient materials and materials with surface stresses // *Math. Mech. Solids.* 2019. Vol. 24, № 8. P. 2526–2535. Doi: 10.1177/1081286518769960.
8. *Chakraborty A.* The effect of surface stress on the propagation of Lamb waves // *Ultrasonics.* 2010. Vol. 50, № 7. P. 645–649. Doi: 10.1016/j.ultras.2010.02.004.
9. *Enzevae C., Shodja H.M.* Crystallography and surface effects on the propagation of Love and Rayleigh surface waves in fcc semi-infinite solids // *Int. J. Solids Struct.* 2018. Vol. 138. P. 109–117. Doi: 10.1016/j.ijsolstr.2018.01.003.
10. *Eremeyev V.A., Rosi G., Naili S.* Surface/interfacial anti-plane waves in solids with surface energy // *Mech. Res. Commun.* 2016. Vol. 74. P. 8–13. Doi: 10.1016/j.mechrescom.2016.02.018.
11. *Jia F., Zhang Z., Zhang H., Feng X.-Q., Gu B.* Shear horizontal wave dispersion in nanolayers with surface effects and determination of surface elastic constants // *Thin Solid Films.* 2018. Vol. 645. P. 134–138. Doi: 10.1016/j.tsf.2017.10.025.
12. *Li Y.D., Lee K.Y.* Size-dependent behavior of Love wave propagation in a nanocoating // *Mod. Phys. Lett. B.* 2010. Vol. 24. P. 3015–3023. Doi: 10.1142/S0217984910025346.
13. *Liu H., Liu H., Yang J.L.* Surface effects on the propagation of shear horizontal waves in thin films with nanoscale thickness // *Physica E.* 2013. Vol. 49. P. 13–17. Doi: 10.1016/j.physe.2013.01.013.
14. *Mikhasev G.I., Botogova M.G., Eremeyev V.A.* On the influence of a surface roughness on propagation of anti-plane short-length localized waves in a medium with surface coating // *Int. J. Eng. Sci.* 2021. Vol. 158. P. 103428. Doi: 10.1016/j.ijengsci.2020.103428.
15. *Murdoch A.I.* The effect of interfacial stress on the propagation of stoneley waves // *J. Sound Vib.* 1977. Vol. 50. P. 1–11. Doi: 10.1016/0022-460X(77)90547-8.
16. *Pal P.K., Acharya D., Sengupta P.R.* Effect of surface stresses on surface waves in elastic solids // *Sadhana.* 1997. Vol. 22. P. 659–670. Doi: 10.1007/BF02802553.
17. *Калинина Т.И.* Антиплоские задачи об установившихся колебаниях при наличии поверхностных напряжений // *Современные проблемы механики сплошной среды: тр. XIX Междунар. конф. (15–18 октября 2018 г., Ростов-на-Дону).* Ростов н/Д.; Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2018. Т. 2. С. 123–127.
18. *Белоконь А.В.* Колебания упругой неоднородной полосы, вызванные движущимися нагрузками // *ПММ.* 1982. Т. 46, № 2. С. 296–302.
19. *Белоконь А.В., Наседкин А.В.* Энергетика волн, генерируемых подвижными источниками // *Акустический журнал.* 1993. Т. 39, вып. 3. С. 421–427.

20. Xu L.M., Wang X., Fan H. Anti-plane waves near an interface between two piezoelectric half-spaces // *Mech. Res. Commun.* 2015. Vol. 67. P. 8–12. Doi: 10.1016/j.mechrescom.2015.04.006.
21. Zhang C., Chen W., Zhang C. On propagation of anti-plane shear waves in piezoelectric plates with surface effect // *Phys. Lett. A.* 2012. Vol. 376. P. 3281–3286. Doi: 10.1016/j.physleta.2012.09.027.
22. Zhang L.L., Liu J.X., Fang X.Q., Nie G.Q. Size-dependent dispersion characteristics in piezoelectric nanoplates with surface effects // *Physica E.* 2014. Vol. 57. P. 169–174. Doi: 10.1016/j.physe.2013.11.007.
23. Eremeyev V.A., Nasedkin A.V. Mathematical models and finite element approaches for nanosized piezoelectric bodies with uncoupled and coupled surface effects // *Wave Dynamics and Composite Mechanics for Microstructured Materials and Metamaterials. Advanced Structured Materials.* Ed. M.A. Sumbatyan. Singapore: Springer, 2017. Vol. 59, ch. 1. P. 1–18. Doi: 10.1007/978-981-10-3797-9\_1.

## References

1. Eremeyev V.A. On effective properties of materials at the nano- and microscales considering surface effects. *Acta Mech.* 2016;227:29-42. Doi: 10.1007/s00707-015-1427-y.
2. Wang J., Huang Z., Duan H., Yu S., Feng X., Wang G., Zhang W., Wang T. Surface stress effect in mechanics of nanostructured materials. *Acta Mech. Solida Sin.* 2011;24(1):52-82. Doi: 10.1016/S0894-9166(11)60009-8.
3. Wang K.F., Wang B.L., Kitamura T. A review on the application of modified continuum models in modeling and simulation of nanostructures. *Acta Mech. Sin.* 2016;32(1):83-100. Doi: 10.1007/s10409-015-0508-4.
4. Gurtin M.E., Murdoch A.I. A continuum theory of elastic material surfaces. *Arch. Rational Mech. Anal.* 1975;57(4):291-323. Doi: 10.1007/BF00261375.
5. Gurtin M.E., Murdoch A.I. Surface stress in solids. *Int. J. Solids Struct.* 1978;14(6):431-440. Doi: 10.1016/0020-7683(78)90008-2.
6. Eremeyev V.A. Strongly anisotropic surface elasticity and antiplane surface waves. *Phil. Trans. R. Soc. A.* 2019;378:20190100. Doi: 10.1098/rsta.2019.0100.
7. Eremeyev V.A., Rosi G., Naili S. Comparison of anti-plane surface waves in strain-gradient materials and materials with surface stresses. *Math. Mech. Solids.* 2019;24(8):2526-2535. Doi: 10.1177/1081286518769960.
8. Chakraborty A. The effect of surface stress on the propagation of Lamb waves. *Ultrasonics.* 2010;50(7):645-649. Doi: 10.1016/j.ultras.2010.02.004.
9. Enzevae C., Shodja H.M. Crystallography and surface effects on the propagation of Love and Rayleigh surface waves in fcc semi-infinite solids. *Int. J. Solids Struct.* 2018;138:109-117. Doi: 10.1016/j.ijsolstr.2018.01.003.
10. Eremeyev V.A., Rosi G., Naili S. Surface/interfacial anti-plane waves in solids with surface energy. *Mech. Res. Commun.* 2016;74:8-13. Doi: 10.1016/j.mechrescom.2016.02.018.
11. Jia F., Zhang Z., Zhang H., Feng X.-Q., Gu B. Shear horizontal wave dispersion in nanolayers with surface effects and determination of surface elastic constants. *Thin Solid Films.* 2018;645:134-138. Doi: 10.1016/j.tsf.2017.10.025.
12. Li Y.D., Lee K.Y. Size-dependent behavior of Love wave propagation in a nanocoating. *Mod. Phys. Lett. B.* 2010;24:3015-3023. Doi: 10.1142/S0217984910025346.
13. Liu H., Liu H., Yang J.L. Surface effects on the propagation of shear horizontal waves in thin films with nanoscale thickness. *Physica E.* 2013;49:13-17. Doi: 10.1016/j.physe.2013.01.013.
14. Mikhasev G.I., Botogova M.G., Eremeyev V.A. On the influence of a surface roughness on propagation of anti-plane short-length localized waves in a medium with surface coating. *Int. J. Eng. Sci.* 2021;158:103428. Doi: 10.1016/j.ijengsci.2020.103428.
15. Murdoch A.I. The effect of interfacial stress on the propagation of stoneley waves. *J. Sound Vib.* 1977;50:1-11. Doi: 10.1016/0022-460X(77)90547-8.
16. Pal P.K., Acharya D., Sengupta P.R. Effect of surface stresses on surface waves in elastic solids. *Sadhana.* 1997;22:659-670. Doi: 10.1007/BF02802553.
17. Kalinina T.I. Antiplane problems of steady-state oscillations of elastic isotropic layer with the surface stress. *Modern problems of continuum mechanics.* Proceedings of the XIX International Conference (October 15-18, 2018, Rostov-on-Don). Rostov-on-Don, Taganrog: SFedU Press, 2018;2:123-127. (In Russ.).
18. Belokon' A.V. Oscillations of an elastic inhomogeneous strip caused by moving loads. *J. Appl. Math. Mech.* 1982;46(2):225-230. Doi: 10.1016/0021-8928(82)90142-3.
19. Belokon' A.V., Nasedkin A.V. Energy characteristics of wave generated by moving sources. *Akusticheskii zhurnal = Acoustic Magazine.* 1993;39(3):421-427. (In Russ.).
20. Xu L.M., Wang X., Fan H. Anti-plane waves near an interface between two piezoelectric half-spaces. *Mech. Res. Commun.* 2015;67:8-12. Doi: 10.1016/j.mechrescom.2015.04.006.
21. Zhang C., Chen W., Zhang C. On propagation of anti-plane shear waves in piezoelectric plates with surface effect. *Phys. Lett. A.* 2012;376:3281-3286. Doi: 10.1016/j.physleta.2012.09.027.
22. Zhang L.L., Liu J.X., Fang X.Q., Nie G.Q. Size-dependent dispersion characteristics in piezoelectric nanoplates with surface effects. *Physica E.* 2014;57:169-174. Doi: 10.1016/j.physe.2013.11.007.
23. Eremeyev V.A., Nasedkin A.V. Mathematical models and finite element approaches for nanosized piezoelectric

bodies with uncoupled and coupled surface effects. *Wave Dynamics and Composite Mechanics for Microstructured Materials and Metamaterials. Advanced Structured Materials*. M.A. Sumbatyan, ed. Singapore: Springer; 2017;59(1):1-18. Doi: 10.1007/978-981-10-3797-9\_1.

**Информация об авторах**

*Калинина Т.И. – ассистент кафедры математики и математического моделирования.*

*Наседкин А.В. – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой математического моделирования, Институт математики, механики и компьютерных наук им. И.И. Воровича.*

**Information about the authors**

*Kalinina T.I. - Assistant of Department of Mathematics and Mathematical Modeling.*

*Nasedkin A.V. - Doctor of Science (Physic and Matematics), Professor, Head of the Department of Mathematical Modeling, Vorovich Institute of Mathematics, Mechanics and Computer Science.*

*Статья поступила в редакцию 03.11.2021; одобрена после рецензирования 15.11.2021; принята к публикации 16.03.2022.*

*The article was submitted 03.11.2021; approved after reviewing 15.11.2021; accepted for publication 16.03.2022.*

---



Научная статья

УДК 519.63

doi: 10.18522/1026-2237-2022-1-23-27

## ОБ УСТОЙЧИВОСТИ И СХОДИМОСТИ РАЗНОСТНОЙ СХЕМЫ, АППРОКСИМИРУЮЩЕЙ КРАЕВУЮ ЗАДАЧУ ДЛЯ ОДНОГО ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО УРАВНЕНИЯ С ДРОБНОЙ ПРОИЗВОДНОЙ КАПУТО

*Асият Гамзатовна Омарова*

*Дагестанский государственный университет, г. Махачкала, Республика Дагестан, Россия*

*asya89.89@mail.ru*

**Аннотация.** На отрезке исследуется первая краевая задача для дифференциального уравнения с дробной производной Капуто. Для приближенного решения данной задачи используется метод конечных разностей. На равномерной сетке построена разностная схема, приближенно заменяющая рассматриваемую краевую задачу. Исследована на устойчивость и сходимость разностная задача. Полученная разностная схема аппроксимирует краевую задачу для дифференциального уравнения с дробной производной Капуто с первым порядком. Разностная схема приведена к каноническому виду для применения принципа максимума. Показано выполнение условий принципа максимума и получена априорная оценка. Из априорной оценки следует устойчивость решения по начальным данным и по правой части. Доказана сходимость решения разностной задачи согласно теореме Лакса к решению соответствующего дифференциального уравнения.

**Ключевые слова:** производная дробного порядка, разностная схема, аппроксимация, канонический вид, устойчивость, сходимость

**Для цитирования:** Омарова А.Г. Об устойчивости и сходимости разностной схемы, аппроксимирующей краевую задачу для одного дифференциального уравнения с дробной производной Капуто // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. 2022. № 1. С. 23–27.

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

Original article

## ON THE STABILITY AND CONVERGENCE OF A DIFFERENT SCHEME THAT APPROXIMATES A BOUNDARY VALUE PROBLEM FOR ONE DIFFERENTIAL EQUATION WITH A FRACTIONAL CAPUTO DERIVATIVE

*Asiyat G. Omarova*

*Dagestan State University, Makhachkala, Republic of Dagestan, Russia*

*asya89.89@mail.ru*

**Abstract.** In the work on the segment of the total, the first boundary value problem for a differential equation with a fractional Caputo derivative. For an approximate solution of this problem, the method of finite differences is used. A difference scheme was built on the nearest grid, which approximately replaces the proposed edge bristle. The resulting difference scheme approximates the boundary value for a differential equation with a fractional Caputo derivative with the first order. Canonical detection differential detection scheme for increased activity detection. It is shown that the fulfillment of the conditions of the highest quality and an a priori estimate is obtained. The a priori estimate implies the stability of the solution with respect to the initial data and the right-hand side. The convergence of the solution of the difference problem according to the Lax theorem to the solution of the corresponding differential equation is proved.

**Keywords:** fractional derivative, difference scheme, approximation, canonical view, stability, convergence

---

© Омарова А.Г., 2022

**For citation:** Omarova A.G. On the Stability and Convergence of a Different Scheme that Approximates a Boundary Value Problem for One Differential Equation with a Fractional Caputo Derivative. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2022;(1):23-27. (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

Дробное исчисление вызывает большой интерес из-за своего потенциального приложения в реальном мире, например, используется в моделях вязкоупругих тел, сплошных сред с памятью, в уравнении диффузии и во многих других областях.

На сегодняшний день нет единого определения для операций дробного порядка. В связи с этим исследование различных способов определения дробных производных и применение этих способов к определенным классам задач являются актуальными.

Большое количество химических, физических, экономических, биологических процессов во фрактальных средах с памятью описывается краевыми задачами для дифференциальных уравнений с дробными производными. В связи с этим возрос интерес к исследованию задач для дифференциальных уравнений с производными дробного порядка. Решение краевых задач для дифференциальных уравнений с дробными производными аналитическими методами является трудоемким процессом, это приводит к необходимости искать приближенные решения различными численными методами. Достаточно эффективным методом численного решения такого рода задач является метод конечных разностей, или метод сеток. В данном методе производится замена непрерывной области некоторой сеточной областью.

Решению краевых задач численными методами посвящены работы [1–8]. В них рассмотрены краевые задачи с дробными производными по времени и по пространственным переменным. В [1] исследована краевая задача для нелинейного уравнения теплопроводности с дробной производной Капуто. Построена неявная разностная схема для численного решения. В [4] получены условия устойчивости разностных схем с весами для уравнения теплопроводности с производной дробного порядка. Работы [5, 9] посвящены разностным методам решения краевых задач для дифференциальных уравнений дробного порядка, с помощью принципа максимума получены априорные оценки, доказана устойчивость и сходимость разностных схем. В [6, 7] методом энергетических неравенств получены априорные оценки для краевых задач уравнения влагопереноса с дробной производной по времени и для уравнения диффузии дробного порядка. В [2, 3, 8] рассмотрены модели теплопереноса, построены разностные схемы решения краевых задач для уравнения теплопереноса с производной дробного порядка, также доказаны критерии устойчивости этих схем.

Данная статья посвящена исследованию на устойчивость и сходимость одной разностной схемы, аппроксимирующей двухточечную краевую задачу для дифференциального уравнения с дробной производной Капуто.

### Разностная схема, аппроксимирующая краевую задачу для дифференциального уравнения с дробной производной Капуто

На отрезке  $[0, 1]$  рассмотрим следующую краевую задачу:

**Задача.** На отрезке  $[0, 1]$  найти решение уравнения

$$\partial_{0t}^{\alpha}(K(t)\partial_{0t}^{\alpha}u(t)) - q(t)u(t) = f(t), \quad 0 < t \leq 1, \quad (1)$$

с краевыми условиями

$$u(0) = a, \quad u(1) = b, \quad (2)$$

где  $\partial_{0t}^{\alpha}u(t) = \frac{1}{\Gamma(1-\alpha)} \int_0^t \frac{u'(\tau)d\tau}{(t-\tau)^{\alpha}}$  – дробная производная Капуто порядка  $\alpha$ ,  $0 < \alpha < 1$ ;  $K(t) \geq k_0 > 0$ ;

$f(t), q(t)$  – заданные непрерывные функции.

Решение задачи (1), (2) будем искать методом конечных разностей. Для этого введем на отрезке  $[0, 1]$  равномерную сетку с шагом  $\tau$

$$\bar{\omega} = \{t_m = m\tau, m = 0, 1, \dots, M, M\tau = 1\}.$$

Обозначим через  $u(t_m)$  точное решение задачи (1), (2), а через  $y(t_m)$  – приближенное сеточное значение функции в точке  $t = t_m$ .

Для производной Капуто имеет место следующая разностная аппроксимация [1]:

$$\partial_{0t}^\alpha u(t_m) = \frac{1}{\Gamma(2-\alpha)} \sum_{k=0}^m (t_{m-k+1}^\alpha - t_{m-k}^\alpha) \Delta u(t_k) + O(\tau). \quad (3)$$

Тогда для производной  $\partial_{0t}^\alpha (K(t) \partial_{0t}^\alpha u(t))$  в точках  $t = t_m$  имеет место разностная аппроксимация

$$\partial_{0t_m}^\alpha (K(t_m) \partial_{0t_m}^\alpha u(t_m)) \approx \frac{1}{\Gamma(2-\alpha)\tau} \sum_{k=0}^m C_{m,k} \frac{1}{\Gamma(2-\alpha)\tau} \left[ K(t_{k+1}) \sum_{i=0}^{k+1} C_{k+1,i} \Delta u(t_i) - K(t_k) \sum_{i=0}^k C_{k,i} \Delta u(t_i) \right], \quad (4)$$

где  $0 < \alpha < 1$ ;  $K(t) \geq k_0 > 0$ ;  $C_{m,k} = t_{m-k+1}^{1-\alpha} - t_{m-k}^{1-\alpha}$ ;  $C_{k,i} = t_{k-i+1}^{1-\alpha} - t_{k-i}^{1-\alpha}$ ;  $C_{k+1,i} = t_{k-i+2}^{1-\alpha} - t_{k-i+1}^{1-\alpha}$ .

Покажем, что аппроксимация (4) имеет порядок  $O(\tau)$ . Используя разложение в ряд Тейлора для  $u(t_{i+1}) = u(t_i + \tau)$  по степеням  $\tau$  и подставляя в (4), имеем

$$\begin{aligned} & \frac{1}{\Gamma(2-\alpha)\tau} \sum_{k=0}^m C_{m,k} \left[ K(t_{k+1}) \partial_{0t}^\alpha u(t_{k+1}) + \frac{\tau K(t_{k+1})}{2\Gamma(2-\alpha)} \sum_{i=0}^{k+1} C_{k+1,i} u''(\xi_i) \right] - \\ & - \frac{1}{\Gamma(2-\alpha)\tau} \sum_{k=0}^m C_{m,k} \left[ K(t_k) \partial_{0t}^\alpha u(t_k) + \frac{\tau K(t_k)}{2\Gamma(2-\alpha)} \sum_{i=0}^k C_{k,i} u''(\xi_i) \right] = \partial_{0t_m}^\alpha (K(t_m) \partial_{0t_m}^\alpha u(t_m)) + O(\tau), \end{aligned} \quad (5)$$

где  $\xi_i$  – некоторая точка, расположенная в интервале  $(t_i, t_i + \tau)$ .

Воспользовавшись разностной аппроксимацией (4) для дифференциальной задачи (1), (2), получим разностный аналог

$$\frac{1}{\Gamma(2-\alpha)\tau} \sum_{k=0}^m C_{m,k} \frac{1}{\Gamma(2-\alpha)\tau} \left[ K(t_{k+1}) \sum_{i=0}^{k+1} C_{k+1,i} \Delta y(t_i) - K(t_k) \sum_{i=0}^k C_{k,i} \Delta y(t_i) \right] - q(t_m) y(t_m) = f(t_m), \quad (6)$$

$$y(0) = a, \quad y(1) = b. \quad (7)$$

С учетом равенства (5) разностная схема (6), (7) имеет первый порядок аппроксимации  $O(\tau)$ .

### Устойчивость и сходимость разностной схемы

Для того чтобы доказать устойчивость разностной схемы (6), (7), воспользуемся принципом максимума. Для этого необходимо привести разностную схему (6), (7) к каноническому виду [10, с. 339]

$$A(P)y(P) = \sum_{Q \in \mathcal{M}'(P)} B(P,Q)y(Q) - F(P), \quad P \in \omega, \quad (8)$$

где  $A(P)$ ,  $B(P,Q)$ ,  $F(P)$  – сеточные функции, определенные для всех узлов сетки  $P, Q \in \omega$ ;  $\mathcal{M}'(P)$  – окрестность узла  $P$ , не содержащая самого узла.

Для выполнения принципа максимума необходимо, чтобы коэффициенты  $A(P)$ ,  $B(P,Q)$  удовлетворяли следующим условиям:

$$A(P) > 0, \quad B(P,Q) > 0, \quad D(P) = A(P) - \sum_{Q \in \mathcal{M}'(P)} B(P,Q)y(Q) \geq 0 \quad \text{для всех } P \in \omega.$$

Запишем уравнение (6) в канонической форме (8)

$$\begin{aligned} & \left[ \frac{K(t_{m+1}) + K(t_m)}{G(2\alpha)} + q(t_m) \right] y(t_m) = \frac{K(t_{m+1})}{G(2\alpha)} y(t_{m+1}) + \frac{K(t_m)}{G(2\alpha)} y(t_{m-1}) + \\ & + \frac{1}{\Gamma(2-\alpha)\tau} \sum_{k=0}^m C_{m,k} \frac{1}{\Gamma(2-\alpha)\tau} \left[ K(t_{k+1}) \sum_{i=0}^k C_{k+1,i} \Delta y(t_i) - K(t_k) \sum_{i=0}^{k-1} C_{k,i} \Delta y(t_i) \right] + \\ & + \frac{1}{\Gamma(2-\alpha)\tau} \sum_{k=0}^{m-1} C_{m,k} \left[ \frac{\tau^{1-\alpha} K(t_{k+1}) \Delta y(t_{k+1})}{\Gamma(2-\alpha)\tau} - \frac{\tau^{1-\alpha} K(t_k) \Delta y(t_k)}{\Gamma(2-\alpha)\tau} \right] - f(t_m), \end{aligned}$$

где  $G(2\alpha) = \Gamma(2-\alpha)\Gamma(2-\alpha)\tau^{2\alpha}$ .

Здесь коэффициенты

$$A(P) = \frac{K(t_{m+1}) + K(t_m)}{G(2\alpha)} + q(t_m), \quad B(P, Q) = \left\{ \frac{K(t_{m+1})}{G(2\alpha)}, \frac{K(t_m)}{G(2\alpha)} \right\}, \quad D(P) = q(t_m).$$

$$F(P) = \frac{1}{\Gamma(2-\alpha)\tau} \sum_{k=0}^m C_{m,k} \frac{1}{\Gamma(2-\alpha)\tau} \left[ K(t_{k+1}) \sum_{i=0}^k C_{k+1,i} \Delta y(t_i) - K(t_k) \sum_{i=0}^{k-1} C_{k,i} \Delta y(t_i) \right] + \\ + \frac{1}{\Gamma(2-\alpha)\tau} \sum_{k=0}^{m-1} C_{m,k} \left[ \frac{\tau^{1-\alpha} K(t_{k+1}) \Delta y(t_{k+1})}{\Gamma(2-\alpha)\tau} - \frac{\tau^{1-\alpha} K(t_k) \Delta y(t_k)}{\Gamma(2-\alpha)\tau} \right] - f(t_m).$$

Коэффициенты  $A(P)$ ,  $B(P, Q)$ ,  $D(P)$  удовлетворяют условиям принципа максимума при  $q(t_m) > 0$ . Согласно [10, с. 344], имеем

$$\|y\|_C \leq \left\| \frac{F(P)}{q(t_m)} \right\|_{C^*}, \quad \|y\|_C = \max_{0 \leq m \leq M} |y(t_m)|.$$

Для того чтобы оценить  $F(P)$ , представим его следующим образом:

$$\|F(P)\| \leq \|F_1\| + \|F_2\| - \|f(t_m)\|, \tag{9}$$

где  $F_1 = \frac{1}{\Gamma(2-\alpha)\tau} \sum_{k=0}^{m-1} C_{m,k} \left[ \frac{\tau^{1-\alpha} K(t_{k+1}) \Delta y(t_{k+1})}{\Gamma(2-\alpha)\tau} - \frac{\tau^{1-\alpha} K(t_k) \Delta y(t_k)}{\Gamma(2-\alpha)\tau} \right],$

$$F_2 = \frac{1}{\Gamma(2-\alpha)\tau} \sum_{k=0}^m C_{m,k} \frac{1}{\Gamma(2-\alpha)\tau} \left[ K(t_{k+1}) \sum_{i=0}^k C_{k+1,i} \Delta y(t_i) - K(t_k) \sum_{i=0}^{k-1} C_{k,i} \Delta y(t_i) \right].$$

Для оценки  $F_1$  и  $F_2$  воспользуемся разложением  $K(t_{k+1}) = K(t_k + \tau)$  в ряд Тейлора. Таким образом, имеем

$$\|F_1\| = \frac{1}{\Gamma(2-\alpha)\tau} \sum_{k=0}^{m-1} C_{m,k} \left[ \frac{\tau^{1-\alpha} (K(t_k) \Delta y(t_{k+1}) - K(t_k) \Delta y(t_k))}{\Gamma(2-\alpha)\tau} + \frac{\tau^{1-\alpha} \tau K'(\zeta_k) \Delta y(t_{k+1})}{\Gamma(2-\alpha)\tau} \right] = \\ = \frac{1}{\Gamma(2-\alpha)} \sum_{k=0}^{m-1} C_{m,k} \left[ \frac{\tau^{1-\alpha} (K(t_k)(y(t_{k+1}) - 2y(t_k) + y(t_{k-1})))}{\Gamma(2-\alpha)\tau^2} + \frac{\tau^{1-\alpha} \tau K'(\zeta_k) \Delta y(t_{k+1})}{\Gamma(2-\alpha)\tau^2} \right] = \\ = \frac{1}{\Gamma(2-\alpha)} \sum_{k=0}^{m-1} C_{m,k} \left[ \frac{\tau^{1-\alpha} (K(t_k) y''(t_k))}{\Gamma(2-\alpha)} + O(\tau^2) + \frac{\tau^{1-\alpha} \tau K'(\zeta_k) y'(t_k)}{\Gamma(2-\alpha)\tau} + O(\tau) \right] \leq \frac{M_1 \tau^{1-\alpha}}{\Gamma(2-\alpha)}, \tag{10}$$

$$\|F_2\| = \frac{1}{\Gamma(2-\alpha)\tau} \sum_{k=0}^m C_{m,k} \frac{1}{\Gamma(2-\alpha)\tau} \left[ K(t_{k+1}) \sum_{i=0}^k C_{k+1,i} \Delta y(t_i) - K(t_k) \sum_{i=0}^{k-1} C_{k,i} \Delta y(t_i) \right] = \\ = \frac{1}{\Gamma(2-\alpha)\tau} \sum_{k=0}^m C_{m,k} \frac{1}{\Gamma(2-\alpha)\tau} \left[ K(t_k) \sum_{i=0}^k C_{k+1,i} \Delta y(t_i) - K(t_k) \sum_{i=0}^{k-1} C_{k,i} \Delta y(t_i) + \tau K'(\xi_k) \sum_{i=0}^k C_{k,i} \Delta y(t_i) \right] \leq \\ \leq \frac{M_2 \tau^2}{\Gamma(2-\alpha)} + O(\tau^2) + O(\tau), \tag{11}$$

где  $\zeta_k$  – некоторая точка, расположенная в интервале  $(t_k, t_k + \tau)$ ;  $M_1, M_2$  – константы, не зависящие от  $\tau$ .

С учетом неравенств (9)–(11) получим

$$\|F_m\| \leq \frac{M_1 \tau^{1-\alpha}}{\Gamma(2-\alpha)} + \frac{M_2 \tau^2}{\Gamma(2-\alpha)} + O(\tau^2) + O(\tau) - \max_{0 \leq m \leq M} \|f(t_m)\|, \quad \|y\|_C \leq \frac{H \tau^{1-\alpha} - \max_{0 \leq m \leq M} \|f(t_m)\|}{\Gamma(2-\alpha) \max_{0 \leq m \leq M} \|q(t_m)\|}, \tag{12}$$

где  $H$  – произвольная константа, не зависящая от  $\tau$ .

Таким образом, доказана

**Теорема.** Для решения задачи (6), (7) справедлив принцип максимума при условии  $q(t_m) > 0$ , и для  $y(t_m)$  имеет место априорная оценка (12). Из этой оценки следует устойчивость разностной схемы (6), (7). Так как разностная схема (6), (7) устойчива и аппроксимирует краевую задачу (1), (2), то, согласно теореме Лакса [11, с. 108], решение разностной задачи сходится к решению краевой задачи. Порядок точности совпадает с порядком аппроксимации и равен  $O(\tau)$ .

## Список источников

1. Бейбалаев В.Д., Ибавов Т.И., Омарова А.Г. Численное исследование нелинейного уравнения теплопроводности с производной дробного порядка // Вестн. ДГУ. 2021. Вып. 2. С. 47–53.
2. Бейбалаев В.Д. Математическая модель переноса в средах с фрактальной структурой // Мат. моделирование. 2009. Т. 21, № 5. С. 55–62.
3. Назаралиев М.А., Бейбалаев В.Д. Численные методы решения краевой задачи для уравнения теплопереноса с производной дробного порядка // Вестн. ДГУ. 2008. Вып. 6. С. 46–54.
4. Малиева Ф.Ф. Об устойчивости разностной схемы с весами для уравнения теплопроводности с дробной производной Капуто // Вестн. ДГУ. 2017. Вып. 2. С. 39–46.
5. Шхануков-Лафишев М.Х., Таукенова Ф.И. Разностные методы решения краевых задач для дифференциальных уравнений дробного порядка // Журн. вычисл. математики и мат. физики. 2006. Т. 46, № 10. С. 1871–1881.
6. Алиханов А.А. Устойчивость и сходимост разностных схем для краевых задач уравнения диффузии дробного порядка // Журн. вычисл. математики и мат. физики. 2016. Т. 56, № 4. С. 572–586.
7. Нахушева Ф.М., Джанкулаева М.А., Нахушева Д.А. Уравнение теплопроводности с дробной производной по времени со сосредоточенной теплоёмкостью // Междунар. журн. прикладных и фундаментальных исследований. 2017. № 8. С. 22–27.
8. Бейбалаев В.Д., Шабанова М.Р. Численный метод решения краевой задачи для двумерного уравнения теплопроводности с производными дробного порядка // Вестн. СамГТУ. Серия: Физико-математические науки. 2010. № 5 (21). С. 244–251.
9. Баззаев А.К., Цопанов И.Д. Разностные схемы для дифференциальных уравнений с частными производными дробного порядка // Уфимский мат. журн. 2019. Т. 11, № 2. С. 19–35.
10. Самарский А.А., Гулин А.В. Устойчивость разностных схем. М.: Наука, 1977. 416 с.
11. Годунов С.К., Рябенский В.С. Разностные схемы. М.: Наука, 1977. 440 с.

## References

1. Beybalaev V.D., Ibaov T.I., Omarova A.G. Numerical study of the nonlinear heat equation with a fractional order derivative. *Vestn. DGU = Herald of Dagestan State University. Natural Sciences*. 2021;(2):47-53. (In Russ.).
2. Beybalaev V.D. Mathematical model of transport in media with fractal structure. *Mat. modelirovanie = Mathematical Models and Computer Simulations*. 2009;21(5):55-62. (In Russ.).
3. Nazaraliev M.A., Beybalaev V.D. Numerical methods for solving a boundary value problem for the heat transfer equation with a fractional derivative. *Vestn. DGU = Herald of Dagestan State University. Natural Sciences*. 2008;(6):46-53. (In Russ.).
4. Malieva F.F. On the stability of a weighted difference scheme for the heat equation with a fractional derivative of Caputo. *Vestn. DGU = Herald of Dagestan State University. Natural Sciences*. 2017;(2):39-46. (In Russ.).
5. Shkhanukov-Lafishev M.Kh., Taukenova F.I. Difference methods for solving boundary value problems for differential equations of fractional order. *Zhurn. vychisl. matematiki i mat. Fiziki = Computational Mathematics and Mathematical Physics*. 2006;46(10):1871-1881. (In Russ.).
6. Alikhanov A.A. Stability and convergence of difference schemes for boundary value problems of the fractional-order diffusion equation. *Zhurn. vychisl. matematiki i mat. Fiziki = Computational Mathematics and Mathematical Physics*. 2016;56(4):572-586. (In Russ.).
7. Nakhusheva F.M., Dzhankulaeva M.A., Nakhusheva D.A. Heat conduction equation with a fractional time derivative with a concentrated heat capacity. *Mezhdunar. zhurn. prikladnykh i fundamental'nykh issledovaniy = International Journal of Applied and Fundamental Research*. 2017;(8):22-27. (In Russ.).
8. Beybalaev V.D., Shabanova M.R. A numerical method for solving a boundary value problem for a two-dimensional heat equation with fractional derivatives. *Vestn. SamGTU. Seriya: Fiziko-matematicheskie nauki = Journal of Samara State Technical University, Ser. Physical and Mathematical Sciences*. 2010;(5):244-251. (In Russ.).
9. Bazzaev A.K., Tsopanov I.D. Difference schemes for partial differential equations of fractional order. *Ufimskii mat. zhurn. = Ufa Mathematical Journal*. 2019;11(2):19-35. (In Russ.).
10. Samarskiy A.A., Gulin A.V. *Stability of difference schemes*. Moscow: Nauka Publ.; 1977. 416 p. (In Russ.).
11. Godunov S.K., Ryabenkiy V.S. *Difference schemes*. Moscow: Nauka Publ.; 1977. 440 p. (In Russ.).

**Информация об авторе**

Омарова А.Г. - аспирант, кафедра прикладной математики, факультет математики и компьютерных наук.

**Information about the author**

Omarova A.G. – Postgraduate, Department of Applied Mathematics, Faculty of Mathematics and Computer Science.

Статья поступила в редакцию 12.10.2021; одобрена после рецензирования 30.11.2021; принята к публикации 16.03.2022.  
The article was submitted 12.10.2021; approved after reviewing 30.11.2021; accepted for publication 16.03.2022.

## НАУКИ О ЗЕМЛЕ

## SCIENCES OF EARTH

Научная статья

УДК 631.416.9

doi: 10.18522/1026-2237-2022-1-28-37

**ФОРМИРОВАНИЕ МИКРОЭЛЕМЕНТНОГО СОСТАВА ЧЕРНОЗЕМОВ  
ОБЫКНОВЕННЫХ ЦЕНТРАЛЬНОГО ПРЕДКАВКАЗЬЯ****Татьяна Васильевна Дегтярева**

Северо-Кавказский федеральный университет, Ставрополь, Россия

dtb.70@mail.ru

**Аннотация.** Рассматриваются особенности формирования микроэлементного состава различных родов черноземов обыкновенных Центрального Предкавказья. Их развитие протекает в своеобразных условиях (мягкий умеренно-континентальный климат, непромывной водный режим, карбонатные почвообразующие породы, разнотравно-злаковая растительность). В зависимости от характера почвообразующих пород происходит образование черноземов обыкновенных обычных и карбонатных на лессовидных суглинках, солонцеватых на элюводелювии майкопских глин, остаточного-карбонатных на элювии известняка, песчаника. Основными почвообразовательными процессами, обуславливающими развитие системы почвенных соединений микроэлементов, являются гумусообразование и гумусонакопление, оглинение, накопление карбонатов Ca, очень слабое ожелезнение.

Распределение большинства рассматриваемых микроэлементов (Pb, Cu, Zn) в профиле почв определяется, прежде всего, процессами биогенной аккумуляции в составе малоподвижных органоминеральных комплексов с гуминовыми кислотами. Выраженность сорбционного геохимического барьера ослаблена в связи с равномерным распределением илстой фракции по профилю почв. Помимо связывания микроэлементов с органическим веществом почв, происходит интенсивное закрепление их в составе карбонатов. Это приводит к снижению миграционной подвижности микроэлементов в почвенном профиле, их недоступности для растений. Особенности формирования микроэлементного состава черноземов обыкновенных Центрального Предкавказья варьируют в зависимости от специфики почвообразующих отложений. В случае залегания почв на солонсных глинистых отложениях определяющую роль играет солонцовый процесс, на элювии плотных пород – близость карбонатных отложений, на лессовидных суглинках – их повышенная пористость и водопроницаемость.

**Ключевые слова:** почвы, черноземы обыкновенные, микроэлементы, химические элементы, Центральное Предкавказье, ландшафты

**Для цитирования:** Дегтярева Т.В. Формирование микроэлементного состава черноземов обыкновенных Центрального Предкавказья // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. 2022. № 1. С. 28–37.

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

Original article

**FORMATION OF THE MICROELEMENT COMPOSITION  
OF ORDINARY CHERNOZEMS IN THE CENTRAL CAUCASIAN REGION****Tatyana V. Degtyareva**

North-Caucasus Federal University, Stavropol, Russia

dtb.70@mail.ru

© Дегтярева Т.В., 2022

**Abstract.** The article discusses the features of the formation of the microelement composition of various genera of ordinary chernozems in the Central Caucasian Region. Their development takes place in peculiar conditions: mild temperate continental climate, non-leaching water regime, carbonate soil-forming rocks, forb-grass vegetation. Depending on the nature of the soil-forming rocks, ordinary and carbonate chernozems (on loess-like loams), solonetzic (on eluvium-deluvium of Maikop clays), and residual-carbonate chernozems (on eluvium of limestone and sandstone) are formed. The main soil-forming processes that determine the development of a system of soil compounds of microelements are humus formation and humus accumulation, claying, accumulation of Ca carbonates, and very weak ferruginization.

The distribution of most of the microelements under consideration (Pb, Cu, Zn) in the soil profile is determined, first of all, by the processes of biogenic accumulation in the composition of low-mobility organic-mineral complexes with humic acids. The severity of the sorption geochemical barrier is weakened due to the uniform distribution of the clay fraction along the soil profile. In addition to the binding of microelements to the organic matter of soils, they are intensively fixed in the composition of carbonates. This leads to a decrease in the migration mobility of microelements in the soil profile and their inaccessibility to plants. The features of the formation of the microelement composition of ordinary chernozems in the Central Caucasian Region vary depending on the specifics of soil-forming deposits. In the case of soil occurrence on salt-bearing clay deposits, the solonetz process plays a decisive role, in the case of occurrence of dense rocks on the eluvium, the proximity of carbonate deposits, and in the case of occurrence on loess-like loams, their increased porosity and water permeability.

**Keywords:** soils, ordinary chernozems, trace elements, chemical elements, Central Caucasian Region, landscapes

**For citation:** Degtyareva T.V. Formation of the Microelement Composition of Ordinary Chernozems in the Central Caucasian Region. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2022;(1):28-37. (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

Микроэлементный состав почв представляет собой важную часть системы почвенных соединений химических элементов [1]. Его формирование в современных условиях антропогенного прессинга на почвенный покров протекает с включением антропогенных потоков загрязняющих веществ. Это создает определенные трудности в дифференциации соединений микроэлементов, относящихся к разным источникам поступления и имеющих различный характер распределения в почвах [2].

Для Центрального Предкавказья проблема изучения формирования микроэлементного состава почв имеет высокую актуальность в связи со значительным вовлечением почвенного покрова в сельскохозяйственное производство [3]. При этом происходит существенная трансформация свойств почв, сопровождающаяся изменением их физических и химических параметров, в том числе и микроэлементного состава [4]. В числе самых распространенных и интенсивно используемых почв в Центральном Предкавказье – черноземы обыкновенные, распределение которых происходит в соответствии с широтной зональностью с севера на юг [3]. Этим почвам соответствуют особые условия их образования: мягкий климат со средней годовой температурой +11,0 °С, отсутствием глубокого промерзания, сумма активных температур ~ 3300–3400 °С, годовое количество осадков 511–636 мм, непромывной тип водного режима [5]. В составе растительности преобладает разнотравно-злаковая степь с большим количеством бобовых видов. Почвообразующие породы представлены преимущественно лессовидными отложениями. Помимо них, черноземы обыкновенные формируются на продуктах выветривания палеоген-неогеновых и неогеновых глин (майкопских и сарматских), известняков и песчаников [4]. В связи с разнообразием почвообразующих пород происходит дифференциация свойств почв, проявляющаяся в развитии солонцового процесса на майкопских глинах, засоления на засоленных отложениях, малой мощности почвенного профиля на элювии известняков.

*Цель исследования* – определить основные закономерности формирования микроэлементного состава черноземов обыкновенных в условиях Центрального Предкавказья на основе анализа литературных материалов и результатов собственных полевых исследований. Изучение микроэлементного состава черноземов обыкновенных позволяет установить основные свойственные им особенности распределения химических элементов по профилю почв, их дифференциацию в зависимости от почвообразующих пород и положения в различных условиях рельефа.

## Материалы и методы исследования

В основу исследования микроэлементного состава черноземов обыкновенных Центрального Предкавказья легли результаты почвенно-геохимического опробования на территории нескольких ландшафтов, выделенных В.А. Шальневым [6] в пределах Ставропольской возвышенности. Ключевыми точками стали морфологические единицы ландшафтов в ранге местностей, опробование которых позволяет наиболее полно реализовать поставленную цель исследования. Такими участками стали платообразные поверхности, склоны структурно-денудационных плато и днища речных долин трех ландшафтов Ставропольского края: Расшеватско-Егорлыкского (охватывает бассейн реки Расшеватка), Егорлыкско-Сенгилеевского (Сенгилеевская котловина и долина реки Егорлык), Ташлянского (бассейн реки Ташла). Растительность ключевых участков представлена разнотравно-дерновиннозлаковой степью, в составе которой преобладают *Bothriochloa ischaemum*, *Festuca rupicola* Heuff., *Festuca valesiaca* Gaudin, *Thymus marschallianus*, *Stipa capillata*, *Artemisia austriaca* Jacq., *Poa angustifolia* L., *Medicago romanica* Pzod. Согласно данным Д.С. Дзыбова [7], урожайность разнотравно-дерновиннозлаковой степи этих участков доходит до 47,8 ц/га.

В пределах ключевых участков проведено заложение полных почвенных разрезов с отбором образцов почв по генетическим горизонтам. Химико-аналитическая обработка заключалась в определении содержания валовых и подвижных форм четырех микроэлементов (Pb, Cu, Zn и Cd), содержания гумуса методом мокрого озоления И.В. Тюрина (ГОСТ 26213-91), значения pH водной вытяжки потенциометрическим методом (ГОСТ 26423-85), гранулометрического состава методом Н.А. Качинского. Валовые формы микроэлементов определялись в сухой пробе на рентген-флуоресцентном спектрометре (Xenometrix EX-Calibur), подвижные формы (обменные) экстрагировались ацетатно-аммонийным буферным раствором с pH 4,8 при соотношении почва:раствор 1:5 [8] и последующим определением содержания микроэлементов на атомно-абсорбционном спектрометре «Квант-АФА». Статистическая обработка осуществлялась в программе Excel.

Характеристика микроэлементного состава почв выполнена на основе сравнения с мировыми почвенными кларками путем определения кларков концентрации (КК) и рассеяния (КР). Расчет КК проводился как отношение содержания химического элемента в почвах ключевых ландшафтов к мировому почвенному кларку данного элемента по [9]; КР – как отношение значения мирового почвенного кларка химического элемента к его содержанию в почвах ключевых ландшафтов. В качественном отношении микроэлементный состав почв характеризовался как последовательность уменьшения концентраций рассматриваемых химических элементов в гумусовом горизонте. При определении особенностей радиального распределения микроэлементов использован коэффициент радиальной дифференциации ( $R$ ), равный отношению содержания химического элемента в генетическом горизонте почв к его содержанию в почвообразующей породе.

## Полученные результаты и их обсуждение

Черноземы обыкновенные обычные и карбонатные в Центральном Предкавказье относятся к предкавказским мицелярно-карбонатным умеренно теплой южноевропейской фации [10]. Для них характерны следующие отличия: большая мощность гумусовых горизонтов (112 см и более), невысокое содержание гумуса (до 4 %), высокий уровень залегания карбонатов в почвенном профиле (поверхность или верхняя часть гумусового горизонта), тяжело- и среднесуглинистый состав, равномерное распределение по профилю илистой фракции [11, 12]. В минералогическом составе преобладают минералы монтмориллонитовой группы и гидрослюды [13], обуславливающие вместе с органическими коллоидами высокую емкость поглощения ( $EKO = 32-35$  мг-экв/100 г) [11].

Изученным черноземам обыкновенным обычным Расшеватско-Егорлыкского ландшафта свойственна нейтральная реакция среды гумусового горизонта (pH 7,18±0,06), которая становится щелочной (pH 8,31±0,14) в нижней части почвенного профиля (табл. 1). Содержание гумуса в верхнем горизонте составляет 3,76±0,44 %, с глубиной происходит его падение до 1,05±0,05 %. Гумус относится к фульватно-гуматному типу [14]. Гранулометрический состав – тяжелосуглинистый, содержание фракции физической глины составляет 49,2±1,7 %. Содержание карбонатов возрастает с глубиной, увеличиваясь от 0,7–0,8 % в гумусовом горизонте до 13–15 % в нижней части почвенного профиля [12].

В качественном отношении микроэлементный состав черноземов обыкновенных обычных Расшеватско-Егорлыкского ландшафта имеет вид Zn>Cu>Pb>Cd (табл. 2). По сравнению с мировыми почвенными кларками [9] микроэлементный состав изученных почв характеризуется обогащением Zn, Pb и Cu, обеднением Cd.



Распределение микроэлементов в профиле черноземов обыкновенных контролируется несколькими почвообразовательными процессами, характерными для различных частей почвенного профиля. В верхней и средней частях почвенного профиля определяющее значение имеют процессы гумусообразования и гумусонакопления, закрепления биогенных элементов в составе органоминеральных комплексов, образованных преимущественно при участии гуминовых кислот. В средней и нижней частях почвенного профиля (горизонты В1, В2, ВС<sub>Ca</sub>) важную роль приобретают процессы накопления CaCO<sub>3</sub>, т.е. окарбоначивания. Накопление большого количества карбонатов кальция приводит к формированию системы почвенных соединений микроэлементов, связанных с CaCO<sub>3</sub>. Микроэлементы частично сорбируются карбонатами кальция, частично обменно замещают Ca, образуя прочносвязанные бикарбонаты [2]. Из рассматриваемых химических элементов это характерно для Cu и Pb [15]. Менее прочно связываются с карбонатами Zn и Cd. Хотя и для этих микроэлементов также установлена способность закрепляться в форме карбонатов [16].

Таблица 1 / Table 1

**Физико-химические свойства и содержание микроэлементов в черноземах обыкновенных  
Центрального Предкавказья / Physicochemical properties and the content of trace elements  
in ordinary chernozems of the Central Caucasian Region**

| Ландшафт,<br>чернозем<br>обыкновенный                             | Горизонт/<br>глубина,<br>см | Гумус,<br>% | pH<br>водн. | Ил<br><0,001 мм,<br>% | Физ. глина<br><0,01 мм,<br>% | Содержание микроэлементов ± погрешность,<br>мг/кг (в числителе – валовые формы,<br>в знаменателе – обменные) |                                      |                                     |                                       |
|---|-----------------------------|-------------|-------------|-----------------------|------------------------------|--|--------------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------------|
|   |                             |             |             |                       |                              | Cu   | Zn                                   | Pb                                  | Cd                                    |
| Расшеватско-<br>Егорлыкский,<br>обычный                           | A/10                        | 3,76        | 7,2         | 24,1                  | 49                           | $\frac{30,6 \pm 3,0}{0,24 \pm 0,13}$   | $\frac{77,4 \pm 7,7}{1,36 \pm 0,2}$  | $\frac{27,8 \pm 2,4}{2,66 \pm 0,2}$ | $\frac{0,44 \pm 0,05}{0,11 \pm 0,01}$ |
|   | B1/35                       | 2,44        | 7,6         | 23,4                  | 47                           | $\frac{28,4 \pm 2,7}{0,42 \pm 0,11}$   | $\frac{64,5 \pm 6,3}{1,22 \pm 0,1}$  | $\frac{25,1 \pm 2,5}{2,12 \pm 0,2}$ | $\frac{0,50 \pm 0,05}{<0,05}$         |
|   | B2/64                       | 1,78        | 7,8         | 23,6                  | 46                           | $\frac{27,5 \pm 2,7}{0,88 \pm 0,1}$  | $\frac{66,4 \pm 6,5}{1,14 \pm 0,2}$  | $\frac{25,9 \pm 2,6}{1,79 \pm 0,2}$ | $\frac{0,49 \pm 0,05}{0,12 \pm 0,01}$ |
|   | BC <sub>Ca</sub> /92        | 1,05        | 8,3         | 24,2                  | 49                           | $\frac{26,9 \pm 2,3}{1,43 \pm 0,08}$   | $\frac{67,7 \pm 6,6}{1,11 \pm 0,14}$ | $\frac{26,8 \pm 2,5}{1,01 \pm 0,2}$ | $\frac{0,47 \pm 0,05}{0,16 \pm 0,01}$ |
|   | C/110                       | 0,76        | 8,1         | 24,1                  | 47                           | $\frac{25,7 \pm 2,5}{1,64 \pm 0,05}$   | $\frac{65,8 \pm 6,5}{1,06 \pm 0,1}$  | $\frac{24,8 \pm 2,4}{1,05 \pm 0,1}$ | $\frac{0,46 \pm 0,05}{0,16 \pm 0,01}$ |
| Егорлыкско-<br>Сенгилеевский,<br>солонцеватый                     | A/10                        | 3,34        | 7,4         | 52,3                  | 71                           | $\frac{37,4 \pm 3,7}{0,43 \pm 0,12}$   | $\frac{96,6 \pm 9,6}{2,08 \pm 0,2}$  | $\frac{32,4 \pm 3,2}{2,68 \pm 0,2}$ | $\frac{0,58 \pm 0,05}{0,13 \pm 0,01}$ |
|   | B1/35                       | 2,35        | 7,8         | 49,4                  | 70                           | $\frac{35,6 \pm 3,5}{0,64 \pm 0,11}$   | $\frac{87,9 \pm 8,7}{1,96 \pm 0,2}$  | $\frac{31,7 \pm 3,0}{2,13 \pm 0,2}$ | $\frac{0,57 \pm 0,05}{0,14 \pm 0,01}$ |
|   | B2/54                       | 1,56        | 8,2         | 51,2                  | 69                           | $\frac{38,4 \pm 3,8}{1,09 \pm 0,1}$  | $\frac{72,3 \pm 7,2}{1,74 \pm 0,2}$  | $\frac{28,6 \pm 2,8}{1,97 \pm 0,2}$ | $\frac{0,43 \pm 0,04}{<0,05}$         |
|   | BC/85                       | 0,84        | 9,1         | 49,8                  | 70                           | $\frac{39,1 \pm 3,9}{1,45 \pm 0,1}$  | $\frac{69,6 \pm 6,8}{1,12 \pm 0,1}$  | $\frac{29,9 \pm 2,9}{1,54 \pm 0,1}$ | $\frac{0,52 \pm 0,05}{<0,05}$         |
|   | C/112                       | 0,41        | 9,0         | 49,4                  | 69                           | $\frac{33,6 \pm 3,2}{1,58 \pm 0,07}$   | $\frac{69,3 \pm 6,8}{1,07 \pm 0,1}$  | $\frac{29,7 \pm 2,9}{1,12 \pm 0,1}$ | $\frac{0,44 \pm 0,04}{0,17 \pm 0,01}$ |
| Тащлянский,<br>остаточно-<br>карбонатный<br>легкосуглини-<br>стый | A/10                        | 2,14        | 7,8         | 21,8                  | 42                           | $\frac{26,4 \pm 2,6}{0,26 \pm 0,2}$  | $\frac{65,3 \pm 6,3}{2,03 \pm 0,1}$  | $\frac{28,4 \pm 2,8}{1,56 \pm 0,1}$ | $\frac{0,43 \pm 0,04}{0,08 \pm 0,01}$ |
|   | B1/24                       | 1,98        | 7,9         | 21,6                  | 43                           | $\frac{25,8 \pm 2,5}{0,59 \pm 0,2}$  | $\frac{65,4 \pm 6,5}{1,54 \pm 0,1}$  | $\frac{26,6 \pm 2,6}{1,24 \pm 0,1}$ | $\frac{0,44 \pm 0,04}{0,11 \pm 0,01}$ |
|   | B2/39                       | 1,76        | 8,3         | 23,7                  | 44                           | $\frac{24,9 \pm 2,4}{0,64 \pm 0,15}$   | $\frac{55,8 \pm 5,5}{1,12 \pm 0,1}$  | $\frac{25,8 \pm 2,5}{1,12 \pm 0,1}$ | $\frac{0,39 \pm 0,03}{0,15 \pm 0,01}$ |
|   | BC/54                       | 0,98        | 8,3         | 22,8                  | 43                           | $\frac{22,6 \pm 2,2}{1,05 \pm 0,14}$   | $\frac{50,4 \pm 5,0}{0,59 \pm 0,1}$  | $\frac{23,5 \pm 2,3}{1,13 \pm 0,1}$ | $\frac{0,38 \pm 0,03}{0,16 \pm 0,01}$ |
|   | C/68                        | 0,44        | 8,1         | 20,9                  | 43                           | $\frac{21,8 \pm 2,1}{1,28 \pm 0,11}$   | $\frac{43,6 \pm 4,3}{0,24 \pm 0,1}$  | $\frac{22,5 \pm 2,2}{3,35 \pm 0,3}$ | $\frac{0,38 \pm 0,03}{<0,05}$         |

Таблица 2 / Table 2

**Микроэлементный состав черноземов обыкновенных Центрального Предкавказья  
/ Trace element composition of ordinary chernozems of the Central Caucasian Region**

| Ландшафт, чернозем обыкновенный        | Качественный состав | Сравнение с кларком почв [9]   |                    | Внутрипрофильное распределение (валовые формы) |   |
|--|---------------------|--|--------------------|--|---|
|  |                     | КК   | КР                 | Горизонт                                       | R   |
| Расшеватско-Егорлыкский, обычный       | Zn>Cu>Pb>Cd         | Pb <sub>2,48</sub> Zn <sub>1,55</sub> Cu <sub>1,53</sub>                       | Cd <sub>1,13</sub> | A  | Cu <sub>1,2</sub> Zn <sub>1,17</sub> Pb <sub>1,0</sub> Cd <sub>0,95</sub>   |
|  |                     |  |                    | B1   | Cu <sub>1,1</sub> Cd <sub>1,08</sub> Pb <sub>1,01</sub> Zn <sub>0,98</sub>  |
|  |                     |  |                    | B2   | Cu <sub>1,07</sub> Cd <sub>1,06</sub> Pb <sub>1,04</sub> Zn <sub>1,01</sub> |
|  |                     |  |                    | BC <sub>Ca</sub>                               | Pb <sub>1,08</sub> Cu <sub>1,04</sub> Cd <sub>1,02</sub> Zn <sub>1,01</sub> |
| Егорлыкско-Сенгилеевский, солонцеватый | Zn>Cu>Pb>Cd         | Pb <sub>3,24</sub> Zn <sub>1,93</sub> Cu <sub>1,87</sub><br>Cd <sub>1,16</sub> | –                  | A  | Zn <sub>1,39</sub> Cd <sub>1,31</sub> Cu <sub>1,11</sub> Pb <sub>1,09</sub> |
|  |                     |  |                    | B1   | Zn <sub>1,26</sub> Cd <sub>1,24</sub> Pb <sub>1,06</sub> Cu <sub>1,05</sub> |
|  |                     |  |                    | B2   | Cu <sub>1,14</sub> Zn <sub>1,04</sub> Cd <sub>0,97</sub> Pb <sub>0,96</sub> |
|  |                     |  |                    | BC <sub>Ca</sub>                               | Cd <sub>1,18</sub> Cu <sub>1,16</sub> Pb <sub>1,0</sub> Zn <sub>1,0</sub>   |
| Ташлянский, остаточнокarbonатный       | Zn>Pb>Cu>Cd         | Pb <sub>2,84</sub> Cu <sub>1,32</sub> Zn <sub>1,30</sub>                       | Cd <sub>1,16</sub> | A  | Zn <sub>1,49</sub> Pb <sub>1,26</sub> Cu <sub>1,21</sub> Cd <sub>1,13</sub> |
|  |                     |  |                    | B1   | Cu <sub>1,18</sub> Pb <sub>1,18</sub> Zn <sub>1,15</sub> Cd <sub>1,15</sub> |
|  |                     |  |                    | B2   | Zn <sub>1,27</sub> Pb <sub>1,14</sub> Cd <sub>1,14</sub> Cu <sub>1,02</sub> |
|  |                     |  |                    | BC <sub>Ca</sub>                               | Zn <sub>1,15</sub> Pb <sub>1,04</sub> Cu <sub>1,03</sub> Cd <sub>1,0</sub>  |

Важное значение в перераспределении микроэлементов по почвенному профилю имеет положение щелочного геохимического барьера, на котором происходит частичное осаждение катионогенных микроэлементов [17]. В черноземах обыкновенных обычных щелочной геохимический барьер формируется на границе гумусового и переходного горизонтов, при смене условий среды с нейтральной (горизонт А) на слабощелочную (горизонт В1). Это приводит к развитию относительно невысокого градиента щелочно-кислотных условий, способствующего выпадению из почвенных растворов мигрирующих соединений микроэлементов [17]. Как видно из рисунка, в черноземах обыкновенных обычных происходит совмещение биогеохимического и щелочного геохимических барьеров в верхней части почвенного профиля, которое сопровождается аккумуляцией Cu, Zn, Pb. Это в определенной мере подтверждается значимым ( $p < 0,05$ ) коэффициентом корреляции между количеством Cu и Zn в почвах и содержанием гумуса ( $r = 0,98$  и  $r = 0,74$  соответственно); между количеством Cu и pH ( $r = -0,95$ ).

Формирование сорбционного геохимического барьера в профиле черноземов обыкновенных лимитируется малой интенсивностью процессов иллювирирования. Их выраженность для данных почв ослаблена в силу преобладания непромывных условий водного режима в течение года, существования «горизонта иссушения» в профиле почв, большой степени перерыхлости почвенной массы. Эти факторы в совокупности приводят к слабой дифференциации почвенного профиля черноземов обыкновенных по гранулометрическому составу (табл. 1). Значимый ( $p < 0,05$ ) коэффициент корреляции между содержанием илстой фракции и количеством микроэлемента установлен только для Cd ( $r = -0,84$ ).

Для черноземов обыкновенных солонцеватых Егорлыкско-Сенгилеевского ландшафта характерным является постепенность переходов генетических горизонтов, пониженный уровень вскипания от 10 % соляной кислоты (ниже гумусового слоя). Реакция почвенной среды гумусового горизонта слабощелочная (pH  $7,4 \pm 0,08$ ), с глубиной величина pH достигает сильнощелочного значения с pH  $9,1 \pm 0,09$  (табл. 1). По содержанию гумуса ( $3,34 \pm 0,23$  %) почвы являются слабогумусированными. Гранулометрический состав легкоглинистый – содержание физической глины в верхнем горизонте составляет  $71,0 \pm 0,64$  %. Элювиально-иллювиальное перемещение илстой фракции в пределах почвенного профиля отсутствует. Сумма поглощенных оснований в верхнем горизонте –  $33,3–35,6$  мг-экв/100 г, в составе поглощенных оснований на долю Na приходится 4,4 % [18].

Как видно из табл. 2, качественный микроэлементный состав черноземов обыкновенных солонцеватых имеет вид Zn>Cu>Pb>Cd. В почвах происходит концентрирование относительно мировых поч-

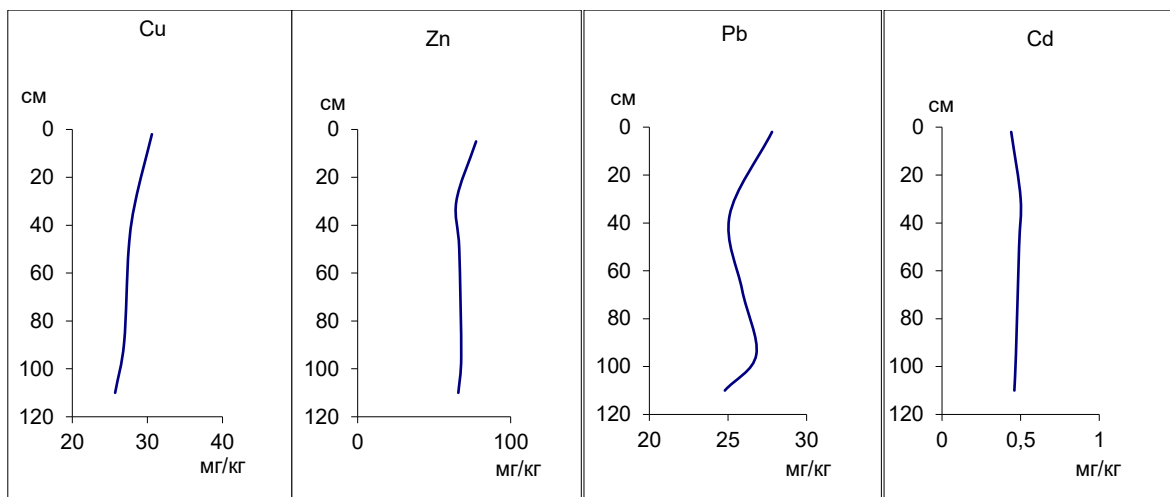
венных кларков по А.П. Виноградову [9] всех рассматриваемых микроэлементов. Высокие концентрации Zn и Pb во многом наследуются от почвообразующих пород (элюво-делювий майкопских глин), минералогический состав которых отличает присутствие цинк- и свинецсодержащих минералов (роговая обманка, биотит, гранат, рутил, эпидот, циркон и др. [4]). Их разрушение в ходе внутрипочвенного выветривания приводит к высвобождению микроэлементов из состава кристаллических решеток и переходу в ионообменные формы.

При формировании микроэлементного состава черноземов обыкновенных солонцеватых определяющее значение имеет накопление катионов Na в составе ППК. При этом происходит изменение щелочно-кислотных условий в сильнощелочную сторону в нижней части почвенного профиля (рН в горизонте ВС у этих почв повышается до 9,4 [18]). Контрастность щелочного геохимического барьера увеличивается за счет более высокого градиента щелочно-кислотных условий. Большинство катионогенных химических элементов (Cu, Zn, Pb) становятся малоподвижными в условиях сильнощелочной реакции почвенного раствора и закрепляются в поглощенном состоянии на поверхности твердой фазы почвы [2, 17]. Свойственные черноземам обыкновенным солонцеватым процессы педотурбации (перемешивание) почвенной массы [19] приводят к постоянному перераспределению фаз – носителей микроэлементов по почвенному профилю. Заключенные в них микроэлементы перемещаются, и их распределение не соответствует приуроченности к определенным внутрипочвенным геохимическим барьерам. Явление слитости, присущее черноземам обыкновенным солонцеватым, способствует слабой проницаемости почвенной массы для почвенных растворов, несущих подвижные формы микроэлементов. Все это, в совокупности, определяет равномерный характер распределения микроэлементов по почвенному профилю черноземов обыкновенных солонцеватых (рисунок), их слабую обеспеченность подвижными, доступными для растений формами микроэлементов.

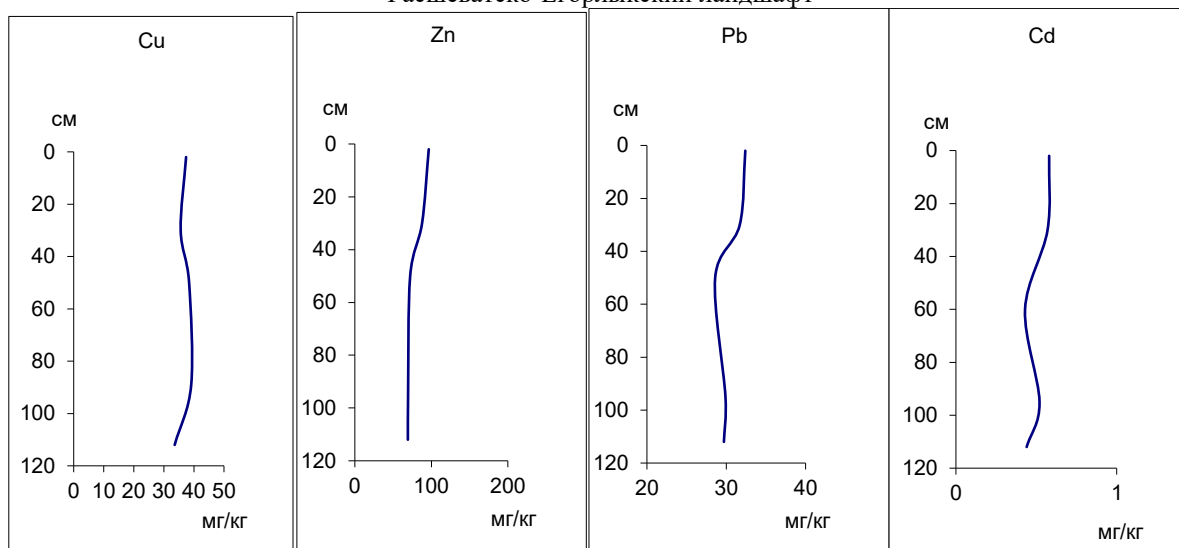
Важной составляющей формирования микроэлементного состава черноземов обыкновенных остаточного-карбонатных, развитых на элювии плотных пород (продукт разрушения известняков и песчаников), является высота залегания карбонатов. Как правило, для этих разновидностей черноземов обыкновенных залегание карбонатов отмечается с поверхности и связано с близостью расположения почвообразующих пород. В черноземах обыкновенных остаточного-карбонатных Ташлянского ландшафта это способствует формированию слабощелочной реакции среды (рН  $7,8 \pm 0,12$ ) уже в гумусовом горизонте (табл. 1). В почвенном профиле не происходит образования щелочного геохимического барьера и распределение микроэлементов определяется их закреплением в составе органо-минеральных комплексов и карбонатов. Это отчасти подтверждается наличием значимых положительных корреляционных связей ( $p < 0,05$ ) между содержанием Cu, Zn, Pb и гумуса ( $r = 0,97 - 0,98$ ); отрицательных – между содержанием Cd и рН ( $r = -0,86$ ). Преимущественный тип внутрипрофильного распределения Cu, Zn и Pb – биогенное аккумулятивное в гумусовом горизонте, Cd – равномерный (рисунок).

Микроэлементный состав черноземов обыкновенных остаточного-карбонатных Ташлянского ландшафта, развитых на элювии плотных пород, отличается более низким содержанием микроэлементов по сравнению с микроэлементным составом черноземов обыкновенных солонцеватых, сформированных на элювии майкопских глин в Егорлыкско-Сенгилеевском ландшафте. Это обстоятельство связано с пониженным уровнем нахождения микроэлементов в почвообразующих породах (элювий известняков, песчаников), облегченным гранулометрическим составом и хорошей проницаемостью почвенной массы для почвенных растворов, выносящих подвижные формы микроэлементов.

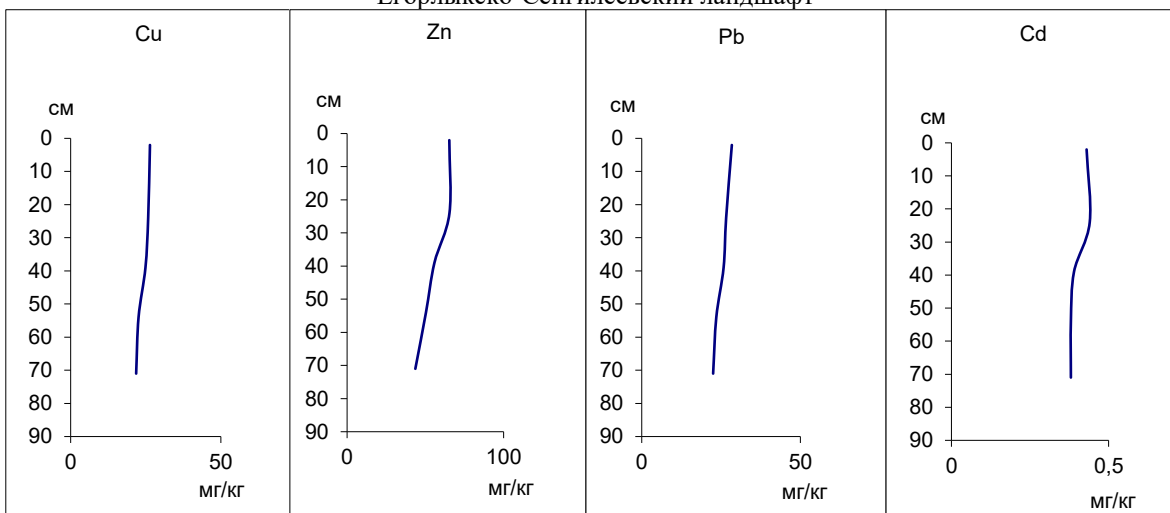
Несмотря на более высокий уровень залегания карбонатов, которые обуславливают прочное связывание микроэлементов, в профиле черноземов обыкновенных остаточного-карбонатных распределение подвижных форм микроэлементов аналогично их распределению в профиле черноземов обыкновенных обычных с залеганием карбонатов на глубине 30–40 см. Происходит увеличение с глубиной подвижных форм Cu и Cd, уменьшение подвижных соединений Zn и Pb. Такое распределение подвижных форм микроэлементов связано с подвижностью их органо-минеральных комплексов и возможностью образовывать специфически сорбированные соединения с карбонатами. Органо-минеральные комплексы гуминовых кислот с ионами Cu и Cd более подвижны, чем с Zn и Pb [16], в то же время с увеличением количества карбонатов в нижней части профиля черноземов обыкновенных происходит сильное связывание подвижных соединений Zn и Pb в составе прочных бикарбонатов [20].



Расшеватско-Егорлыкский ландшафт



Егорлыкско-Сенгилеевский ландшафт



Ташлянский ландшафт

Распределение микроэлементов (валовые формы) в профиле черноземов обыкновенных ландшафтов Центрального Предкавказья / Distribution of trace elements (gross forms) in the profile of chernozems of ordinary landscapes in the Central Caucasian Region

## Заключение

Формирование микроэлементного состава различных родов черноземов обыкновенных Центрального Предкавказья определяется выраженностью в почвенном профиле основных почвенно-геохимических процессов, связанных с закреплением и перераспределением микроэлементов: их биоаккумуляции в составе гумуса, окисления и вхождения микроэлементов в состав карбонатных соединений, оглинивания и сорбции микроэлементов на илистых частицах, педотурбации и перемешивания почвенных масс землероями. Все это приводит к равномерному распределению фаз – носителей микроэлементов в почвенном профиле. В разных родах черноземов обыкновенных выраженность этих процессов во многом обусловлена влиянием характера почвообразующих пород на свойства почвенной массы. При залегании черноземов обыкновенных на лессовидных суглинках важное значение имеет положение щелочного геохимического барьера, на котором накапливаются микроэлементы в почвенном профиле. При залегании черноземов обыкновенных на майкопских глинах определяющую роль играют постоянно протекающие процессы педотурбации, приводящие к равномерному распределению микроэлементов в составе фаз-носителей по почвенному профилю. Близость плотных известняковых пород в черноземах обыкновенных остаточно-карбонатных вызывает отсутствие щелочного геохимического барьера в профиле почв.

Изученные особенности развития системы почвенных соединений микроэлементов в различных родах черноземов обыкновенных Центрального Предкавказья позволяют осуществлять прогнозные мероприятия по стабилизации микроэлементного состава почв в условиях усиления их антропогенного использования.

## Список источников

1. Дегтярева Т.В., Караев Ю.И., Лиховид А.А., Лысенко А.В. Микроэлементный состав дерново-карбонатных почв Северо-Западного Кавказа // Устойчивое развитие горных территорий. 2021. Т. 13, № 1 (47). С. 25–34.
2. Минкина Т.М., Мотузова Г.В., Назаренко О.Г. Состав соединений тяжелых металлов в почвах. Ростов н/Д.: Эверест, 2009. 208 с.
3. Подколзин А.И., Минеев В.Г. Антропогенез почвенного покрова природных ландшафтов Центрального Предкавказья // Проблемы агрохимии и экологии. 2009. № 1. С. 51–59.
4. Цховребов В.С. Агрогенная деградация черноземов Центрального Предкавказья. Ставрополь: АГРУС, 2003. 224 с.
5. Кулинцев В.В., Годунова Е.И., Желнакова Л.И., Удовиченко В.И., Петрова Л.Н., Дридигер В.К., Антонов С.А., Адрианов Д.Ю., Дзыбов Д.С., Крайцов В.В., Ерошенко Ф.В., Куприченко М.Т., Ковтун В.И., Кузыченко Ю.А., Шустикова Е.П., Хрипунов А.И., Шаповалова Н.И., Чертов В.Г., Володин А.Б., Комаров Н.М., Лапенко Н.Г., Галушко Н.А., Давидянц Э.С., Чапцев А.И., Чапцева Т.В., Шлыкова Т.Д., Браткова Л.Г., Чумакова В.В., Обица Е.Н., Багринцева В.Н., Ходжаева Н.А., Федотов А.А., Кешин Н.В. Система земледелия нового поколения Ставропольского края. Ставрополь: АГРУС, 2013. 520 с.
6. Шальнев В.А. Эволюция ландшафтов Северного Кавказа. Ставрополь: Изд-во СГУ, 2007. 310 с.
7. Дзыбов Д.С. Растительность Ставропольского края. Ставрополь: АГРУС, 2018. 492 с.
8. Садовникова Л.К. Использование почвенных вытяжек при изучении соединений тяжелых металлов // Химия в сельском хозяйстве. 1997. № 2. С. 37–40.
9. Виноградов А.П. Геохимия редких и рассеянных химических элементов в почвах. М.: Изд-во АН СССР, 1957. 238 с.
10. Вальков В.Ф., Штомпель Ю.А., Тюльпанов В.И. Почвоведение (почвы Северного Кавказа). Краснодар: Совет. Кубань, 2002. 728 с.
11. Куприченко М.Т., Антонова Т.Н., Симбирев Н.Ф., Цыганков А.С. Земельные ресурсы Ставрополя и их плодородие. Ставрополь: Ставропольская краевая тип., 2002. 320 с.
12. Антыков А.Я., Стомарев А.Я. Почвы Ставрополя и их плодородие. Ставрополь: Ставропольское кн. изд-во, 1970. 180 с.
13. Чижикова Н.П., Годунова Е.И., Шкабарда С.Н., Самсонова А.А., Малыева Т.И. Пространственное распределение глинистых минералов в агрочерноземах эрозивно-денудационных равнин Ставропольского края // Почвоведение. 2012. № 9. С. 983–996.
14. Сизов А.П. Влияние некоторых почвообразующих пород на черноземообразовательный процесс: автореф. дис. ... канд. биол. наук. М., 1985. 24 с.
15. Минкина Т.М., Пинский Д.Л., Манджиева С.С., Бауэр Т.В., Сушкова С.Н., Кушнерева А.В. Влияние сопутствующего аниона на баланс катионов в системе почва – раствор (на примере чернозема обыкновенного) // Почвоведение. 2014. № 8. С. 932–940.

16. Путилина В.С., Галицкая И.В., Юганова Т.И. Адсорбция тяжелых металлов почвами и горными породами. Характеристики сорбента, условия, параметры и механизмы адсорбции : анализ. обзор. Новосибирск: ГПНТБ СО РАН, 2009. 155 с.
17. Перельман А.И., Касимов Н.С. Геохимия ландшафта. М.: Астрей-2000, 1999. 768 с.
18. Новиков А.А. Генетические особенности и агроэкологический мониторинг черноземов солонцевато-слистых развитых на элювии майкопских глин Центрального Предкавказья: автореф. дис. ... канд. с.-х. наук. Краснодар, 2003. 26 с.
19. Ковда И.В., Моргунов Е.Г., Алексеева Т.В. Формирование и развитие почвенного покрова гильгай (на примере Центрального Предкавказья) // Почвоведение. 1992. № 3. С. 19–34.
20. Манджиева С.С., Минкина Т.М., Мотузова Г.В., Головатый С.Е., Мирошниченко Н.Н., Лукашенко Н.К., Фатеев А.И. Фракционно-групповой состав соединений цинка и свинца как показатель экологического состояния почв // Почвоведение. 2014. № 5. С. 632–640.

## References

1. Degtyareva T.V., Karaev Yu.I., Likhovid A.A., Lysenko A.V. Microelement composition of soddy-calcareous soils of the North-Western Caucasus. *Ustoichivoe razvitie gornyykh territorii = Sustainable Development of Mountain Territories*. 2021;13(1):25-34. (In Russ.).
2. Minkina T.M., Motuzova G.V., Nazarenko O.G. *Composition of heavy metal compounds in soils*. Rostov-on-Don: Everest Publ.; 2009. 208 p. (In Russ.).
3. Podkolzin A.I., Mineev V.G. Anthropogenesis of soil cover in natural landscapes of the Central Ciscaucasia. *Problemy agrokhimii i ekologii = Problems of Agrochemistry and Ecology*. 2009;(1):51-59. (In Russ.).
4. Tskhovrebov B.C. *Agrogenic degradation of chernozems of the Central Caucasian Region* Stavropol: AGRUS Publ.; 2003. 224 p. (In Russ.).
5. Kulintsev V.V., Godunova E.I., Zhelnakova L.I., Udovichenko V.I., Petrova L.N., Dridiger V.K., Antonov S.A., Adrianov D.Yu., Dzybov D.S., Kravtsov V.V., Eroshenko F.V., Kuprichenko M.T., Kovtun V.I., Kuzychenko Yu.A., Shustikova E.P., Khripunov A.I., Shapovalova N.I., Chertov V.G., Volodin A.B., Komarov N.M., Lapenko N.G., Galushko N.A., Davidyants E.S., Chaptsev A.I., Chaptseva T.V., Shlykova T.D., Bratkova L.G., Chumakova V.V., Obshchiya E.N., Bagrintseva V.N., Khodjaeva N.A., Fedotov A.A., Keshin N.V. *The system of agriculture of the new generation of the Stavropol Territory*. Stavropol: AGRUS Publ.; 2013. 520 p. (In Russ.).
6. Shalnev V.A. *Evolution of the landscapes of the North Caucasus*. Stavropol: Stavropol State University Press; 2007. 310 p. (In Russ.).
7. Dzybov D.S. *Vegetation of the Stavropol Territory*. Stavropol: AGRUS Publ., 2018. 492 p. (In Russ.).
8. Sadovnikova L.K. Use of soil extracts in the study of compounds of heavy metals. *Khimiya v sel'skom khozyaistve = Chemistry in Agriculture*. 1997;(2):37-40. (In Russ.).
9. Vinogradov A.P. *Geochemistry of rare and trace elements in soils*. Moscow: USSR Academy of Sciences Press; 1957. 238 p. (In Russ.).
10. Valkov V.F., Shtompel Yu.A., Tyulpanov V.I. *Soil science (soils of the North Caucasus)*. Krasnodar: Sovetskaya Kuban' Publ.; 2002. 728 p. (In Russ.).
11. Kuprichenkov M.T., Antonova T.N., Simbirev N.F., Tsygankov A.S. *Land resources of the Stavropol region and their fertility*. Stavropol: Stavropol Regional Printing House; 2002. 320 p. (In Russ.).
12. Antykov A.Ya., Stomarev A.Ya. *Soils of the Stavropol Territory and their fertility*. Stavropol: Stavropol Publishing House; 1970. 180 p. (In Russ.).
13. Chizhikova N.P., Godunova E.I., Shkabarda S.N., Samsonova A.A., Malueva T.I. Spatial distribution of clay minerals in agrochernozems of erosion-denudation plains of the Stavropol Territory. *Pochvovedenie = Eurasian Soil Science*. 2012;(9):983-996. (In Russ.).
14. Sizov A.P. *Influence of some soil-forming rocks on the chernozem-forming process*. Dissertation Thesis. Moscow, 1985. 24 p. (In Russ.).
15. Minkina T.M., Pinsky D.L., Mandzhieva S.S., Bauer T.V., Sushkova S.N., Kushnereva A.V. Influence of an accompanying anion on the balance of cations in the soil-solution system (on the example of ordinary chernozem). *Pochvovedenie = Eurasian Soil Science*. 2014;(8):932-940. (In Russ.).
16. Putilina V.S., Galitskaya I.V., Yuganova T.I. *Adsorption of heavy metals by soils and rocks. Characteristics of the sorbent, conditions, parameters and mechanisms of adsorption*. An analytical review. Novosibirsk: GPNTB SO RAN Press; 2009. 155 p. (In Russ.).
17. Perelman A.I., Kasimov N.S. *Geochemistry of the landscape*. Moscow: Astrea-2000 Publ., 1999. 768 p. (In Russ.).
18. Novikov A.A. *Genetic features and agroecological monitoring of solonchic merged chernozems developed on the eluvium of Maikop clays of the Central Ciscaucasia*. Dissertation Thesis. Krasnodar, 2003. 26 p. (In Russ.).

19. Kovda I.V., Morgun E.G., Alekseeva T.V. Formation and development of the gilgai soil cover (on the example of the Central Caucasian Region). *Pochvovedenie = Eurasian Soil Science*. 1992;(3):19-34. (In Russ.).

20. Mandzhieva S.S., Minkina T.M., Motuzova G.V., Golovaty S.E., Miroshnichenko N.N., Lukashenko N.K., Fateev A.I. Fractional-group composition of zinc and lead compounds as an indicator of the ecological state of soils. *Pochvovedenie = Eurasian Soil Science*. 2014;(5):632-640. (In Russ.).

#### **Информация об авторе**

*Дегтярева Т.В. – кандидат географических наук, доцент кафедры физической географии и кадастров, Институт наук о Земле.*

#### **Information about the author**

*Degtyareva T.V. - Candidate of Science (Geography), Associate Professor of the Department of Physical Geography and Cadastre, Institute of Earth Sciences.*

*Статья поступила в редакцию 23.12.2021; одобрена после рецензирования 25.01.2022; принята к публикации 16.03.2022.*

*The article was submitted 23.12.2021; approved after reviewing 25.01.2022; accepted for publication 16.03.2022.*

---

Научная статья

УДК 631.423.4

doi: 10.18522/1026-2237-2022-1-38-48

## ВЛИЯНИЕ ГУМИНОВОГО ПРЕПАРАТА НА ФРАКЦИОННО-ГРУППОВОЙ СОСТАВ ФОСФАТОВ В ЧЕРНОЗЕМЕ ОБЫКНОВЕННОМ КАРБОНАТНОМ

**Марина Николаевна Дубинина<sup>1✉</sup>, Ольга Степановна Безуглова<sup>2</sup>**

<sup>1, 2</sup>Федеральный Ростовский аграрный научный центр, пос. Рассвет, Ростовская область, Россия

<sup>1</sup>dubinina-marina@rambler.ru<sup>✉</sup>

<sup>2</sup>lola314@mail.ru

**Аннотация.** Представлены результаты изменения фракционно-группового состава фосфора в черноземе обыкновенном карбонатном под влиянием фоллиарной обработки посевов озимой пшеницы гуминовым препаратом. Обработку посевов проводили в фазу кущения и фазу колошения. Исследования вели в 2017–2020 гг. на стационаре ФБГНУ «ФРАНЦ».

Исследования показали, что обработка посевов озимой пшеницы гуминовым препаратом способствует снижению в почве всех форм минеральных фосфатов, особенно фосфатов первой группы, наиболее доступных растениям. Однако и другие группы, в том числе труднодоступные фосфаты алюминия и железа, оказываются вовлеченными в этот процесс. Причина – повышенная потребность растений, получивших стимулирующие обработки гуминовым препаратом, в фосфорном питании. Растения озимой пшеницы регулируют высвобождение связанных форм фосфатов включением в процесс фосфатазы.

**Ключевые слова:** чернозем обыкновенный карбонатный, фосфор, групповой состав фосфатов, гуминовый препарат, озимая пшеница

**Для цитирования:** Дубинина М.Н., Безуглова О.С. Влияние гуминового препарата на фракционно-групповой состав фосфатов в черноземе обыкновенном карбонатном // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. 2022. № 1. С. 38–48.

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

## THE IMPACT OF A HUMIC PREPARATION ON THE FRACTIONAL COMPOSITION OF PHOSPHATES IN CALCIC CHERNOZEM

**Marina N. Dubinina<sup>1✉</sup>, Olga S. Bezuglova<sup>2</sup>**

<sup>1, 2</sup>Federal Rostov Agricultural Research Center, Rassvet, Rostov Region, Russia

<sup>1</sup>dubinina-marina@rambler.ru<sup>✉</sup>

<sup>2</sup>lola314@mail.ru

**Abstract.** The results of changes in the fractional composition of phosphorus in Calcic Chernozem under the influence of foliar treatment of winter wheat crops with a humic preparation are presented. Research was carried out in 2017–2020 at the experimental field of Federal Rostov Agricultural Research Center. The treatment of crops was carried out in the phases of tillering and heading.

Studies have shown that the treatment of winter wheat crops with a humic preparation helps to reduce all forms of mineral phosphates in the soil, especially phosphates of the first group, the most accessible to plants. However, other groups, including hard-to-reach aluminum and iron phosphates, are also involved in this process. The reason is the increased need for phosphorus nutrition in the plants that received stimulating treatments with a humic preparation. Winter wheat plants regulate the release of bound forms of phosphate by including phosphatase in the process.



**Keywords:** Calcic Chernozem, phosphorus, group composition of phosphates, humic preparation, winter wheat

**For citation:** Dubinina M.N., Bezuglova O.S. The Impact of a Humic Preparation on the Fractional Composition of Phosphates in Calcic Chernozem. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2022;(1):38-48. (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 питании и развитии растений важную роль играет фосфор. Будучи составной частью сложных белков (нуклеопротеидов), нуклеиновых кислот, фосфатидов, ферментов, витаминов, фитина и других биологически активных соединений [1], он участвует в обмене веществ, делении клеток, размножении, передаче наследственных свойств. Особенно необходим фосфор молодым растениям, так как способствует развитию корневой системы, повышает интенсивность кушения зерновых культур. Установлено, что, увеличивая содержание растворимых углеводов в клеточном соке, фосфор усиливает зимостойкость озимых культур.

Доступность и экстрагируемость фосфора различных групп в значительной степени определяются природой и прочностью его связи с органоминеральными компонентами почвы. Важной его особенностью является обратимость перехода фосфора из одной группы в другую. Если в растения переходит лишь незначительное количество фосфора из внесенных минеральных и органических удобрений, то остальная его часть должна поступать из почвенных запасов. Наличие данных резервов связано с уровнем естественного плодородия почвы и с предшествующим внесением фосфора с органическими и минеральными удобрениями [2].

Большое количество фосфора находится в почве в виде фосфорорганических соединений, это своеобразный природный запас, который под влиянием комплекса факторов может быть мобилизован для питания и развития растений. Часть вносимых с минеральными удобрениями фосфатов связывается с органическим почвенным веществом и переходит в малоподвижное состояние. При активизации жизнедеятельности почвенной микрофлоры и изменении реакции почвенного раствора такие соединения трансформируются, высвобождая фосфор, и поступление этого элемента носит постоянный характер [3].

В свою очередь, органические фосфорсодержащие соединения в почве входят в состав гумуса, растительных и животных остатков. Фосфор содержится в них, в противоположность азоту и сере, в окисленной форме, в виде остатка фосфорной кислоты. И именно в черноземах наибольшая доля от общего запаса фосфора сосредоточена в фосфорорганических соединениях – до 80 %, причем большая их часть находится в форме фитина, нуклеиновых кислот, фосфолипидов [4].

Мобилизовать фосфор из малодоступных соединений кальция, алюминия и железа способны микроорганизмы родов *Pseudomonas*, *Azotobacter*, *Bacillus* и др. На дефицит фосфатов растения отвечают физиологическими изменениями: повышенное выделение корнями органических кислот и подкисление почвы [5].

Устойчивость фосфорных соединений к микробному разложению зависит от природы катиона, с которым связаны фосфаты. Наиболее легко мобилизуется фосфат кальция; фосфат алюминия менее подвержен растворению, а фосфат железа очень устойчив к действию бактериальных метаболитов. Часть образующихся под действием микроорганизмов растворимых фосфатов поглощается растениями в процессе питания, часть иммобилизуется микроорганизмами и часть фиксируется в почве. Нуклеиновые кислоты (ДНК, РНК) также содержат остатки фосфорной кислоты, которые освобождаются под действием микробных ферментов, выделяемых клетками многих почвенных микроорганизмов. Эти процессы составляют основу превращений фосфора в природе [6].

Количество доступного растениям фосфора от его общего запаса невелико: примерно 10–20 % относительно доступны и 50–60 % – малодоступны. Растения поглощают фосфор из почвенного раствора в основном в виде ортофосфатов. Содержание их в почве зависит от ряда факторов: общего запаса фосфорсодержащих соединений, химического состава почвы, количества и качества вносимых фосфорных удобрений, климатических и погодных условий исследуемой территории, кислотности почвенной среды, жизнедеятельности почвенных биосистем.

Анализ фракционного состава фосфора чернозема обыкновенного показал, что минеральные формы фосфатов представлены преимущественно фракциями фосфатов кальция. Фракции фосфатов полуторных оксидов содержатся в незначительных количествах. Фосфаты железа в черноземе обыкновенном составляют около 15 % от суммы всех определяемых фракций, или 3 % от валового количества фосфора. Вниз по профилю содержание всех фракций равномерно снижается. На долю оставшихся фракций фосфатов невыветрившихся минералов приходится около 70 %. Среди активных форм минеральных фосфатов основная доля приходится на фосфаты кальция, среди которых преобладают высокоосновные фосфаты кальция типа апатита [7–9].

Необходимо отметить, что проблема недостаточной обеспеченности пахотных земель фосфором особенно актуальна для южных агротехнических территорий зоны черноземных почв, где превалируют их карбонатные роды [10, 11].

Проблема дефицита фосфорного питания решается различными способами: увеличением доз минеральных фосфорных удобрений [12, 13], совместным использованием минеральных и органических удобрений [14], применением сева по технологии черного пара [15–17] и т.п. Достоверному увеличению содержания подвижного фосфора в черноземе способствует и обработка посевов озимой пшеницы гуминовым препаратом, что обусловлено активным регулированием растениями процессов мобилизации фосфора через механизм корневых выделений и увеличением численности микроорганизмов [18]. При использовании в агрономической практике гуминовых препаратов исследования фракционного состава подвижных соединений фосфора позволяют судить о механизмах интенсификации процессов фосфорного питания.

Цель данного исследования – изучение влияния гуминового препарата на состав и динамику почвенных фосфатных соединений, изучалось также действие более высоких концентраций гуминового препарата «ВЮ-Дон» на почвенное плодородие и урожайность озимой пшеницы.

### Объекты и методы исследования

Исследования проводили на стационаре Федерального Ростовского аграрного научного центра (ФГБНУ «ФРАНЦ») в Аксайском районе Ростовской области. Почва – чернозем обыкновенный карбонатный. Содержание гумуса в пахотном слое составляет 4,4–4,7 %, количество валового азота 0,20–0,25 %, фосфора – 0,11–0,16, калия – 2,3 % [19]. Содержание подвижной фосфорной кислоты преимущественно низкое и очень низкое (в пахотном слое 0,6–1,5 мг на 100 г почвы), обменного калия – повышенное (30,0–47,0 мг на 100 г почвы).

Возделываемая культура – озимая пшеница, сорт Золушка, включенный в Госреестр в 2012 г. в 6 и 8 регионах РФ.

В эксперименте испытывали гуминовый препарат (ГП) «ВЮ-Дон», получаемый путем щелочной экстракции из вермикомпоста. В его составе содержатся гуминовые кислоты, сумма которых составляет в среднем 2,2 г/л. ГП проявил себя как стимулятор роста и адаптоген, снимающий стресс после применения средств защиты и воздействия неблагоприятных погодных факторов [20, 21]. Данный препарат разбавляют до оптимальной концентрации 0,002 % по органическому углероду и производят обработку почвы или растений.

Полевой опыт включал 4 варианта: 1) фон – минеральные удобрения (без обработки гуминовым препаратом «ВЮ-Дон»); 2) фон + «ВЮ-Дон» в дозе 2,0 л/га (концентрация ГП 0,002 %); 3) фон + «ВЮ-Дон» в дозе 3,0 л/га (концентрация ГП 0,003 %); 4) фон + «ВЮ-Дон» в дозе 4,0 л/га (концентрация ГП 0,004 %). Фон – минеральные удобрения: азофоска – 100 кг/га (в д.в.  $N_{10}P_{20}K_{26}$ ) – предпосевное внесение, аммиачная селитра 180 кг/га – подкормка после возобновления весенней вегетации (суммарно в д.в. 61 кг/га). ГП вносили в фазу кущения и фазу колошения опрыскиванием рабочим раствором с концентрацией 0,002–0,004 %. Площадь делянки 30 м<sup>2</sup>, площадь учетной делянки 8 м<sup>2</sup>. Каждый вариант представлен в трех повторениях. Предшественник – в вегетационном периоде 2017–2018 гг. – пар, в последующие годы исследований – озимая пшеница; возделываемая культура – озимая пшеница.

Активность фосфатазы определяли по методу А.Ш. Галстяна и Э.А. Арутюняна [22] с некоторыми изменениями (увеличение времени инкубации и объема добавляемого раствора фенолфталейнфосфата натрия). Групповой состава фосфатов по методу Чирикова (вариант Шконде в модификации К.Е. Гинзбург [23]) предполагает определение следующих групп соединений:

– фосфаты щелочных металлов и аммония, гидрофосфаты и частично фосфаты кальция и магния (первая группа фосфатов – углекислотная вытяжка);

- разноосновные фосфаты кальция, частично фосфат алюминия (вторая группа фосфатов – уксуснокислая вытяжка);
- высокоосновные фосфаты кальция, разноосновные фосфаты алюминия и железа, часть фосфорных эфиров (третья группа фосфатов – солянокислая вытяжка);
- фосфор органических соединений, фосфаты алюминия и железа (четвертая группа фосфатов – аммиачная вытяжка).

Дополнительно в остатке почвы после экстракции всех извлекаемых по методу Чирикова форм фосфора определяли фосфаты невыветрившихся минералов и трудногидролизуемые соединения фосфора с гумусовыми кислотами.

### Результаты исследования

*Динамика фосфатов первой группы.* Первая группа представлена самыми подвижными соединениями, так как катионы этих фосфатов – щелочные и щелочноземельные металлы, имеющие наибольшее биологическое средство с растениями. Их количество в значительной степени регулируется гидротермическими условиями года и, соответственно, активностью микроорганизмов. В начале наблюдений содержание этих фосфатов в течение вегетационного периода во всех вариантах опыта сохранялось на примерно одинаковом низком уровне (рис. 1).

Обусловлено это тем, что весна и начало лета 2018 г. были очень сухими, месячное количество осадков колебалось в пределах 6–8 мм, что в несколько раз ниже среднееголетних значений, и снабжение растений влагой шло фактически за счет почвенных влагозапасов, обеспеченных осенне-зимними осадками. Тем не менее колебания в содержании этой группы фосфатов по фазам развития имеются, причем статистически достоверные. Особенно хорошо видны различия между вариантами в фазу кущения, так как фосфор способствует интенсификации кущения у зерновых культур.

В этот период в контрольном варианте наблюдается снижение фосфатов щелочных металлов аммония и однозамещенного кальция, так как именно во время активного роста вегетативной массы растений потребность в элементах питания, в том числе в фосфоре, особенно велика. Обработка растений гуминовым препаратом в фазу кущения способствовала еще большему снижению этой группы фосфатов, так как стимуляция роста растений сопровождалась повышенной потребностью в фосфоре.

Как ранее показали исследования, фолиарная обработка посевов озимой пшеницы в фазу кущения гуминовым препаратом сопровождается достоверным увеличением микробиологической активности в ризосферной зоне [24]. Однако в варианте с дозой ГП 2,0 л/га активность микроорганизмов, вероятно, недостаточна высока для восполнения расхода легкодоступных фосфатов из других менее доступных групп.

В варианте с дозой 3,0 л/га отмечается рост содержания этой группы фосфатов, а увеличение дозировки гуминового препарата до 4,0 л/га вновь сопровождается усилением потребности в соединениях фосфора и достоверным снижением содержания фосфатов щелочных металлов, аммония и однозамещенного кальция. В последующие сроки отбора (колошение и уборка) достоверных различий между вариантами не наблюдалось.

Следующий год исследований (2018–2019) характеризовался иным распределением осадков в весенне-летний период. Малоснежный февраль сменился влажными (на уровне среднееголетних величин) мартом и апрелем, а в мае количество осадков было на 20 мм выше среднееголетнего значения. В июне наблюдалось резкое уменьшение количества осадков. Но в целом год был достаточно хорошим по влагообеспеченности, о чем свидетельствует и величина ГТК (0,7). Как следствие, на момент возобновления вегетации отмечено резкое увеличение самого количества этих соединений: почти в 3 раза выше, чем в этот же период предыдущего вегетационного года (рис. 1).

Однако затем содержание этой группы фосфатов в контрольном варианте в течение вегетации неуклонно снижалось, скорее всего, за счет активного потребления хорошо развивающимися растениями. При этом существенное влияние на содержание этой группы фосфатов оказало внесение гуминовых препаратов: увеличение дозы гуматов в вариантах приводило к достоверному снижению фосфатов первой группы. Из этого можно сделать вывод, что даже на фоне недостаточной влажности почвы активное потребление легкорастворимых фосфатов может быть инициировано внесением гуминовых веществ.

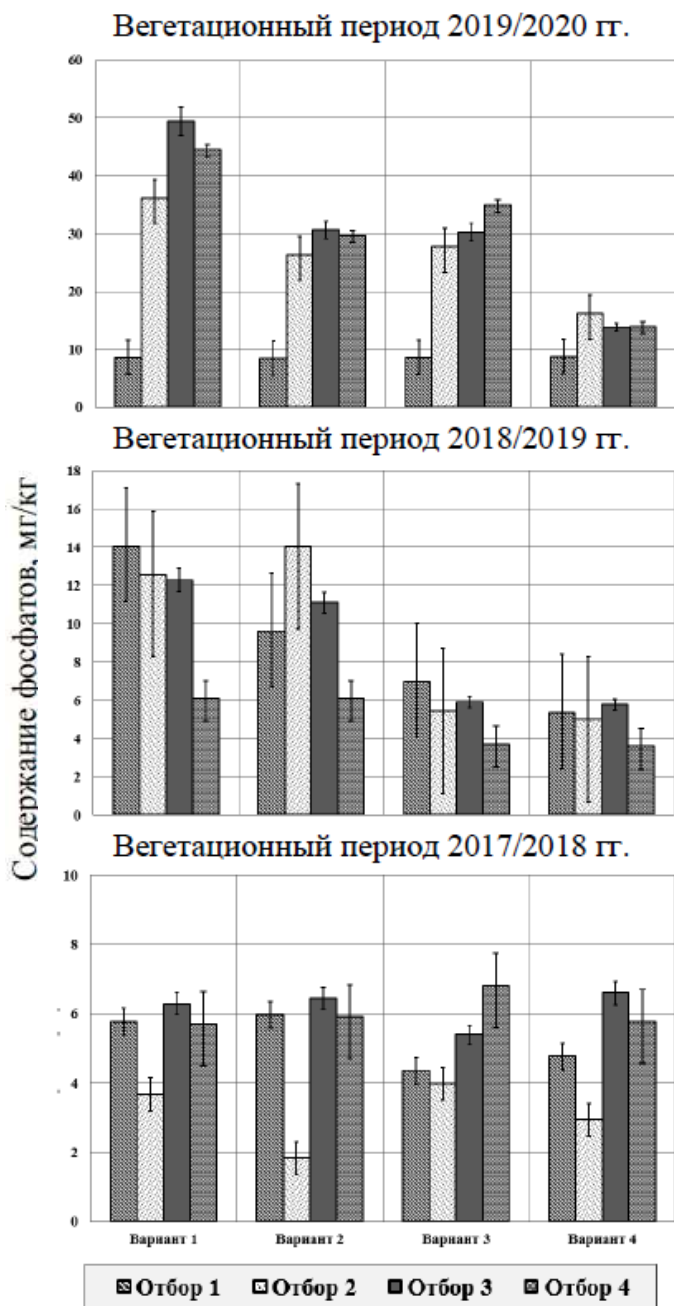


Рис. 1. Динамика первой группы фосфатов (фосфаты щелочных металлов и аммония, гидрофосфаты и частично фосфаты кальция и магния, углекислотная вытяжка).  
 Отборы: 1. Возобновление весенней вегетации. 2. Через 2 недели после первой обработки гуминовым препаратом. 3. Через 2 недели после второй обработки гуминовым препаратом. 4. После уборки урожая / Fig. 1. Dynamics of the first group of phosphates (phosphates of alkali metals and ammonium, hydrophosphates and partially phosphates of calcium and magnesium, carbon dioxide extract). Selections: 1. Resumption of spring vegetation. 2. 2 weeks after the first treatment with a humic preparation. 3. 2 weeks after the second treatment with a humic preparation. 4. After harvest

Исследования 2019/2020 г. добавили еще больше данных для подтверждения этого явления. Максимально этот эффект проявил себя в варианте с применением ГП в дозировке 4 л/га (рис. 1). Содержание однозамещенных фосфатов на контроле достигало 50 мг/кг (в фазу колошения), в то же время во всех трех вариантах с ГП количество фосфатов этой группы не превышает 35 мг/кг. Однако тенденция к накоплению этих соединений в фазу колошения сохраняется. Следует также отметить, что весеннее внесение аммиачной селитры сопровождалось увеличением содержания фосфатов щелочных металлов и аммония, наиболее легко усваиваемых растениями. Однако затем эти соединения находятся в практически постоянной концентрации в течение всего периода наблюдений, особенно в контрольном варианте 1. Колебания крайне незначительные, а в варианте 4 с внесением ГП в дозе 4,0 л/га даже на фоне минеральных удобрений баланс этих легкодоступных форм фосфатов не меняется.

*Динамика фосфатов второй группы.* Вторая группа фосфатов, экстрагируемая уксусной кислотой, представляет собой двузамещенные фосфаты кальция (рис. 2).

Фактически эта группа фосфатов является ближним резервом фосфора, в литературе отмечается возможность перехода двузамещенных фосфатов в однозамещенные при подкислении рН, изменении микробиологической активности, колебаниях температуры и влажности [24]. Содержание этой группы фосфатов после обработок ГП колеблется в довольно узком диапазоне, что может свидетельствовать о равновесии между потребляемым фосфором и фосфатами, вступающими во взаимодействие с почвенным кальцием, так как почвенный комплекс в черноземе обыкновенном карбонатном насыщен поглощенным кальцием, и нарушить это равновесие – довольно сложная задача.

Учитывая, что именно насыщенность почвенного комплекса кальцием в черноземах в значительной степени обеспечивает устойчивость этого типа почв к химической деградации, установленный факт можно оценивать как положительное явление.

Тем не менее, несмотря на небольшой диапазон колебаний, четко видна динамика этой формы фосфора по фазам развития растений в начале исследований (2017/2018 вегетационный год), причем на контроле разница выражена особенно хорошо. В значительной степени динамика и этой группы фосфатов зависит от погодных условий года.

Так, в резко засушливых условиях 2018 г. именно в этот период наблюдается резкое и статистически достоверное снижение количества этой группы фосфатов во второй отбор, который приходился на фазу кущения. Активность формирования вегетативной массы в этот период наибольшая, и, вероятно, недостаток фосфорной кислоты в среде способствует росту активности фосфатазы (таблица).

Низкая доза ГП (вариант 2), способствуя лучшему развитию растения, в недостаточной степени активизирует почвенные процессы, поэтому дефицит этой группы фосфатов усиливается. Дозировка 3,0 л/га оказывается оптимальной, обеспечивая пополнение нехватки фосфора и достоверно повышая содержание фосфатов кальция в групповом составе.

В 2019 г. при более оптимальной обеспеченности влагой в контроле четко прослеживается снижение содержания этой группы фосфатов, напротив, в сухом 2020 г. наблюдалось увеличение её содержания от начала возобновления вегетации к фазе колошения. На вариантах с гуматом динамика второй группы фосфатов сходная с картиной в контрольном варианте, однако к уборке уровень этой группы фосфатов остается высоким, особенно при низкой дозировке «БИО-Дон».

Таким образом, все три года наблюдений продемонстрировали, что фактически динамика первой и второй групп фосфатов идентична (при высокой разнице в абсолютном их содержании). Это свидетельствует о возможности использования фосфатов второй группы при формировании урожая озимой пшеницы, причем в вариантах с гуматом этот тренд выражен ярче.

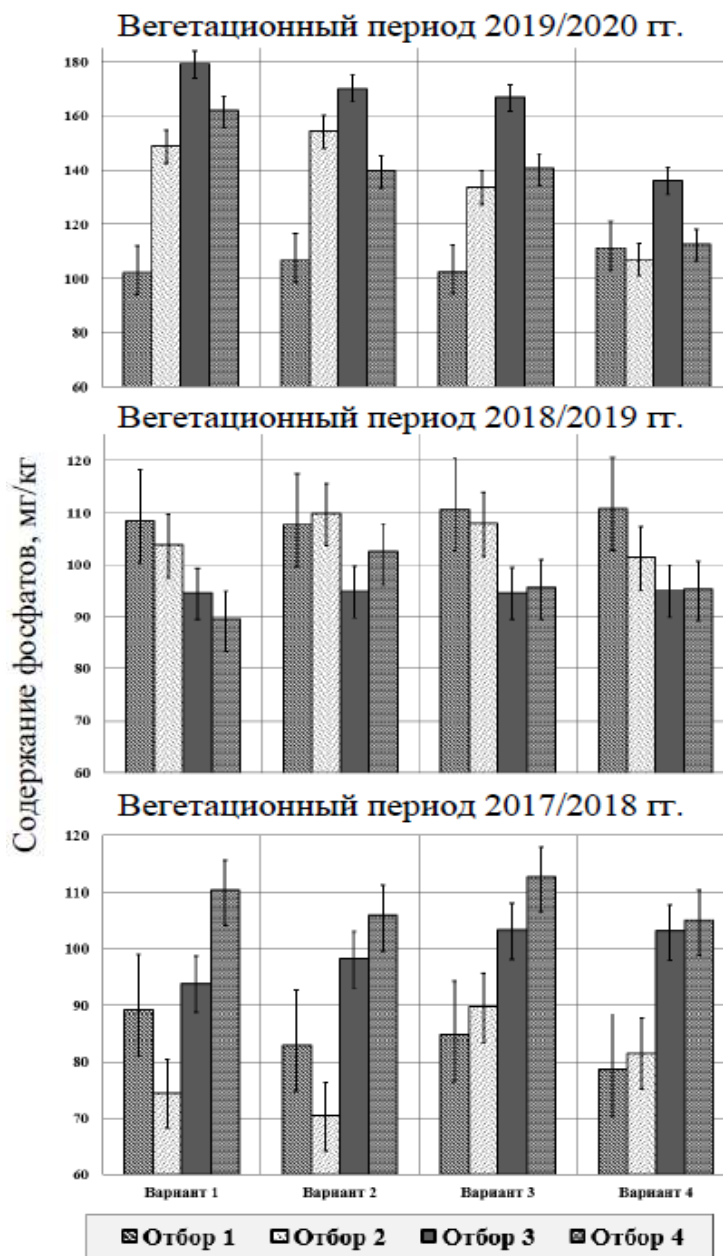


Рис. 2. Динамика второй группы фосфатов (разноосновные фосфаты кальция, частично фосфат алюминия, уксуснокислая вытяжка). Отборы: рис. 1 / Fig. 2. Dynamics of the second group of phosphates (various base calcium phosphates, partly aluminum phosphate, acetic acid extract). Selections: see Fig. 1

**Динамика фосфатазной активности по вариантам опыта, мг P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> / 100 г почвы за 1 ч /  
Dynamics of phosphatase activity by experimental variants, mg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> / 100 g of soil per 1 hour**

| Вариант опыта               | Среднее по варианту   | Разница с контролем | Среднее по варианту | Разница с контролем | Разница между отборами | Среднее по варианту | Разница с контролем | Разница между отборами | Среднее по варианту | Разница с контролем | Разница между отборами | Изменения к концу опыта |
|-----------------------------|---|---------------------|---------------------|---------------------|------------------------|---------------------|---------------------|------------------------|---------------------|---------------------|------------------------|-------------------------|
|                             | Отбор 1   |                     | Отбор 2             |                     |                        | Отбор 3             |                     |                        | Отбор 4             |                     |                        |                         |
| 2017/2018 вегетационный год |   |                     |                     |                     |                        |                     |                     |                        |                     |                     |                        |                         |
| 1                           | 4,89  | –                   | 5,38                | –                   | <b>0,94</b>            | 4,47                | –                   | <b>–1,36</b>           | 5,30                | –                   | <b>0,83</b>            | 0,41                    |
| 2                           | 4,21  | <b>–0,68</b>        | 5,34                | –0,04               | <b>1,13</b>            | 4,61                | 0,14                | <b>–0,73</b>           | 4,69                | <b>–0,61</b>        | 0,08                   | 0,48                    |
| 3                           | 3,07  | <b>–1,82</b>        | 3,90                | <b>–1,48</b>        | <b>0,83</b>            | 3,14                | <b>–1,33</b>        | <b>–0,76</b>           | 4,70                | <b>–0,60</b>        | <b>1,56</b>            | <b>1,63</b>             |
| 4                           | 2,70  | <b>–2,19</b>        | 2,80                | <b>–2,58</b>        | 0,10                   | 3,04                | <b>–1,43</b>        | 0,24                   | 3,13                | <b>–2,17</b>        | 0,09                   | 0,43                    |
| <b>НСР<sub>05</sub></b>     | По фактору А (разница между отборами) – 0,40; по фактору В (содержание ГП) – 0,40; по факторам АВ – 0,57                        |                     |                     |                     |                        |                     |                     |                        |                     |                     |                        |                         |
| 2018/2019 вегетационный год |   |                     |                     |                     |                        |                     |                     |                        |                     |                     |                        |                         |
| 1                           | 3,54  | –                   | 3,16                | –                   | <b>–0,38</b>           | 3,52                | –                   | <b>0,36</b>            | 4,23                | –                   | <b>0,71</b>            | <b>0,69</b>             |
| 2                           | 3,70  | 0,16                | 3,73                | <b>0,57</b>         | 0,03                   | 3,44                | –0,08               | –0,29                  | 4,14                | –0,09               | <b>0,70</b>            | 0,44                    |
| 3                           | 3,65  | 0,11                | 3,56                | <b>0,40</b>         | –0,09                  | 3,42                | –0,10               | –0,14                  | 4,19                | –0,04               | <b>0,74</b>            | <b>0,51</b>             |
| 4                           | 3,23  | –0,31               | 3,11                | –0,05               | –0,12                  | 3,06                | <b>–0,46</b>        | –0,05                  | 3,48                | <b>–0,75</b>        | <b>0,42</b>            | 0,25                    |
| <b>НСР<sub>05</sub></b>     | По фактору А (разница между отборами) – 0,33; по фактору В (содержание ГП) – 0,33; по факторам АВ – 0,47                        |                     |                     |                     |                        |                     |                     |                        |                     |                     |                        |                         |
| 2019/2020 вегетационный год |   |                     |                     |                     |                        |                     |                     |                        |                     |                     |                        |                         |
| 1                           | 3,89  | –                   | 4,46                | –                   | <b>0,57</b>            | 4,99                | –                   | <b>0,53</b>            | 7,40                | –                   | <b>2,41</b>            | <b>3,51</b>             |
| 2                           | 4,01  | 0,12                | 3,91                | <b>–0,55</b>        | –0,10                  | 5,46                | <b>0,47</b>         | <b>1,55</b>            | 7,14                | –0,26               | <b>1,68</b>            | <b>3,13</b>             |
| 3                           | 3,98  | 0,09                | 4,03                | <b>–0,43</b>        | 0,05                   | 5,42                | <b>0,43</b>         | <b>1,39</b>            | 5,50                | <b>–1,90</b>        | 0,08                   | <b>1,52</b>             |
| 4                           | 3,52  | <b>–0,47</b>        | 3,45                | <b>–1,01</b>        | –0,07                  | 5,59                | <b>0,60</b>         | <b>2,14</b>            | 4,50                | <b>–2,90</b>        | <b>–1,09</b>           | <b>0,98</b>             |
| <b>НСР<sub>05</sub></b>     | По фактору А (разница между отборами) – <b>0,38</b> ; по фактору В (содержание ГП) – <b>0,38</b> ; по факторам АВ – <b>0,54</b> |                     |                     |                     |                        |                     |                     |                        |                     |                     |                        |                         |

**Примечание.** жирным шрифтом выделены значения разницы, превышающие величину НСР<sub>05</sub>, т. е. отличающиеся от варианта сравнения на статистически значимую величину.

*Динамика фосфатов труднодоступных групп.* Третья группа фосфатов представляет собой комплекс органических и неорганических фосфорных соединений алюминия и железа, это своеобразный запас минеральных фосфатов, колебания его связаны с вегетационным фазовым переходом, в дальнейшем соотношение минеральной и органической части восстанавливается. В течение периода исследования существенного влияния внесения ГП в вариантах опыта на динамику этой группы фосфатов выявлено не было, однако интересна сама динамика количества органической и минеральной составляющей (рис. 3).

Если в начале наблюдения в 2017/2018 г. органические соединения определялись в количестве менее 100 мг/кг, а минеральные – около 250 мг/кг, то в 2018/2019 г. эти величины уже находились в пределах 100–120 и 350 мг/кг соответственно. К моменту окончания опыта количество органических фосфатов алюминия и железа составляло уже примерно 200 мг/кг, минеральных – до 450 мг/кг. В пользу достоверности полученных данных говорит тот факт, что в течение всего периода исследования соотношение форм фосфатов сохранялось постоянным, таким образом, накапливаются неорганические фосфорные соединения, которые могут быть включены в процесс питания растений за счет катионообменных реакций, органические же соединения могут быть мобилизованы в микробиотических процессах.

Четвертая группа фосфатов (фосфогумусовые комплексы, остатки нуклеиновых кислот, кислотонерастворимые фосфорные соединения алюминия и железа) отличается отсутствием постоянного соотношения органической и минеральной составляющей, поэтому можно предположить, что эта группа более отзывчива к различным факторам и воздействиям.

Суммарное количество фосфорсодержащих соединений этой группы хорошо коррелирует с динамикой почвенной среды рН и почвенного гумуса. Поэтому в данном случае динамические процессы захватывают именно органическую компоненту, формирование корневой системы и развитие ризосферы сдвигает рН среды в сторону уменьшения, тем самым способствуя увеличению количества органического вещества за счет разложения растительных остатков. Фосфор минеральных удобрений связывается в органоминеральные комплексы, которые в дальнейшем распадаются, высвобождая новые порции питательных веществ.

Если в начале опыта на долю фосфорно-гумусовых компонентов почвы приходилось 80–90 % от общего количества определяемых соединений, то следующий год исследований продемонстрировал резкое снижение содержания фосфорорганических веществ, что привело к снижению общего количества соединений этой группы (рис. 4).

Предположительно, это снижение связано с активным включением группы этих веществ в вегетационный процесс, так как длительный период вегетации озимой пшеницы, особенно по аналогичному предшественнику, не дает возможности пополнять запасы почвенного органического вещества за счет разложения пожнивных остатков. Период исследования характеризуется в целом низким количеством атмосферных осадков и запасов почвенной влаги, что также является лимитирующим фактором многих естественных почвенных процессов.

В последний год наблюдений выявлено накопление фосфорно-гумусовых веществ, что может быть связано с адаптивными микробиологическими процессами в почве. При этом следует отметить, что содержание минеральных фосфорных соединений алюминия и железа на протяжении всего периода опыта остается примерно одинаковым, в диапазоне 150–250 мг/кг почвы, поэтому эту группу соединений в силу ее инертности нельзя считать потенциальным запасом для фосфорного питания растений, в то время как органическая группа проявила значительную лабильность как к фазам вегетации, так и к погодным факторам, что указывает на ее активную роль в усвоении и перераспределении как почвенных фосфатов, так и фосфатов минеральных удобрений.

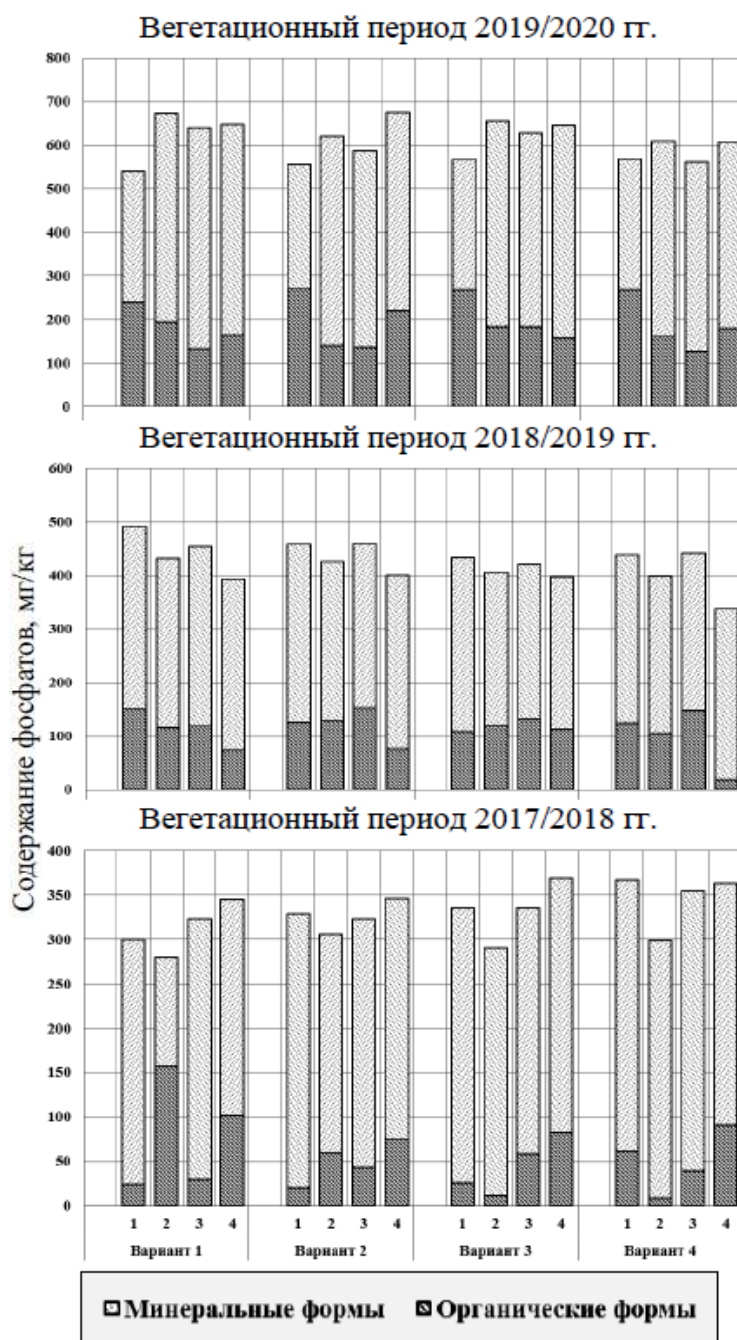


Рис. 3. Динамика третьей группы фосфатов (высокоосновные фосфаты кальция, разноосновные фосфаты алюминия и железа, часть фосфорных эфиров, солянокислая вытяжка) по вариантам опыта в течение периода исследования. Отборы: рис. 1 / Fig. 3. Dynamics of the third group of phosphates (highly basic calcium phosphates, heterobasic aluminum and iron phosphates, part of phosphoric esters, hydrochloric acid extract) according to the experimental options during the study period. Selections: see Fig. 1

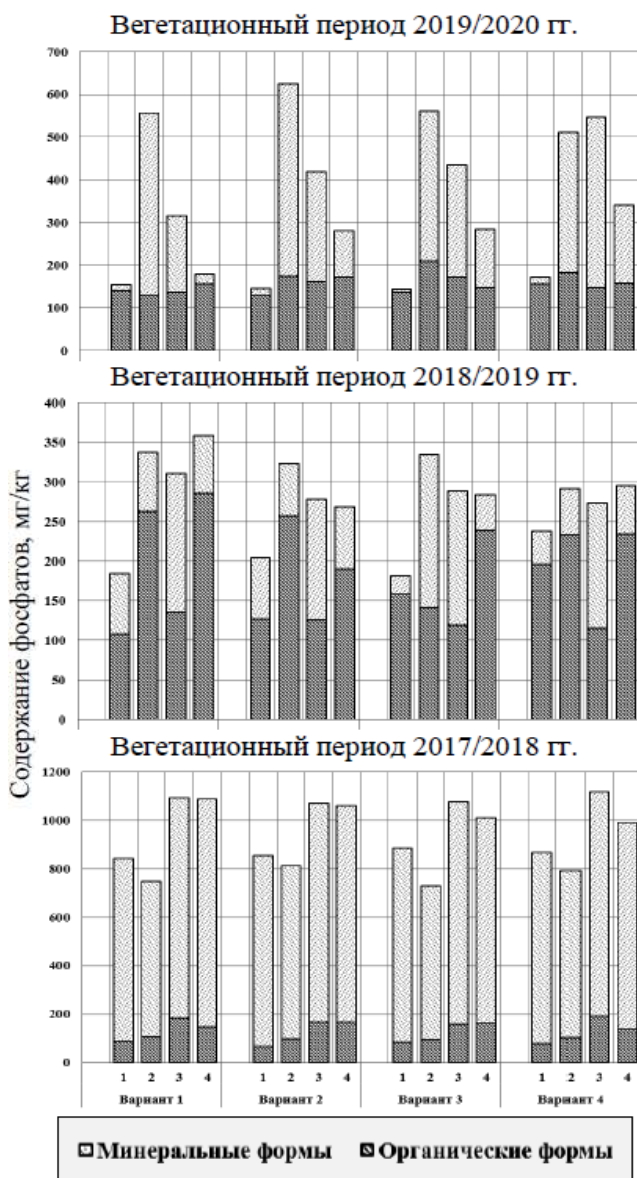


Рис. 4. Динамика четвертой группы фосфатов фосфор органических соединений, фосфаты алюминия и железа, аммонийная вытяжка) по вариантам опыта в течение периода наблюдения. Отборы: рис. 1 / Fig. 4.  
 Dynamics of the fourth group of phosphates (phosphorus of organic compounds, aluminum and iron phosphates, ammonium extract) according to the variants of the experiment during the observation period.  
 Selections: see Fig. 1

металлами и аммонием, а также включающей гидрофосфаты и частично фосфаты кальция и магния. Однако и другие группы, в том числе фосфаты, представленные разноосновными соединениями с алюминием и железом, своеобразным запасом минеральных фосфатов, оказываются вовлеченными в этот процесс. Эти факты свидетельствуют о повышенной потребности растений, получивших стимулирующие обработки ГП, в фосфорном питании и способности растений через включение в процесс фосфатазы регулировать высвобождение связанных форм фосфатов.

Группы малоподвижных фосфорсодержащих веществ, включающие органические соединения, гораздо меньше подвержены влиянию внесения гуминовых веществ, но значительно больше зависят от погодных факторов, демонстрируя лабильность органической фазы в разные годы наблюдения.

Исследование динамики третьей и четвертой групп фосфорных соединений показало, что, несмотря на невосприимчивость их к внесению различных ГП, механизм формирования и разрушения их комплекса органических и минеральных соединений имеет маятниковый характер, то есть снижение содержания фосфорно-эфирных соединений компенсируется повышением фосфорно-гуминовых, и наоборот.

### Заключение

Сложившиеся в период исследования 2017–2020 гг. погодные условия характеризовались крайне низким содержанием и неравномерным по фазам развития количеством атмосферных осадков, которые вкупе с повышенными по сравнению со средними многолетними значениями температурами атмосферного воздуха создавали неблагоприятные условия для формирования и развития посевов озимой пшеницы. В таких условиях азот минеральных удобрений из-за низкого уровня почвенной влаги медленно переходит из почвы в растения, замедляются процессы перехода аммонийной формы азота в нитратную.

Фосфорное питание тоже зависит от наличия почвенной влаги. Однако даже оптимальное содержание подвижных форм фосфора в почве, при условии невозможности перевести их в почвенный раствор, вызывает повышение активности почвенной фосфатазы, которая находится в обратной зависимости от уровня обеспеченности растений легкодоступными фосфатами. Обработка посевов ГП в различных дозировках увеличивает активность фосфатазы и поступление фосфора из почвы в растения, тем самым нивелируя неблагоприятные погодные условия.

Динамика группового состава соединений фосфора показывает, что обработка посевов озимой пшеницы ГП способствует снижению в почве всех форм минеральных фосфатов. В наибольшей степени это проявляется в фосфатах первой группы, связанных со щелочными



## Список источников

1. Ковда В.А. Биохимия почвенного покрова. М.: Наука, 1985. 264 с.
2. Джонстон Дж., Фиксен П., Пултон П. Эффективное использование фосфорных удобрений в земледелии // Питание растений. 2015. № 2. С. 8–11.
3. Фокин А.Д., Чистова Е.Д. О влиянии гумусовых веществ на сорбцию фосфатов почвами // Агрохимия. 1964. № 11. С. 41–47.
4. Возбуцкая А.Е. Химия почв. М.: Высшая школа, 1968. 428 с.
5. Халиков Р.М., Лопытова З.Б., Шарипов Р.А. Биогеохимическая подвижность и трансформация фосфатов в почвах агроландшафтов // Nauka-rastudent.ru. 2017. № 1 (037). URL: <http://nauka-rastudent.ru/37/3901/> (дата обращения: 05.12.2021).
6. Звягинцев Д.Б., Бабьева И.П., Зенова Г.М. Биология почв. М.: МГУ, 2005. 445 с.
7. Кравцова Н.Е. Эколого-агрохимическая оценка фосфатного состояния черноземов Нижнего Дона : автореф. дис. ... канд. биол. наук. Ростов н/Д., 2004. 28 с.
8. Ванина М.Г., Брехова Л.И. Формы фосфора в почвах Каменной степи разного уровня гидроморфизма // Лесотехн. журн. 2012. № 4. С. 156–159.
9. Кравцова Н.Е., Бирюкова О.А., Крыщенко В.С. Фракционный состав фосфатов почв Нижнего Дона // Наука и образование в XXI веке: материалы Междунар. науч.-практ. конф.: в 4 ч. Тамбов, 2013. С. 66–67.
10. Кравцова Н.Е., Цупор Ю.А. Динамика содержания минеральных фосфатов в почвах черноземного ряда Ростовской области // Роль инноваций в трансформации современной науки: материалы Междунар. науч.-практ. конф. Тамбов, 2016. С. 24–25.
11. Шевченко И.М. Содержание фракций минеральных форм фосфатов в черноземе южном при разных дозах удобрения и системах обработки почвы // Приоритетные направления развития современной науки молодых ученых аграриев: материалы V Междунар. науч.-практ. конф. молодых ученых, посвященной 25-летию Прикаспийского НИИ аридного земледелия. Махачкала, 2016. С. 80–84.
12. Бутяйкин В.В. Динамика фосфатного режима черноземной почвы под влиянием антропогенных факторов // Вестн. Ульяновской гос. с/х академии. 2014. № 2. С. 17–21.
13. Варламова Л.Д., Нефедьева В.В. Изменение фракционного состава фосфатов при многолетнем применении удобрений // Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2014. № 5. С. 38–42.
14. Митрофанова Е.М., Васбиева М.Т. Фосфатный режим дерново-подзолистой почвы при длительном применении органических и минеральных удобрений // Агрохимия. 2014. № 9. С. 13–19.
15. Юмашев Н.П. Влияние фосфора на зимостойкость и продуктивность озимой пшеницы в условиях ЦЧО // Агрохимия. 2007. № 12. С. 27–35.
16. Tian L., Guo Q., Yu G., Zhu Y., Lang Y., Wei R., Hu J., Yang X., Ge T. Phosphorus fractions and oxygen isotope composition of inorganic phosphate in typical agricultural soils // Chemosphere. 2020. Vol. 239. Article 124622. Doi: 10.1016/j.chemosphere.2019.124622.
17. Li F., Liang X., Zhang H., Tian G. The influence of no-till coupled with straw return on soil phosphorus speciation in a two-year rice-fallow practice // Soil and Tillage Research. 2019. Vol. 195. Article 104389.
18. Полюенко Е.А., Безуглова О.С., Горовцов А.В., Лыхман В.А., Павлов П.Д. Применение гуминового препарата «ВЮ-Дон» на посевах озимой пшеницы // Достижения науки и техники АПК. 2016. Т. 30, № 2. С. 24–28.
19. Безуглова О.С., Хырхырова М.М. Почвы Ростовской области. Ростов н/Д.: ЮФУ, 2008. 352 с.
20. Безуглова О.С., Полюенко Е.А., Горовцов А.В., Лыхман В.А. Технология применения гуминового препарата «ВЮ-Дон» на посевах озимой пшеницы. Рассвет: ДЗНИИСХ, 2016. 18 с.
21. Безуглова О.С., Полюенко Е.А., Гринько А.В., Горовцов А.В., Лыхман В.А., Дубинина М.Н. Приемы комплексного использования средств химизации и гуминового препарата «ВЮ-Дон» при возделывании озимой пшеницы. Рассвет: ДЗНИИСХ, 2017. 35 с.
22. Хазиев Ф.Х. Методы почвенной энзимологии. М.: Наука, 1990. 286 с.
23. Муха В.Д., Муха Д.В., Ачкасов А.Л. Практикум по агрономическому почвоведению. СПб.: Лань, 2013. 480 с.
24. 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. Kovda V.A. *Soil biochemistry*. Moscow: Nauka Publ.; 1985. 264 p. (In Russ.).
2. Johnston J., Fixsen P., Poulton P. Effective use of phosphate fertilizers in agriculture. *Pitanie rastenii = Plant Nutrition*. 2015;(2):8-11. (In Russ.).
3. Fokin A.D., Chistova E.D. On the influence of humic substances on the sorption of phosphates by soils. *Agrokhimiya = Agrochemistry*. 1964;(11):41-47. (In Russ.).
4. Vozbutskaya A.E. *Soil chemistry*. Moscow: Higher School Press; 1968. 428 p. (In Russ.).

5. Khalikov R.M., Lopytova Z.B., Sharipov R.A. Biogeochemical mobility and transformation of phosphates in soils of agricultural landscapes. *Nauka-rastudent.ru*. 2017;(1). Available from: <http://nauka-rastudent.ru/37/3901/> [Accessed 5th December 2021]. (In Russ.).
6. Zvyagintsev D.B., Babieva I.P., Zenova G.M. *Soil biology*. Moscow: Moscow State University Press; 2005. 445 p. (In Russ.).
7. Kravtsova N.E. *Ecological and agrochemical assessment of the phosphate state of the chernozems of the Lower Don*. Dissertation Thesis. Rostov-on-Don, 2004. 28 p. (In Russ.).
8. Vanina M.G., Brekhova L.I. Forms of phosphorus in the soils of the Kamennaya Steppe at different levels of hydromorphism. *Lesotekhn. zhurn. = Forest Engineering Journal*. 2012;(4):156-159. (In Russ.).
9. Kravtsova N.E., Biryukova O.A., Kryshchenko V.S. Fractional composition of phosphates in the soils of the Lower Don. *Science and Education in the 21st Century*. Proceedings of the International Scientific and Practical Conference in 4 parts. Tambov, 2013:66-67. (In Russ.).
10. Kravtsova N.E., Tsupor Yu.A. Dynamics of the content of mineral phosphates in the soils of the chernozem series of the Rostov region. *The Role of Innovations in the Transformation of Modern Science*. Proceedings of the International Scientific and Practical Conference. Tambov, 2016:24-25. (In Russ.).
11. Shevchenko I.M. The content of fractions of mineral forms of phosphates in southern chernozem at different doses of fertilizer and tillage systems. *Priority directions for the development of modern science of young agricultural scientists*. Proceedings of the V International Scientific and Practical Conference of Young Scientists, dedicated to the 25th anniversary of the Caspian Research Institute of Arid Agriculture. Makhachkala, 2016:80-84. (In Russ.).
12. Butyaykin V.V. Dynamics of the phosphate regime of the chernozem soil under the influence of anthropogenic factors. *Vestn. Ulyanovskoi gos. s/kh akademii = Vestnik of Ulyanovsk State Agricultural Academy*. 2014;(2):17-21. (In Russ.).
13. Varlamova L.D., Nefed'eva V.V. Changes in the fractional composition of phosphates during long-term use of fertilizers. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka = Agricultural Science Euro-North-East*. 2014;(5):38-42. (In Russ.).
14. Mitrofanova E.M., Vasbieva M.T. Phosphate regime of soddy-podzolic soil with long-term use of organic and mineral fertilizers. *Agrokhimiya = Agrochemistry*. 2014;(9):13-19. (In Russ.).
15. Yumashev N.P. Influence of phosphorus on winter hardiness and productivity of winter wheat in the conditions of the Central Chernobyl Region. *Agrokhimiya = Agrochemistry*. 2007;(12):27-35. (In Russ.).
16. Tian L., Guo Q., Yu G., Zhu Y., Lang Y., Wei R., Hu J., Yang X., Ge T. Phosphorus fractions and oxygen isotope composition of inorganic phosphate in typical agricultural soils. *Chemosphere*. 2020;239:124622. Doi: 10.1016/j.chemosphere.2019.124622.
17. Li F., Liang X., Zhang H., Tian G. The influence of no-till coupled with straw return on soil phosphorus speciation in a two-year rice-fallow practice. *Soil and Tillage Research*. 2019;195:104389.
18. Polienko E.A., Bezuglova O.S., Gorovtsov A.V., Lykhman V.A., Pavlov P.D. Application of the humic preparation BIO-Don on winter wheat crops. *Dostizheniya nauki i tekhniki APK = Achievements of Science and Technology of AICis*. 2016;30(2):24-28. (In Russ.).
19. Bezuglova O.S., Khyrkhyrova M.M. *Soils of the Rostov region*. Textbook. Rostov-on-Don: SFU Press; 2008. 352 p. (In Russ.).
20. Bezuglova O.S., Polienko E.A., Gorovtsov A.V., Lykhman V.A. *Technology of application of BIO-Don humic fertilizer on winter wheat crops*. Rassvet: Don Zonal Research Institute of Agriculture Press; 2016. 18 p. (In Russ.).
21. Bezuglova O.S., Polienko E.A., Grinko A.V., Gorovtsov A.V., Lykhman V.A., Dubinina M.N. *Techniques for the integrated use of chemicals and the humic preparation BIO-Don in the cultivation of winter wheat*. Rassvet: Don Zonal Research Institute of Agriculture Press; 2017. 36 p. (In Russ.).
22. Khaziev F.Kh. *Methods of soil enzymology*. Moscow: Nauka Publ., 1990. 286 p. (In Russ.).
23. Mukha V.D., Mukha D.V., Achkasov A.L. *Workshop on agronomic soil science*. Textbook. St. Petersburg: Lan Publ.; 2013. 480 p. (In Russ.).
24. 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**

Дубинина М.Н. – младший научный сотрудник.

Безуголова О.С. – доктор биологических наук, профессор, главный научный сотрудник.

### **Information about the authors**

Dubinina M.N. - Junior Researcher.

Bezuglova O.S. - Doctor of Science (Biology), Professor, Main Researcher.

Статья поступила в редакцию 07.12.2021; одобрена после рецензирования 25.12.2021; принята к публикации 16.03.2022.

The article was submitted 07.12.2021; approved after reviewing 25.12.2021; accepted for publication 16.03.2022.

Научная статья

УДК 911.2, 551.453.43, 502.52

doi: 10.18522/1026-2237-2022-1-49-56

## СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ЛЕДНИКОВЫХ ЛАНДШАФТОВ ГОРНЫХ РАЙОНОВ ЮГА ВОСТОЧНОЙ СИБИРИ

**Егор Николаевич Иванов**

*Институт географии им. В.Б. Сочавы Сибирского отделения Российской академии наук, Иркутск, Россия*  
egoryo@bk.ru

**Аннотация.** Ледниковые районы представляют интерес для выявления тенденций в динамике оледенения с учетом глобального потепления, которое сказывается не только на уменьшении циркумполярных ледяных щитов планеты, но и на состоянии горных ледников. Малые ледники юга Восточной Сибири чувствительны к таким изменениям и могут служить индикаторами скорости изменения климата. Отмечается, что происходит значительное уменьшение в толщине за последние десятилетия и замедление деградации в последние 5–10 лет. Созданы ГИС-проект и база данных нивально-ледниковых образований для количественного анализа накопленной информации. Горные районы Прибайкалья – это территория с большим рекреационным и познавательным потенциалом, который недостаточно реализован. Особенностью самых труднодоступных районов региона является наличие современного оледенения. Изучение процессов сохранения чистой пресной воды в современных условиях является одной из важнейших научных задач современного общества. Ледники являются самыми точными индикаторами происходящих климатических изменений и хранят в себе огромный массив информации о климате прошлого.

**Ключевые слова:** ледники, горные районы, климатические изменения, Восточная Сибирь, гляциальные ландшафты, рекреационные ресурсы

**Благодарности:** исследование выполнено в рамках базового проекта лаборатории геоморфологии ИГ СО РАН, государственная регистрация № АААА-А21-121012190017-5.

**Для цитирования:** Иванов Е.Н. Современное состояние ледниковых ландшафтов горных регионов юга Восточной Сибири // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. 2022. № 1. С. 49–56.

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

Original article

## THE CURRENT STATE OF GLACIAL LANDSCAPES OF MOUNTAIN REGIONS OF EASTERN SIBERIA'S SOUTH

**Egor N. Ivanov**

*Sochava Institute of Geography, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia*  
egoryo@bk.ru

**Abstract.** Glacial areas are interesting to identify trends in glaciations dynamic in view of global warming. Global warming is reviling not only in reducing the circumpolar ice shields of the planet, but in a condition of mountain glaciers. Small glaciers of south of Eastern Siberia are sensitive to such changes and they can serve as indicators of the rate of climate change. East Siberia's mountain glaciers significantly reduced in thickness for the last decades, and their degradation is slowed in the last 5-10 years. The GIS project and the database of nival-glacial formations for the quantitative analysis of the accumulated information have been created. The mountain region of the Baikal territory is an area with a large recreational and informative potential, which is not enough, covered. The feature of the most remote areas of the

---

© Иванов Е.Н., 2022

region is the presence of modern glaciations. The study of the processes of preserving clean fresh water in modern conditions is one of the most important scientific tasks of modern society. Glaciers are the most accurate indicators of ongoing climate change and store a huge array of information about the climate of the past.

**Keywords:** glaciers, mountain areas, climate changes, Eastern Siberia, glacial landscapes, recreational resources

**Acknowledgments:** the study was carried out within the framework of the basic project of the Laboratory of Geomorphology, IG SB RAS, state registration No. AAAA-A21-121012190017-5.

**For citation:** Ivanov E.N. The Current State of Glacial Landscapes of Mountain Regions of Eastern Siberia's South. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2022;(1):49-56. (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

Несмотря на наличие высоких гор, до середины XX в. считалось, что резко континентальный климат с малым количеством осадков зимой и достаточно теплым летом создает неблагоприятные условия для образования ледников и фирновых полей на территории Восточной Сибири. В настоящее время в горах Байкальской рифтовой зоны (Прибайкалье) обнаружено около 150 ледников общей площадью 50 км<sup>2</sup>. По сравнению с другими горными регионами России, где существуют современные оледенения, Прибайкалье занимает пятое место по площади ледников после Кавказа (1000 км<sup>2</sup>), Камчатки (866 км<sup>2</sup>), Алтая (628 км<sup>2</sup>) и Верхояно-Колымской горной страны с Корякским нагорьем (580 км<sup>2</sup>) [1].

На рис. 1 обозначено расположение горных хребтов юга Восточной Сибири с наличием современного оледенения.



Рис. 1. Горные районы юга Восточной Сибири с современным оледенением: 1 – хребет Кодар; 2 – Байкальский хребет; 3 – Баргузинский хребет; 4 – Восточный Саян / Fig. 1. Eastern Siberia's South mountain areas with the current glaciation: 1 - Kodar Ridge; 2 - Baikalskii Ridge; 3 - Barguzinskii Ridge; 4 - Eastern Sayan

На границе Иркутской области и Забайкальского края в верховьях рек Сюльбан, Верхний и Средний Сакукан, Апсат, Левая Сыгыкта находится значительное количество ледников различных форм и размеров. В совокупности они образуют Кодарскую ледниковую область. Впервые ледники хребта Кодар были открыты в 1958 г. по данным аэрофотосъемки 1963 и 1968 гг. Тридцать ледников Кодара внесены в Каталог ледников СССР [2].

Исследования Байкальского и Баргузинского хребтов с точки зрения гляциологии недостаточны. Сохранилось четыре ледника на Байкальском хребте и два ледника на Баргузинском хребте. Ледники Байкальского хребта были открыты в 1981 г., Баргузинского – в 1985 и 2013 гг. [3].

Восточный Саян был изучен гораздо раньше Станового нагорья и Байкальского региона. По заданию Русского географического общества Г.И. Радде в 1859 г. впервые совершил экспедицию в район массива Мунку-Сардык и обнаружил ледники. Позже Ячевским в 1888 г. и Перетолчиным в 1908 г., которые впервые описали ледники, были проведены геолого-географические исследования Восточного Саяна. В настоящее время фиксируется наличие пяти современных ледников в массиве Мунку-Сардык, в районе пика Топографов – семь ледников, в остальной крайне удаленной части Восточного Саяна (Большой Саян) – около ста ледников [4].

### Методы исследования

Ледниковые ландшафты Байкальского региона можно представить в виде широтного трансекта, который охватывает различные природные зоны. Он является наиболее характерной континентальной территорией без значительного антропогенного и океанического влияния. На севере трансект начинается от хребта Кодар и проходит на юго-запад через Байкальский и Баргузинский хребты к Восточному Саяну. Выстраивается широтная зона, продолжающаяся от центрально-сибирских таежных континентальных геосистем до южно-центрально-азиатских резко континентальных степных геосистем. Кроме того, высотная зона, характеризующаяся присущими ей горными геосистемами, простирается от степных и лесных до гольцовых и нивально-ледниковых ландшафтов. Здесь происходит увеличение высот в южном направлении, при этом сохраняется термическая устойчивость подобных геосистем [3].

Перспективы для исследований в обширных и отдаленных горных районах появились благодаря развитию электронных географических технологий, таких как космические снимки сверхвысокого разрешения, по которым можно регистрировать географические особенности в диапазоне электромагнитного излучения от видимого до теплового и радио; ГИС-технологии для анализа данных дистанционного зондирования, тематических карт и данных наземных полевых измерений; приборы GPS-навигации и наземные лазерные сканирующие системы.

Ледниковые объекты на трансекте – это малые формы современного оледенения, которые наиболее уязвимы для изменений климата. Рассмотрение поведения горных нивально-гляциальных геосистем позволяет выявлять некоторые закономерности изменчивости климата [5].

Горные ледники интересны еще и тем, что без изучения ледниковой среды невозможно выделить процессы, в которые они включены. Энергообмен и массообмен ледников происходят в тесном взаимодействии с окружающей средой. Размер и положение нивально-ледникового образования влияют на всю геосистему окружающей среды. Во-первых, высокое альbedo приводит к тому, что солнечные лучи отражаются от ледника на окружающие природные объекты, увеличивая поступление к ним солнечной радиации. Во-вторых, сток с ледника проникает в геосистемы, которые орографически расположены ниже, и вызывает новые процессы. В-третьих, на территориях, занятых ледниками или многолетними снежниками, происходят интенсивные процессы и нивация, которые преобразуют и формируют новый рельеф. В-четвертых, образуются моренные фации с особыми свойствами и взаимосвязями [3].

Ледники в Прибайкалье были нанесены на топографические и туристические карты, но часто вместо них показывали большие многолетние снежники. Необходимо было провести специальное исследование этих образований, чтобы отнести их к той или иной группе. Данные дистанционного зондирования (спутниковые снимки) высокого разрешения позволяют различать разнообразные снежные и ледяные объекты (с точностью до 0,5 м). При выявлении устойчивых нивально-ледниковых образований необходимо было измерить характерные параметры этих объектов и их границ, используя топографические карты, спутниковые снимки и GPS-устройства на месте. Для количественного анализа накопленной информации были созданы ГИС-проект и база данных нивально-ледниковых образований. Горные ледники Восточной Сибири за последние десятилетия значительно уменьшились в мощности, а в последние 5–10 лет их деградация замедлилась [6].

### Обсуждение результатов

Рассмотрим отдельные тенденции по некоторым ключевым участкам обозначенного трансекта. Ре-презентативным ледником хребта Кодар является ледник №20 (Азаровой), данные о его функционировании используются в проектах всемирного исследования таяния ледников [7]. На рис. 2 представлена картосхема ледника и окружающих его геосистем, составленная автором в результате замера высотных и орографических параметров на местности.

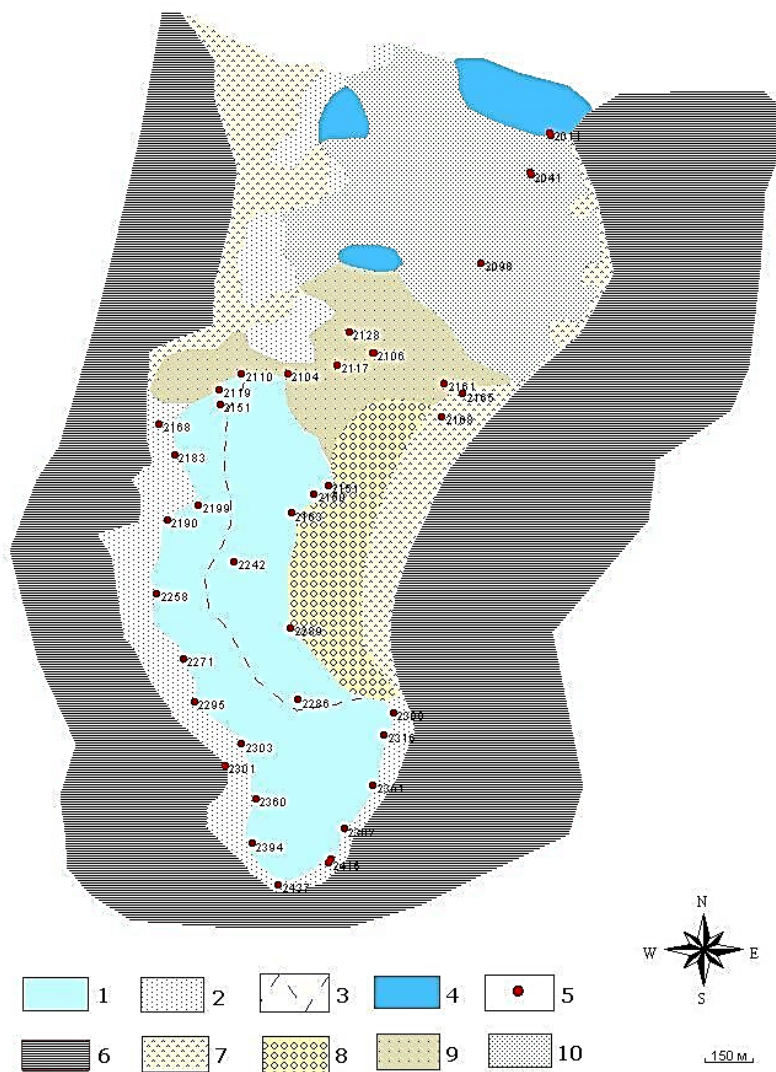


Рис. 2. Картосхема нивально-гляциальных геосистем ледника № 20 (Азаровой) на хребте Кодар. Условные обозначения: 1 – тело ледника; 2 – многолетние снежники; 3 – фирновая линия; 4 – озера; 5 – отметки высот по результатам GPS-съемки; 6 – скалы и скалисто-грубообломочный материал; 7 – осыпи и каменисто-щебенистые поверхности; 8 – боковой вал современной морены; 9 – современная морена; 10 – морена исторической стадии с лишайниково-кустарничковыми участками / Fig. 2. Schematic map of the nival-glacial geosystems of the glacier № 20 (Azarova's), Kodar Ridge. Symbols: 1 - glacier body; 2 - perennial snowfields; 3 - firn line; 4 - lakes; 5 - elevation marks based on the results of GPS surveys; 6 - rocks and rocky-coarse-grained material; 7 - scree and rocky-crushed surfaces; 8 - lateral shaft of the recent moraine; 9 - recent moraine; 10 - moraine of the historical stage with lichen-shrubby areas

Для ледников Кодарского ледникового района характерна тенденция реагирования на наблюдаемые изменения климата, при которой они не столько уменьшаются по площади, сколько теряют массу и толщину. Это прямо указывает на зависимость существования этих ледников в большей степени от

свойств подстилающей поверхности, чем от количества осадков на данной территории. Климатические условия в регионе до сих пор остаются чрезвычайно суровыми. Низкие температуры и слабое увлажнение позволяют ледниковым объектам находиться в относительно устойчивом состоянии [8].

В настоящее время на Байкальском хребте находится несколько ледников. Самый крупный из них расположен в юго-восточном цирке горы Черского (2588 м над уровнем моря) примерно в 18 км к западу от северной части озера Байкал. На рис. 3 представлена картосхема ледника и окружающих его геосистем, составленная автором в результате замера высотных и орографических параметров на местности.

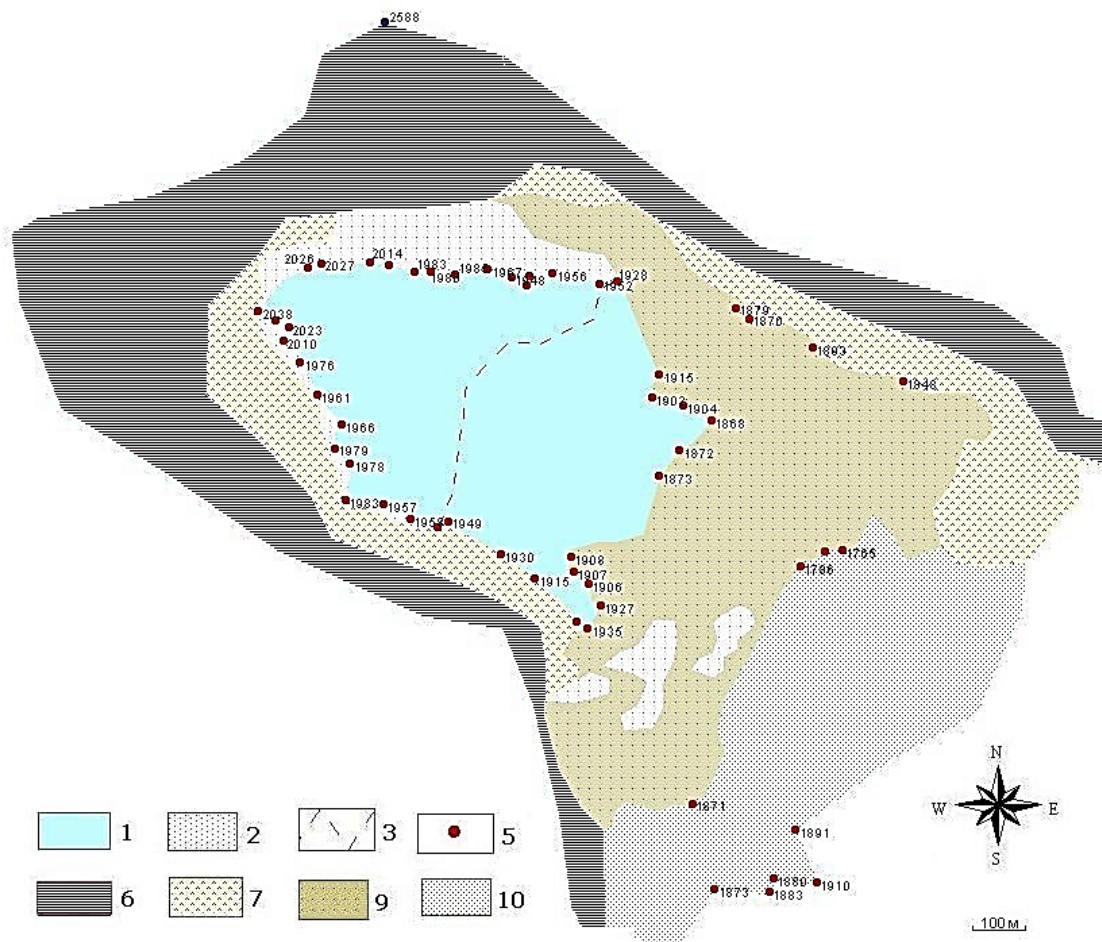


Рис. 3. Картосхема нивально-гляциальных геосистем ледника горы Черского на Байкальском хребте. Условные обозначения: 1 – тело ледника; 2 – многолетние снежники; 3 – фирновая линия; 5 – отметки высот по результатам GPS-съемки; 6 – скалы и скалисто-грубообломочный материал; 7 – осыпи и каменисто-щебенистые поверхности; 9 – современная морена; 10 – морена исторической стадии с лишайниково-кустарничковыми участками / Fig. 3. Schematic map of the nival-glacial geosystems of the glacier of the Chersky Mountain, Baikal Ridge. Symbols: 1 - glacier body; 2 - perennial snowfields; 3 - firn line; 5 - elevation marks based on the results of GPS surveys; 6 - rocks and rocky-coarse-grained material; 7 - scree and rocky-crushed surfaces; 9 - recent moraine; 10 - moraine of the historical stage with lichen-shrubby areas

За последние 50 лет общая площадь нивально-гляциальных образований (снежники, ледники, фирновые поля) в Баргузинском хребте уменьшилась в четыре раза, а отдельно ледников – только в два раза [9]. За это же время ледники Байкальского хребта уменьшились только на одну треть. Главный ледник Баргузинского хребта уменьшается со скоростью 0,002 км<sup>2</sup>/год. Это сравнимо со скоростью сокращения ледников Восточного Саяна, но меньше, чем у ледников хребта Кодар.

В пределах Восточного Саяна в настоящее время фиксируется около 100 ледников. Северный ледник Перетолчина у высочайшей точки хребта отступил на 50% по сравнению с 1906 г. [10]. В настоящее время это присклоновый ледник с прижатой к вершине небольшой фирновой зоной.

Для сибирских горных ледников малых форм более репрезентативным является показатель массивности, толщины ледяного тела, нежели площадные характеристики. Измерение массивности – сложно

реализуемая для горных ледников задача. Лучший прямой способ определить толщину ледника – бурение ледяного тела насквозь. Такой метод очень трудозатратен и требует масштабной технологической и логистической подготовки, такие исследования осуществлены пока единично в нескольких точках планеты. Есть и другие способы измерить массивность ледника, например с помощью радиолокационного зондирования. С 2014 г. объединенная исследовательская группа Института географии им. В.Б. Сочавы СО РАН и Института земной коры СО РАН запустила проект измерения массивности горных ледников юга Восточной Сибири посредством геофизического радара. Такой способ не является абсолютным, однако позволяет сравнивать измеренные ледники между собой и выстраивать корреляции. К настоящему времени таким способом как минимум по одному разу измерены 3 ледника Восточного Саяна. Ледник Северный Перетолчина измеряется геофизическим радаром периодически с 2014 г., что уже позволяет формировать динамическую картину изменений массивности ледника и сравнивать ее с трансформацией площадных характеристик [11]. На рис. 4 представлены первичные результаты измерений мощности ледника геофизическим радаром «Око-2» с антенным блоком АБДЛ «Тритон» на частоте 100 МГц.

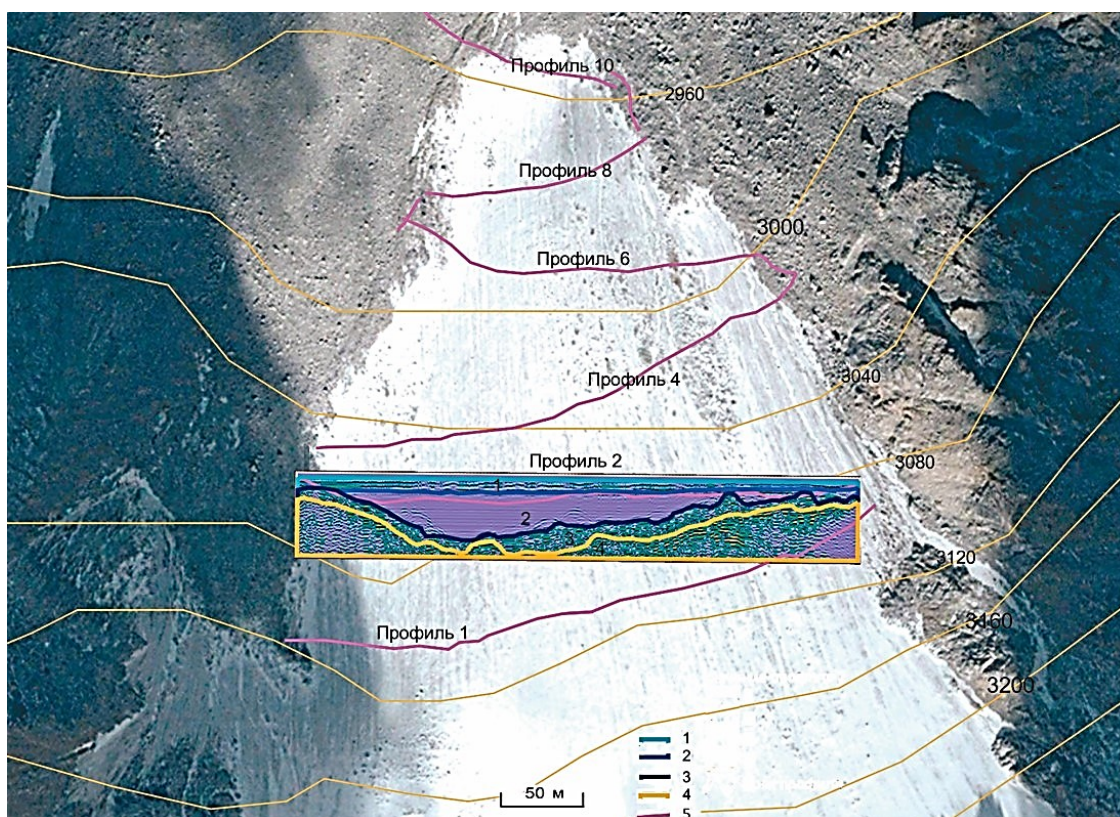


Рис. 4. Схема профилей на леднике Северный Перетолчина, г. Мунку-Сардык на фоне космического снимка QuickBird (пространственное разрешение 0,6 м). Условные обозначения сечений профиля 2: 1 – фирн; 2 – лед; 3 – донные морены; 4 – ложе ледника; 5 – трек профиля / Fig. 4. Scheme of profiles on the North Peretolchin Glacier, Munku-Sardyk Mountain. Background - space image QuickBird (spatial resolution 0.6 m). Symbols of profile sections 2: 1 – firn; 2 – ice; 3 - bottom moraines; 4 - glacier bed; 5 - profile's track

Выработан наиболее рациональный метод измерения сечений по дополнительным профилям с учетом рельефа ледника. По результатам измерения геофизическим радаром выявлено, что максимальная толщина ледника Северный Перетолчина составляет 45 м, средняя – около 25 м. Эти данные позволяют вычислить объем этого ледника, его величина составляет около 0,007 км<sup>3</sup>. В обследованной части фирн составляет 25 %, собственно ледовое тело – 29, донные морены – 46. Доля чистого льда уменьшается от середины ледника к нижнему концу языка. С начала XX в. ледник Северный Перетолчина сократился в длину в 1,75 раза, его площадь уменьшилась в 2,9 раза, а объем – в 3,71. Соотношение показателей еще раз подчеркивает важность учета объемных характеристик при выстраивании моделей изменений современных ледников гор юга Восточной Сибири под воздействием климатических изменений.



## Выводы

Закономерности перемещения воздушных масс над Евразией, как и особенности рельефа этого материка, обуславливают распределение осадков. Осадки вместе с воздушными массами перемещаются вглубь материка с запада на восток, постепенно теряя влагу. В центральные районы Евразии доходит небольшая часть осадков с Атлантического океана. Осадки с севера, юга и востока по сравнению с количеством осадков с запада практически не влияют на климат этой территории [12].

Современное оледенение гор юга Восточной Сибири является наиболее ярко выраженным районом внутриконтинентальных климатических условий. Резко континентальный климат характеризуется температурным режимом с очень существенными амплитудами колебания. Осадков горные районы получают мало, около 400–700 мм. Суточная температура в период абляции на леднике имеет значительную амплитуду: +13+15°C днем и +1–1°C ночью, нередко ночные заморозки. В этом регионе следует учитывать как практически повсеместную промороженность территории, так и очень большой запас холода, содержащийся в ледниках.

Функционирование современных ледников внутриконтинентальных горных районов Евразии, как мы видим на примере гор юга Восточной Сибири, находящихся в условиях, близких к абсолютной резкоконтинентальности, подчинено локальным факторам. В условиях быстро меняющегося климата необходимо проводить мониторинг состояния областей питания ледников. Чтобы правильно понимать закономерности ледниковых процессов, необходимо анализировать взаимодействие трех факторов – оледенения, климата и рельефа. Осуществляемые сегодня программы слежения за балансом массы и отступанием краевых частей ледников позволяют с достаточно большой точностью оценить внешние признаки деградации современного оледенения [13], при сравнении динамики оледенения необходимо учитывать локальные климатические и орографические факторы.

Внутриконтинентальный уровень осадков в пределах 400–550 мм в год не обеспечивает стабильного пополнения массы ледников. В дополнение основная их часть выпадает в летнее время в жидком виде, что способствует усилению абляции. Среднегодовые температуры составляют сравнимые значения для всех территорий, однако в горах юга Восточной Сибири амплитуда летних и зимних температур достигает 40–50 °C, а, например, в Арктике и на Полярном Урале этот показатель колеблется в диапазоне 15–20 °C [6].

Фиксируемые изменения ледников юга Восточной Сибири соответствуют глобальным оценкам региональных изменений баланса массы ледников с 2000 по 2019 г. по региону «Северная Евразия» [14]. Внутриконтинентальные нивально-гляциальные системы региона отражают законы формирования оледенения в условиях холодного климата с недостаточным увлажнением.

## Список источников

1. Долгушин Л.Д. Ледники. М.: Мысль, 1989. 447 с.
2. Каталог ледников СССР. Хребет Кодар. Л.: Гидрометиздат, 1972. Т. 17, вып. 2, ч. 1. 44 с.
3. Иванов Е.Н. Динамика снежно-ледовых геосистем гор юга Восточной Сибири. Иркутск: Ин-т географии им. В.Б. Сочавы СО РАН, 2015. 125 с.
4. Каталог ледников СССР. Ангаро-Енисейский район. Л.: Гидрометиздат, 1973. Т. 16, вып. 1, ч. 3–5. С. 64.
5. Kitov A.D., Kovalenko S.N., Plyusnin V.M., Suvorov E.G. Modern changes of the high-mountain landscapes and glaciation in Southern Siberia (Russia) by the example of the Eastern Sayan mountains // Environ. Earth Sci. 2015. Vol. 74. <https://doi.org/10.1007/s12665-015-4455-y>.
6. Plyusnin V.M., Ivanov E.N., Kitov A.D., Sheinkman V.S. The modern glaciers dynamics in the mountains of Eastern Siberia's south // Geography and Natural Resources. 2017. Vol. 38, iss. 3. P. 267–274.
7. Stokes C.R., Shahgedanova M., Evans I.S., Popovnin V.V. Accelerated loss of alpine glaciers in the Kodar Mountains, south-eastern Siberia // Global Planet Chang. 2013. Vol. 101. P. 82–96.
8. Kitov A.D., Plyusnin V.M. The database and GIS analysis of the status of glaciation of the Kodar Mountains (Northern Transbaikalia) // Geography and Natural Resources. 2017. Vol. 38 (2). P. 181–187. <https://doi.org/10.1134/S1875372817020093>.
9. Ivanov E.N., Plyusnin V.M., Kitov A.D., Kovalenko S.N., Balyazin I.V., Sofronov A.P. Inventory of nival-glacial geosystems in Lake Baikal area (East Siberia, Russia) // EES. 2015. Vol. 74. P. 1957–1968. Doi: 10.1007/s12665-015-4446-z.
10. Suvorov E.G., Kitov A.D. Landscape structure of the southeastern part of Eastern Sayan // Geography and Natural Resources. 2013. Vol. 34. P. 371. <https://doi.org/10.1134/S1875372813040112>.
11. Китов А.Д., Серебряков Е.В., Гладков А.С., Лунина О.В., Плюснин В.М., Иванов Е.Н. Георадарный мониторинг ледника Перетолчина (Восточный Саян) // География и природные ресурсы. 2020. № 3 (162). С. 130–136.

12. Sheinkman V.S. Glaciation in the High Mountains of Siberia // *Developments in quaternary sciences. Vol. 15: Quaternary glaciations – extent and chronology a closer look.* Amsterdam, 2011. P. 883–907.

13. Оледенение Северной и Центральной Евразии в современную эпоху / М.Д. Ананичева, А.Ф. Глазовский, Л.В. Десинов [и др.]. М.: Наука, 2006. 482 с.

14. Hugonnet R., McNabb R., Berthier E., Menounos B., Nuth C., Girod L., Farinotti D., Huss M., Dussaillant I., Brun F., KääB A. Accelerated global glacier mass loss in the early twenty-first century // *Nature*. 2021. Vol. 592. P. 726–731.

#### References

1. Dolgushin L.D. *Glaciers*. Moscow: Mysl Publ.; 1989. 447 p. (In Russ.).
2. *Catalog of glaciers of the USSR. Ridge Kodar*. Leningrad: Gidrometizdat Publ.; 1972;17(2, 1). 44 p. (In Russ.).
3. Ivanov E.N. *Dynamics of snow-ice geosystems of mountains in the south of Eastern Siberia*. Irkutsk : Sochava Institute of Geography SB RAS Press; 2015. 125 p. (In Russ.).
4. *Catalog of glaciers of the USSR. The Angara-Yenisei district*. Leningrad: Gidrometizdat Publ., 1973;16(1, 3-5):64. (In Russ.).
5. Kitov A.D., Kovalenko S.N., Plyusnin V.M., Suvorov E.G. Modern changes of the high-mountain landscapes and glaciation in Southern Siberia (Russia) by the example of the Eastern Sayan mountains. *Environ. Earth Sci.* 2015;74. <https://doi.org/10.1007/s12665-015-4455-y>.
6. Plyusnin V.M., Ivanov E.N., Kitov A.D., Sheinkman V.S. The modern glaciers dynamics in the mountains of Eastern Siberia's south. *Geography and Natural Resources*. 2017;38(3):267-274.
7. Stokes C.R., Shahgedanova M., Evans I.S., Popovnin V.V. Accelerated loss of alpine glaciers in the Kodar Mountains, south-eastern Siberia. *Global Planet Chang.* 2013;101:82-96.
8. Kitov A.D., Plyusnin V.M. The database and GIS analysis of the status of glaciation of the Kodar Mountains (Northern Transbaikalia). *Geography and Natural Resources*. 2017;38(2):181-187. <https://doi.org/10.1134/S1875372817020093>.
9. Ivanov E.N., Plyusnin V.M., Kitov A.D., Kovalenko S.N., Balyazin I.V., Sofronov A.P. Inventory of nival-glacial geosystems in Lake Baikal area (East Siberia, Russia). *EES*. 2015;74:1957-1968. Doi: 10.1007/s12665-015-4446-z.
10. Suvorov E.G., Kitov A.D. Landscape structure of the southeastern part of Eastern Sayan. *Geography and Natural Resources*. 2013;34:371. <https://doi.org/10.1134/S1875372813040112>.
11. Kitov A.D., Serebryakov E.V., Gladkov A.S., Lunina O.V., Plyusnin V.M., Ivanov E.N. Georadar monitoring of the Peretolchin glacier (Eastern Sayan). *Geografiya i prirodnye resursy = Geography and Natural Resources*. 2020;(3):130-136. (In Russ.).
12. Sheinkman V.S. Glaciation in the High Mountains of Siberia. *Developments in quaternary sciences. Vol. 15: Quaternary glaciations - extent and chronology a closer look.* Amsterdam, 2011: P. 883-907.
13. Ananicheva M.D., Glazovsky A.F., Desinov L.V. [et al.]. *Glaciation of Northern and Central Eurasia in the modern era*. Moscow: Nauka Publ.; 2006. 482 p. (In Russ.).
14. Hugonnet R., McNabb R., Berthier E., Menounos B., Nuth C., Girod L., Farinotti D., Huss M., Dussaillant I., Brun F., KääB A. Accelerated global glacier mass loss in the early twenty-first century. *Nature*. 2021;592:726-731.

#### **Информация об авторе**

Иванов Е.Н. – кандидат географических наук, научный сотрудник лаборатории геоморфологии.

#### **Information about the author**

Ivanov E.N. - Candidate of Science (Geography), Researcher of the Geomorphology Laboratory.

Статья поступила в редакцию 01.10.2021; одобрена после рецензирования 11.11.2021; принята к публикации 16.03.2022.

The article was submitted 01.10.2021; approved after reviewing 11.11.2021; accepted for publication 16.03.2022.

Научная статья

УДК 504.064

doi: 10.18522/1026-2237-2022-1-57-65

## ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ СОДЕРЖАНИЯ ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ ВЕЩЕСТВ В ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОДАХ БАСЕЙНА СЕВЕРНОЙ ДВИНЫ

**Е.Е. Лобченко<sup>1</sup>, И.П. Ничипорова<sup>2✉</sup>, Н.Н. Оленникова<sup>3</sup>, О.Л. Романюк<sup>4</sup>, Н.А. Лямперт<sup>5</sup>**

<sup>1, 2, 3, 4, 5</sup>Гидрохимический институт, Ростов-на-Дону, Россия

<sup>1, 2, 3, 4, 5</sup>info@gidrohim.com

<sup>2</sup>nichiporovaIi@mail.ru✉

<sup>3</sup>listopadova-natalija@rambler.ru

<sup>4</sup>o.romanuk@gidrohim.com

<sup>5</sup>n194547@yandex.ru

**Аннотация.** На основе анализа многолетних (2000–2020 гг.) рядов содержания загрязняющих веществ в воде р. Северная Двина и ее притоков показано пространственно-временное изменение среднемноголетних и среднесезонных значений концентраций отдельных химических веществ, оказывающих влияние на качество воды, формирующейся в результате совместного влияния природных и антропогенных факторов. Изучена межгодовая и внутригодовая изменчивость содержания в воде рек бассейна Северной Двины органических веществ (по ХПК и БПК<sub>5</sub>), соединений железа, меди, цинка, лигносульфонатов. Показано влияние антропогенных факторов на качество воды правых и левых притоков верхнего течения реки Северная Двина – р. Сухона, р. Пельшима, р. Вычегда.

Оценено изменение качества воды за период 2010–2020 гг. по всему течению рек Северная Двина, Сухона, Пельшима, Вычегда, на качество воды которых наибольшее влияние оказывают сточные воды предприятий лесопромышленных комплексов, гидромеханизированные работы в русловой части Северной Двины и ее притоков, сельскохозяйственная деятельность предприятий агропромышленного комплекса, а также льяльных вод речного транспорта.

**Ключевые слова:** среднемноголетние месячные концентрации, сезонные показатели качества воды, половодье, зимняя межень, летняя межень, динамика качества воды

**Для цитирования:** Лобченко Е.Е., Ничипорова И.П., Оленникова Н.Н., Романюк О.Л., Лямперт Н.А. Пространственно-временные изменения содержания загрязняющих веществ в поверхностных водах бассейна Северной Двины // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. 2022. № 1. С. 57–65.

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

Original article

## SPATIO-TIME CHANGES IN THE CONTENT OF POLLUTANTS IN THE SURFACE WATERS OF THE NORTHERN DVINA BASIN

**E.E. Lobchenko<sup>1</sup>, I.P. Nichiporova<sup>2✉</sup>, N.N. Olennikova<sup>3</sup>, O.L. Romanyuk<sup>4</sup>, N.A. Lampert<sup>5</sup>**

<sup>1, 2, 3, 4, 5</sup>FGBU "Hydrochemical Institute", Rostov-on-Don, Russia

<sup>1, 2, 3, 4, 5</sup>info@gidrohim.com

<sup>2</sup>nichiporovaIi@mail.ru✉

<sup>3</sup>listopadova-natalija@rambler.ru

<sup>4</sup>o.romanuk@gidrohim.com

<sup>5</sup>n194547@yandex.ru

**Abstract.** The long-term (for the period 2000–2020) series of pollutant content in the water of the river Northern Dvina and its tributaries are analyzed. The spatio-temporal change in the average age and average seasonal concentrations of especially high concentrations that affect water quality, formed as a result of monitoring natural and anthropogenic factors is shown. The interannual and intraannual variability of the content of organic substances (according to COD and BOD<sub>5</sub>), compounds of iron, copper, zinc, and lignosulfonates in the water of the rivers of the Northern Dvina basin was studied. The influence of anthropogenic factors on the water quality of the right and left tributaries of the upper reaches of the Northern Dvina River - Sukhona, Pelshma, Vychehda.

The change in water quality for the period 2010–2020 was assessed throughout the river Northern Dvina, Sukhona, Pelshma, Vychehda, the water quality of which is most affected by wastewater from timber industry enterprises, hydro-mechanized works in the channel part of the Northern Dvina and its tributaries; agricultural activities of enterprises of the agro-industrial complex, as well as bilge waters of river transport.

**Keywords:** average annual monthly concentrations, seasonal indicators of water quality, high water, winter low water, summer low water, dynamics of water quality

**For citation:** Lobchenko E.E., Nichiporova I.P., Olennikova N.N., Romanyuk O.L., Lampert N.A. Spatio-Time Changes in the Content of Pollutants in the Surface Waters of the Northern Dvina Basin. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2022;(1):57-65. (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 современных условиях химический состав и качество поверхностных вод бассейна Северной Двины, формирующихся в результате совместного влияния природных и антропогенных факторов, характеризуются исключительной неоднородностью и неравномерностью.

Значительное антропогенное воздействие нарушило естественный гидрохимический режим и, соответственно, межгодовую, внутригодовую, пространственную изменчивость содержания в воде рек бассейна Северной Двины характерных загрязняющих веществ.

*Цель работы* – рассмотреть особенности физико-географических условий в бассейне Северной Двины и проанализировать динамику качества воды.

## Методы исследования

На основе данных, полученных гидрохимической наблюдательной сетью Росгидромета в течение 2000–2020 гг., был проведен анализ и обобщены аналитические материалы по химическому составу поверхностных вод бассейна Северной Двины с использованием дифференцированного поингредиентного и комплексного подходов [1].

При выборе метода исследования были учтены следующие особенности:

– распределение концентраций рассматриваемых показателей качества воды в большинстве створов на водных объектах бассейна Северной Двины характеризуется отсутствием нормальности и наличием выраженной в разной степени асимметрии;

– концентрации загрязняющих веществ, зависящие от количества и качества поступающих в водные объекты сточных вод, выше, чем в створах, не подверженных влиянию сточных вод;

– для биологически активных загрязняющих веществ (органические вещества (по ХПК и БПК<sub>5</sub>)), соединений железа, меди, цинка характерно наличие сезонности, т.е. статистически достоверных отличий концентраций, ранжированных по сезонам, месяцам и другим периодам года;

– для большинства веществ, загрязняющих воду рек бассейна Северной Двины, характерно наличие высокой межгодовой дисперсии, обусловленной аномальными значениями концентраций, происхождение которых связано с неординарными явлениями, такими как аварийный сброс сточных вод, залповые поступления загрязняющих веществ с поверхностным стоком;

– для большинства рассматриваемых рядов концентраций загрязняющих веществ отмечалось присутствие автокорреляции, которая свидетельствует о наличии связи между предшествующими и последующими значениями концентраций.

Учитывая особенности формирования химического состава поверхностных вод бассейна р. Северная Двина, большой объем обработанной гидрохимической информации (по 36–38 показателям качества воды, составившим свыше 350 тыс. определений за 20 лет) и результаты проведенного анализа массива данных, были выбраны наиболее характерные для поверхностных вод бассейна Северной Двины загрязняющие вещества.

При оценке многолетних тенденций использовались непараметрические статистические характеристики, дающие возможность исследования пространственно-временных изменений химического состава воды как на фоновом уровне, так и в результате антропогенных воздействий. Они обладают преимуществами перед параметрическими: не зависят от разброса концентраций определяемых в воде загрязняющих веществ; не подвержены искажениям под действием нестандартных и недостающих данных; расчет непараметрической статистики прост; эффективны при небольшом ряде наблюдений. Для изучения относительных многолетних изменений использовался непараметрический тест Кенделла для монотонных трендов [2].

### Результаты и их обсуждение

Проанализированы естественные условия формирования химического состава поверхностных вод бассейна Северной Двины, расположенного на территории, представляющей собой лесистую равнину, для которой характерно избыточное увлажнение и относительно однообразные природные условия, коренным образом меняющиеся только вблизи полярного круга, где на смену тайге приходит лесотундра и тундра; в восточных пределах равнина сменяется возвышенностями Западного Урала [3].

Особенностями климата являются малое количество солнечной радиации зимой, влияние северных морей, интенсивный западный перенос воздушных масс. Почвы на большей части территории подзолистые, супесчаные и суглинистые, местами песчаные или торфянистые, в тундре – глеево-болотные. Повсеместно распространены болота. В тундровой зоне они в основном имеют реликтовый характер, многие из болот подвергаются интенсивному разрушению, некоторые связаны с современным болотообразовательным процессом. Растительный покров в основном представлен хвойными лесами. Питание поверхностных вод бассейна Северной Двины осуществляется за счет атмосферных осадков и талых снеговых вод.

Водный режим бассейна Северной Двины носит естественный характер из-за отсутствия гидротехнических сооружений. Он характеризуется большой неравномерностью стока воды в течение года, высоким весенним половодьем и низкой зимой меженью, в летне-осенний период – дождевыми паводками, особенно частыми осенью [3].

В распределении годового стока воды наблюдается закономерность, соответствующая климатическим и гипсометрическим особенностям. Сток рек незначительно уменьшается с севера на юг, несмотря на некоторое увеличение в том же направлении годовой суммы осадков в соответствии с ростом испарения с поверхности водосбора. Наибольшая часть суммарного стока в течение весны приходится на снеговые воды (60–80 %), для дождевого стока составляет 10–30 % [4].

Природные особенности бассейна Северной Двины обуславливают высокое содержание в воде рек органических веществ гумусового происхождения, как трудно- (по ХПК), так и легкоокисляемых (по БПК<sub>5</sub>).

Химическое потребление кислорода (ХПК) является мерой количества растворенного в воде кислорода, потребляемого при химическом окислении содержащихся в воде органических и неорганических веществ. В водных объектах, подверженных сильному воздействию хозяйственной деятельности, на временные (сезонные) изменения величины ХПК значительное влияние оказывает режим поступления в водный объект сточных вод дереводобывающих, деревоперерабатывающих, целлюлозно-бумажных предприятий, которые, несмотря на проведение в последние годы водоохраных мероприятий, продолжают оказывать значительное негативное влияние на качество поверхностных вод бассейна Северной Двины [5–7].

Значительное влияние на содержание органических веществ (по ХПК и БПК<sub>5</sub>) в воде рек бассейна Северной Двины оказывают специфические особенности гидрологического режима, характеризуемого прохождением в весенние месяцы более половины годового стока, при этом в зимние месяцы сток составляет 2–9 % годового объема. Среднемноголетние значения расходов воды р. Северная Двина изменяются от 700 м<sup>3</sup>/с в верхнем течении (г. Великий Устюг) до 4260 в устье реки (с. Усть-Пинега), соответственно, максимальные весенние расходы воды в этих створах изменяются от 2000 до 12 000 м<sup>3</sup>/с [4].

Среднегодовое содержание в воде р. Северная Двина органических веществ (по ХПК) во всех створах по длине реки и во все гидрологические сезоны превышало предельно допустимые значения (рис. 1).

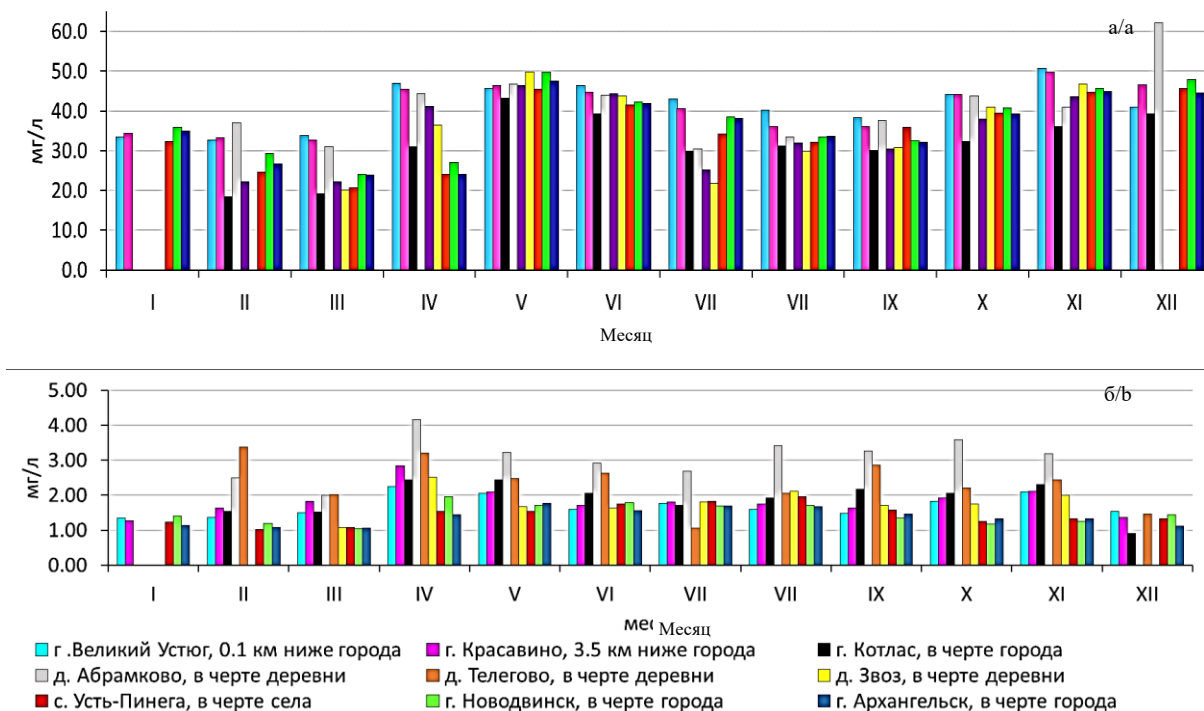


Рис. 1. Изменение среднегодовых месячных концентраций органических веществ: а – по ХПК; б – по БПК<sub>5</sub> в воде р. Северная Двина / Fig. 1. Changes in the average annual monthly concentrations of organic substances: a - according to COD; b - according to BOD<sub>5</sub> in the water of the river Northern Dvina

Наиболее высокие концентрации отмечали в период весеннего половодья, когда вместе с тальми водами в реку поступали органические вещества разного происхождения, в том числе и смываемые с поверхности водосбора, в верхнем и среднем течении реки в пунктах г. Великий Устюг, г. Красавино, г. Котлас, д. Телегово, д. Абрамково в пределах 30,5–40,9 мг/л. В летнюю и зимнюю межень величина ХПК в воде р. Северная Двина также оставалась высокой – 32,0–41,0–45,0 мг/л, достигая в д. Телегово 62,1 мг/л.

Устойчивый тренд увеличения содержания органических веществ (по ХПК) в створах верхнего течения р. Северная Двина (г. Великий Устюг, г. Красавино) в течение 2014–2020 гг., возможно, является откликом на увеличивающиеся лесозаготовительные работы (рис. 2).

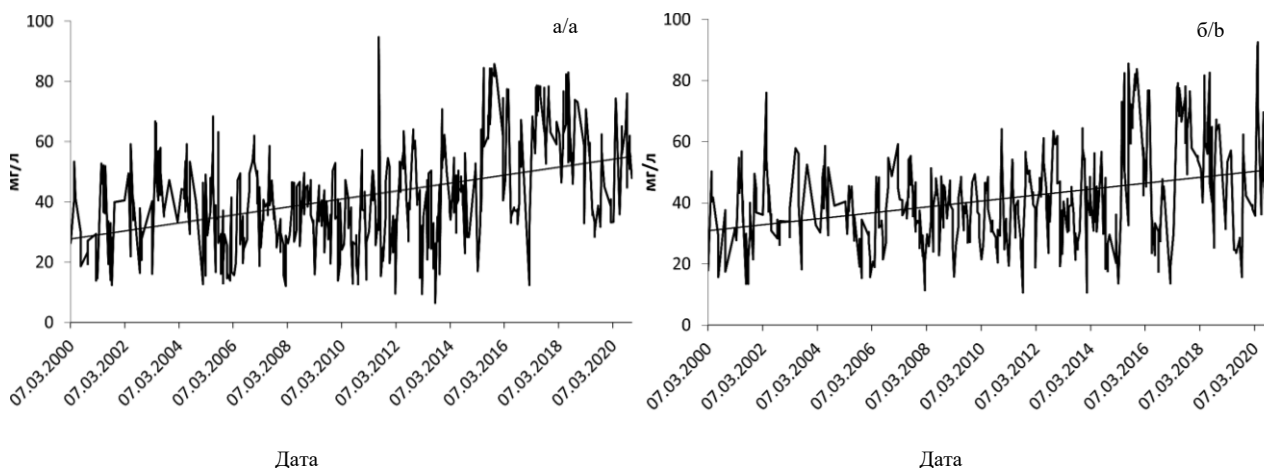


Рис. 2. Динамика изменения содержания органических веществ (по ХПК) в воде р. Северная Двина в створах: а – г. Великий Устюг; б – г. Красавино / Fig. 2. Dynamics of changes in the content of organic substances (according to COD) in the water of the river Northern Dvina in sections: a - Veliky Ustyug; b - Krasavino

За период 2000–2020 гг. в пункте с. Усть-Пинега отмечена незначительная тенденция увеличения, в г. Новодвинске и в черте г. Архангельска – стабилизация содержания органических веществ (по ХПК) в воде р. Северная Двина.

Величина БПК<sub>5</sub> воды подвержена сезонным изменениям, является условной мерой загрязнения легко поддающимися биохимическому распаду лабильными органическими веществами. Существенным источником такого класса органических веществ являются сточные воды хозяйственно-бытовой и пищевой промышленности. БПК<sub>5</sub> воды используется при контроле эффективности работ очистных сооружений и определении остаточной степени загрязненности производственных вод.

Среднегодовое сезонные концентрации легкоокисляемых органических веществ (по БПК<sub>5</sub>) в воде большинства створов р. Северная Двина соответствовали значениям ниже предельно допустимых, за исключением половодья и первой декады зимней межени в пунктах наблюдения верхнего течения реки г. Великий Устюг, г. Красавино, г. Котлас; практически в течение всего года величина превышала предельно допустимую в пунктах среднего течения у д. Телегово и д. Абрамково (рис. 1).

В многолетнем плане в пунктах наблюдения г. Великий Устюг, г. Красавино, г. Котлас, г. Новодвинск, д. Телегово, д. Абрамково, с. Усть-Пинега отмечено уменьшение; в пунктах д. Звоз и в черте г. Архангельска стабилизация содержания в воде р. Северная Двина легкоокисляемых органических веществ (по БПК<sub>5</sub>).

Устьевая часть реки, начинающаяся от с. Усть-Пинега до выхода в Двинскую губу по Никольскому, Мурманскому, Корабельному рукавам и по протоке Маймакса, характеризуется наиболее высоким содержанием в воде органических веществ по ХПК – 30,6–48,6 мг/л и по БПК<sub>5</sub> – 1,18–2,18 мг/л в меженный период, что является результатом взаимного влияния гидрологических факторов (уменьшение расходов воды, сгонно-нагонные явления) и сбросов сточных вод промышленными предприятиями г. Архангельска.

Важным источником поступления органических веществ в устьевую часть р. Северная Двина является речной сток, который составляет 10 т/км<sup>2</sup> в год, что свидетельствует об интенсивной миграционной способности органических веществ, сказывающейся на биологической продуктивности прибрежных районов. Основная масса терригенных органических и неорганических веществ оседает в зоне смешения речных и морских вод и переходит в донные отложения [8].

Антропогенным источником соединений железа являются сточные воды предприятий горнодобывающей, металлургической, металлообрабатывающей, текстильной, лакокрасочной промышленности и сельскохозяйственные стоки, природным – процессы химического выветривания горных пород, сопровождающиеся их механическим разрушением и растворением. Значительная часть соединений железа поступает с подземным стоком.

По всему течению р. Северная Двина во всех наблюдаемых пунктах обнаруживали в воде соединения железа по среднегодовым сезонным концентрациям выше предельно допустимых значений в 3–8 раз, наиболее высокие – в период весеннего ледохода и половодья в районе д. Телегово, г. Котлас; в летнюю межень во всех створах; во второй декаде осеннего ледохода и ледостава в устьевом участке (рис. 3).

Анализ динамики изменения в многолетнем плане (2000–2020 гг.) содержания соединений железа в воде р. Северная Двина показал разнонаправленность: в верхнем течении (гг. Великий Устюг, Красавино) и в нижнем течении (д. Звоз) – стабилизацию; незначительное уменьшение у д. Телегово; увеличение концентраций у г. Котласа, д. Абрамково, с. Усть-Пинега, г. Новодвинска, в черте г. Архангельска.

Содержание соединений меди и цинка в воде р. Северная Двина в концентрациях, превышающих предельно допустимые, обнаруживали во всех створах наблюдений, среднегодовое месячные в период половодья составляли: соединений меди в районе г. Великий Устюг, г. Красавино, г. Котлас, д. Телегово – 5,00–7,82 мкг/л, за исключением д. Телегово, где в июне отмечено наиболее высокое содержание меди – 18,0 мкг/л (рис. 3); соединений цинка по всему течению реки было значительно больше, чем соединений меди, и составляло 12,0–31,0 мкг/л во все сезоны года (рис. 3).

Наиболее выраженное в многолетнем плане уменьшение содержания в воде р. Северная Двина соединений меди прослеживается в пунктах г. Великий Устюг, г. Красавино, г. Котлас, повышение – д. Абрамково, д. Звоз, в черте г. Архангельска. Тенденция снижения концентраций соединений цинка выявлена в пунктах д. Телегово, д. Абрамково, д. Звоз, с. Усть-Пинега, в черте г. Архангельска, увеличения – в пунктах г. Красавино, г. Котлас, стабилизация – г. Великий Устюг.

Разнонаправленность изменения содержания соединений меди и цинка зависит от поверхностного стока в данных пунктах, кроме того, для соединений меди характерно накопление в местах сельскохозяйственных угодий, поступление с талыми водами за счет выщелачивания карбонатных пород, обогащенных сульфидными минералами. Соединения цинка могут накапливаться и поступать в воду с ионообменных фильтров промышленных стоков, а также могут являться результатом вымывания из оцинкованных труб, латуни и цинкосодержащей арматуры.

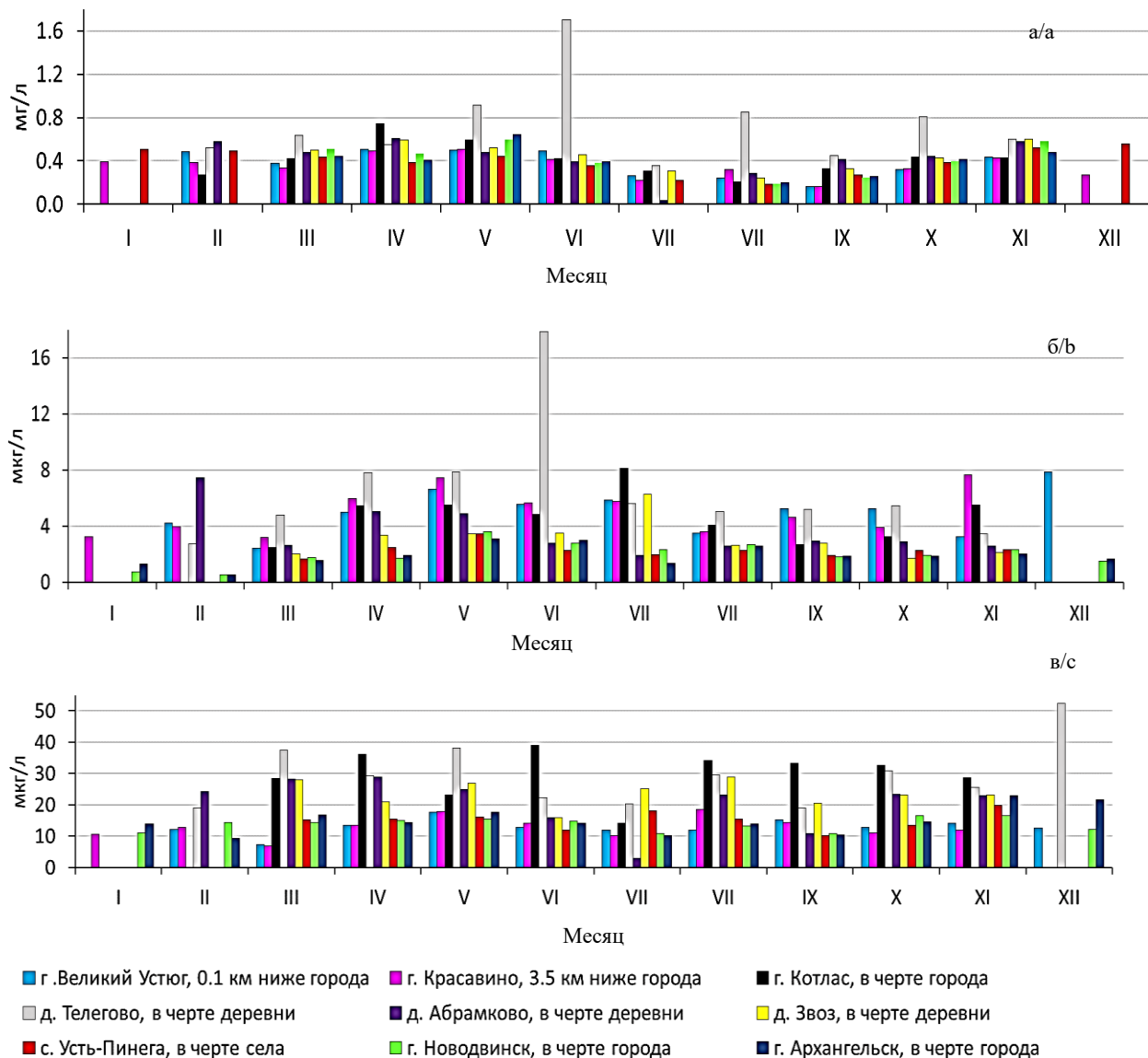


Рис. 3. Изменение среднесезонных концентраций соединений: а – железа; б – меди; в – цинка в воде р. Северная Двина / Fig. 3. Changes in the average annual seasonal concentrations of compounds: a - iron; b - copper; c - zinc in the water of the river Northern Dvina

На распределение загрязняющих веществ в воде рек Сухона, Вычегда, Пельшма оказывают влияние как природные условия формирования химического состава воды рек, так и антропогенные факторы, основными из которых являются поступление загрязняющих веществ со сточными водами предприятий целлюлозно-бумажной, лесодобывающей, деревообрабатывающей промышленности, жилищно-коммунального и сельского хозяйства, льяльных вод с судов речного флота, поверхностный сток. К наиболее характерным для воды бассейна р. Северная Двина загрязняющим веществам относятся соединения железа, меди, цинка, органические вещества (по ХПК), лигносульфонаты. На рис. 4 показано распределение загрязняющих веществ в воде рек бассейна Северной Двины, %.

В концентрациях, значительно превышающих предельно допустимые, органические вещества (по ХПК) в воде р. Сухона в течение года обнаруживали в пределах: ниже г. Сокола – 42,0–74,0 мг/л, ниже впадения



р. Пельшма – 45,5–67,0 мг/л, ниже г. Тотьмы – 44,3–57,3 мг/л, незначительно ниже в створе ниже г. Великий Устюг – 34,0–51,0 мг/л. Наиболее высокие концентрации характерны для периода зимней межени.

Содержание легкоокисляемых органических веществ (по БПК<sub>5</sub>) в большинстве притоков превышало предельно допустимые концентрации незначительно, в многолетнем плане наибольшие средне-многолетние сезонные концентрации обнаруживали в воде р. Сухона ниже г. Сокола (7,87 мг/л) и ниже впадения р. Пельшма (6,79 мг/л).

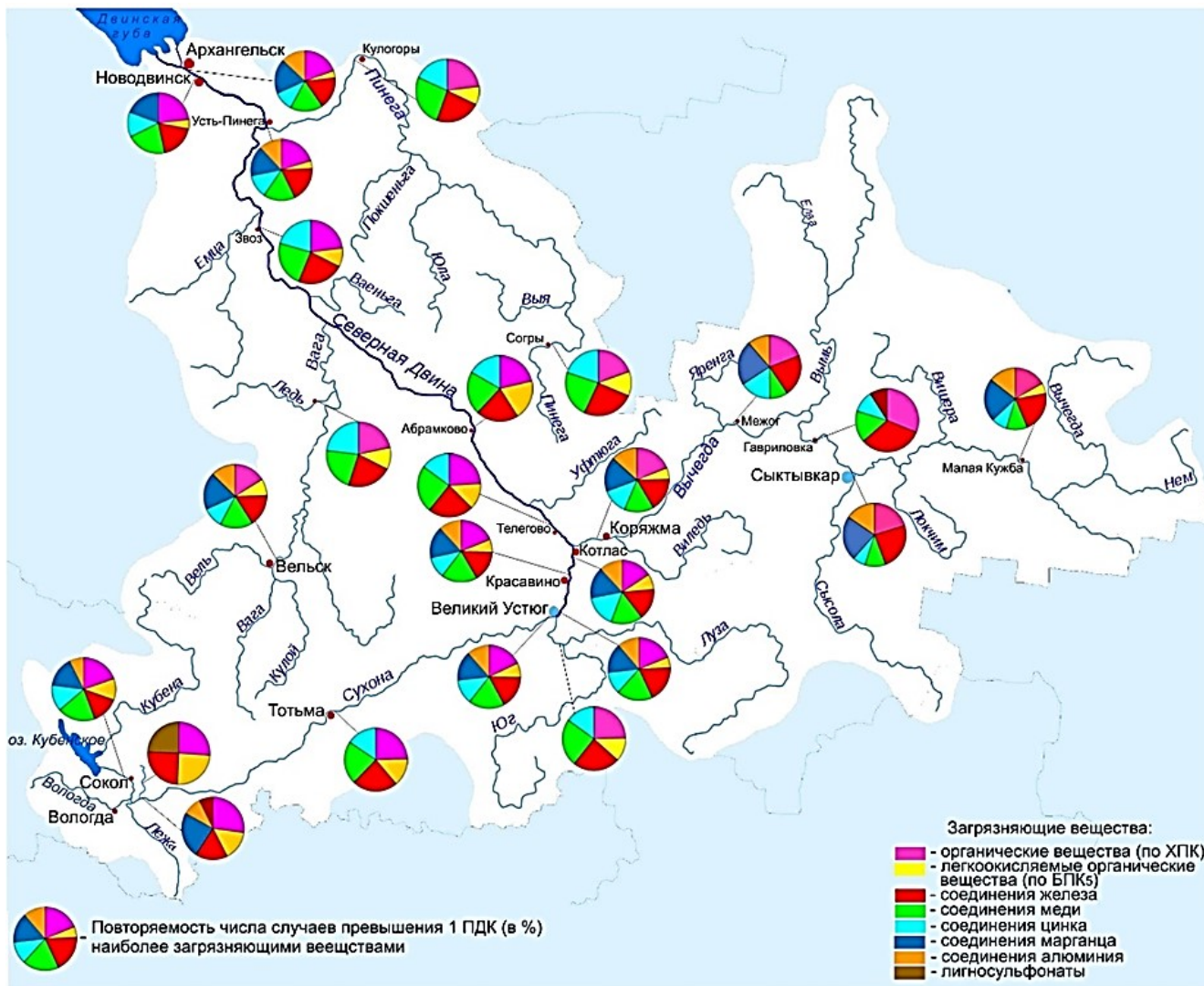


Рис. 4. Распределение характерных загрязняющих веществ в воде рек бассейна Северной Двины в 2020 г., %  
 / Fig. 4. Distribution of characteristic pollutants in the water of the rivers of the Northern Dvina basin in 2020, %

Пространственно-временное распределение содержания соединений железа, меди, цинка, лигносульфонатов в воде притоков верхнего течения не зависит от фаз гидрологического режима, обусловлено режимами сброса сточных вод предприятий, расположенных на территории водосборов рек бассейна Северной Двины. Исключение составляет устьевая часть р. Северная Двина в черте г. Архангельска (протоки Маймакса и Кузнечиха), где концентрации натрия, хлоридов, иногда соединений цинка, марганца достигают или превышают уровень высокого загрязнения, обусловленный проникновением морских вод в дельту р. Северная Двина.

В бассейне Северной Двины наиболее загрязнена р. Пельшма (г. Сокол), для которой характерны случаи высокого загрязнения в разные годы в следующих пределах: лигносульфонатами – 27,0–32,5–98,6 мг/л, метанолом – 1,20–4,37 мг/л, формальдегидом – 0,16–1,90 мг/л, органическими веществами по БПК<sub>5</sub> – 13,6–34,3 мг/л, по ХПК – 160–494 мг/л; случаи экстремально высокого загрязнения органическими веществами (по БПК<sub>5</sub>) – 40,8–140 мг/л, метанолом – 5,76–9,73 мг/л.

Участки р. Северная Двина – г. Великий Устюг, г. Красавино, г. Котлас, р. Сухона в створах ниже г. Сокола и выше г. Великий Устюг – характеризуются преобладанием низкого качества воды, оцениваемого 4-м классом, разряда «а» («грязная» вода), д. Телегово – г. Архангельск – 3-м классом, в большинстве створов – разрядом «б» («очень загрязненная» вода) (таблица).

#### Качество поверхностных вод бассейна Северной Двины / Surface water quality in the Northern Dvina basin

| Водный объект, пункт    | Год  |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|-------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|                         | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 | 2019 | 2020 |
| р. Северная Двина       |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| г. Великий Устюг        |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| г. Красавино            |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| г. Котлас               |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| д. Телегово             |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| д. Абрамково            |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| д. Звоз                 |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| с. Усть-Пинега          |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| г. Новодвинск           |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| г. Архангельск          |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| р. Сухона               |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| г. Сокол                |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| р-н впадения р. Пельшма |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| г. Тотьма               |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| г. Великий Устюг        |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| р. Вычегда              |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| с. Малая Кужба          |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| г. Сыктывкар            |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| д. Гавриловка           |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| с. Межог                |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| г. Коряжма              |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| р. Пельшма              |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| г. Сокол                |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |

|  |  |
|--|--|
|  | 3-й класс качества, разряд «а» («загрязненная» вода)       |
|  | 3-й класс качества, разряд «б» («очень загрязненная» вода) |
|  | 4-й класс качества, разряд «а» («грязная» вода)            |
|  | 4-й класс качества, разряд «б» («грязная» вода)            |
|  | 5-й класс качества («экстремально грязная» вода)           |

Крайне неудовлетворительному 5-му классу качества («экстремально грязная») соответствует вода р. Пельшма в створе г. Сокола.

#### Выводы

Анализ результатов комплексной оценки изменения качества поверхностных вод бассейна Северной Двины в течение 2010–2020 гг. свидетельствует, что большинство створов на водных объектах бассейна оценивались удовлетворительной водой 3-го класса качества разрядов «а» и «б» («загрязненная» и «очень загрязненная» вода), диапазон распределения классов качества составлял 51–80 %. Вода отдельных водных объектов оценивалась 4-м классом качества разрядами «а» – «г» («грязная» и «очень грязная» вода), р. Пельшма – 5-м классом качества («экстремально грязная» вода). В отдельные годы (2010, 2011, 2013, 2014, 2018, 2020 гг.) на реках Юг, Луза, Весляна, Емца, Покшеньга, Локчим, Вычегда (верхнее течение) и Пинега, не подверженных влиянию антропогенного фактора, вода оценивалась хорошим, 2-м классом качества, как «слабо загрязненная».

Поингредиентный анализ динамики содержания химических веществ в поверхностных водах бассейна Северной Двины показал, что наиболее высокие концентрации наблюдаются по органическим

веществам (по ХПК и БПК<sub>5</sub>), соединениям железа, меди, цинка, лигносульфонатам, содержание в воде которых, вероятнее всего, зависит от количественных и качественных характеристик сбрасываемых сточных вод в основном предприятиями целлюлозно-бумажной, лесной и деревообрабатывающей промышленности.

#### Список источников

1. РД 52.24.643-2002. Методические указания. Метод комплексной оценки степени загрязненности поверхностных вод суши по гидрохимическим показателям. СПб.: Гидрометеиздат, 2002. 49 с.
2. Helsel D.R., Hirsch R.M., Ryberg K.R., Archfield S.A., Gilroy E.J. Statistical methods in water resources. U.S. Geological Survey Techniques and Methods, 2020. Book 4, chap. A3. 458 p. URL: <https://doi.org/10.3133/tm4a3> (дата обращения: 22.11.2021).
3. Ресурсы поверхностных вод СССР. Т. 3: Северный край / под ред. И.М. Жила, Н.М. Алюшинской. Л.: Гидрометеиздат, 1972. 633 с.
4. Бреховских В.Ф., Волков З.В., Колесниченко Н.Н. Проблемы качества поверхностных вод в бассейне Северной Двины. М.: Наука, 2003. 233 с.
5. Доклад о состоянии и охране окружающей среды Вологодской области в 2020 году. Вологда, 2021. 273 с.
6. Состояние и охрана окружающей среды Архангельской области за 2020 год / отв. ред. О.В. Перхурова. Архангельск: САФУ, 2021. 478 с. URL: <https://dvinaland.ru/gov/iogv/minlpr/doclad/> (дата обращения: 22.11.2021).
7. Качество поверхностных вод Российской Федерации за 2019 г. Ростов н/Д.: ГХИ, 2020. 577 с.
8. Мальцева А.В., Тарасов М.Н., Смирнов М.П. Показатели стока органических веществ для рек территории СССР // Гидрохимические материалы. 1984. Т. 92. С. 72–91.

#### References

1. RD 52.24.643-2002. Methodical instructions. A method for a comprehensive assessment of the degree of pollution of land surface waters by hydrochemical indicators. St. Petersburg: Gidrometeoizdat Publ.; 2002. 49 p. (In Russ.).
2. Helsel D.R., Hirsch R.M., Ryberg K.R., Archfield S.A., Gilroy E.J. Statistical methods in water resources. U.S. Geological Survey Techniques and Methods, 2020;4(A3). 458 p. Available from: <https://doi.org/10.3133/tm4a3> [Accessed 22th November 2021].
3. Zhila I.M., Alyushinskaya N.M., eds. Resources of surface waters of the USSR. Vol. 3. Northern Territory. Leningrad: Gidrometeoizdat Publ.; 1972. 633 p. (In Russ.).
4. Brekhovskikh V.F., Volkov Z.V., Kolesnichenko N.N. Problems of surface water quality in the Northern Dvina basin. Moscow: Nauka Publ.; 2003. 233 p. (In Russ.).
5. Report on the state and protection of the environment of the Vologda Oblast in 2020. Vologda, 2021. 273 p. (In Russ.).
6. Perkhurova O.V., ed. State and environmental protection of the Arkhangelsk region for 2020. Arkhangelsk: SAFU Press; 2021. 478 p. Available from: <https://dvinaland.ru/gov/iogv/minlpr/doclad/> [Accessed 22th November 2021]. (In Russ.).
7. The quality of surface waters of the Russian Federation for 2019. Rostov-on-Don: GHI Press; 2020. 577 p. (In Russ.).
8. Maltseva A.V., Tarasov M.N., Smirnov M.P. Indicators of the runoff of organic substances for the rivers of the territory of the USSR. *Gidrokhimicheskie materialy = Hydrochemical Materials*. 1984;92:72-91. (In Russ.).

#### Информация об авторах

Лобченко Евгения Ефимовна – кандидат химических наук, ведущий научный сотрудник.  
Ничипорова Ирина Павловна – старший научный сотрудник.  
Оленникова Наталья Николаевна – младший научный сотрудник.  
Романюк Оксана Львовна – кандидат географических наук, заведующий лабораторией.  
Лямперт Наталья Александровна – старший научный сотрудник.

#### Information about the authors

Evgeniya E. Lobchenko - Candidate of Science (Chemistry), Leading Researcher.  
Irina P. Nichiporova - Senior Researcher.  
Natalia N. Olennikova - Junior Researcher.  
Oksana L. Romanjuk - Candidate of Science (Geography), Head of the Laboratory.  
Natalya A. Lampert - Senior Researcher.

Статья поступила в редакцию 15.12.2021; одобрена после рецензирования 27.01.2022; принята к публикации 16.03.2022.  
The article was submitted 15.12.2021; approved after reviewing 27.01.2022; accepted for publication 16.03.2022.

Научная статья

УДК 631.416.1:58.051 (470.67)

doi: 10.18522/1026-2237-2022-1-66-70

## АЗОТ В ПОЧВАХ СКЛОНОВЫХ ЭКОСИСТЕМ СРЕДНЕГОРЬЯ ДАГЕСТАНА

**Ш.К. Салихов<sup>1✉</sup>, Г.Н. Гасанов<sup>2</sup>, Т.А. Асварова<sup>3</sup>, М.А. Яхияев<sup>4</sup>, К.Б. Гимбатова<sup>5</sup>**

<sup>1, 2, 3, 4, 5</sup>Прикаспийский институт биологических ресурсов Дагестанского федерального исследовательского центра РАН, Махачкала, Республика Дагестан, Россия

<sup>1</sup>salichov72@mail.ru✉

<sup>2</sup>nikuevich@mail.ru

<sup>3</sup>tatacvar@mail.ru

<sup>4</sup>pazil59@mail.ru

<sup>5</sup>gimbatova1954@mail.ru

**Аннотация.** Актуальность настоящей работы определяется первостепенным значением определения содержания и запасов азота в типичных почвах среднегорной подпровинции Дагестана. Общие запасы азота позволяют оценить потенциальное, а легкогидролизуемый азот, который используют растения, – практическое плодородие почв территории. Цель данной работы – определить концентрации легкогидролизуемого и общего азота, их запасов в типичных почвах среднегорной подпровинции Дагестана при их заповедном содержании. Научная новизна – впервые в условиях среднегорья Дагестана установлены запасы почвенного азота. Общий азот определялся фотометрическим методом «индофеноловой зелени» по методу ЦИНАО, легкогидролизуемый азот – по Тюрину и Кононовой. Результаты исследования показали, что более плодородной была горная бурая лесная почва на склоне северной экспозиции горы Маяк, поскольку в ней обнаружено больше гумуса на 14,88 % и легкогидролизуемого азота на 14,38 %, чем в слое 0–20 см горной лугово-степной почвы. Накопление общего азота в верхнем слое 0–20 см составило для горной бурой лесной почвы 0,247 %, а в горной лугово-степной было меньше на 8,81 %. Запасы азота в почвах также различались – меньше запасов в слое 0–20 см на 6,7 и 12,16 % было в горной лугово-степной, соответственно общая и легкогидролизуемая форма. Вероятно, это обусловлено большей крутизной склона южной экспозиции, к которой приурочена горная лугово-степная почва. Большое количество запасов азота в горной бурой лесной почве может быть связано и с расположением ее у подножия леса.

**Ключевые слова:** горный Дагестан, почвы склонов, горная бурая лесная почва, горная лугово-степная почва, запасы азота

**Благодарности:** работа выполнена с использованием УНУ «Система экспериментальных баз, расположенных вдоль высотного градиента» Федерального государственного бюджетного учреждения науки Горного ботанического сада Дагестанского научного центра Российской академии наук (УНУ СЭБ ГОРБС ДНЦ РАН).

**Для цитирования:** Салихов Ш.К., Гасанов Г.Н., Асварова Т.А., Яхияев М.А., Гимбатова К.Б. Азот в почвах склоновых экосистем среднегорья Дагестана // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. 2022. № 1. С. 66–70.

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

Original article

## NITROGEN IN THE SOILS OF SLOPE ECOSYSTEMS OF THE MIDDLE MOUNTAINS OF DAGESTAN

**Sh.K. Salikhov<sup>1✉</sup>, G.N. Gasanov<sup>2</sup>, T.A. Asvarova<sup>3</sup>, M.A. Yahyaev<sup>4</sup>, K.B. Gimbatova<sup>5</sup>**

<sup>1, 2, 3, 4, 5</sup>Precaaspian Institute of Biological Resources, Dagestan Federal Research Centre, RAS, Makhachkala, Republic of Dagestan, Russia

<sup>1</sup>salichov72@mail.ru✉

<sup>2</sup>nikuevich@mail.ru

<sup>3</sup>tatacvar@mail.ru

<sup>4</sup>pazil59@mail.ru

<sup>5</sup>gimbatova1954@mail.ru

© Салихов Ш.К., Гасанов Г.Н., Асварова Т.А., Яхияев М.А., Гимбатова К.Б., 2022

**Abstract.** This work is determined by the primary importance of determining the content and reserves of nitrogen in typical soils of the Middle-Mountain subprovince of Dagestan, since the potential nitrogen reserves are estimated by the total nitrogen reserves, and the practical soil fertility of the territory is estimated by the easily hydrolyzed nitrogen used by plants. The aim of the study - determination concentration of easily hydrolyzable and total nitrogen, their reserves in typical soils of the Mid-Mountain subprovince of Dagestan, with their reserved content, was determined. Scientific novelty. For the first time in the conditions of the Middle Mountains of Dagestan, the reserves of soil nitrogen were determined. Total nitrogen was determined by the photometric method of "indophenol greens" according to the CIAS method, easily hydrolyzable nitrogen according to Tyurin and Kononova.

The results of the study showed that the mountain brown forest soil was more fertile on the slope of the northern exposure of Mount Mayak, since it revealed more humus by 14.88 % and easily hydrolyzable nitrogen by 14.38 % than in the 0-20 cm layer of mountain meadow-steppe soil. The accumulation of total nitrogen in the upper 0-20 cm layer was 0.247 % for mountain brown forest soil, and 8.81 % less for mountain meadow-steppe soil. Nitrogen reserves in soils also differed - less reserves in the 0-20 cm layer were 6.7 % and 12.16 % were in the mountain meadow-steppe, respectively, of the general and easily hydrolyzed form. This is probably due to the steeper slope of the southern exposure, to which the mountain meadow-steppe soil is confined. A large number of nitrogen reserves in mountain brown forest soil may be associated with its location at the foot of the forest.

**Keywords:** mountainous Dagestan, Mayak mountain, slope, northern exposure, southern exposure, mountain brown forest soil, mountain meadow-steppe soil, nitrogen reserves

**Acknowledgments:** the study was carried out within System of experimental bases located along the high altitude gradient of the Mountain Botanical Garden, Dagestan Scientific Center, Russian Academy of Sciences.

**For citation:** Salikhov Sh.K., Gasanov G.N., Asvarova T.A., Yahyaev M.A., Gimbatova K.B. Nitrogen in the Soils of Slope Ecosystems of the Middle Mountains of Dagestan. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2022;(1):66-70. (In Russ.).

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

Функционирование фитоценозов зависит от плодородия почв, так как из нее растения получают воду, обеспечиваются благоприятными эдафическими условиями и питательными элементами. Значительное влияние на почвенное плодородие оказывает содержание азота в почве, который не накапливается в горных породах [1, 2].

Азот имеет существенное значение для жизнедеятельности растений [3], необходим для биосинтеза фитогормонов, хлорофилла, АТФ, нуклеиновых кислот, аминокислот [4]. Азот увеличивает продуктивность и способствует устойчивости фитоценозов к стрессам [5]. В мире уделяется много внимания проблеме содержания азота в биогеоценозах из-за его глобального значения [6, 7]. Работ, посвященных содержанию и запасам азота в почвах Дагестана, недостаточно для выводов об обеспеченности почв этим элементом [8, 9].

Актуальность настоящего исследования связана со значимостью вопроса определения содержания и запасов азота в почвах, поскольку по общим запасам азота оценивают потенциальное, а по легкогидролизуемому азоту – действительное плодородие почв.

Цель исследования – выявление содержания легкогидролизуемого и общего азота, а также их запасов в типичных почвах среднегорья Дагестана, в заповедных условиях.

### Объекты и методы исследования

В годы исследований (2012–2019 гг.) средняя температура воздуха составила +8,7 °С. Среднегодовое количество осадков – 544 мм, максимум выпал весной и летом, средняя влажность воздуха – 61 %.

Работа проведена на двух площадках по 100 м<sup>2</sup> на северном и южном склонах горы Маяк в среднегорной подпровинции Дагестана, на территории Гунибской базы Горного ботанического сада ДФИЦ РАН. Объектом исследования были почвы: горная бурая лесная олуговелая карбонатная маломощная тяжелосуглинистая на делювиальных глинистых карбонатных отложениях – склон северной экспозиции; горная лугово-степная карбонатная маломощная тяжелосуглинистая на делювиальных плотных известняковых отложениях – склон южной экспозиции. С помощью GPS-навигатора определены географические координаты: 42.40176770 N, 46.91865520 E (участок южного склона, уклон – 25°); 42.40058950 N, 46.91963550 E (участок северного склона, уклон – 15°).

Проведен отбор образцов каждого типа почв по профилю (0–20, 20–40, 40–60 см). Анализы почв проведены в лаборатории почвенных и растительных ресурсов ПИБР ДФИЦ РАН. Повторность полевых и лабораторных исследований 3-кратная. Общий азот в почве определен фотометрическим методом «индофеноловой зелени» по методу ЦИНАО, легкогидролизующий методом Тюрина и Кононовой [10]. Запасы азота вычислены по формуле  $Q = (m \cdot h \cdot d) \cdot 1000$ , где Q – запасы азота, кг/га для почвенного слоя; m – содержание азота; h – мощность почвенного слоя, см; d – плотность почвенного слоя, г/см<sup>3</sup>. Анализ данных выполнен при помощи пакета Microsoft Excel 2013. Для выявления уровня значимости различий между показателями плотности, содержания гумуса и азота в почвах был использован t-критерий Стьюдента.

### Результаты и обсуждение

Исследователи как в России, так и за рубежом отмечают необходимость определения легкогидролизующего азота почвы для оценки почвенного плодородия [11, 12].

Выявлено, что более плодородной была горная бурая лесная почва, приуроченная к склону северной экспозиции горы Маяк среднегорья Дагестана, поскольку в ней обнаружено больше гумуса на 14,88 % и легкогидролизующего азота на 14,38 %, чем в слое 0–20 см горной лугово-степной почвы (таблица). Соответственно гумусу и легкогидролизующей форме азота, валовое количество азота также превалировало в горной бурой лесной почве.

**Содержание и запасы общего и легкогидролизующего азота в почвах среднегорья Дагестана (2012–2019 гг.) / The content and reserves of total and easily hydrolyzable nitrogen in the soils of the Middle Mountains of Dagestan (2012-2019)**

| Тип почвы             | Слой почвы, см | Плотность, г/см <sup>3</sup> | Гумус, %   | N <sub>общ.</sub> , % | N <sub>гидр.</sub> , мг/100 г | Запасы, кг/га     |                    |
|-----------------------|----------------|------------------------------|------------|-----------------------|-------------------------------|-------------------|--------------------|
|                       |                |                              |            |                       |                               | N <sub>общ.</sub> | N <sub>гидр.</sub> |
| Горная бурая лесная   | 0–20           | 1,02±0,005                   | 5,56±0,133 | 0,247±0,004           | 13,758±0,296                  | 5038,8            | 280,663            |
|                       | 20–40          | 1,14±0,004                   | 2,77±0,014 | 0,143±0,0003          | 5,348±0,207                   | 3260,4            | 121,934            |
|                       | 40–60          | 1,29±0,003                   | 1,22±0,009 | 0,064±0,0003          | 0,813±0,306                   | 1651,2            | 20,975             |
| Горная лугово-степная | 0–20           | 1,04±0,004                   | 4,84±0,207 | 0,227±0,006           | 12,031±0,347                  | 4721,6            | 250,245            |
|                       | 20–40          | 1,12±0,005                   | 2,68±0,027 | 0,141±0,0007          | 4,301±0,258                   | 3158,4            | 96,342             |

Установлено, что содержание валового азота в почвах субальпийских лугов Шахдагского парка в верхнем слое составило: горные лугово-степные – 0,42 %; горно-луговые дерновые – 0,45 [13]. Близкими по свойствам к бурым лесным почвам являются коричневые горно-лесные почвы (0,2–0,3 %) и горно-коричневые карбонатные почвы (0,19–0,25 % валового азота) [14].

В исследовании содержание общего азота в верхнем слое 0–20 см составило для горной бурой лесной почвы – 0,247 %, а в горной лугово-степной было меньше на 8,81 %. Общей закономерностью для исследованных почв было то, что с увеличением глубины почвенного профиля содержание легкогидролизующего и общего азота снижалось.

Выявлено, что различия по плотности, содержанию гумуса, азота в горной бурой лесной и горной лугово-степной почвах статистически значимы при  $\alpha = 0,05$ .

В исследованных почвах также обнаружена очень тесная достоверная связь содержания общего и легкогидролизующего азота с количеством гумуса –  $r = + 0,995$  и  $r = + 0,997$  соответственно.

Запасы азота в почвах различались – меньше запасов было в слое 0–20 см на 6,72 и 12,15 % в горной лугово-степной почве, соответственно общей и легкогидролизующей форм. Различие в содержании азота связано с содержанием гумуса в почвах, в горной бурой лесной, в слое 0–40 см, его содержание больше на 10,77 %. Вероятно, это обусловлено и большей крутизной склона южной экспозиции, к которой приурочена горная лугово-степная почва, и смывом питательных элементов [15]. Большее количество запасов азота в горной бурой лесной почве может быть связано и с расположением ее у подножия леса.

## Заключение

В заповедных условиях накопление и запасы азота в почвах среднегорья Дагестана в 2012–2019 гг. имели следующие показатели:

1. В слое 0–20 см содержание легкогидролизуемого азота было больше на 14,38 % и общего азота на 8,81 % в горной бурой лесной почве.
2. Больше запасов легкогидролизуемого и общего азота было в горной бурой лесной почве (423,6 и 9950 кг/га в слое 0–60 см), что явилось следствием соседства участка с лесным массивом и меньшей крутизной склона (15°). Пониженное количество запасов как гидролизуемого (346,6), так и общего азота (7880 кг/га) в горной лугово-степной почве, видимо, связано с меньшей мощностью почвенного профиля (0–40 см) и крутизной склона (25°), из-за чего, должно быть, происходит смыв почвенного азота.
3. Общей закономерностью для почв среднегорья Дагестана было большее содержание легкогидролизуемого и общего азота в слое 0–20 см со значительным уменьшением его вниз по почвенному профилю.

## Список источников

1. Койчуманов З.Т. Анализ современного состояния плодородия почв природного парка «Беш-Таш» в Талаской области // Наука, новые технологии и инновации Кыргызстана. 2018. № 4. С. 14–17.
2. Халилов Ф.Д.О., Сулейманова Ф.Ф.К. Горнолесные почвы юго-восточного склона Большого Кавказа и влияние антропогенных факторов на их деградацию (на примере Шамахинского района) // Инновации. Наука. Образование. 2021. № 33. С. 1263–1272.
3. LeBauer D.S., Treseder K.K. Nitrogen limitation of net primary productivity in terrestrial ecosystems is globally distributed // Ecology. 2008. Vol. 3, № 89 (2). P. 371–379. Doi: 10.1890/06-2057.1.
4. Crawford N.M., Forde B.G. Molecular and Developmental Biology of Inorganic Nitrogen Nutrition // The Arabidopsis Book. BioOne. 2002. Vol. 1. P. e0011. Doi: 10.1199/tab.0011.
5. Chen W., Hou Z., Wu L., Liang Y., Wei C. Effects of salinity and nitrogen on cotton growth in arid environment // Plant and Soil. 2009. Vol. 326, № 1–2. P. 61–73. Doi: 10.1007/s11104-008-9881-0.
6. Stevens C.J. Nitrogen in the environment // Science. 2019. Vol. 363, № 6427. P. 578–580. Doi: 10.1126/science.aav8215.
7. Шафран С.А. Баланс азота в земледелии России и его регулирование в современных условиях // Агрохимия. 2020. № 6. С. 14–21. Doi: 10.31857/s0002188120060113.
8. Залибеков З.Г., Биарсланов А.Б. О разнообразии почвенных ресурсов и их роли в создании продовольственной безопасности // Аридные экосистемы. 2016. Т. 22, № 2 (67). С. 5–15.
9. Кадималиев М.М., Ахмедгаев А.М. Состояние плодородия почв Республики Дагестан // Земледелие. 2017. № 7. С. 21–26.
10. Ягодин Б.А., Дерюгин И.П., Жуков Ю.П., Демин В.А., Петербургский А.В., Кидин В.В., Слипчик А.Ф., Кулюкин А.И., Саблина С.М. Практикум по агрохимии. М.: Агропромиздат, 1987. 512 с.
11. Näfe D., Lerche K. Untersuchungen auf unorganischen Stickstoff und standortgerechte Düngergaben // Gartenpost. 1990. Vol. 26. P. 25–32.
12. Лукин С.В., Четверикова Н.С., Ероховец М.А. Агроэкологическая оценка содержания азота в сельскохозяйственных растениях и почвах Белгородской области // Науч. ведомости БелГУ. Естеств. науки. 2011. № 21 (116). С. 95–102.
13. Ахмедова Г.М. Экологическая характеристика и охрана почв альпийских и субальпийских лугов Шахдагского национального парка // Междунар. науч.-исслед. журн. 2018. № 3 (69). С. 81–83. Doi: 10.23670/IRJ.2018.69.002.
14. Гусейнова С.М., Джафарова Ч.М., Джафаров А.М. Горно-коричневые почвы южного склона Большого Кавказа // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2019. № 1 (201). С. 56–66. Doi: 10.23683/0321-3005-2019-1-56-66.
15. Курбанов С.А. Сохранение и повышение плодородия почв – основа увеличения эффективности земледелия Дагестана // Земледелие. 2021. № 4. С. 16–20. Doi: 10.24411/0044-3913-2021-10404.

## References

1. Koichumanov Z.T. Analysis of the current state of soil fertility in the Besh-Tash Natural Park in the Talas region. *Nauka, novye tekhnologii i innovatsii Kyrgyzstana = Science, New Technologies and Innovations in Kyrgyzstan*. 2018;(4):14-17. (In Russ.).

2. Khalilov F.D.O., Suleymanova F.F.K. Mountain forest soils of the south-eastern slope of the Greater Caucasus and the influence of anthropogenic factors on their degradation (on the example of the Shamakhi district). *Innovatsii. Nauka. Obrazovanie = Innovations. Science. Education*. 2021;(33):1263-1272. (In Russ.).
3. LeBauer D.S., Treseder K.K. Nitrogen limitation of net primary productivity in terrestrial ecosystems is globally distributed. *Ecology*. 2008;3(89):371-379. Doi: 10.1890/06-2057.1.
4. Crawford N.M., Forde B.G. Molecular and Developmental Biology of Inorganic Nitrogen Nutrition. *The Arabidopsis Book. BioOne*. 2002J;1:e0011. Doi: 10.1199/tab.0011.
5. Chen W., Hou Z., Wu L., Liang Y., Wei C. Effects of salinity and nitrogen on cotton growth in arid environment. *Plant and Soil*. 2009;326(1-2):61-73. Doi: 10.1007/s11104-008-9881-0.
6. Stevens C.J. Nitrogen in the environment. *Science*. 2019;363(6427):578-580. Doi: 10.1126/science.aav8215.
7. Shafran S.A. Nitrogen balance in agriculture of Russia and its regulation in modern conditions. *Agrokimiya = Agrochemistry*. 2020;(6):14-21. Doi: 10.31857/s0002188120060113. (In Russ.).
8. Zalibekov Z.G., Biarslanov A.B. Soil resource diversity and its role in food security preservation. *Aridnye ekosistemy = Arid Ecosystems*. 2016;(6):81-88. Doi: 10.1134/S207909611602013X.
9. Kadimaliyev M.M., Akhmedagaev A.M. Condition of soil fertility in the Republic of Dagestan. *Zemledelie = Agriculture*. 2017;(7):21-26. (In Russ.).
10. Yagodin B.A., Deryugin I.P., Zhukov Yu.P., Demin V.A., Peterburgskiy A.V., Kidin V.V., Slipchik A.F., Kulyukin A.I., Sablina S.M. *Workshop on agrochemistry*. Moscow: Agropromizdat Publ.; 1987. 512 p. (In Russ.).
11. Näfe D., Lerche K. Untersuchunhen auf unorganischen Stickstoff und standortgerechte Düngergaben. *Gartnerpost*. 1990;26:25-32.
12. Lukin S.V., Chetverikova N.S., Erokhovets M.A. Agroecological estimation of nitrogen content in agricultural crops and soils of Belgorod region. *Nauchnyye vedomosti BelGU. Estestvennyye nauki = Belgorod State University Scientific Bulletin. Natural Sciences*. 2011;17(21):95-102. (In Russ.).
13. Akhmedova G.M. Ecological characteristics and soil protection of alpine and subalpine meadows of the Shahdag National Park. *Mezhdunar. nauch.-issled. zhurn. = International Research Journal*. 2018;(3):81-83. Doi: 10.23670/IRJ.2018.69.002. (In Russ.).
14. Huseynova S.M., Jafarov Ch.M., Jafarov A.M. Mountain-brown soils of the southern slope of the Greater Caucasus. *Izv. vuzov. Sev.-Kavk. region. Estestv. nauki = Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science*. 2019;(1):56-66. Doi: 10.23683/0321-3005-2019-1-56-66. (In Russ.).
15. Kurbanov S.A. Preservation and improvement of soil fertility - the basis for increasing the efficiency of agriculture in Dagestan. *Zemledelie = Agriculture*. 2021;(4):16-20. Doi: 10.24411/0044-3913-2021-10404. (In Russ.).

### **Информация об авторах**

Салихов Шамиль Курамагомедович – научный сотрудник, лаборатория почвенных и растительных ресурсов.

Гасанов Гасан Никуевич – доктор сельскохозяйственных наук, главный научный сотрудник, лаборатория почвенных и растительных ресурсов.

Асварова Татьяна Азимовна – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, лаборатория почвенных и растительных ресурсов.

Яхияев Магомедпазил Атагишиевич – младший научный сотрудник, лаборатория почвенных и растительных ресурсов.

Гимбатова Кабират Бадыровна – младший научный сотрудник, лаборатория почвенных и растительных ресурсов.

### **Information about the authors**

Shamil K. Salikhov - Researcher, Laboratory of Soil and Plant Resources.

Gasan N. Gasanov - Doctor of Science (Agriculture), Main Researcher, Laboratory of Soil and Plant Resources.

Tatyana A. Asvarova - Candidate of Science (Biology), Senior Researcher, Laboratory of Soil and Plant Resources.

Magomedpazil A. Yahyaev - Junior Researcher, Laboratory of Soil and Plant Resources.

Kabirat B. Gimbatova - Junior Researcher, Laboratory of Soil and Plant Resources.

Статья поступила в редакцию 13.07.2021; одобрена после рецензирования 20.11.2021; принята к публикации 16.03.2022.

The article was submitted 13.07.2021; approved after reviewing 20.11.2021; accepted for publication 16.03.2022.



Научная статья

УДК 631.416

doi: 10.18522/1026-2237-2022-1-71-79

## РАСПРЕДЕЛЕНИЕ МИКРОЭЛЕМЕНТОВ В ЕСТЕСТВЕННЫХ ПОЧВАХ РОСТОВСКОЙ АГЛОМЕРАЦИИ ПОД РАЗЛИЧНЫМИ ТИПАМИ РАСТИТЕЛЬНЫХ СООБЩЕСТВ

**Н.В. Сальник<sup>1✉</sup>, С.Н. Горбов<sup>2</sup>, О.С. Безуглова<sup>3</sup>, А.К. Шерстнев<sup>4</sup>, П.Н. Скрипников<sup>5</sup>**

<sup>1,2,3,4,5</sup>Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, Россия

<sup>1</sup>salnik@sfedu.ru✉

<sup>2</sup>sngorbov@sfedu.ru

<sup>3</sup>osbesuglova@sfedu.ru

<sup>4</sup>aksherstnev@sfedu.ru

<sup>5</sup>pav.sc@yandex.ru

**Аннотация.** Рассмотрены особенности содержания и распределения микроэлементов по профилю в естественных почвах Ростовской агломерации под различными типами древесных растительных сообществ. Определение содержания микроэлементов проводилось рентгенофлуоресцентным методом на приборе Spectroscan MAKS-GV. Изучены черноземы миграционно-сегрегационные (Calcic Chernozems (Pachic)), под естественной степной растительностью, их аналоги под искусственными древесными формациями. Искусственные лесные насаждения в степной зоне создают условия для аккумуляции цинка и свинца в верхних гумусово-аккумулятивных горизонтах и меди на уровне карбонатного барьера в иллювиально-карбонатных горизонтах чернозема.

**Ключевые слова:** микроэлементы, чернозем миграционно-сегрегационный, парково-рекреационные зоны города

**Благодарности:** исследования выполнены при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках госзадания (Южный федеральный университет, проект № 0852-2020-0029), закладка почвенных разрезов и определение органического вещества проводились в рамках научного проекта РФФИ № 20-34-90085 с использованием оборудования ЦКП «Биотехнология, биомедицина и экологический мониторинг» Южного федерального университета.

**Для цитирования:** Сальник Н.В., Горбов С.Н., Безуглова О.С., Шерстнев А.К., Скрипников П.Н. Распределение микроэлементов в естественных почвах Ростовской агломерации под различными типами растительных сообществ // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. 2022. № 1. С. 71–79.

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

Original article

## MICROELEMENT DISTRIBUTION IN NATIVE SOILS OF ROSTOV AGGLOMERATION UNDER DIFFERENT GROUPS OF PLANT COMMUNITIES

**N.V. Salnik<sup>1✉</sup>, S.N. Gorbov<sup>2</sup>, O.S. Bezuglova<sup>3</sup>, A.K. Sherstnev<sup>4</sup>, P.N. Skripnikov<sup>5</sup>**

<sup>1,2,3,4,5</sup>Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia

<sup>1</sup>salnik@sfedu.ru✉

<sup>2</sup>sngorbov@sfedu.ru

<sup>3</sup>osbesuglova@sfedu.ru

<sup>4</sup>aksherstnev@sfedu.ru

<sup>5</sup>pav.sc@yandex.ru

**Abstract.** The article deals with the content and distribution of microelements in the profile of native soils of the Rostov agglomeration under different types of woody plant communities. Determination of microelement content was carried out by X-ray fluorescence method on "Spectroscan MAKS-GV" device. Calcic Chernozems (Pachic) under natural steppe

© Сальник Н.В., Горбов С.Н., Безуглова О.С., Шерстнев А.К., Скрипников П.Н., 2022

vegetation and their analogues under artificial tree formations were studied. Man-made forest plantations in the steppe zone provide conditions for accumulation of zinc and lead in the upper humus-accumulative horizons, and copper at the carbonate barrier layer in illuvial-carbonate horizons of chernozem.

**Keywords:** *microelements, Calcic Chernozems, park and recreational areas of the city*

**Acknowledgments:** *the research was financially supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of the state task in the field of scientific activity (Southern Federal University, No. 0852-2020-0029), soil sampling and determination of organic matter was conducted as part of RFBR, project No. 20-34-90085 using equipment of Center for Collective Use of Southern Federal University "Biotechnology, Biomedical and Environmental Monitoring".*

**For citation:** Salnik N.B., Gorbov S.N., Bezuglova O.S., Sherstnev A.K., Skripnikov P.N. Microelement Distribution in Native Soils of Rostov Agglomeration under Different Groups of Plant Communities. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2022;(1):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

Почвы городов, являясь уникальным природным буфером, представляют в то же время среду для накопления основных загрязнителей [1]. В настоящее время процесс урбанизации и связанный с ним целый ряд проблем в области экологии вызывают необходимость индикации и оценки состояния городской среды [2]. Влияние человека на почвенный покров городских территорий приводит к возникновению техногенных геохимических аномалий, что обуславливает потребность инвентаризации и систематики таких почв, а также изучения особенностей их экологических функций [3].

Влияние лесополос на свойства чернозема изучалось еще в Каменной степи В.В. Докучаевым [4] и освещено в последующих работах различных ученых [5–7]. Однако широко обсуждаемая проблема оценки изменений основных свойств черноземов под влиянием несвойственной для них древесной растительности остается нерешенной [8].

Ростовская область расположена в степной зоне, которая является наиболее трансформированным типом зональных ландшафтов Северной Евразии, но даже при значительной антропогенной нагрузке на природные комплексы она отличается сохранением относительно высокого уровня биоразнообразия [9]. Для создания микроклимата в степной зоне вокруг городов высаживаются древесные массивы, которые также можно рассматривать как антропогенное воздействие на почвы городской среды. Посадка нетипичных для степи деревьев сопровождается рядом изменений. В поверхностных горизонтах этих почв по мере роста и развития древесных культур начинает формироваться лесная подстилка, которая является средой для накопления атмосферной пыли и содержащихся в ней тяжелых металлов [10].

По мере роста и развития древесных культур изменяются экологические условия функционирования степных почв, увеличивается биологическое разнообразие, претерпевает существенное изменение водный баланс территории и в конечном итоге направленность течения естественных почвообразовательных процессов [8]. Как следствие, в таких почвах начинают доминировать нисходящие токи влаги, изменяется распределение гумуса в почвенном профиле и глубина залегания карбонатов кальция [11].

Цель наших исследований – оценка изменения микроэлементного состава отдельных горизонтов черноземов миграционно-сегрегационных под влиянием древесных растительных ассоциаций с доминированием как широколиственных, так и хвойных видов.

## Объекты и методы

Для изучения накопления и распределения по профилю городских почв тяжелых металлов объектами исследований были выбраны черноземы миграционно-сегрегационные Ростовской агломерации на территории Темерницкой рощи (разрез 2103р), Щепкинского леса (разрез 2101р), Ботанического сада ЮФУ – в питомнике посадки сосны (разрез 2006р) и на целине (разрез 2003р). Таким образом были отобраны образцы почв естественного сложения на залежных, целинных участках и в лесных массивах, незначительно подверженных влиянию урбанизационных процессов.

Определение содержания микроэлементов проводилось рентгенофлуоресцентным методом на приборе Spectroscan MAKS-GV. Данный метод сертифицирован и рекомендован Российской Федерацией в качестве метода, пригодного для государственного экологического и производственного контроля [12].

Максимальное видовое разнообразие растительности при геоботаническом описании обнаружено на территории Темерницкой рощи. Здесь доминируют представители семейств *Fabaceae* и *Aceraceae* (*Robinia pseudoacacia* L., *Gleditsia triacanthos* L., *Acer negundo* L., *A. tataricum* L., *Amorpha fruticosa* L. и др.). Помимо этого, в травянистом покрове Темерницкой рощи важное участие принимают представители сорно-кустарниковой, сорно-луговой и лесолуговой растительности с преобладанием 3–5 видов (*Glechoma hederacea* L., *Galium aparine* L., *Elytrigia repens* L., *Artemisia vulgaris* L., *Sonchus arvensis* L. и др.).

На территории ООПТ «Щепкинский лес» основную площадь занимают насаждения из семейств дуба черешчатого *Quercus robur* L., клена остролистного *Acer platanoides* L., ясеня высокого *Fraxinus excelsior* L. Примешиваются и другие виды, преимущественно из семейств *Aceraceae* и *Rosaceae* (*A. tataricum* L., *A. negundo* L., вишня магалебская (черемуха антипка) *Prunus mahaleb* L., шиповник собачий *Rosa canina* L., груша обыкновенная *Pyrus communis* L. и др.). В питомнике Ботанического сада ЮФУ высажена исключительно сосна крымская *P. pallasiana* D. Don. [13].

### Результаты и обсуждение

Количественное содержание микроэлементов в почвах определяется значимыми факторами, к которым относят направленность и интенсивность процессов почвообразования, а также их содержание в материнской породе. В последнее время на величину содержания минеральных элементов в почвах все большее влияние оказывает антропогенный прессинг. В этой связи особенно важными становятся работы по изучению микроэлементного состава почв, проводимые до этапов масштабного индустриального роста и развития промышленных предприятий в отдельно взятой геохимической провинции. Поэтому при исследовании почв Ростовской агломерации за фоновые значения нами принимаются данные, приведенные в работе [14].

Результаты наших исследований приведены в таблице. Они свидетельствуют, что по валовому содержанию микроэлементы в целинном черноземе миграционно-сегрегационном (Р. 2003р) можно расположить в следующий ряд: Cr>Zn>V>Ni>Pb>Cu>Co.

Наиболее высокое содержание микроэлементов отмечено на целине в гумусово-аккумулятивном горизонте, а самое низкое – в почвообразующей породе. Повышенные значения отдельных микроэлементов сопряжены с концентрационной функцией как отдельных видов растений степной зоны, так и всей растительной ассоциации в целом, так как известны по крайней мере от 17 до 19 химических элементов, концентрирующихся в живом веществе, прежде всего в растительных организмах [15]. Однако в условиях городской среды высокое содержание микроэлементов в естественных почвах может также объясняться накопительным эффектом тяжелых металлов, вызванным процессами индустриализации (наличие крупного лакокрасочного предприятия ЗАО «Эмпилс» в г. Ростове-на-Дону) и вероятной миграцией тяжелых металлов по профилю почв [16]. Нельзя также исключить факт педогеохимической специфики самих лессовидных суглинков как почвообразующей породы для большей части региона [14].

Таким образом, для всего ряда рассмотренных элементов наиболее значимыми являются никель, медь, свинец, цинк. Это вызвано как природой самих элементов, так и наличием или отсутствием техногенных выбросов, характерных именно для Ростовской агломерации.

Профильное распределение никеля в горизонтах целинного чернозема и лесных массивов показывает плавное снижение содержания данного элемента с глубиной в довольно узком диапазоне величин, что свидетельствует о стабильности соединений этих элементов и их слабой миграции вниз по профилю.

Распределение меди по профилю естественных почв города носит иной характер по сравнению с распределением никеля. Если для никеля отмечается тенденция его закрепления и накопления в гумусово-аккумулятивном горизонте, то соединения меди в почвенном профиле характеризуются большей подвижностью. Это находит отражение, с одной стороны, в некотором обеднении поверхностных горизонтов, с другой – в возникновении пиков концентрации данного элемента в средней части профиля (рис. 1). Так, количество меди в черноземе Щепкинского леса в верхних горизонтах лежит в интервале 23–29±3,15 мг/кг почвы, в средней части профиля – 32–37±3,32. Аналогичная картина распределения

наблюдается и в черноземе Темерницкой роши (верхние горизонты – 24–27±3,17 мг/кг, средняя часть профиля – 37–40±3,30). Анализ профильного распределения меди в почвах агломерации показал, что содержание меди в средней части профиля наиболее высокое. Это может свидетельствовать о накоплении меди на карбонатном барьере в процессе элювиирования и подтверждает возможность передвижения соединений этого элемента с нисходящими токами влаги. Однако необходимо учитывать тот факт, что материнские породы, представленные лессовидными глинами и суглинками, изначально богаты медью.

**Микроэлементный состав чернозема миграционно-сегрегационного под степной растительностью (целина) и под лесными массивами Ростовской агломерации, мг/кг (ppm) / Micronutrient composition of Calcic Chernozem under steppe vegetation (virgin land) and forests of Rostov agglomeration, mg/kg (ppm)**

| Горизонт  | Глубина отбора | Микроэлементный состав, мг/кг (ppm) |            |            |            |
|---|----------------|-------------------------------------|------------|------------|------------|
|   |                | Ni                                  | Cu         | Zn         | Pb         |
| Фон   |                | 45                                  | 30         | 65         | 20         |
| <b>ПДК</b>  |                | <b>80</b>                           | <b>132</b> | <b>220</b> | <b>130</b> |
| Чернозем миграционно-сегрегационный, Calcic Chernozem (Pachic), целина, Ботанический сад. Разрез 2003р.   |                |                                     |            |            |            |
| AU rz   | 0-10           | 47,06                               | 24,15      | 94,30      | 33,05      |
| AU  | 10-50          | 47,97                               | 24,01      | 68,21      | 20,81      |
| AU hi   | 50-70          | 48,09                               | 22,87      | 65,14      | 19,09      |
| BCA lc  | 70-95          | 41,02                               | 28,91      | 63,90      | 19,31      |
| BCA nc  | 95-120         | 37,73                               | 24,64      | 64,69      | 21,12      |
| C ca  | 120-150        | 42,98                               | 31,32      | 65,82      | 21,03      |
| Чернозем миграционно-сегрегационный, Calcic Chernozem (Pachic), лесопарк, Темерницкая роша. Разрез 2103р. |                |                                     |            |            |            |
| AU rz   | 0-10           | 52,51                               | 24,77      | 94,29      | 25,64      |
| AU  | 10-30          | 55,15                               | 27,48      | 82,60      | 27,39      |
| AU'   | 30-55          | 55,68                               | 29,66      | 81,76      | 32,45      |
| AU hi   | 50-70          | 60,62                               | 38,81      | 79,08      | 25,02      |
| BCA lc  | 70-90          | 57,31                               | 37,08      | 77,50      | 22,93      |
| BCA nc  | 90-110         | 54,75                               | 40,73      | 76,15      | 28,73      |
| BCA nc'   | 110-130        | 51,01                               | 42,75      | 74,59      | 21,61      |
| C ca  | 130-150        | 53,83                               | 43,76      | 76,98      | 24,68      |
| Чернозем миграционно-сегрегационный, Calcic Chernozem (Pachic), лесопарк, Щепкинский лес. Разрез 2101р.   |                |                                     |            |            |            |
| AU rz   | 0-15           | 51,43                               | 23,12      | 81,84      | 18,56      |
| AU  | 15-70          | 55,88                               | 28,59      | 78,31      | 10,51      |
| AU'   | 15-70          | 60,84                               | 29,43      | 77,94      | 34,64      |
| AU hi   | 70-95          | 62,73                               | 32,18      | 79,20      | 32,90      |
| BCA lc  | 95-120         | 58,24                               | 36,87      | 78,33      | 32,44      |
| BCA nc  | 120-145        | 53,10                               | 36,81      | 77,02      | 20,41      |
| C ca  | 145-160        | 43,61                               | 35,54      | 75,47      | 26,60      |
| Чернозем миграционно-сегрегационный, Calcic Chernozem (Pachic), питомник сосны. Разрез 2006р.             |                |                                     |            |            |            |
| AU rz   | 0-8            | 62,06                               | 35,88      | 195,06     | 54,48      |
| AU  | 8-60 (20-30)   | 63,79                               | 37,89      | 91,36      | 30,02      |
| AU'   | 8-60 (40-50)   | 65,22                               | 33,57      | 84,88      | 16,30      |
| AU hi   | 60-90          | 61,47                               | 39,30      | 86,47      | 11,39      |
| BCA lc  | 90-110         | 54,93                               | 40,65      | 80,76      | 13,16      |
| BCA nc  | 110-150        | 54,80                               | 41,64      | 82,27      | 22,36      |
| C ca  | 150-160        | 51,63                               | 41,16      | 73,95      | 20,65      |

В условиях Ростовской агломерации основным источником поступления цинка в поверхностные горизонты городских почв являлись функционирующие с середины XX по начало XXI в. крупные лакокрасочные предприятия. Цинк проявляет выраженную тенденцию к увеличению концентраций в дерновом и гумусово-аккумулятивном горизонтах, в то время как в нижележащей толще наблюдается выравнивание его содержания (рис. 2). Гумусовые вещества черноземов связывают микроэлементы с

образованием комплексных гетерополярных солей [17], а цинк относится именно к элементам биогенной аккумуляции, и существует взаимосвязь между содержанием органического вещества и его концентрацией в почвах [18].

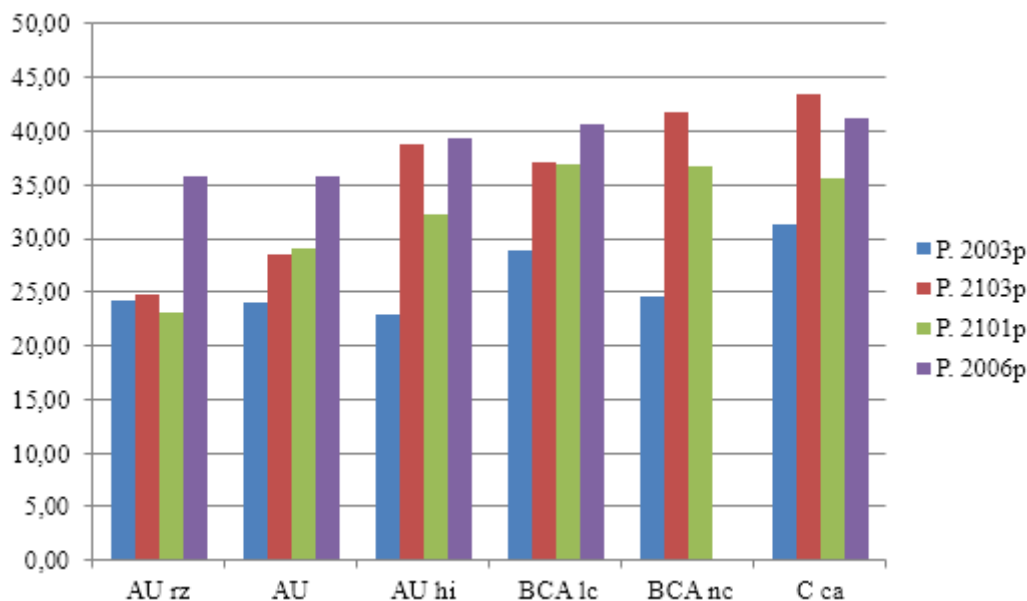


Рис. 1. Профильное распределение меди в черноземах миграционно-сегрегационных Ростовской агломерации: под степной растительностью (целина) (P. 2003p) и под лесными массивами (P. 2103p – Темерницкая роща; P. 2101p – Щепкинский лес; P. 2006p – питомник сосны) / Fig. 1. Profile distribution of copper in Calcic Chernozem of Rostov agglomeration: under steppe vegetation (virgin land) (P. 2003p) and under forest massive (P. 2103p - Temernitskaya grove; P. 2101p - Shchepkinsky forest; P. 2006p - Pine tree nursery)

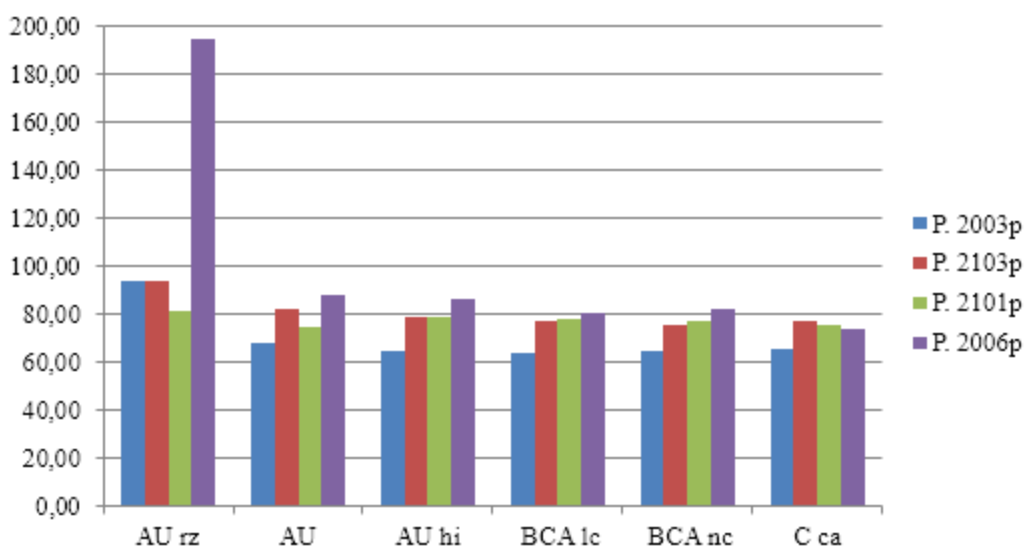


Рис. 2. Профильное распределение цинка в почвах Ростовской агломерации: под степной растительностью (целина) (P. 2003p) и под лесными массивами (черноземы миграционно-сегрегационные) (P. 2103p – Темерницкая роща; P. 2101p – Щепкинский лес; P. 2006p – питомник сосны) / Fig. 2. Profile distribution of zinc in Calcic Chernozem of Rostov agglomeration: under steppe vegetation (virgin land) (P. 2003p) and under forest massive (P. 2103p - Temernitskaya grove; P. 2101p - Shchepkinsky forest; P. 2006p - Pine tree nursery)

Так, если в среднем для городских почв Ростовской агломерации валовое содержание цинка составляет 65 мг/кг, то в поверхностном слое почв лесных массивов концентрации цинка значительно пре-

вышают приведенные величины (таблица). При среднем содержании цинка 85,72 мг/кг размах колебаний находится в пределах 73,95–195,06 мг/кг. Максимальное количество цинка наблюдается в гумусово-аккумулятивном горизонте чернозема миграционно-сегрегационного под посадками сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.). Это связано с тем, что среди интродуцированных в регионе хвойных растений наиболее чувствительна к загрязнению воздуха именно *Pinus sylvestris* L., характеризующаяся высокой газопоглощительной способностью. Даже при удаленности от источников загрязнения происходит накопление цинка в её опаде [19].

Содержание и распределение свинца отличаются значительным разбросом концентраций (рис. 3). Если накопление свинца в поверхностных горизонтах объясняется близостью к крупным транспортным узлам и автомагистралям, то волнообразная миграция данного элемента в профиле почвы обусловлена его высоким сродством с гумусовыми веществами. Как следствие, черноземы под различными древесными формациями отличаются по содержанию свинца как в поверхностных горизонтах, так и в почвенном профиле в целом. К примеру, в Темерницкой роще среднее содержание свинца в верхнем горизонте (0–15) равняется  $25,64 \pm 9,97$  мг/кг, в Щепкинском лесу –  $18,56 \pm 9,88$ , в питомнике сосны –  $54,48 \pm 9,82$  мг/кг. В средней части профиля в почве под лесной растительностью наблюдается низкое содержание свинца, что может быть обусловлено особенностями гранулометрического состава и спецификой фракционно-группового состава гумуса в этих горизонтах.

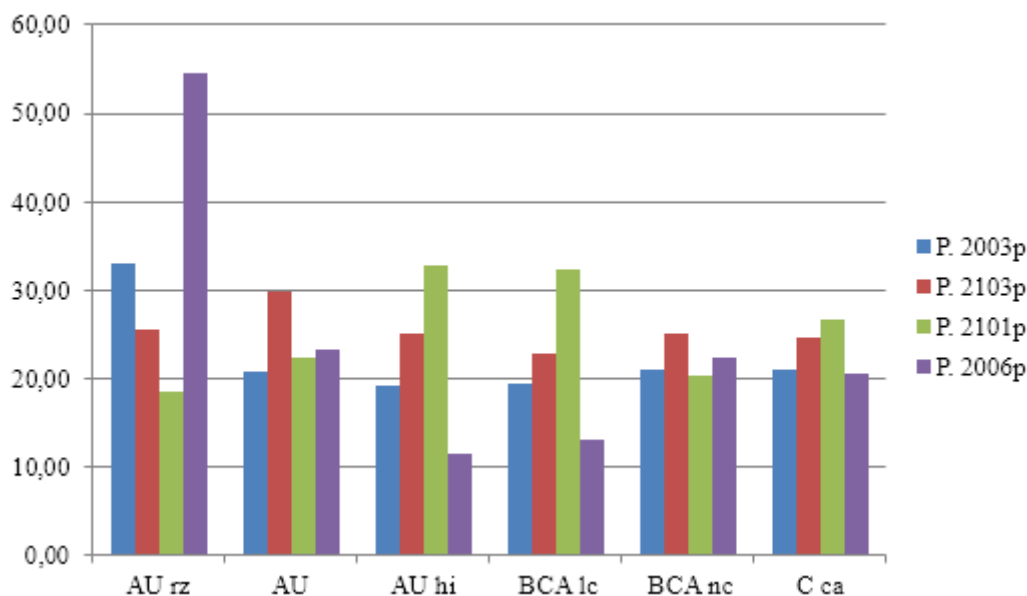


Рис. 3. Профильное распределение свинца в почвах Ростовской агломерации: под степной растительностью (целина) (P. 2003p) и под лесными массивами (черноземы миграционно-сегрегационные) (P. 2103p – Темерницкая роща; P. 2101p – Щепкинский лес; P. 2006p – питомник сосны) / Fig. 3. Profile distribution of lead in Calcic Chernozem of Rostov agglomeration: under steppe vegetation (virgin land) (P. 2003p) and under forest massive (P. 2103p - Temernitskaya grove; P. 2101p - Shchepkinsky forest; P. 2006p - Pine tree nursery)

### Заключение

Распределение тяжелых металлов в профиле почв естественного сложения (черноземы целинных участков и лесопарков) проявляет стабильные закономерности.

В черноземе миграционно-сегрегационном – на целинном участке Ботанического сада ЮФУ – наблюдается наиболее высокое содержание микроэлементов в гумусово-аккумулятивном горизонте с плавным снижением к почвообразующей породе.

Несмотря на то что почвы территорий лесопарковых рекреаций испытывают на себе несвойственное им по генезису воздействие древесной растительности, в целом распределение микроэлементов сохраняется в пределах, характерных для черноземов целинных участков, занятых разнотравно-злаковыми ассоциациями. Независимо от типа растительного сообщества соединения меди в почвенном

профиле характеризуются большей подвижностью, что приводит к возникновению пиков концентрации данного элемента в средней части профиля на уровне карбонатного барьера. Никелю присуще плавное снижение содержания вниз по почвенному профилю в узком диапазоне величин. Содержание цинка имеет тенденцию к увеличению концентраций в дерновом и гумусово-аккумулятивном горизонтах, для свинца характерен разброс концентраций в пределах почвенного профиля с минимальными значениями в центральной его части.

#### Список источников

1. Горбов С.Н., Безуглова О.С., Алексикова А.С., Тагивердиев С.С., Дубинина М.Н., Шерстнев А.К. Содержание и распределение тяжелых металлов и мышьяка в почвах Ростова-на-Дону // *Современные проблемы науки и образования*. 2015. № 4. С. 543.
2. Корельская Т.А., Попова Л.Ф. Тяжелые металлы в почвенно-растительном покрове селитебного ландшафта города Архангельска // *Арктика и Север*. 2012. № 7. С. 136–152.
3. Середя Л.О., Куролан С.А., Яблонских Л.А. Эколого-геохимическая оценка техногенного загрязнения почвенного покрова промышленных городов. Воронеж: Научная книга, 2018. 196 с.
4. Докучаев В.В. Труды экспедиции, снаряженной лесным департаментом, под руководством проф. Докучаева // Избр. соч. Т. II: Труды по геологии и сельскому хозяйству. М.: Гос. изд-во с/х лит-ры, 1949. С. 231–247.
5. Громовик А.И., Королев В.А., Йонко О.А. Влияние полезащитных лесных полос на основные показатели плодородия почв Каменной степи // *Вестн. ВГУ. Серия: Химия. Биология. Фармация*. 2013. № 1. С. 105–114.
6. Трофимов И.Т., Беховых Ю.В., Болотов А.Г., Сизов Е.Г. Физические свойства черноземов под хвойными лесополосами // *Вестн. Алтайского гос. аграрн. ун-та*. 2013. № 9 (107). С. 23–27.
7. Укенов Б.С., Верхоиенцева Ю.П. Влияние искусственных лесополос на физические свойства черноземов Предуралья // *Экологические проблемы Южного Урала и пути их решения*. Оренбург, 2017. С. 173–179.
8. Чевеурдин Ю.И., Вавин В.С., Ахтямов А.Г., Воронин Д.А. Роль лесных насаждений в изменении свойств черноземов // *Достижения науки и техники АПК*. 2014. № 2. С. 11–14.
9. Федяева В.В., Шмараева А.Н., Шишлова Ж.Н., Кузьменко И.П. Редкие виды растений на территориях охраняемых ландшафтов Ростовской области // *Живые и биокосные системы*. 2021. № 35. URL: <https://jbks.ru/archive/issue-35/article-2/> (дата обращения: 01.11.2021).
10. Сальник Н.В., Горбов С.Н., Безуглова О.С. Накопление и распределение Ni, Cu, Zn и Pb в черноземах парково-рекреационной зоны г. Ростов-на-Дону // *Подготовка кадров в условиях перехода на инновационный путь развития лесного хозяйства: материалы науч.-практ. конф.* Воронеж, 21–22 октября 2021 г. / отв. ред. И. С. Зиновьева. Воронеж, 2021. С. 368–371.
11. Горбов С.Н. Генезис, классификация и экологическая роль городских почв европейской части Юга России (на примере Ростовской агломерации): дис. ... д-ра биол. наук. М., 2018. 488 с.
12. Poukhovski A.V. X-ray fluorescence analysis in the Russian State Agrochemical Service: an overview // *X-Ray Spectrom.* 2002. Vol. 31 (3). P. 225–234.
13. Наливайченко А.А., Скрипников П.Н., Горбов С.Н., Матецкая А.Ю. Оценка состояния растительного покрова искусственных насаждений г. Ростова-на-Дону // *Биологическое разнообразие природных и антропогенных ландшафтов: изучение и охрана: сб. ст.* Астрахань: Астраханский гос. ун-т, 2021. С. 56–60.
14. Акимцев В.В., Болдырева А.В., Голубев С.Н., Кудрявцев М.Н., Руденская К.В., Садименко П.А., Собдорникова И.Г. Содержание микроэлементов в почвах Ростовской области // *Микроэлементы и естественная радиоактивность*. Ростов н/Д.: Изд-во Рост. ун-та, 1962. С. 37–42.
15. Вернадский В.И. Очерки геохимии. М.: Наука, 1983. 422 с.
16. Дубинина М.Н., Горбов С.Н., Безуглова О.С., Шерстнев А.К. Содержание и профильное распределение валовых форм тяжелых металлов в почвах урбанизированных территорий Юга России // *Изв. Самарского науч. центра РАН*. 2016. Т. 18, № 2–2. С. 349–354.
17. Бодеева Е.А. Микроэлементы (Cu, Zn, Ni, Pb) в гумусовых веществах черноземов и каштановых почв Западного Забайкалья: дис. ... канд. биол. наук. Новосибирск, 2012. 127 с.
18. Яхияев М.А., Рамазанов А.Ш., Аджиева А.И. Валовые и подвижные формы цинка в почвах южной экспозиции предгорного Дагестана // *Вестн. Даг. гос. ун-та. Естеств. науки*. 2011. № 6. С. 162–165.
19. Бородин Н.А. Аккумуляция тяжелых металлов хвоей сосны в урбоэкосистеме города Благовещенска // *Изв. Самарского науч. центра РАН*. 2012. Т. 14, № 1–8. С. 1958–1962.

#### References

1. Gorbov S.N., Bezuglova O.S., Aleksikova A.S., Tagiverdiev S.S., Dubinina M.N., Sherstnev A.K. The content and distribution of heavy metals and arsenic in soils of Rostov-on-Don. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya = Modern Problems of Science and Education*. 2015;(4):543. (In Russ.).

2. Korelskaya T.A., Popova L.F. Heavy metals in the soil-vegetation cover of the selitebni landscape of the city Arkhangelsk. *Arktika i Sever = Arctic and North*. 2012;(7):136-152. (In Russ.).
3. Sereda L.O., Kurolap S.A., Yablonskikh L.A. *Ecological and geochemical assessment of anthropogenic pollution of the soil cover of industrial cities*. Voronezh, 2018. 196 p. (In Russ.).
4. Dokuchaev V.V. The works of the expedition equipped by the Forest Department, under the guidance of Prof. Dokuchaeva. *Selected works. Vol. II: Works on geology and agriculture*. Moscow: State Publishing House of Agricultural Literature; 1949: 231-247. (In Russ.).
5. Gromovik A.I., Korolev V.A., Jonko O.A. The influence of field-protecting forest belts on the basic parameters of soils fertility in Stone steppe. *Vestn. VGU. Seriya: Khimiya. Biologiya. Farmatsiya = Proceedings of Voronezh State University. Series: Chemistry. Biology. Pharmacy*. 2013;(1):105-114. (In Russ.).
6. Timofeyevich T.I., Bekhovikh Yu.V., Bolotov A.G., Sizov E.G. Physical properties of chernozem soils under coniferous windbreaks. *Vestn. Altaiskogo gos. agrarn. un-ta = Proceedings of the Altai State Agricultural University*. 2013;(9):23-27. (In Russ.).
7. Ukenov B.S., Verkhoshentseva Yu.P. Influence of artificial forest belts on the physical properties of chernozems of the Urals. *Environmental problems of the Southern Urals and their solutions*. Orenburg, 2017:173-179. (In Russ.).
8. Cheverdin Yu.L., Vavin V.S., Ahtyamov A.G., Voronin D.A. Role of wood plantings in change of properties of chernozems. *Dostizheniya nauki i tekhniki APK = Achievements of Science and Technology of AICis*. 2014;(2):11-14. (In Russ.).
9. Fedyeva V.V., Shmaraeva A.N., Shishlova Zh.N., Kuzmenko I.P. Rare plant species in the territories of protected landscapes of the Rostov region. *Zhivye i biokosnye sistemy = Living and Biocontainable Systems*. 2021;(35). Available from: <https://jbks.ru/archive/issue-35/article-2/> [Accessed 1st November 2021]. (In Russ.).
10. Salnik N.V., Gorbov S.N., Bezuglova O.S. Accumulation and distribution of Ni, Cu, Zn, and Pb in chernozems of the recreational park zone of Rostov-on-Don. *Training of personnel in the context of the transition to an innovative path of development of forestry*. Materials of Scientific and Practical Conference. Voronezh, October 21-22, 2021. Ed. by I.S. Zinoviev. Voronezh, 2021:368-371. (In Russ.).
11. Gorbov S.N. *Genesis, classification, ecological role of urban soils in the south of the European part of Russia (on the example of the Rostov agglomeration)*. Dissertation. Moscow, 2018. 448 p. (In Russ.).
12. Poukhovski A.V. X-ray fluorescence analysis in the Russian State Agrochemical Service: an overview. *X-Ray Spectrom*. 2002;31(3):225-234.
13. Nalyvaichenko A.A., Skripnikov P.N., Gorbov S.N., Matetskaya A.Yu. Assessment of the state of the vegetation cover of artificial forestations in Rostov-on-Don. *Biodiversity of natural and anthropogenic landscapes: study and protection*. Astrakhan: Astrakhan State University Press; 2021:56-60. (In Russ.).
14. Akimtsev V.V., Boldyreva A.V., Golubev S.N., Kudryavtsev M.N., Rudenskaya K.V., Sadimenko P.A., Sobdornikova I.G. Content of trace elements in the soils of the Rostov region. *Trace elements and natural radioactivity*. Rostov-on-Don: Rostov State University Press; 1962:37-42. (In Russ.).
15. Vernadsky V.I. *Essays on geochemistry*. Moscow: Nauka Publ.; 1983. 422 p. (In Russ.).
16. Dubinina M.N., Gorbov S.N., Bezuglova O.S., Sherstnev A.K. Content and profile distribution of heavy metals total forms in soils of urban territories of Russia south. *Izv. Samarskogo NTs RAN = Izvestia of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2016;18(2-2):349-354. (In Russ.).
17. Bodeeva E.A. *Microelements (Cu, Zn, Ni, Pb) in humus substances of chernozems and chestnut soils of Western Transbaikalia*. Dissertation. Novosibirsk, 2012. 127 p. (In Russ.).
18. Jahijaev M.A., Ramazanov A.Sh., Adzhieva A.I. Gross and mobile forms of zinc in the soils of the southern exposition of the foothills of Dagestan. *Vestn. Dag. gos. un-ta. Estestv. nauki = Herald of Dagestan State University. Natural Sciences*. 2011;(6):162-165. (In Russ.).
19. Borodina N.A. Accumulation of heavy metals by pine needles in urban ecosystem of Blagoveshchensk city. *Izv. Samarskogo NTs RAN = Izvestia of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2012;14(1-8):1958-1962. (In Russ.).

### **Информация об авторах**

Сальник Надежда Владимировна – аспирант, стажер-исследователь, научно-испытательная лаборатория «Биогеохимия», Академия биологии и биотехнологии им. Д.И. Ивановского.

Горбов Сергей Николаевич – доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник, заведующий научно-испытательной лабораторией «Биогеохимия», профессор кафедры ботаники.

Безуглова Ольга Степановна – доктор биологических наук, профессор кафедры почвоведения и оценки земельных ресурсов, профессор.

Шерстнев Алексей Константинович – преподаватель, кафедра почвоведения и оценки земельных ресурсов.

Скрипников Павел Николаевич – аспирант, младший научный сотрудник, научно-испытательная лаборатория «Биогеохимия».



**Information about the authors**

*Nadezhda V. Salnik - Postgraduate, Research Assistant, Scientific Laboratory of Biogeochemistry, Ivanovsky Academy of Biology and Biotechnologies.*

*Sergey N. Gorbov - Doctor of Science (Biology), Leading Researcher, Head of the Scientific Laboratory of Biogeochemistry, Professor of Department of Botany.*

*Olga S. Bezuglova - Doctor of Science (Biology), Professor of the Department of Soil Science and Land Resources Assessment, Professor.*

*Aleksey K. Sherstnev - Lecturer, Department of Soil Science and Land Resources Assessment.*

*Pavel N. Skripnikov - Postgraduate, Junior Researcher, Scientific Laboratory of Biogeochemistry.*

*Статья поступила в редакцию 08.12.2021; одобрена после рецензирования 21.12.2021; принята к публикации 16.03.2022.*

*The article was submitted 08.12.2021; approved after reviewing 21.12.2021; accepted for publication 16.03.2022.*

---

Научная статья

УДК 502.4+338.48

doi: 10.18522/1026-2237-2022-1-80-89

## ЗАРУБЕЖНЫЙ И РОССИЙСКИЙ ОПЫТ ОРГАНИЗАЦИИ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО ТУРИЗМА НА ОСОБО ОХРАНЯЕМЫХ ПРИРОДНЫХ ТЕРРИТОРИЯХ

**Анастасия Николаевна Усольцева**

Тюменский государственный университет, Тюмень, Россия  
entrada2009@mail.ru

**Аннотация.** Среди различных видов туризма в настоящее время экологический туризм набирает всё большую популярность как в развитых, так и в развивающихся странах. Особенно туристов привлекают поездки в природные места, которые сохранились в наилучшем естественном состоянии. На сегодняшний день такими территориями являются особо охраняемые природные территории (ООПТ). Исследователи многих стран мира в области экологического туризма до сих пор продолжают дискутировать о возможности или невозможности достижения той формы туризма, которая может соответствовать принципам глобальной концепции устойчивого развития. Опыт достижения лучшей практики наиболее распространён в тех странах, в которых внедряются те или иные конкретные принципы экотуризма. В статье рассмотрен опыт организации экологического туризма на ООПТ различных регионов мира. Проанализированы европейская, американская и российская модели экологического туризма на конкретных примерах, что позволило выявить сходства и различия путешествий в природные резерваты разных стран мира и особенности организации экотуров. Рассмотренный зарубежный и российский опыт экологического туризма на ООПТ может быть интересен и полезен территориям, где планируется создать фундамент для развития экологического туризма на ООПТ.

**Ключевые слова:** экологический туризм, особо охраняемые природные территории, концепция экотуризма, зарубежный опыт, устойчивое развитие, экологическое просвещение, экологическое путешествие, экологические туры, природный туризм, охрана природы

**Для цитирования:** Усольцева А.Н. Зарубежный и российский опыт организации экологического туризма на особо охраняемых природных территориях // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. 2022. № 1. С. 80–89.

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

Original article

## FOREIGN AND RUSSIAN EXPERIENCE IN ORGANIZING ECOLOGICAL TOURISM IN PROTECTED AREAS

**Anastasia N. Usoltseva**

Tyumen State University, Tyumen  
e-mail: entrada2009@mail.ru

**Abstract.** Among the various types of tourism, eco-tourism is currently gaining more and more popularity in both developed and developing countries. Especially tourists are attracted by trips to natural places that have been preserved in the best natural condition. To date, such territories are specially protected natural areas (protected areas). Researchers from many countries in the field of eco-tourism still continue to discuss the possibility or impossibility of achieving a form of tourism that can comply with the principles of the global concept of sustainable development. The experience of achieving best practices is most common in those countries where certain specific principles of eco-tourism are being implemented. The article considers the experience of organizing ecological tourism in specially protected natural territories of various regions of the world. In the course of the study, European, American and Russian models of eco-tourism were analyzed using specific examples, which made it possible to identify similarities and differences between trips to natural reserves of different countries of the world and the peculiarities of organizing eco-tours. The considered foreign

© Усольцева А.Н., 2022

and Russian experience of eco-tourism in protected areas may be interesting and useful to territories that plan or seek to create a foundation for the development of ecotourism in protected areas.

**Keywords:** ecological tourism, specially protected natural areas, eco-tourism concept, foreign experience, sustainable development, environmental education, ecological travel, ecological tours, nature tourism, nature protection

**For citation:** Usoltseva A.N. Foreign and Russian Experience in Organizing Ecological Tourism in Protected Areas. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2022;(1):80-89. (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

Согласно данным Всемирной туристской организации (ВТО), экологический туризм растет примерно на 25–30 % в год и имеет достаточно высокий потенциал для дальнейшего развития. В настоящее время существует много подходов, которые показывают высокий интерес к изучению различных аспектов экологического туризма. Концепция экологического туризма считается одним из самых приемлемых и устойчивых подходов к сохранению и развитию экосистем и биоразнообразия, устойчивому развитию, а также поддержке местных народов и их культуры. Исследователи многих стран мира в области экологического туризма до сих пор продолжают дискутировать о возможности или невозможности достижения той формы туризма, которая может соответствовать принципам глобальной концепции устойчивого развития. Опыт достижения лучшей практики наиболее распространен в тех странах, в которых внедряются те или иные конкретные принципы экотуризма [1].

Global Wildlife Travel Index (Глобальный индекс путешествий по дикой природе) в 2019 г. опубликовал рейтинг стран, которые выделяются путешествиями по дикой природе. В основу оценки были взяты следующие критерии: видовое разнообразие флоры и фауны, объем лесных ресурсов, количество охраняемых природных зон, национальных парков. Также оценивались экологическое просвещение и экологическая устойчивость территории. В результате проведенного исследования рейтинг возглавили Финляндия, Швеция, Бразилия, Канада, США, Норвегия, Испания, Германия, Польша, Словения, Италия, Венесуэла, Словакия, Россия, Франция, Австралия, Коста-Рика, Латвия, Эстония, Свазиленд, Чехия, Румыния, Замбия, Греция, Мексика, Намибия, Парагвай, Монголия, Австрия и Япония [2].

## Материалы исследования и результаты

Большинство различных стран мира не только обладают существенным ресурсным потенциалом, но и проводят активную политику по планированию, регулированию, поддержке, продвижению и мониторингу экологического туризма на особо охраняемых природных территориях (ООПТ), опираясь на международные рекомендации по устойчивому развитию [1].

Рассматривая историю становления экологического туризма в Зарубежной Европе, стоит подчеркнуть, что первые охраняемые территории появились еще в Средневековье. Примером может служить лесной массив Нью-Форест в Южной Англии, который объявил заповедным охотничьим угодьем еще в 1079 г. король Вильгельм I. Но если говорить об охраняемых территориях в современном научном понимании, то они появились гораздо позже [3].

В начале XX в. европейцы осознавали необходимость создания резерватов для охраны дикой природы, и в 1909 г. на территории Европы (в Швеции) были созданы первые национальные парки «Сарек» и «Стура-Шёфаллет». В период между двумя мировыми войнами возникли национальные парки в Польше, Чехословакии, Италии, Исландии, Болгарии, Румынии. После Второй мировой войны деятельность по охране дикой природы активизировалась. Важную роль сыграли большой ущерб, нанесенный войной природе Зарубежной Европы, и общее ухудшение экологической ситуации континента. В целом особенностью формирования системы ООПТ в Зарубежной Европе является то, что она развивалась на фоне практически полностью освоенного, густонаселенного ландшафта, этим и определяется их специфика: во-первых, разбросанность по территории; во-вторых, наличие не естественных, а производственных и полупроизводственных экосистем; в-третьих, небольшие размеры [1, 4].

Европейское агентство по окружающей среде в рамках Европейской сети экологической информации и наблюдения (Eionet) опубликовало информацию об ООПТ европейских стран. По новым данным, на 52 страны Зарубежной Европы приходится более 120 тыс. ООПТ разных категорий, их общая площадь составляет около 21 % от общей площади этих стран. Охраняемые территории в Зарубежной

Европе охватывают 11 различных биогеографических регионов: от арктических пустынь и бореальных хвойных лесов до засушливых степных зон. Размер охраняемых природных территорий достаточно различен и может достигать более 97 млн га (Гренландия) [5]. По количеству разных категорий ООПТ на данный момент лидируют следующие страны Зарубежной Европы: ФРГ, Великобритания, Австрия, Испания, Италия, Швеция, Швейцария, Норвегия, Польша, Франция, Финляндия, Нидерланды, Дания.

В рейтинге самых посещаемых мест в странах Зарубежной Европы среди экотуристов было выделено 49 ООПТ в Германии, Великобритании, Австрии, Финляндии, Швеции и Норвегии. В табл. 1 приведены некоторые из этих территорий, которые пользуются большой популярностью у экотуристов.

Таблица 1 / Table 1

**Рейтинг ООПТ стран Зарубежной Европы, наиболее значимых для организации экологического туризма (составлено автором) / Rating of protected areas in foreign Europe the most important for the organization of ecological tourism (compiled by the author)**

| Страна         | Название ООПТ, значимых для экологического туризма | Направление экологического туризма  |
|----------------|--|---|
| Германия       | National Park Müritz                               | Активно-рекреационное (оздоровительное) – пляжно-купальный отдых; водные прогулки (каное); велосипедные прогулки; пешие прогулки.<br>Научно-познавательное – фотосафари; эколого-географические туры для экопросвещения туристов.<br>Пассивно-рекреационное – рыбалка; сбор грибов  |
| Великобритания | Yorkshire Dales National Park                      | Активно-рекреационное (оздоровительное) – пешие прогулки; железнодорожные туры; велосипедные прогулки; конные прогулки; водные прогулки (на байдарках, каное); каякинг; виндсерфинг; яхтинг; пляжно-купальный отдых.<br>Научно-познавательное – историко-археологические туры; эколого-культурные туры; эколого-этнографические туры; наблюдение за флорой и фауной.<br>Пассивное-рекреационное – гастрономические туры |
| Австрия        | National Park Gesäuse                              | Активно-рекреационное (оздоровительное) – пешие прогулки; скалолазание; рафтинг; каньонинг; водные прогулки (на каное, байдарках); конные прогулки; спелеотуризм; лыжные прогулки; прогулки на снегоступах; санные прогулки.<br>Научно-познавательное – наблюдение за флорой и фауной; эколого-географические туры.<br>Пассивное-рекреационное – сбор грибов; рыбалка; кемпинг  |
| Финляндия      | Nuukсион kansallispuisto                           | Активно-рекреационное (оздоровительное) – пешие прогулки; скалолазание; ледолазание; прогулки на лыжах; водные прогулки (на каное); прогулки на коньках; пляжно-купальный отдых; конные прогулки; велосипедные прогулки.<br>Научно-познавательное – бёрдвотчинг; наблюдение за флорой и фауной; эколого-географические туры; эколого-культурные туры.<br>Пассивное-рекреационное – рыбалка; сбор ягод и грибов          |
| Швеция         | Abisko National Park                               | Активно-рекреационное (оздоровительное) – пешие прогулки; прогулки на снегоступах; прогулки на снегоходах; катание на собачьих упряжках; прогулки на лыжах.<br>Научно-познавательное – наблюдение за флорой и фауной; эколого-географические туры; эколого-культурные туры  |
| Норвегия       | Jotunheimen National Park                          | Активно-рекреационное (оздоровительное) – пешие прогулки; альпинизм; рафтинг; велосипедные прогулки; прогулки на снегоступах; прогулки на лыжах и сноубордах; катание на собачьих упряжках; конные прогулки; прогулки на санях.<br>Научно-познавательное – наблюдение за флорой и фауной; эколого-географические туры   |

В целом для ООПТ Зарубежной Европы наиболее распространенными направлениями экологического туризма являются эколого-географические и эколого-культурные туры с целью экопросвещения населения (50 %); пешие, велосипедные прогулки, прогулки на лыжах (30 %); водные прогулки (20 %); бёрдвотчинг (наблюдение за птицами) (10 %); кемпинг и рыбалка (4 %).

Из перечисленных стран стоит выделить экологический туризм в Германии, которая стала первым государством, обратившим внимание жителей на необходимость охраны, защиты и бережного отношения к природе. Начало зарождения немецкого экотуризма связывают с Королевским озером, которое находится на территории национального парка «Берхтесгаден». Это чистое горное озеро привлекало туристов с самых давних времен. В настоящее время Королевское озеро (Königssee) является одним из самых популярных мест среди туристов, вокруг него расположен национальный парк, где можно остановиться посетителям. Из особенностей стоит подчеркнуть то, что передвижение по озеру происходит практически бесшумно, так как туристам в аренду сдаются лодки с маленькими электродвигателями, это не нарушает покой флоры и фауны. Именно поэтому туристская индустрия практически не наносит вреда экологии, несмотря на значительный поток путешественников [6].

Сейчас немецкий экотуризм превращается в одну из важнейших отраслей страны. Подобная тенденция позволяет получить значительный и социальный, и экономический эффект. Например, компания Deutsche Bahn начала организацию пешеходных и велосипедных экскурсий по заповедникам Германии. В частности, программа «Маршрут – природа» включает 17 заповедников и национальных парков, которые турист посещает в период своего путешествия. Еще одним примером является созданная Федеральным ведомством по окружающей среде Германии туристическая марка Viabono. Вместе с федеральным министерством создали добровольное объединение квартир, отелей и кемпингов, а также ресторанов и туристических коммун Германии для развития устойчивого туризма и охраны природы. В целом стоит отметить, что Германия – одна из немногих стран мира, которые в настоящее время активно пропагандируют охрану и защиту природы, а также развитие устойчивого экотуризма [6].

Экологический туризм в Австрии можно проанализировать на примере национального парка «Гезойзе», который в настоящее время принимает участие во многих современных экологических программах и проектах. Интересным с точки зрения экотуризма на территории парка является то, что там проводятся программы для школьников и студентов на открытом воздухе, предполагающие интенсивный диалог между учащимися и полностью подготовленными зрителями парка, а также использование игровых дидактических методов, активно вовлекающих в эти программы и помогающие понять концепцию национального парка. В качестве примера можно привести программу Journey into the microcosm, в которой можно погрузиться в увлекательный мир водных и почвенных организмов с помощью экспертных инструкций опытных сотрудников парка. Популярен в национальном парке «Гезойзе» и альпинизм. На территории была создана целая серия фристайловых восхождений разных уровней сложности. Более 50 % площади занимают леса, поэтому популярен пеший туризм в окружении нетронутой фауны и флоры. Здесь много велосипедных дорожек, популярны сплавы по реке Энс на байдарках и каноэ. Зимой можно кататься на лыжах с заходом в теплые альпийские хижины [7].

Нельзя не сказать о концепции развития экотуризма в Финляндии, которая заняла в рейтинге Глобального индекса путешествий по дикой природе первое место. В Финляндии насчитывается 17 заповедников и 39 национальных парков, в большинстве из которых осуществляется концепция экологического развития. Интересными с точки зрения экологического туризма ООПТ можно назвать национальные парки «Нууксио», «Теййо», «Реповеси» и Национальный парк им. Урхо Кекконена. На территории каждого из них проходят пешеходные и велосипедные маршруты протяженностью несколько десятков и сотен километров, также летом возможна рыбалка в водоемах по определенным правилам и водные походы на каноэ и весельных лодках. Зимой можно кататься на лыжах по оборудованным лыжным маршрутам либо прогуляться на снегоступах [8].

Особого внимания заслуживает Швеция, это первая страна в Зарубежной Европе, которая ввела в 2002 г. экологическую сертификацию Nature's Best, которая сейчас известна за пределами Швеции. В настоящее время экологическая сертификация важна для проведения концепции устойчивого развития экологического туризма, так как экологический сертификат является залогом выполнения основных принципов экотуризма и своеобразным знаком качества. Важно, что при бронировании любой подобной поездки у туроператоров Nature's Best будет соблюдаться строгий кодекс поведения и будет внесен вклад в защиту окружающей среды в районе тура [9, 10]. С каждым годом Швеция привлекает все больше экотуристов. Провинции Верmland и Вестманланд популярны для любителей рыбалки, пеших прогулок, сплавов по рекам и велотуризма. В Лапландии проходит пеший маршрут под названием «Королевская тропа» длиной 425 км, распространен велотуризм, зимой – катание на лыжах или оленьей упряжке [11].

Швеция богата ООПТ, в частности, насчитывается 30 национальных парков, более 4000 заповедников, более 7000 охраняемых районов обитания на лесных землях и около 107 других охраняемых зон среды обитания, в большинстве которых набирает популярность экологический туризм [12].

В целом можно сделать вывод о том, что концепция развития экологического туризма в Зарубежной Европе имеет самые большие перспективы. Во-первых, стоит отметить, что природа данного региона высокоаттрактивна вследствие широкой дифференциации природных условий. Все рассмотренные страны отличаются климатическими особенностями, рельефом, наличием разнообразных водных объектов, также страны находятся в разных природных зонах, соответственно, виды флоры и фауны также различаются. Во-вторых, история европейских стран достаточно сложная, именно поэтому многие ООПТ обладают и объектами историко-культурного наследия [13].

Анализируя регион Северной Америки, необходимо добавить, что, опираясь на систему туристско-рекреационного районирования Ю.Д. Дмитриевского, в регионе в туристском отношении выделяется не весь материк, а только Канада и США [14]. Уровень туризма в США и Канаде достаточно высок в силу того, что они обладают благоприятными природными условиями (особенно США), богатыми рекреационными ресурсами, высоким уровнем развития экономики и доходов населения. Здесь выделяется достаточно много типов рекреационных территорий, но особенно стоит отметить различные ООПТ, такие как национальные парки, специальные природные парки, зоны отдыха (разного уровня подчинения), заповедники и национальные морские побережья [13]. Большая часть ООПТ Канады и США получили всемирную известность и пользуются спросом как у местных жителей, так и у туристов из всех стран и регионов мира (табл. 2) [6].

В настоящее время в США насчитывается около 1 500 ООПТ, их общая площадь превышает 104 млн га. Из категорий ООПТ выделяется 394 природных резервата, 70 памятников природы, 451 заповедник и 176 национальных парков. Сеть национальных парков США является основой экологического туризма страны и служит главным механизмом сохранения природного и культурного наследия страны [6, 15].

Практически все ООПТ США активно развивают концепцию экологического туризма и пользуются большой популярностью. Особенности североамериканского развития экологического туризма можно увидеть на ярком примере самого знаменитого Йеллоустонского (Yellowstone) национального парка, который считается самым первым в мире национальным парком и был основан в 1872 г. [16].

Таблица 2 / Table 2

**Рейтинг ООПТ стран Северной Америки, наиболее значимых для организации экологического туризма (составлено автором) / Rating of protected areas in North America most significant for the organization of ecological tourism (compiled by the author)**

| Страна | Название ООПТ, значимых для экологического туризма | Направление экологического туризма  |
|--------|--|---|
| США    | Yellowstone National Park                          | Активно-рекреационное (оздоровительное) – пешие прогулки; прогулки на лыжах; прогулки на снегоступах; прогулки на снегоходах; водные прогулки (на безмоторных лодках); велосипедные прогулки; конные прогулки.<br>Научно-познавательное – наблюдение за флорой и фауной; фотосафари; эколого-географические туры.<br>Пассивное-рекреационное – рыбалка; кемпинг   |
|        | Arbor Hills Nature Preserve                        | Активно-рекреационное (оздоровительное) – пешие прогулки; велосипедные прогулки; водные прогулки (на безмоторных лодках).<br>Научно-познавательное – бёрдвотчинг; наблюдение за флорой и фауной; эколого-географические туры.<br>Пассивное-рекреационное – кемпинг  |
| Канада | Riding Mountain National Park                      | Активно-рекреационное (оздоровительное) – пешие прогулки; велосипедные прогулки; конные прогулки; прогулки на лыжах; прогулки на снегоступах; прогулки на снегоходах.<br>Научно-познавательное – наблюдение за флорой и фауной; эколого-географические туры; эколого-этнографические туры; эколого-культурные туры.<br>Пассивное-рекреационное – кемпинг; рыбалка |
|        | Laurentides Wildlife Reserve                       | Активно-рекреационное (оздоровительное) – пешие прогулки; прогулки на лыжах; конные прогулки; рафтинг; велосипедные прогулки.<br>Научно-познавательное – наблюдение за флорой и фауной; эколого-географические туры; гидрологические туры.<br>Пассивное-рекреационное – кемпинг; рыбалка  |

Изучая концепцию развития экотуризма в Канаде, стоит подчеркнуть, что это страна с огромной площадью, которая обладает недостаточно использованными рекреационными ресурсами и во многом нетронутой уникальной природой, за исключением Приозерного района. Канада также имеет большое количество ООПТ, которые занимают около 40 % всей территории страны [13].

Привлекательность Канады и США для развития экотуризма заключается в следующих особенностях: обширные уникальные ландшафты и нетронутые районы; большая система охраняемых территорий, которые включают в себя исторические объекты, объекты Всемирного наследия ЮНЕСКО, морские заповедные зоны, репрезентативные экосистемы и биосферные заповедники. В рейтинге наиболее посещаемых территорий США и Канады лидирует двадцать две ООПТ, в табл. 2 приведены ООПТ, самые популярные среди экотуристов места. В целом опыт развития концепции экологического туризма этих стран построен вокруг следующих видов деятельности:

- наблюдение за природой/культурой, айсбергами или северным сиянием, уникальной флорой и фауной, а также за аборигенной природной и культурной средой, фототуризм;

- пешие и альпинистские экспедиции, скалолазание, езда по тропам на велосипеде, сухопутные сафари;

- водный туризм, гребля на каноэ, морской каякинг, речной каякинг и рафтинг, парусный спорт, подводное плавание, экспедиционные (береговые) круизы, спортивная и любительская рыбалка;

- катание на лыжах, катание на собачьих упряжках, прогулки на снегоступах, ледолазание, зимние походы [2, 9].

Исследуя отечественный опыт, нужно отметить, что Россия считается наиболее перспективной страной для развития экологического туризма благодаря природным условиям и интересным культурно-историческим объектам. По прогнозам ВТО, экологический туризм в России – это одно из приоритетных направлений развития внутреннего и въездного туризма. Вследствие неразвитой туристской инфраструктуры сохраняется нереализованный потенциал использования ООПТ регионального значения для развития экотуризма. В распоряжении Правительства РФ от 20.09.2019 № 2129-р «О Стратегии развития туризма в РФ на период до 2035 года» предполагается разработка отдельной концепции развития экологического туризма в РФ на период до 2035 г.

В концепции развития экологического туризма важно обосновать переход к модели экологического туризма как комплексному направлению, которое будет обеспечивать взаимосвязь туризма, экологии и культуры, а также представляющему современный подход к организации экологического туризма на ООПТ, прежде всего национальных парков, в целях обеспечения их устойчивого развития за счет создания условий для комплексного взаимодействия инвестиционной, туристской (в том числе научно-познавательной и рекреационной) и социальной деятельности с учетом природоохранной, ландшафтной специфики и антропогенной нагрузки на территорию [17].

Сейчас в России насчитывается 35 национальных парков (общей площадью 6,9 млн га), 28 памятников природы федерального значения (28,9 тыс. га), 102 государственных природных заповедника (33,7 млн га), 69 государственных природных заказников федерального значения (12 775 тыс. га) [18]. ООПТ, в частности национальные парки и природные заповедники, привлекают туристов нетронутой уникальной природой и историко-культурным наследием, что является движущим фактором развития экотуризма, но в то же время большинство российских туристов пока мало представляют, чем экологический туризм отличается от обычного отдыха на природе. Иностранцы заинтересованы в экотуристских программах больше, но, как правило, для них устанавливают очень высокую стоимость на экотуры. Главной целью классических экологических туров в первую очередь является экологическое просвещение туристов, знакомство с историческим прошлым населяющих регион народов. Экотуры могут включать и элементы активного туризма с проживанием в палатках, и размещение в домах отдыха, на турбазах. Другой целью экотуров является способствование развитию местной экономики [19].

Далее рассмотрим концепцию развития экологического туризма на конкретных примерах ООПТ РФ. В целом абсолютно положительных примеров развития экотуризма в России не так много. Скорее можно говорить об успешной реализации тех или иных конкретных принципов экотуризма, как отмечают Е.И. Арсеньева и А.С. Кусков [20, 21]. Всего в рейтинге было выделено 12 ООПТ не только с развитой концепцией экологического туризма, но и наиболее популярных среди иностранных и российских экотуристов. В качестве примера в табл. 3 приведены шесть таких охраняемых природных территорий.

В северо-западной части России стоит выделить природный заповедник «Кивач», один из самых старейших заповедников России и первый в Республике Карелия, в котором прослеживается большой потенциал для развития экологического туризма. Сейчас в заповеднике «Кивач» проложены три экологические тропы разной тематической направленности, которые позволяют туристам ознакомиться с удивительными формами рельефа и представителями флоры и фауны заповедника. Все экотропы односторонние, пешие, с различной сложностью прохождения и продолжительностью.

Таблица 3 / Table 3

**Рейтинг ООПТ России, наиболее значимых для организации экологического туризма (составлено автором) / Rating of protected areas in Russia most significant for the organization of ecological tourism (compiled by the author)**

| Название ООПТ, значимых для экологического туризма          | Направление экологического туризма  |
|---|---|
| Природный заповедник «Кивач»                                | Активно-рекреационное (оздоровительное) – пешие прогулки.<br>Научно-познавательное – наблюдение за флорой и фауной;<br>эколого-географические туры; биологические туры; эколого-культурные туры.<br>Пассивное-рекреационное – кемпинг [22]  |
| Байкальский государственный природный биосферный заповедник | Активно-рекреационное (оздоровительное) – пешие прогулки; прогулки на лыжах; водные прогулки (на безмоторных лодках);<br>Научно-познавательное – наблюдение за флорой и фауной; бёрдвотчинг;<br>геологические туры; ботанические туры; этнографические туры; эколого-географические туры; эколого-культурные туры.<br>Пассивное-рекреационное – кемпинг |
| Кроноцкий природный биосферный заповедник                   | Активно-рекреационное (оздоровительное) – пешие прогулки; прогулки на снегоходах; прогулки на лыжах; водные прогулки.<br>Научно-познавательное – наблюдение за флорой и фауной; вэйлвотчинг; бёрдвотчинг; эколого-географические туры; эколого-культурные туры; геологические туры; биологические туры  |
| Природный заповедник «Верхне-Тазовский»                     | Активно-рекреационное (оздоровительное) – пешие прогулки; водные прогулки (на лодках); прогулки на снегоходах; прогулки на лыжах.<br>Научно-познавательное – наблюдение за флорой и фауной;<br>эколого-географические туры; эколого-культурные туры;<br>эколого-этнографические туры; историко-археологические туры                                     |
| Природный заповедник «Тигирекский»                          | Активно-рекреационное (оздоровительное) – пешие прогулки; конные прогулки; водные прогулки.<br>Научно-познавательное – агрономические туры; наблюдение за флорой и фауной;<br>эколого-географические туры; эколого-культурные туры.<br>Пассивное-рекреационное – рыбалка; кемпинг   |
| Кавказский природный биосферный заповедник                  | Активно-рекреационное (оздоровительное) – пешие прогулки; конные прогулки; прогулки на снегоходах; прогулки на лыжах; прогулки на снегоходах; катание на собачьих упряжках.<br>Научно-познавательное – наблюдение за флорой и фауной;<br>эколого-культурные туры; историко-археологические туры.<br>Пассивное-рекреационное – кемпинг                   |

Нельзя не согласиться с Н.В. Тихомировым, который отмечает, что большим потенциалом для развития экологического туризма обладают ООПТ сибирских регионов, особенно выделяется Алтай. Из ярких примеров развития экотуризма можно отметить государственный природный заповедник «Тигирекский», расположенный в юго-западной части Алтайского края. Сейчас в заповеднике проложено четыре экологических маршрута, самый продолжительный из них составляет четыре дня, протяженность – около 70 км. Интересно, что передвигаться по маршруту можно как пешком, так и верхом на лошади. В ходе маршрута можно познакомиться с флорой и фауной заповедника, основными достопримечательностями, наблюдать высотную поясность [23].

Один из самых ярких примеров развития экологического туризма России представляет озеро Байкал, значительная часть побережий которого является ООПТ. В первую очередь стоит отметить Байкальский государственный природный биосферный заповедник в центральной части горного хребта



Хамар-Дабан. Сейчас в разработке находятся две специальные программы: познавательная программа с элементами анимации на тропе «Кедровая аллея» и программа научно-познавательного туризма (орнитология, ботаника, геология), которые будут интересны как для взрослых, так и для детей. Разработано два эколого-познавательных тура для групп продолжительностью от 6 ч до нескольких дней. Маршруты проходят по подготовленным, маркированным тропам с оборудованными местами стоянок.

В целом многие ООПТ данного региона пропагандируют развитие экологического туризма, среди них Баргузинский государственный природный биосферный заповедник, Забайкальский национальный парк, Байкало-Ленский государственный природный заповедник, Прибайкальский национальный парк и многие другие [23].

Необходимо отметить еще один немаловажный регион России – полуостров Камчатка, который обладает уникальной природой и большим количеством ООПТ. Нельзя не согласиться с Н.В. Тихомировым, что наибольшее развитие экологический туризм здесь получил в Кроноцком государственном природном биосферном заповеднике. Вообще здесь развивают особый вид туризма – познавательный, экологически ответственный, устойчивый, так как в туризме задействовано всего 0,05 % территории заповедника [23].

### Заключение

Экологический туризм на ООПТ в настоящее время набирает обороты практически в каждом регионе мира. Рассмотрев европейскую, североамериканскую и российскую модели экологического туризма, можно сделать вывод, что есть различия в степени развития, видах и направленности экотуров. Североамериканская модель экотуризма отличается тем, что самые первые путешествия были организованы в преимущественно ненарушенные территории. Сейчас эта тенденция сохраняется, и большую популярность у туристов в настоящее время набирают рекреационные (оздоровительные) экотуры – 60 %, научно-познавательные экотуры составляют около 40 % всех туристических поездок.

Европейская модель экотуризма первоначально была реализована в культурном ландшафте, для поддержания этого же ландшафта – в концепции мягкого туризма. Сейчас одним из приоритетов европейского экотуризма является сохранение культурного и природного наследия региона, а также экологическое просвещение. Именно поэтому в настоящее время европейские ООПТ принимают туристов чаще с научно-познавательными целями, которые составляют более 60 % всех экопутешествий.

Российская модель экотуризма в настоящее время находится на стадии становления и развития вследствие экономических трудностей, недостаточной развитости дорожной, транспортной, коммуникационной и туристской инфраструктуры регионов, специфики российской системы ООПТ. Также стоит отметить, что недостатком организации экотуризма является слабый уровень образовательного аспекта. Так, экоэкскурсия или экотур часто оказываются нацелены только на демонстрацию достопримечательностей, а не на изучение экологических проблем и активное участие в их решении.

Несмотря на это, Россия наравне с Зарубежной Европой и Северной Америкой считается перспективной страной для развития экологического туризма. В настоящее время наиболее значимыми регионами для развития экотуризма в России являются Алтайский край, район озера Байкал, Камчатский край, Северный Кавказ и территория Северо-Западного федерального округа. Высокая значимость экотуризма и его перспективность должны оцениваться не только научными сотрудниками, но и российскими властями. Продуманные и грамотно реализованные концепции развития экологического туризма на ООПТ будут не только привлекать иностранных туристов и решать социально-экономические проблемы страны, но и помогать сохранять уникальное природное наследие и природные комплексы страны [18].

### Список источников

1. Максанова Л.Б.-Ж., Гусева Е.Ю., Оюнгерэл Б., Аюшеева С.Н., Мункуева В.Д. Международный опыт развития экотуризма: страновая специфика и общие подходы // Вестн. МГОУ. Естеств. науки. 2019. № 2. С. 54–66.
2. Benidickson J. Legal framework for protected areas: Canada // Guidelines for protected areas legislation. IUCN Environmental law and policy. 2011. URL: <https://dx.doi.org/10.2139/ssrn.2296254> (дата обращения: 20.09.2020).
3. Охраняемые природные территории в Зарубежной Европе. URL: <https://scicenter.online/mirovaya-geografiya-scicenter/ohranyaemye-prirodnyie-territorii-zarubejnoj-39345.html> (дата обращения: 08.12.2020).
4. Пименова Е.Л. Экологический туризм. Ижевск: Удмуртский ун-т, 2013. 87 с.

5. Покрищук Д.В. Особо охраняемые природные территории в Европе // Современная наука. 2017. № 1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/osobo-ohranyaemye-prirodnye-territorii-v-evrope> (дата обращения: 20.09.2021).
6. Никитин А.И., Фёдорова С.В. Экологический туризм в США // СтройМного. 2017. № 2 (7). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/ekologicheskij-turizm-v-ssha> (дата обращения: 06.12.2020).
7. Официальный сайт National park Gesäuse. URL: <https://www.nationalpark.co.at/> (дата обращения: 08.12.2020).
8. Национальные парки Финляндии. URL: <https://po-russki.nationalparks.fi/> (дата обращения: 20.09.2021).
9. Integration of Biodiversity and Tourism: Canada Case Study. Pamela Wight. January 2001. Avenue, Edmonton, Alberta, Canada. URL: [https://cbd.int/doc/nbsap/tourism/Canada \(Tourism\).pdf](https://cbd.int/doc/nbsap/tourism/Canada%20(Tourism).pdf) (дата обращения: 12.12.2021).
10. Global Wildlife Travel Index 2019. URL: <https://www.true.travel/global-wildlife-travel-index/> (дата обращения: 20.09.2021).
11. Логинова Н.Ю., Костоварова В.В., Чудайкина Г.М. Экологический туризм в России и странах Скандинавии // Сервис в России и за рубежом. 2016. № 2 (63). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/ekologicheskij-turizm-v-rossii-i-stranah-skandinavii> (дата обращения: 20.09.2021).
12. Швеция: экотуризм. URL: <https://www.atorus.ru/archive/newstof/new/19350.html> (дата обращения: 06.12.2020).
13. Кружалин В.И., Мироненко Н.С., Зигерн-Корн Н.В., Шабалина Н.В. География туризма. М.: Федеральное агентство по туризму, 2014. 336 с.
14. Дмитриевский Ю.Д. Туристские районы мира. Смоленск: СГУ, 2000. 224 с.
15. Максаковская Н.С., Максаковский Н.В. Опыт национальных парков США по сохранению наследия и организации туризма // Наследие и современность. 2019. № 4. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/opyt-natsionalnyh-parkov-ssha-po-sohraneniyu-naslediya-i-organizatsii-turizma> (дата обращения: 20.09.2021).
16. Официальный сайт Yellowstone National Park. URL: <https://www.yellowstonenationalpark.com> (дата обращения: 08.12.2020).
17. Распоряжение Правительства РФ от 20.09.2019. № 2129-р «О Стратегии развития туризма в РФ на период до 2035 года». URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/72661648/> (дата обращения: 20.02.2020).
18. Рындач М.А. Направления развития экологического туризма в России // Экономика: вчера, сегодня, завтра. 2017. Т. 7, № 6В. С. 231–242.
19. Миронова Н.И. Развитие экологического туризма в России // Сервис в России и за рубежом. 2009. № 4. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/razvitie-ekologicheskogo-turizma-v-rossii> (дата обращения: 06.12.2020).
20. Арсеньева Е.И., Кусков А.С. Развитие экотуризма в пределах особо охраняемых природных территорий России: мнение специалистов // Актуальные вопросы социально-экономического развития России в XXI в. Аспиранты и студенты в научном поиске: сб. науч. ст. Смоленск, 2005.
21. Бочкарева Т.В. Экотуризм: анализ существующего международного опыта. Владивосток: УРБЭКС-развитие, 2003. 90 с.
22. Бышок К.А., Сапунова Е.В., Пыхтина М.Г. Государственный заповедник «Кивач» как основа развития экологического туризма в Республике Карелия // Вопросы науки и образования. 2019. № 23 (71). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/gosudarstvennyy-zapovednik-kivach-kak-osnova-razvitiya-ekologicheskogo-turizma-v-respublike-kareliya> (дата обращения: 20.09.2021).
23. Тихомиров Н.В. Экологический туризм. Ярославль: ЯрГУ, 2007. 91 с.

## References

1. Maksanova L.B.-Zh., Guseva E.Yu., Oyungerel B., Ayusheeva S.N., Munkueva V.D. International experience of ecotourism development: country specifics and general approaches. *Vestn. MGOU. Estestv. nauki = Bulletin of the Moscow State Regional University. Natural Sciences*. 2019;(2):54–66. (In Russ.).
2. Benidickson J. Legal framework for protected areas: Canada. *Guidelines for protected areas legislation. IUCN Environmental law and policy*. 2011. Available from: <https://dx.doi.org/10.2139/ssrn.2296254> [Accessed 20th September 2020].
3. *Protected natural areas in Foreign Europe*. Available from: <https://scicenter.online/mirovaya-geografiya-scicenter/ohranyaemye-prirodnye-territorii-zarubejnoj-39345.html> [Accessed 12th December 2020]. (In Russ.).
4. Pimenova E.L. *Ecological tourism*. Izhevsk: Udmurt University Press; 2013. 87 p. (In Russ.).
5. Pokrishchuk D.V. Specially protected natural territories in Europe. *Sovremennaya nauka = Modern Science*. 2017;(1). Available from: <https://cyberleninka.ru/article/n/osobo-ohranyaemye-prirodnye-territorii-v-evrope> [Accessed 20th September 2020]. (In Russ.).
6. Nikitin A.I., Fedorova S.V. Ecological tourism in the USA. *StroyMnogo = Build A Lot*. 2017;(2). Available from: <https://cyberleninka.ru/article/n/ekologicheskij-turizm-v-ssha> [Accessed 6th December 2020]. (In Russ.).
7. *Official website of National Park Gesäuse*. Available from: <https://www.nationalpark.co.at/> [Accessed 8th December 2020].

8. *National Parks of Finland*. Available from: <https://po-russki.nationalparks.fi> [Accessed 20th September 2020]. (In Russ.).
9. *Integration of Biodiversity and Tourism: Canada Case Study*. Pamela Wight. January 2001. Avenue, Edmon-ton, Alberta, Canada. Available from: [https://cbd.int/doc/nbsap/tourism/Canada\(Tourism\).pdf](https://cbd.int/doc/nbsap/tourism/Canada(Tourism).pdf) com [Accessed 12th December 2021].
10. *Global Wildlife Travel Index 2019*. Available from: <https://www.true.travel/global-wildlife-travel-index/> [Ac-cessed 20th September 2020].
11. Loginova N.Yu., Kostovarova V.V., Chudaikina G.M. Ecological tourism in Russia and the Scandinavian coun-tries. *Servis v Rossii i za rubezhom = Services in Russia and Abroad*. 2016;(2). Available from: <https://cyberleninka.ru/article/n/ekologicheskii-turizm-v-rossii-i-stranah-skandinavii> [Accessed 20th September 2020]. (In Russ.).
12. *Sweden: ecotourism*. Available from: <https://www.atorus.ru/archive/newstof/new/19350.html> [Accessed 6th De-cember 2020]. (In Russ.).
13. Kruzhalin V.I., Mironenko N.S., Zigern-Korn N.V., Shabalina N.V. *Geography of tourism*. Moscow: Federal Agency for Tourism Press; 2014. 336 p. (In Russ.).
14. Dmitrevskiy Yu.D. *Tourist areas of the world*. Smolensk: SSU Press, 2000. 224 p. (In Russ.).
15. Maksakovskaya N.S., Maksakovskiy N.V. The experience of US national parks in preserving heritage and organ-izing tourism. *Nasledie i sovremennost' = Heritage and Modern Times*. 2019;(4). Available from: <https://cyber-leninka.ru/article/n/opyt-natsionalnyh-parkov-ssha-po-sohraneniyu-naslediya-i-organizatsii-turizma> [Accessed 20th Sep-tember 2020]. (In Russ.).
16. *Official website of Yellowstone National Park*. Available from: <https://www.yellowstonenationalpark.com> [Ac-cessed 8th December 2020].
17. *Decree of the Government of the Russian Federation dated September 9, 2019. No. 2129-r "On the Strategy of tourism development in the Russian Federation for the period up to 2035"*. Available from: [https://www.garant.ru/prod-ucts/ipo/prime/doc/72661648/](https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/72661648/) [Accessed 20th February 2020]. (In Russ.).
18. Ryndach M.A. Directions of development of ecological tourism in Russia. *Ekonomika: vchera, segodnya, zavtra = Economics: Yesterday, Today, Tomorrow*. 2017;7(6B):231-242. (In Russ.).
19. Mironova N.I. Development of ecological tourism in Russia. *Servis v Rossii i za rubezhom = Services in Russia and Abroad*. 2009;(4). Available from: <https://cyberleninka.ru/article/n/razvitie-ekologicheskogo-turizma-v-rossii> [Ac-cessed 6th December 2020]. (In Russ.).
20. Arsenyeva E.I., Kuskov A.S. Development of ecotourism within specially protected natural territories of Russia: opinion of specialists. *Topical issues of socio-economic development of Russia in the 21st century. Graduate students and students in scientific search*. Collection of scientific articles. Smolensk, 2005. (In Russ.).
21. Bochkareva T.V. *Ecotourism: analysis of existing international experience*. Vladivostok: URBEX-razvitie Publ.; 2003. 90 p. (In Russ.).
22. Byshok K.A., Sapunova E.V., Pykhtina M.G. The State reserve "Kivach" as a basis for the development of eco-logical tourism in the Republic of Karelia. *Voprosy nauki i obrazovaniya = Problems of Science and Education*. 2019;(23). Available from: <https://cyberleninka.ru/article/n/gosudarstvennyy-zapovednik-kivach-kak-osnova-razvitiya-ekologicheskogo-turizma-v-respublike-kareliya> [Accessed 20th September 2020]. (In Russ.).
23. Tikhomirov N.V. *Ecological tourism*. Yaroslavl: Yaroslavl State University Press; 2007. 91 p. (In Russ.).

### **Информация об авторе**

Усольцева А.Н. – аспирант, Институт наук о Земле.

### **Information about the author**

Usoltseva A.N. - Postgraduate, Institute of Earth Sciences.

Статья поступила в редакцию 25.10.2021; одобрена после рецензирования 10.11.2021; принята к публикации 16.03.2022.  
The article was submitted 25.10.2021; approved after reviewing 10.11.2021; accepted for publication 16.03.2022.

Научная статья

УДК 56:551.41+564.1

doi: 10.18522/1026-2237-2022-1-90-95

## КОНХИЛИОФАУНА ХАЗАРСКИХ КОМПЛЕКСОВ ДАГЕСТАНСКОГО ПОБЕРЕЖЬЯ КАСПИЯ

**Марина Владимировна Хлопкова<sup>1✉</sup>, Айша Шарапатовна Гасанова<sup>2</sup>,  
Каис Магомедович Гусейнов<sup>3</sup>**

<sup>1, 2, 3</sup>Прикаспийский институт биологических ресурсов Дагестанского федерального научного центра РАН,  
Махачкала, Республика Дагестан, Россия

<sup>2</sup>Махачкалинский филиал Московского автомобильно-дорожного государственного технического  
университета (МАДИ), Махачкала, Республика Дагестан, Россия

<sup>1</sup>hlopkovam@mail.ru✉

<sup>2, 3</sup>kais61@mail.ru

**Аннотация.** Проводилось исследование биокомплексов хазарских горизонтов дагестанского побережья Каспия и выявление фаунистических критериев воссоздания условий обитания палеобассейнов, что позволяет с большей достоверностью проводить реконструкции отдельных этапов позднего эоплейстоцена. При изучении хазарских отложений и содержащихся в них моллюсков применялись биостратиграфический и морфометрический методы исследований. Различные комплексы дидакн позволяют детально стратифицировать вмещающие их осадки. Изменения состава фауны по разрезу морских осадков связаны в основном с экологическими условиями и характером осадконакопления, что позволяет косвенно использовать смену разнофациальных комплексов в качестве периодизации отложений. В основе биостратиграфии каспийского позднего эоплейстоцена – эволюционные изменения и закономерности экологической смены сообществ моллюсков рода *Didacna Eichwald* в пространстве и времени. Исследование конхилиофауны хазарских горизонтов дагестанского района Каспия показало, что в комплексах представлены две группы моллюсков: *crassa* и *trigonoidea*, определены руководящие и характерные виды. Анализ распределения основных групп дидакн по разрезу, устойчивость их состава и межгрупповых различий указывает на высокую надежность расчленения по этому признаку каспийских отложений.

**Ключевые слова:** трансгрессии Каспийского моря, хазарские комплексы моллюсков, *Didacna Eichwald*

**Для цитирования:** Хлопкова М.В., Гасанова А.Ш., Гусейнов К.М. Конхилиофауна хазарских комплексов дагестанского побережья Каспия // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. 2022. № 1. С. 90–95.

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

Original article

## CONCHYLIOFAUNA OF KHAZAR COMPLEXES OF THE DAGESTAN COAST OF THE CASPIAN SEA

**Marina V. Khlopkova<sup>1✉</sup>, Aysha Sh. Gasanova<sup>2</sup>, Kais M. Guseynov<sup>3</sup>**

<sup>1, 2, 3</sup>Precaspian Institute of Biological Resources, Dagestan Scientific Center, Russian Academy of Sciences,  
Makhachkala, Republic of Dagestan, Russia

<sup>2</sup>Makhachkala branch, Moscow Automotive and Road State Technical University (MADI), Makhachkala,  
Republic of Dagestan, Russia

<sup>1</sup>hlopkovam@mail.ru✉

<sup>2, 3</sup>kais61@mail.ru

**Abstract.** The study of the biocomplexes of the Khazar horizons of the Dagestan coast of the Caspian Sea and the identification of faunal criteria for recreating the habitat conditions of paleobasins, which allows for more reliable reconstructions of individual stages of the Late Eopleistocene. Biostratigraphic and morphometric research methods were used to study the Khazar sediments and the mollusks contained in them. Various didacn complexes allow us to stratify the sediments containing them in detail. Changes in the composition of fauna in the section of marine sediments are mainly associated with environmental conditions and the nature of sedimentation, which allows us to indirectly use the change of different facies complexes as a periodization of sediments. The biostratigraphy of the Caspian Late Eopleistocene is based on evolutionary changes and patterns of ecological change in the communities of mollusks of the genus *Didacna* Eichwald in space and time. The study of the conchylofauna of the Khazar horizons of the Dagestan region of the Caspian Sea showed that two groups of crassa and trigonoides mollusks are mainly represented in the complexes, and the leading and characteristic species are identified. The analysis of the distribution of the main groups of didacnas by section, the stability of their composition and intergroup differences indicates a high reliability of the division of the Caspian sediments on this basis.

**Keywords:** transgressions of the Caspian Sea, Khazar mollusk complexes, *Didacna* Eichwald

**For citation:** Khlopko M.V., Gasanova A.Sh., Guseynov K.M. Conchylofauna of Khazar Complexes of the Dagestan Coast of the Caspian Sea. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2022;(1):90-95. (In Russ.).

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

Возможности использования раковин моллюсков для целей стратификации включающих их отложений заложены в широком временном и пространственном распространении конхилиофауны, различиях сменявшихся комплексов и зависимости от условий обитания [1–9]. Цель исследований – изучение биокомплексов хазарских отложений Каспия и выявление фаунистических критериев воссоздания условий обитания палеобассейнов, что позволяет проводить реконструкции отдельных этапов позднего эоплейстоцена.

### Методы исследований

Основной метод исследования – малакофаунистический, включающий изучение состава, биостратиграфического распределения, филогении моллюсков. При изучении хазарских отложений дагестанского побережья Каспия были исследованы разрезы этих осадков в долинах рек Шура-озень, Манас-озень, Черкес-озень, Ачи-су, речки Иргин, устья Манас-озень, берегов озер Турали (рис. 1). Исследовано более 600 раковин моллюсков согласно распространенным методикам [2, 3, 10], выявлена связь между фауной и фациальной изменчивостью вмещающих отложений.

### Результаты исследований

Состав и строение хазарских отложений Дагестана указывают, что море было мелководным, динамичным и хорошо аэрируемым бассейном. Раннехазарская трансгрессия развивалась тремя крупными стадиями, разделенными регрессиями. Нижнехазарский горизонт включает нижний, средний и верхний подгоризонты, охарактеризованные соответствующими фаунистическими комплексами [2, 3, 5]. В разрезе (№ 1) южного берега озера Малое Турали обнаружено 3 вида дидакн (рис. 2а). По доминированию тригоноидных дидакн *D. subpyramidata* мы отнесли эти отложения к нижнему подгоризонту раннехазарских отложений.

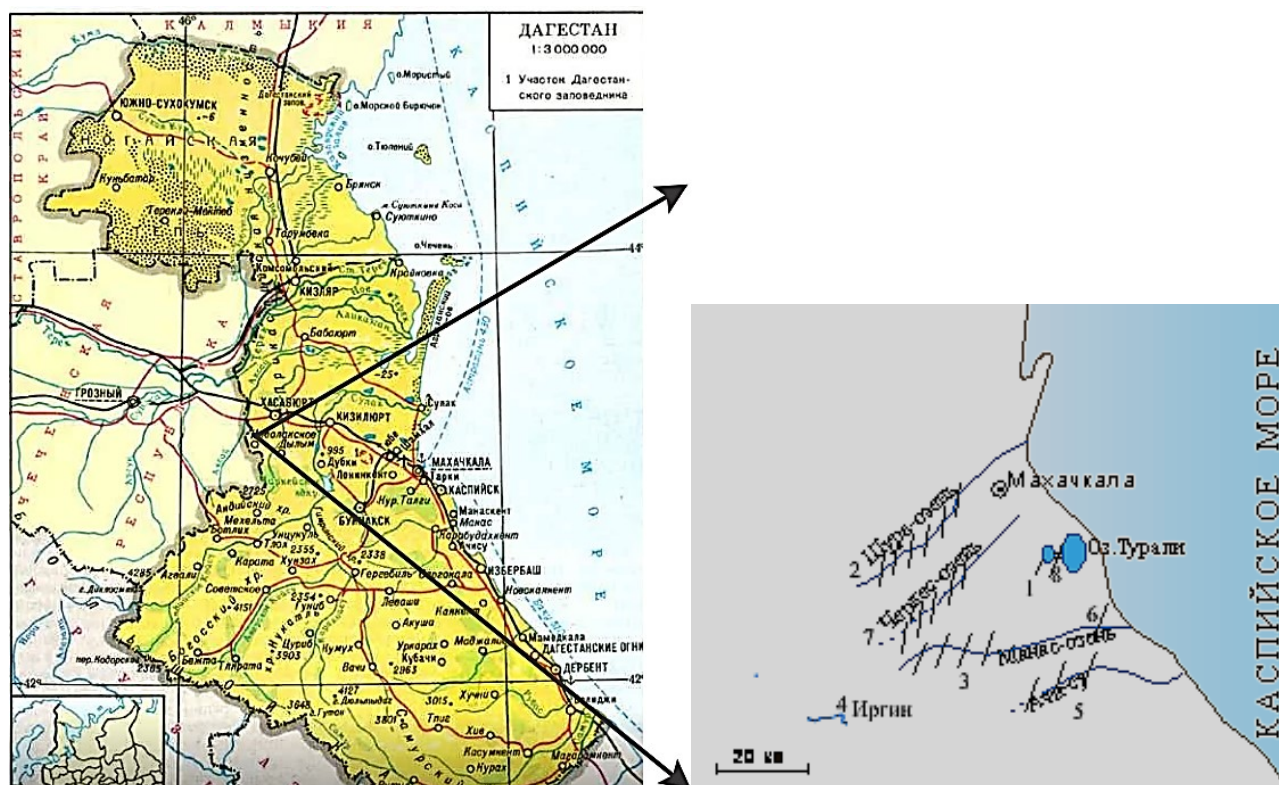
В долине реки Шура-озень (разрез № 2) (средний подгоризонт раннехазарских осадков) сборы фауны проводились в отложениях, выходящих по правому борту. Разрез вскрывает строение морской террасы абсолютной высотой 100 м. Под конгломератами и песками залегают нижнехазарские ржаво-желтые пески и супеси, с линзами раковин *Didacna crassa schuraosenica* Svit. et Tscern., этот вид доминирует в выборке, доля его составляет 73 % (рис. 2а). *Didacna crassa schuraosenica* – руководящий вид палеосообщества раннехазарских осадков Дагестана. К среднему подгоризонту раннехазарских осадков отнесены также разрезы реки Манас-озень и ручья Иргин, так как выявлено сходство состава фауны. Долина реки Манас-озень (разрез № 3) – в 0,3 км ниже шоссе Москва – Баку, в правом борту долины, под супесью вскрывается песок с прослоями раковин моллюсков. Обнаружено 6 видов: до-

минант *D. schuraosonica*, субдоминант *Dreissena rostriformis distincta*, реже встречаются *Dr. polymorpha*, *D. vulgaris*, единичные *Hypanis plicatus*. В разрезе ручья Иргин (№ 4) обнаружено 6 видов (рис. 2а).

Разрез (№ 5) долины реки Ачи-су отнесен нами к верхнему подгоризонту раннехазарских отложений. Под песками и супесями вскрывается гравийно-галечный конгломерат с прослоями детрита и целыми раковинами. Мощность отложений 1,5 м. Доминирует *Didacna paleotrigonoides Fed.* – 52 % (рис. 2а). Переход доминирования от крассоидных (в среднем подгоризонте: разрезы долин рек Шура-озень, Манас-озень, Иргин) к тригоноидным формам (в верхнем горизонте: Ачи-су) может свидетельствовать о существенном понижении солёности. На это указывает и то, что субдоминантом здесь является *Dr. polymorpha*.

*Верхнехазарский горизонт* разделяется на нижний и верхний подгоризонты, включающие соответственно ранний и поздний позднехазарские комплексы [1–3]. Отмечается закономерность доминирования *Didacna crassa nalivkini* в ранних отложениях позднехазарского бассейна Каспия и преобладание *D. surachanica* в поздних. Господство дидакн крассоидной группы, массивность и крупные размеры раковин свидетельствуют о хорошо аэрируемом и прогреваемом бассейне с повышенной солёностью. В разрезе (№ 6) устья реки Манас-озень (нижний подгоризонт позднехазарских отложений) обнаружено 3 вида (рис. 1б), среди которых доминирует *D. nalivkini* (55 %). В долине реки Черкес-озень (разрез № 7) доминирует *D. nalivkini*, частота встречаемости по слоям уменьшается с 70 до 61 %, второстепенные виды *D. surachanica*, *Dr. polymorpha*, *D. subpyramidata*. Появляется вид из группы *catillus* – *D. vulgaris* (рис. 1б). В разрезе № 8 восточного берега озера Малое Турали (верхний подгоризонт позднехазарских отложений) отмечено 4 вида (рис. 1б). Доминант – *D. surachanica*, субдоминант – *D. nalivkini*.

а/а



б/б

Рис. 1. Карта района исследования: а – дагестанское побережье Среднего Каспия; б – схема расположения разрезов: 1 – южный берег оз. Малые Турали; 2 – долина реки Шура-озень; 3 – долина реки Манас-озень; 4 – ручей Иргин; 5 – долина реки Ачи-су; 6 – устье р. Манас; 7 – долина реки Черкес-озень; 8 – восточный берег озера Малые Турали / Fig.1. Map of the research area: a - Dagestan coast of the Middle Caspian Sea; b - the layout of the sections: 1 - The Southern shore of lake Small Turali; 2 - the valley of the Shura-ozen river; 3 - the valley of the Manas-ozen river; 4 - the Yergin stream; 5 - the valley of the Achi-su river; 6 - the mouth of the Manas river; 7 - the valley of the Cherkess-Ozen river; 8 - The Eastern shore of the lake Small Turali

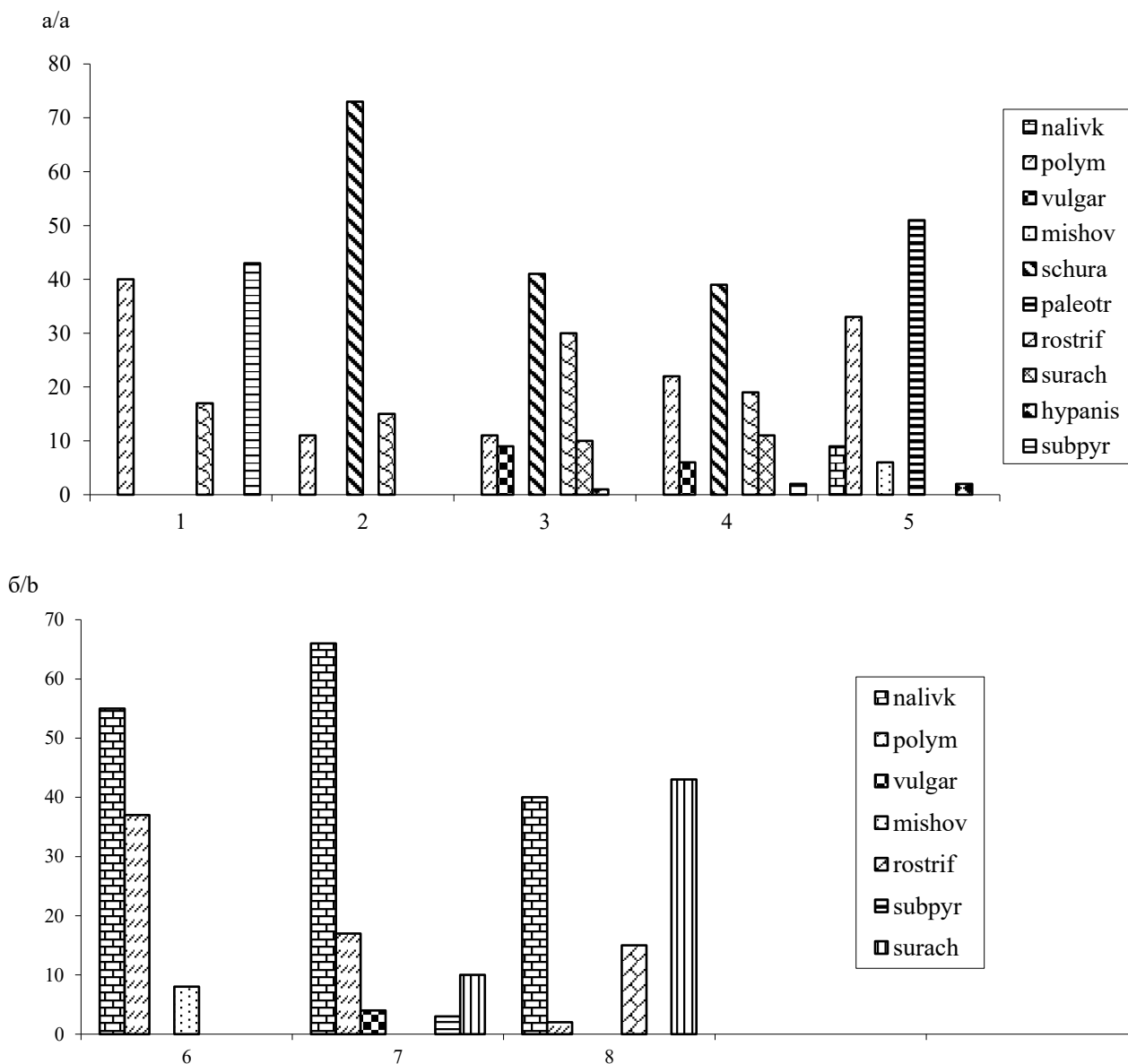


Рис. 2. Встречаемость двустворчатых моллюсков в раннехазарском горизонте (а); в позднехазарском горизонте (б). По оси абсцисс: разрезы 1 – южный берег оз. Малые Турали; 2 – долина реки Шура-озень; 3 – долина реки Манас-озень; 4 – ручей Иргин; 5 – Ачи-су; 6 – устье р. Манас; 7 – долина р. Черкес-озень; 8 – восточный берег оз. Малые Турали. По оси ординат: доля таксона в выборке моллюсков, %. Легенда – виды: *Didacna nalivekini* (nalivk); *Dreissena polymorpha* (polym); *Didacna vulgaris* (vulgar); *Didacna mishovdagica* (mishov); *Didacna schuraosonica* (schura); *Didacna paleotrigonoides* (paleotr); *Dreissena rostriformis* (rostrif); *Didacna surachanica* (surach); *Hypanis plicatus* (hypanis), *Didacna subpyramidata* (subpyr) / Fig. 2. Occurrence of bivalves in the early Khazar horizon (a); in the late Khazar horizon (b). Along the abscissa axis: sections 1 - The Southern shore of lake Small Turali; 2 - the valley of the Shura-ozen river; 3 - the valley of the Manas-ozen river; 4 - the Yergin stream; 5 - Achi-su; 6 - the mouth of the Manas River; 7 - the valley of the Cherkess-Ozen river; 8 - the Eastern shore of the lake. Small Turali. On the ordinate axis: the share of the taxon in the sample of mollusks, %. Legend - species: *Didacna nalivekini* (nalivk); *Didacna vulgaris* (vulgar); *Didacna mishovdagica* (mishov); *Didacna paleotrigonoides* (paleotr); *Didacna schuraosonica* (schura); *Didacna apsheronica* (apsheron); *Didacna subpyramidata* (subpyr); *Dreissena polymorpha* (polym); *Dreissena rostriformis* (rostrif); *Hypanis plicatus* (hypanis)

Если проследить распределение вышеупомянутых видов по подгоризонтам и разрезам, то можно отметить следующее. В нижнем подгоризонте раннехазарских отложений доминирует представитель тригоноидной группы *D. subpyramidata*. Представители группы *crassa* отсутствуют, что свидетельствует о пониженной солености. В среднем подгоризонте раннехазарских отложений руководящим видом является представитель крассоидной группы *D. schuraosonica*. Частота встречаемости в осад-

ках от нижнего до верхнего подгоризонта уменьшается от 73 до 39 %. Видовой состав моллюсков становится более разнообразным, отмечены представители групп *trigonoides* и *catillus*.

Таким образом, нижние и верхние подгоризонты позднехазарских отложений характеризуются сходным видовым составом, только доминант сменяет субдоминанта и наоборот, что свидетельствует о повышении температуры и солености. Кроме того, в верхних горизонтах позднехазарских отложений исчезают представители тригоноидной и катиллоидной групп.

Наиболее благоприятные условия для развития группы *trigonoides* были в нижнем подгоризонте раннехазарских отложений. Отсутствие группы *crassa* и *catillus* может свидетельствовать о пониженной солености.

Судя по распределению основных групп дидакн в среднем подгоризонте раннехазарского горизонта, в тот период условия были наиболее благоприятны для развития группы *crassa*. Современные представители этой группы *D. baeri* обитают на глубине при солености около 13 ‰ и умеренных температурах в Южном Каспии и на дагестанском побережье Каспия. Можно предположить, что в тот период в местах обитания моллюсков соленость была выше 13 ‰ и температура выше 6–12 °С. В угнетенном состоянии находились группы *trigonoides* и *catillus*.

В верхнем горизонте раннехазарских отложений доминирует тригоноидная группа. Численность крассоидной группы сократилась относительно тригоноидных, моллюски катиллоидной группы отсутствуют. Соленость уменьшилась, температура повысилась, следовательно, условия стали более благоприятны для тригоноидных дидакн. В современном Сулакском заливе обитают представители этой группы *Didacna trigonoides*, известно, что соленость там составляет 8–11 ‰. Исходя из этого, мы предполагаем, что в начале, а также в конце раннехазарской трансгрессии непродолжительное время соленость была несколько пониженной по сравнению со средним горизонтом, образующим мощные слои с крассоидной фауной, свидетельствующие о длительном периоде повышенной солености в море.

В нижнем и верхнем подгоризонтах позднехазарских отложений наблюдается расцвет крассоидных дидакн, тригоноидная группа фактически отсутствует. Представители группы *catillus* отмечены нами в трех разрезах среднего подгоризонта раннехазарских и нижнего подгоризонта позднехазарских отложений (рис 2а, б). Судя по встречаемости групп в среднем горизонте нижнехазарских и в двух горизонтах верхнехазарских отложений, условия обитания в них были сходными. В этих горизонтах доминирует группа *crassa*.

## Выводы

1. В комплексах представлены в основном две группы моллюсков: *crassa* и *trigonoides*. В нижнем подгоризонте руководящий вид – *D. subpyramidata*, в среднем подгоризонте руководящий вид – *D. schuraosenica*, а в верхнем подгоризонте раннехазарских отложений – *D. paleotrigonoides*. В позднехазарских отложениях доминируют крассоидные дидакны, также встречаются представители катиллоидной группы. На распределении групп дидакн сказывается изменение температуры и солености.

2. Форма раковин несколько трансформируется при переходе от одного типа грунта к другому (нижний хазар *D. shuraosenica* – верхний хазар *D. surachanica*, *D. nalivekini*). Соленость и температура изменились незначительно, но раковины близкородственных видов становятся более массивными, выпуклыми, с четкими приростами, что свидетельствует об изменении гидродинамических условий. Увеличение степени подвижности среды и огрубление грунта находят подтверждение в фациальных исследованиях.

3. Групповой состав *Didacna* изменялся в соответствии с трансгрессивно-регрессивным режимом Каспия. Полученные данные свидетельствуют об изменении условий обитания моллюсков и могут послужить основанием для более детальных палеорекоконструкций.

## Список источников

1. Абдурахманов Г.М., Хлопкова М.В. Реконструкция среды обитания в плейстоцене на основе фаунистического и морфометрического анализов дидакн как составляющая в исследовании уровня Каспия // Юг России. Экология, развитие. 2007. № 3. С. 32–39.
2. Янина Т.А. Неоплейстоцен Понто-Каспия: биоистратиграфия, палеогеография, корреляция. М.: МГУ, 2012. 264 с.



3. Янина Т.А., Хомченко Д.С. Моллюски рода *Didacna* – биостратиграфическая основа корреляции событий неоплейстоцена Понто-Каспия // Вісн. ОНУ. Географічні та геологічні науки. 2014. Т. 19, вип. 2. С. 188–201.
4. Yanina T., Sorokin V., Bezrodnyk, Y., Romanyuk B. Late Pleistocene climatic events reflected in the Caspian Sea geological history (based on drilling data) // Quaternary Int. 2018. № 465. P. 130–141. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2017.08.003>.
5. Yanina T.A. Ponto-Caspian and Mediterranean basins under conditions of the last glacial epoch // Limnology and Freshwater Biology. 2020. № 4. P. 536–537. Doi:10.31951/2658-3518-2020-A-4-536.
6. Svitoch A.A., Markova A.K., Yanina T. A. Stratigraphy and the small mammal fauna of the Late Pleistocene sections in the south of the middle reaches of the Volga River // Quaternary Int. 2020. № 540. P. 1–15.
7. Svitoch A.A., Makshaev R.R. Incompleteness of the geological record in Middle-Upper Pleistocene key sections of the Northern Caspian Lowland // Quaternary Int. 2020. № 540. P. 78–96.
8. Zastrozhnov A.S., Danukalova G.A., Golovachev M.V., Titov V.V., Osipova E.M., Simakova A.N., Yakovlev A., Yakovleva T., Aleksandrova G.N., Shevchenko A., Tesakov A.S., Sadikov E. Biostratigraphical investigations as a tool for palaeoenvironmental reconstruction of the neopleistocene (Middle-Upper Pleistocene) at Kosika, lower Volga, Russia // Quaternary Int. 2020. № 540. P. 38–67. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2018.11.036>.
9. Yanina T., Bolikhovskaya N., Sorokin V., Romanyuk B., Berdnikova A., Tkach N. Paleogeography of the Atelian regression in the Caspian Sea (based on drilling data) // Quaternary Int. 2021. № 590. P. 73–84.
10. Золотарев В.Н. Склерохронология морских двустворчатых моллюсков. Киев: Наукова думка, 1989. 112 с.

## References

1. Abdurakhmanov G. M., Khlopikova M. V. Reconstruction of the habitat in the Pleistocene on the basis of faunal and morphometric analyses of didacn, as a component in the study of the Caspian Sea level. *Yug Rossii: Ekologiya, razvitiye = South of Russia: Ecology, Development*. 2007;(3):32-39. (In Russ.).
2. Yanina T. A. *Neopleistocene of the Ponto-Caspian Sea: biostratigraphy, paleogeography, correlation*. Moscow: Moscow State University Press; 2012. 264 p. (In Russ.).
3. Yanina T. A., Khomchenko D. S. Genus *Didacna* molluscs - biostratigraphical basis of correlation of the Ponto-Caspian Sea Neopleistocene events. *Visnik ONU. Ser.: Geografichni ta geologichni nauki = Odessa National University. Geography and Geology*. 2014;19(2):188-201. (In Russ.).
4. Yanina T., Sorokin V., Bezrodnykh Y., Romanyuk B. Late Pleistocene climatic events reflected in the Caspian Sea geological history (based on drilling data). *Quaternary International*. 2018;(465):130-141. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2017.08.003>.
5. Yanina T. A. Ponto-Caspian and Mediterranean basins under conditions of the last glacial epoch. *Limnology and Freshwater Biology*. 2020;(4):536-537. Doi: 10.31951/2658-3518-2020-A-4-536.
6. Svitoch A.A., Markova A.K., Yanina T. A. Stratigraphy and the small mammal fauna of the Late Pleistocene sections in the south of the middle reaches of the Volga River. *Quaternary International*. 2020;(540):1-15.
7. Svitoch A.A., Makshaev R.R. Incompleteness of the geological record in Middle-Upper Pleistocene key sections of the Northern Caspian Lowland. *Quaternary International*. 2020;(540):78-96.
8. Zastrozhnov A.S., Danukalova G.A., Golovachev M.V., Titov V.V., Osipova E.M., Simakova A.N., Yakovlev A., Yakovleva T., Aleksandrova G.N., Shevchenko A., Tesakov A.S., Sadikov E. Biostratigraphical investigations as a tool for palaeoenvironmental reconstruction of the neopleistocene (Middle-Upper Pleistocene) at Kosika, lower Volga, Russia. *Quaternary International*. 2020;(540):38-67. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2018.11.036>.
9. Yanina T., Bolikhovskaya N., Sorokin V., Romanyuk B., Berdnikova A., Tkach N. Paleogeography of the Atelian regression in the Caspian Sea (based on drilling data). *Quaternary International*. 2021;(590):73-84.
10. Zolotarev V. N. *Sclerochronology of marine Bivalves*. Kiev: Naukova dumka Publ.; 1989. 112 p. (In Russ.).

## Информация об авторах

Хлопикова М.В. – кандидат биологических наук, научный сотрудник, лаборатория морской биологии.

Гасанова А.Ш. – кандидат биологических наук, доцент, старший научный сотрудник, доцент, лаборатория морской биологии.

Гусейнов К.М. – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, лаборатория морской биологии.

## Information about the authors

Khlopikova M.V. - Candidate of Science (Biology), Researcher, Marine Biology Laboratory.

Gasanova A.Sh. - Candidate of Science (Biology), Associate Professor, Senior Researcher, Associate Professor, Marine Biology Laboratory.

Guseynov K.M. - Candidate of Science (Biology), Senior Researcher, Marine Biology Laboratory.

Статья поступила в редакцию 13.09.2021; одобрена после рецензирования 16.09.2021; принята к публикации 16.03.2022.

The article was submitted 13.09.2021; approved after reviewing 16.09.2021; accepted for publication 16.03.2022.

Научная статья

УДК 581.524.1/552:504.73

doi: 10.18522/1026-2237-2022-1-96-106

## АЛЛЕЛОПАТИЧЕСКИЙ РЕЖИМ ПОЧВЫ ПОСЛЕ РАЗОВОЙ РЕКРЕАЦИОННОЙ НАГРУЗКИ В ЛЕСНЫХ ЭКОСИСТЕМАХ СОЧИНСКОГО ПРИЧЕРНОМОРЬЯ

**Виталий Георгиевич Щербина**

Филиал Института природно-технических систем в г. Сочи, Сочи, Краснодарский край, Россия

v.g.scherbina@bk.ru

**Аннотация.** Исследован аллелопатический режим почвы через сутки и 30 сут после моделируемого рекреационного воздействия в семи лесных экосистемах Сочинского Причерноморья с монодоминантным древостоем методом тестирования водных почвенных вытяжек. Определено, что разовые рекреационные нагрузки в анализируемых экосистемах сопровождаются ростом аллелопатической активности почвы. Заметное усиление фитотоксичности (16–66 %) регистрируется при нагрузке 2,78–4,17 чел/га. Большое рекреационное воздействие (6,25–8,33 чел/га) приводит к формированию тропиной сети, анаэробным условиям и ингибированию биотеста в диапазоне 0,8–1,0. Установлено, что через 30 сут после разового рекреационного воздействия активность почвы восстанавливается до контрольных значений только после нагрузки 1,39 чел/га. После нагрузки 2,78–4,17 чел/га отмечается всего лишь снижение фитотоксичности на 9–21 %. На участках после максимального воздействия (6,25–8,33 чел/га) фитотоксичность снижается ниже контрольных значений в экосистемах с доминированием *Fagus orientalis* L., *Quercus petraea* (Matt.) Liebl., *Quercus pubescens* Willd. и *Carpinus betulus* L., косвенно объясняя вероятность внедрения в эти сообщества вдоль троп, чуждых для лесных экосистем видов. Значительная активность почвы сохраняется в экосистемах с *Taxus baccata* L., *Castanea sativa* Mill. и *Vixus colchica* Pojark., объясняя их устойчивость к разовым рекреационным нагрузкам.

**Ключевые слова:** Сочинское Причерноморье, лесная экосистема, рекреационная нагрузка, плотность почвы, аллелопатическая активность

**Благодарности:** работа выполнена в рамках государственного задания по теме № АААА-А16-116012510144-6 «Совершенствование механизма управления природопользованием с целью обеспечения эколого-экономической безопасности функционирования индустрии туризма».

**Для цитирования:** Щербина В.Г. Аллелопатический режим почвы после разовой рекреационной нагрузки в лесных экосистемах Сочинского Причерноморья // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. 2022. № 1. С. 96–106.

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

Original article

## ALLELOPATHIC SOIL REGIME AFTER A ONE-TIME RECREATIONAL LOAD IN THE FOREST ECOSYSTEMS OF THE SOCHI BLACK SEA REGION

**Vitaliy G. Scherbina**

Branch of Institute of Natural and Technical Systems in Sochi, Sochi, Krasnodar Region, Russia

v.g.scherbina@bk.ru

© Щербина В.Г., 2022

**Abstract.** The method of testing water soil extracts was used to study the allelopathic regime of the soil one day and 30 days after the simulated recreational impact in seven forest ecosystems of the Sochi Black Sea region with a monodominant forest stand. It was determined that one-time recreational loads in the analyzed ecosystems are accompanied by an increase in allelopathic soil activity. A noticeable increase in phytotoxicity (16-66 %) is recorded at a load of 2.78-4.17 people/ha. Greater recreational impact (6.2-8.33 people/ha) leads to the formation of a path network, anaerobic conditions and inhibition of the biotest in the range 0.8-1.0. It was found that 30 days after a one-time recreational impact, soil activity is restored to control values only after a load of 1.39 people/ha. After a load of 2.78-4.17 people/ha, only a decrease in phytotoxicity by 9-21 % is observed. In areas after maximum exposure (6.25-8.33 people/ha), phytotoxicity decreases below control values in ecosystems dominated by *Fagus orientalis* L., *Quercus petraea* (Matt.) Liebl., *Quercus pubescens* Willd. and *Carpinus betulus* L., indirectly explaining the likelihood of introducing species alien to forest ecosystems along the trails. Significant soil activity persists in ecosystems with *Taxus baccata* L., *Castanea sativa* Mill., and *Buxus colchica* Pojark., explaining their resistance to one-time recreational loads.

**Keywords:** Sochi Black Sea region, forest ecosystem, recreational load, soil density, allelopathic activity

**Acknowledgments:** the work was carried out within the framework of the state task on the topic no. AAAA16-116012510144-6 "Improving the mechanism of environmental management in order to ensure the ecological and economic security of the functioning of the tourism industry".

**For citation:** Scherbina V.G. Allelopathic Soil Regime after a One-Time Recreational Load in the Forest Ecosystems of the Sochi Black Sea Region. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2022;(1):96-106. (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

Почва, выполняя в ценозах функцию ослабления влияния ингибирующих веществ, также является и их аккумулятором [1]. Процессы поглощения почвой колинов при ферментации корневых экссудатов в ризосфере под действием микроорганизмов, влажности, температуры и почвенного воздуха, а также при гуттации, естественном промывании и разложении лесной подстилки [2–4] в комплексе формируют аллелопатические свойства эдафотопы [5–7], т.е. аллелопатическую активность и аллелопатический режим [1, с. 274], контролируя большую часть физиологических процессов: режим водопотребления [8] и минерального питания [9, 10], клеточные циклы проницаемости [11], развитие фотосинтезирующего аппарата, фотосинтез и дыхание [1, 12], образование первичной и вторичной продукции [13] и т.д. В конечном итоге аллелопатические эффекты почвы определяют устойчивость сообществ в стрессовых условиях и биоразнообразии [14], включая механизм противостояния внедрению в экосистемы новых видов [15].

В лесных экосистемах регионов рекреационно-туристской специализации исследования аллелопатической активности почвы, воспринимающей в первую очередь рекреационную нагрузку [16], смогут открыть новые методологические возможности для создания инструмента оценки состояния трансформированных экосистем и организации более эффективных природоохранных мероприятий с целью обеспечения эколого-экономической безопасности функционирования индустрии туризма.

Цель настоящей работы – исследовать аллелопатический режим почвы после разовой рекреационной нагрузки в лесных экосистемах преобладающих формаций Сочинского Причерноморья с монодоминантным древостоем. В задачи входило:

- определить аллелопатическую активность почвы при различной величине рекреационной нагрузки;
- оценить аллелопатическую активность почвы через 30 сут после рекреационного воздействия.

## Материалы и методы

Исследования проводились в период весенних дождей (апрель-май 2020 и 2021 гг.) в предгорной зоне Сочинского Причерноморья (зона влажных субтропиков), в лесных экосистемах со средневозрастным одновидовым древостоем, имеющим в составе 10 единиц по запасу: граб обыкновенный

(*Carpinus betulus* L.), бук восточный (*Fagus orientalis* L.), дуб пушистый (*Quercus pubescens* Willd.), дуб скальный (*Quercus petraea* (Matt.) Liebl.), каштан посевной (*Castanea sativa* Mill.), самшит колхидский (*Buxus colchica* Pojark), тис ягодный (*Taxus baccata* L.). Среди видов с долей участия менее 2 % запаса встречались [17]: вишня птичья (*Prunus avium* L.), ясень высокий (*Fraxinus excelsior* L.), липа бегониелистная (*Tilia caucasica* Rupr.), клен полевой (*Acer campestre* L.), клен красивый (*Acer laetum* C. A. Mey), клен ложноплатановый (*Acer pseudoplatanus* L.), груша обыкновенная (*Pyrus communis* L.), ольха черная (*Alnus glutinosa* (L.) Gaertn.), осина обыкновенная (*Populus tremula* L.). Анализируемые экосистемы по напочвенному покрову относились к двум типам экосистем (при составе древостоя): беспокровный (10Бк + Яс, ед. Чрш; 10Кш + Бк ед. Г; 10Смш ед. Лп, Г; 10Тс ед. Бк), разнотравный (10Дчш ед. Г; 10Дпуш + Кш, Г, Бк, Брк, Грш, Чрш; 10Г + Бк).

Почва желто-бурая лесная, маломощная, щебенистая на мелкозернистых песчаниках и глинистых сланцах [18], характеризуется тяжелым механическим составом (табл. 1): в верхних горизонтах легко-глинистая, иловато-пылеватая; в нижних – средне-тяжело-глинистая, пылевато-иловатая. Скелетность верхних горизонтов представлена очень малой каменистостью – в среднем 1,4 % по объему, в том числе частиц крупнее 3 мм – 0,8 %. Растительные включения (в основном корни) составляют в среднем 2,1 % по объему, общий объем твердых включений – 3,5 % по объему.

Таблица 1 / Table 1

### Гранулометрический состав почвы / Granulometric composition of the soil

| Средняя глубина слоя, см | Размер фракции, мм |           |           |            |             |         | Из них |        |
|--------------------------|--------------------|-----------|-----------|------------|-------------|---------|--------|--------|
|                          | 1,0–0,25           | 0,25–0,05 | 0,50–0,01 | 0,01–0,005 | 0,005–0,001 | < 0,001 | < 0,01 | > 0,01 |
| 2–12                     | 6,3                | 13,3      | 9,8       | 14,2       | 32,9        | 23,5    | 70,6   | 29,4   |
| 15–20                    | 4,8                | 11,9      | 8,0       | 13,5       | 35,4        | 26,4    | 75,3   | 24,7   |
| 40–50                    | 4,7                | 9,2       | 9,2       | 13,6       | 36,0        | 27,3    | 76,9   | 23,1   |
| > 65                     | 2,0                | 6,1       | 7,4       | 18,0       | 30,6        | 35,9    | 84,4   | 15,5   |

Разовые рекреационные нагрузки имитировались путем вытаптывания [19], с учетом методических рекомендаций моделирования шаговой нагрузки [20] и продолжительности сезона рекреационного посещения – 1200 ч [21, с. 57], на учетных площадках 1,43×0,71 м (8-кратная повторность), при визуальном отсутствии нарушений напочвенного покрова, в пяти вариантах: 10, 20, 30, 45, 60 мин (табл. 2).

Таблица 2 / Table 2

### Параметры имитации рекреационных нагрузок / Parameters of simulation of recreational loads

| Время нагрузки, мин | Рекреационная нагрузка |          |                           | Плотность почвы, г/см <sup>3</sup> | Запас подстилки, кг/м <sup>2</sup> |
|---------------------|------------------------|----------|---------------------------|------------------------------------|------------------------------------|
|                     | чел.мин/м <sup>2</sup> | чел.ч/га | чел.ч/га – сезон, чел./га |                                    |                                    |
| 0                   | –                      | –        | –                         | 0,81-0,85                          | 0,346–0,610                        |
| 10                  | 10                     | 1666,7   | 1,39                      | 0,89-0,91                          | 0,309–0,547                        |
| 20                  | 20                     | 3333,3   | 2,78                      | 0,99-1,11                          | 0,231–0,297                        |
| 30                  | 30                     | 5000,0   | 4,17                      | 1,14-1,19                          | 0,119–0,180                        |
| 45                  | 45                     | 7500,0   | 6,25                      | 1,20-1,44                          | 0,000–0,021                        |
| 60                  | 60                     | 10000,0  | 8,33                      | 1,46-1,66                          | –                                  |

Пробы почвы отбирали на учетных площадках перед имитацией нагрузки (контроль) и в два этапа после вытаптывания, с интервалом через сутки и через 30 сут, методом конверта (5-кратная повторность) в верхнем горизонте почвы (0–10 см) буром ударного типа, с последующим стандартным определением плотности почвы.

Пробы лесной подстилки для определения запаса брали с использованием рамок 20×20 см в 6-кратной повторности.

Аллелопатические характеристики почвы определяли общепринятыми методами в два этапа: 1) определение количества колинов методом биотеста [22, с. 304] с переводом всхожести семян в условные кумариновые единицы (УКЕ); 2) расчет ингибирующей активности колинов.

По рекомендациям [1, 22] аналитические пробы готовили на водной вытяжке (1:10); биотестом служили семена редьки (*Raphanus sativus var. radicola* Pers.); количество колинов рассчитывали по шкале УКЕ А.М. Гродзинского [22, с. 306]. Ингибирующую активность колинов (фитотоксичность) определяли по индексу аллелопатической активности, разработанному Н.О. Симагиной и Н.Ю. Лысяковой [23, с. 274]:

$$A = \frac{S_o - S_k}{S_o},$$

где  $A$  – аллелопатическая активность;  $S_o$  – содержание УКЕ в опыте;  $S_k$  – содержание УКЕ в контроле. Повышение (снижение) значений аллелопатической активности отражает повышение (снижение) ингибирующей активности колинов.

Статистическая обработка включала стандартные методы оценки вариационных рядов и дисперсионный двухфакторный анализ при иерархической схеме [24]. В качестве источников варьирования принимались 5 вариантов рекреационной нагрузки в факторе  $A$  (рекреация) и дифференциация экосистем по биоэкологическим особенностям древесного вида – доминанта в факторе  $B$  (экосистема).

Всего в каждой исследуемой экосистеме, на отдельных вариантах моделируемой нагрузки анализ аллелопатической активности проводили по результатам 40 проб почвы.

### Полученные результаты

Проведенные разовые рекреационные нагрузки в диапазоне от 1,39 до 8,33 чел/га (табл. 2) привели к вариации плотности почвы в диапазоне 0,86–1,66 г/см<sup>3</sup> и лесной подстилки – от 0,547 до 0,000 кг/м<sup>2</sup>. Реакция на нагрузку между лесными экосистемами (рис. 1) имеет отличительные особенности, обусловленные комплексным влиянием многих факторов (состав и жизненное состояние древостоя, гранулометрический состав почвы, влажность, температура, кислотность среды и т.д.), в целом отражающие прямые и косвенные индикационные связи в рекреационно трансформированных экосистемах Сочинского Причерноморья [25–28].

Из общих закономерностей, согласующихся со многими исследованиями [18, 20, 21, 28, 29], отмечают:

1) большие величины плотности почвы характерны для экосистем с большей скоростью разложения лесной подстилки и/или меньшим ее запасом;

2) величина разрушения подстилки зависит от рекреационной нагрузки и биоэкологических особенностей доминирующего вида в древостое.

Несмотря на значительную пространственную вариацию запаса, подстилка считается очень чувствительным индикатором [25, 28]. Механическое разрушение подстилки на 2,3–33,8 % ( $\bar{x} = 18,2$  %) при нагрузке в 1,39 чел/га в первые сутки (рис. 2а) сопровождается ростом аллелопатической активности почвы, составляя увеличение ингибирования на 0,2–6,0 % ( $\bar{x} = 2,3$  %). Изменения при данной нагрузке не являются статистически достоверными ( $t_{\text{факт.}} < t_{\text{табл.}}$  при  $P = 0,05$ : 1,71–1,94 < 1,96) и, следовательно, могут только отражать общую закономерность реакции верхнего горизонта почвы на влияние рекреации. При большем воздействии на почву (диапазон нагрузок 2,78–4,17 чел/га) регистрируется тесная обратная связь запаса подстилки с аллелопатической активностью ( $r = -86,6 - -98,2$  %) во всех анализируемых экосистемах.

Большие рекреационные нагрузки (6,25 чел/га) в аналогичных лесных сообществах Сочинского Причерноморья при хронической нагрузке [21, 28] приводят к анаэробным условиям, исчезновению подстилки на тропах большинства экосистем и деформации гумусо-аккумулятивного горизонта; нагрузка в 8,33 чел/га приводит к уплотнению верхнего горизонта до типичной плотности иллювиального горизонта [20, 23]. В условиях эксперимента диапазон корреляции аллелопатической активности почвы с плотностью верхнего горизонта составляет 75,1–89,2 %; почвенные фильтраты проявляют значительную активность ( $R^2 = 0,896-0,977$ ), вплоть до полного угнетения биотеста (УКЕ кумарина 1364 мг/л), т.е. с ростом ингибирования до 0,8–1,0 (рис. 2а). Большая активность почвы отмечается в экосистемах с доминированием *Fagus orientalis* и *Carpinus caucasica*, характеризующихся полным разрушением подстилки и максимальным уплотнением почвы (рис. 1).

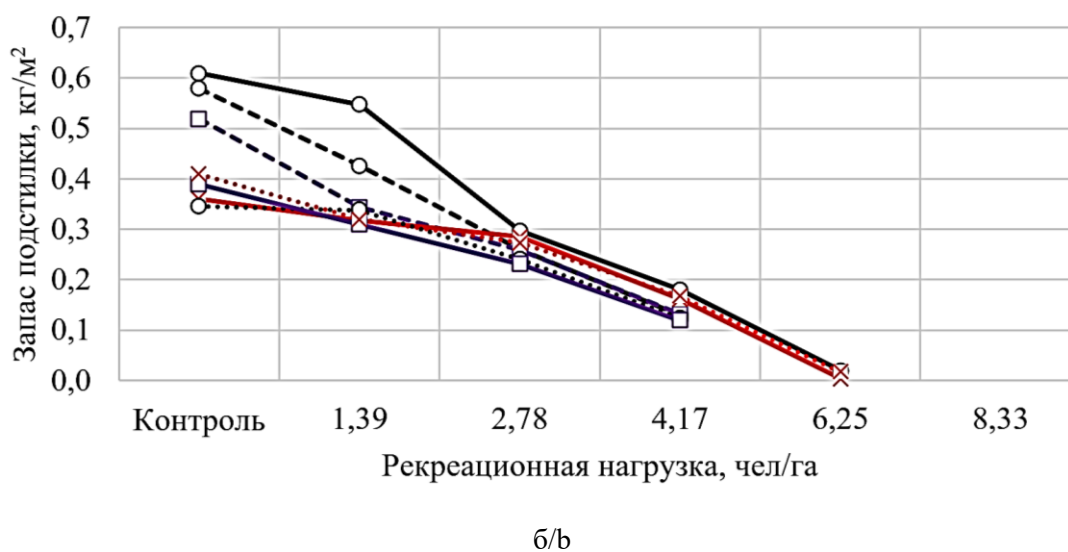
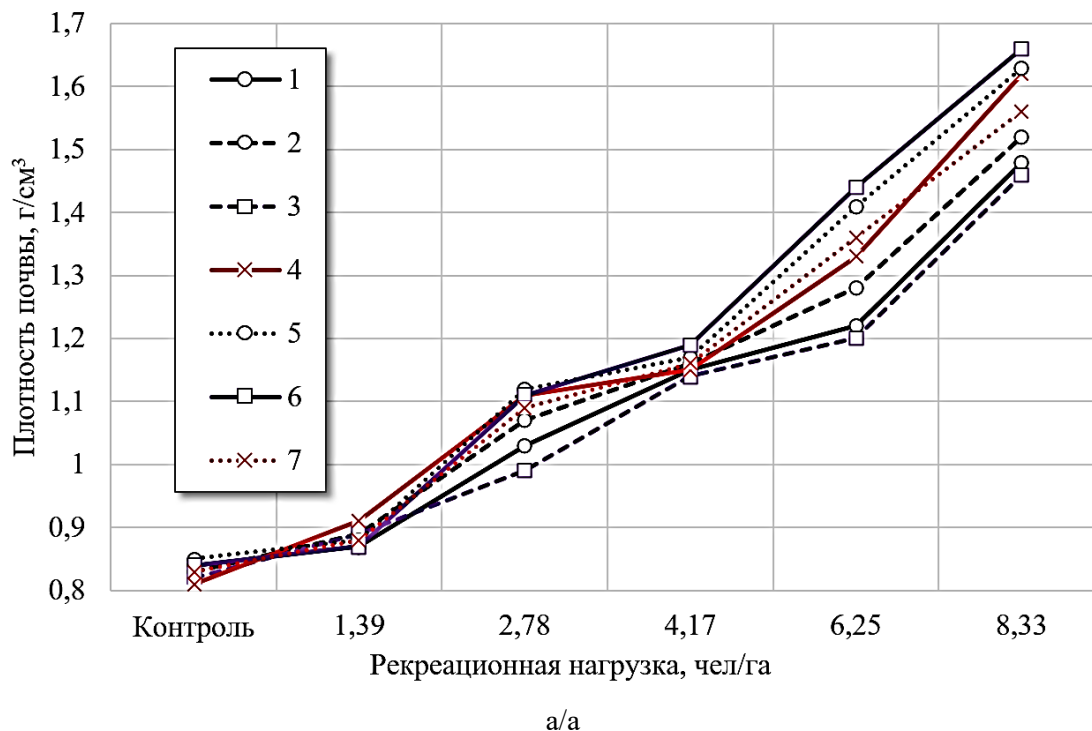


Рис. 1. Динамика плотности почвы (а) и запаса лесной подстилки (б) при рекреационных нагрузках в лесных экосистемах с древостоем: 1 – *Castanea sativa*; 2 – *Quercus petraea*; 3 – *Quercus pubescens*; 4 – *Buxus colchica*; 5 – *Fagus orientalis*; 6 – *Carpinus caucasica*; 7 – *Taxus baccata* / Fig. 1. Dynamics of soil density (a) and stock of forest litter (b) under recreational loads in forest ecosystems with stands: 1 - *Castanea sativa*; 2 - *Quercus petraea*; 3 - *Quercus pubescens*; 4 - *Buxus colchica*; 5 - *Fagus orientalis*; 6 - *Carpinus caucasica*; 7 - *Taxus baccata*

По исследованиям в антропогенно ненарушенной среде и лабораторных условия х полагают [1, 22], что при недостатке почвенного кислорода аэробная микрофлора переходит в неактивное состояние, замещаясь на аммонифицирующие и денитрифицирующие бактерии, усиливая накопление колинов и микробиологических процессов в корнеобитаемом слое в направлении почвоутомления. С изменением почвенной структуры и физико-химических показателей идет развитие фитопатогенной микрофлоры с усилением одностороннего выноса питательных веществ [30, 31], сопровождаемого обеднением почвы [32] и нарушением биохимического баланса [33, 34].

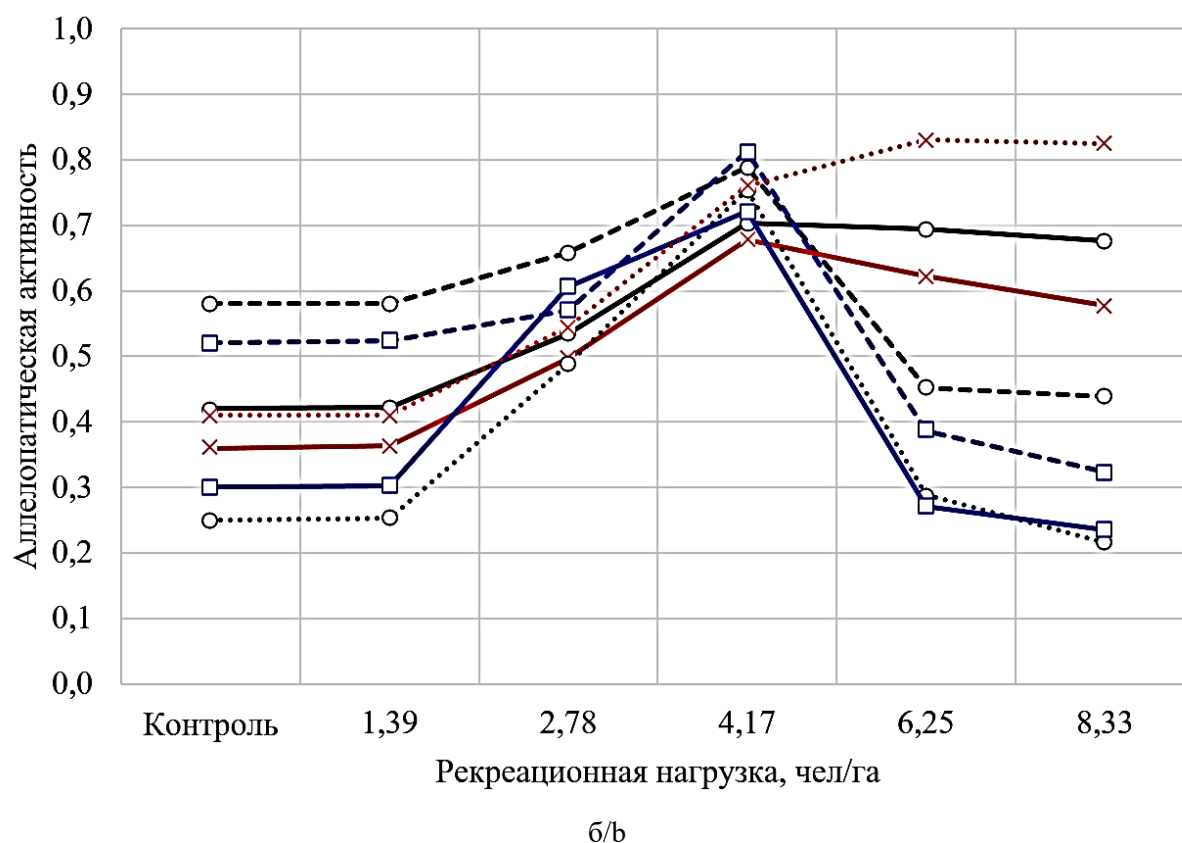
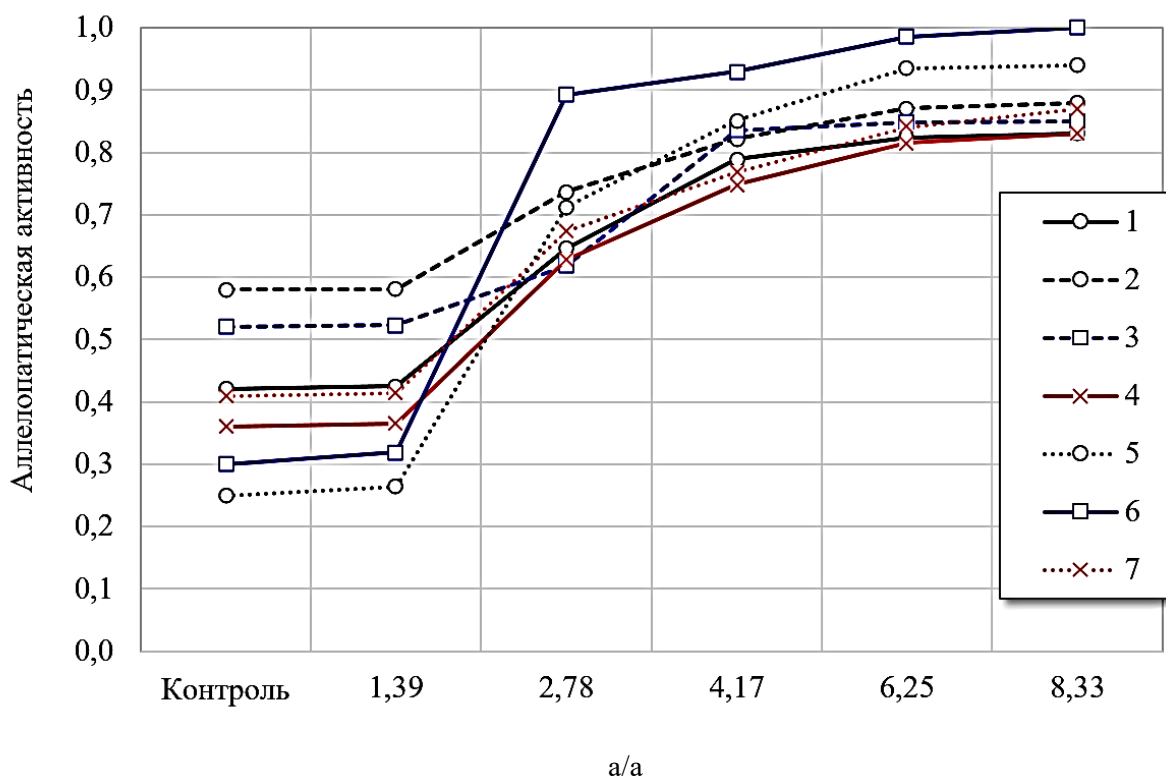


Рис. 2. Фитотоксичность почвы в одновидовых насаждениях через сутки (а) и 30 сут (б) после разовой рекреационной нагрузки: 1 – *Castanea sativa*; 2 – *Quercus petraea*; 3 – *Quercus pubescens*; 4 – *Buxus colchica*; 5 – *Fagus orientalis*; 6 – *Carpinus caucasica*; 7 – *Taxus baccata* / Fig. 2. Soil phytotoxicity in single-species plantations in a day (a) and 30 days (b) after a one-time recreational load: 1 - *Castanea sativa*; 2 - *Quercus petraea*; 3 - *Quercus pubescens*; 4 - *Buxus colchica*; 5 - *Fagus orientalis*; 6 - *Carpinus caucasica*; 7 - *Taxus baccata*

Через 30 сут, после моделирования разовой нагрузки (рис. 2б), величина фитотоксичности рекреационно трансформированной почвы во всех экосистемах снижается ( $R^2 = 0,575-0,993$ ), указывая на протекающие процессы восстановления эдафической среды. В естественных условиях (не нарушенных) снижение токсичности на 20–25-е сут А.М. Гродзинским [1] объясняется способностью почв поглощать колины при слабой насыщенности органическими соединениями. Также есть мнение, что аллелотоксины с течением времени могут снижать свою концентрацию в результате переноса в нижележащие горизонты с почвенной влагой [35].

Большие изменения регистрируются в сформированных анаэробных условиях, т.е. при нагрузке  $\geq 6,25$  чел/га [27, 28]. Так, при 1,39 чел/га (аэробиз) на 30-е сут отмечено восстановление величин фитотоксичности до контрольных значений; при 2,78–4,17 чел/га (аэробиз) интенсивность снижения по средним выборочным составляет 8,8–20,8 %, при 6,25–8,33 чел/га (анаэробиз) – 40,7–45,6 %.

Снижение фитотоксичности в анаэробных условиях ниже контрольных значений, регистрируемое в отдельных экосистемах (с доминированием *Fagus orientalis*, *Quercus robur* и *Q. pubescens*, *Carpinus caucasica*), опосредованно указывает на повышающийся потенциал к проникновению в лесные сообщества чужеродных видов, с высокой аллелопатической активностью [36]. Также установлена обратная зависимость ( $r = -0,472 - -0,860$ ) между аллелопатической активностью и величиной адвентивизации лесных ценозов [37]. Значительная устойчивость к синантропизации отмечается в экосистемах с доминированием *Castanea sativa*, *Buxus colchica* и *Taxus baccata*, подтверждая ранее полученные результаты при стадиях рекреационной дигрессии [25, 27, 28].

Дисперсионный анализ, призванный оценить долю влияния величины рекреационной нагрузки и биоэкологических особенностей древесных видов лесных экосистем на динамику аллелопатической активности почвы, показал (табл. 3), что через сутки после моделируемой нагрузки на аллелопатическую активность почвы достоверно влияют (при  $P = 0,01$ ) особенности древостоя (38 %) и величина рекреационной нагрузки (40 %).

Таблица 3 / Table 3

**Дисперсионный анализ влияния рекреационной нагрузки в различных экосистемах на динамику аллелопатической активности почвы / Dispersion analysis of the influence of recreational load in different ecosystems on the dynamics of soil allelopathic activity**

| Источник варьирования  | ss     | df   | ms    | $F_{\text{факт.}}$ | $F_{\text{табл. при } P}$ |      | Степень влияния |
|------------------------|--------|------|-------|--------------------|---------------------------|------|-----------------|
|                        |        |      |       |                    | 0,05                      | 0,01 |                 |
| Через сутки            |        |      |       |                    |                           |      |                 |
| Рекреационная нагрузка | 104,67 | 4    | 26,17 | 7,95               | 2,69                      | 4,02 | 0,401           |
| Экосистема             | 98,75  | 30   | 3,29  | 77,98              | 1,46                      | 1,70 | 0,378           |
| Случайные отклонения   | 57,62  | 1365 | 0,04  | –                  | –                         | –    | 0,221           |
| Общее                  | 261,03 | 1399 | 1,44  | –                  | –                         | –    | –               |
| Через 30 сут           |        |      |       |                    |                           |      |                 |
| Рекреационная нагрузка | 40,49  | 4    | 10,12 | 3,67               | 2,69                      | 4,02 | 0,158           |
| Экосистема             | 82,76  | 30   | 2,76  | 28,41              | 1,46                      | 1,70 | 0,324           |
| Случайные отклонения   | 132,55 | 1365 | 0,10  | –                  | –                         | –    | 0,518           |
| Общее                  | 255,80 | 1399 | 4,35  | –                  | –                         | –    | –               |

**Примечание.** ss – сумма квадратов; df – число степеней свободы; ms – дисперсия.

Через 30 сут полевого эксперимента влияние биоэкологических особенностей (32 %) на аллелопатию остается достоверным при  $P = 0,01$ . Вклад рекреационной нагрузки (16 %) в изменчивость аллелопатии снижается, оставаясь достоверным только при значимости 0,05. Это говорит о снижении влияния на аллелопатический режим почвы такого фактора, как рекреационная нагрузка, ввиду протекающих восстановительных процессов в верхнем горизонте почвы. Увеличение влияния неучтенных факторов с 22 до 52 % подтверждает ранее полученные результаты по активации процессов, связанных с трансформацией абиотических факторов и структурных характеристик ценопопуляций [16, 36, 38, 39] в рекреационных лесах.



## Заключение

Полученные результаты по последствиям моделируемой рекреационной нагрузки позволяют объяснить отдельные моменты проявления трансформации, протекающие в лесах рекреационной специализации.

Разовые рекреационные нагрузки сопровождаются усилением фитотоксичности почвы (на 16–66 %) при нагрузке 2,78–4,17 чел/га и проявляются в зависимости от биоэкологических особенностей доминирующих древесных видов в лесных экосистемах. Большое рекреационное воздействие (6,25–8,33 чел/га) приводит к формированию тропиной сети с анаэробными условиями в верхнем горизонте почвы, накоплением колинов и изменением микробиологических процессов.

Через 30 сут после разового рекреационного воздействия аллелопатическая активность почвы восстанавливается до контрольных значений только после нагрузки 1,39 чел/га. Нагрузка 2,78–4,17 чел/га сопровождается восстановительными процессами со снижением фитотоксичности на 9–21 %, оставаясь выше контрольных значений. На участках с максимальным воздействием (6,25–8,33 чел/га) фитотоксичность снижается ниже контрольных значений в экосистемах с доминированием *Fagus orientalis*, *Quercus robur*, *Q. pubescens* и *Carpinus caucasica*, косвенно объясняя высокую вероятность внедрения в эти сообщества вдоль троп новых для лесных экосистем видов. Значительная аллелопатическая активность почвы, выше контрольных значений, сохраняется в экосистемах с доминированием *Taxus baccata*, *Castanea sativa* и *Vixus colchica*, что объясняется их устойчивостью к разовым рекреационным нагрузкам.

## Список источников

1. Гродзинский А.М., Богдан Г.П., Головки Э.Я. Аллелопатическое почвоутомление. Киев: Наукова думка, 1979. 248 с.
2. Gallet C., Pellissier F. Phenolic compounds in natural solutions of a coniferous forest // J. of Theoretical Biology. 1997. № 23. P. 2401–2412.
3. Roshchina V.V., Roshchina V.D. External secretion // The Excretory Function of Higher Plants. Berlin: Springer, 1993. P. 67–130.
4. Bertin C., Yang X., Weston L.A. The role of root exudates and allelochemicals in the rhizosphere // Plant and Soil. 2003. Vol. 256, № 1. P. 67–83.
5. Cheng F., Cheng Z. Research progress on the use of plant allelopathy in agriculture and the physiological and ecological mechanisms of allelopathy // Frontiers in Plant Science. 2015. Vol. 6. Article 1020.
6. Дерфлинг К. Гормоны растений. Системный подход. М.: Мир, 1985. 303 с.
7. Кавеленова Л.М., Лицинская С.Н., Карандаева Л.Н. Особенности сезонной динамики водорастворимых фенольных соединений в листьях березы повислой в условиях урбосреды в лесостепи (на примере Самары) // Химия растительного сырья. 2001. № 3. С. 91–96.
8. Barkosky R.R., Einhellig F.A. Allelopathic interference of plant-water relationships // J. of Theoretical Biology. 2003. № 44. P. 53–58.
9. Booker F.L., Blum U., Fiscus E.L. Short-term effects of ferulic acid on ion uptake and water relations in cucumber seedlings // The American Naturalist. 1992. № 93. P. 649–655.
10. Yu J.Q., Matsui Y. Effects of root exudates of cucumber (*Cucumis sativus*) and allelochemicals on ion uptake by cucumber seedlings // Forest Ecology and Management. 1997. № 23 (3). P. 817–827.
11. Sanchez-Moreiras A., Gonzalez L., Reigosa M.J. Small-scale distribution of plants in the vicinity of competitors: Possible effects of allelopathy // Allelopathy. 2003. № 11 (2). P. 185–194.
12. Kagan I.A., Rimando A.M., Dayan F.E. Chromato-graphic separation and in vitro activity of sorgoleone congeners from the roots of *Sorghum bicolor* // J. of Theoretical Biology 2003. № 51. P. 7589–7595.
13. Duran-Serantes B., Gonzalez L., Reigosa M. Comparative physiological effects of three allelochemicals and two herbicides on *Dactylis glomerata* // Forest Ecology and Management. 2002. Vol. 24 (4). P. 385–392.
14. Гродзинский А.М. Некоторые проблемы изучения аллелопатического взаимодействия растений // Взаимодействие растений и микроорганизмов в фитоценозах. Киев: Наукова думка, 1977. С. 3–12.
15. Cummings J.A., Parker I.M., Gilbert G.S. Allelopathy: a tool for weed management in forest restoration // J. of Plant Nutrition and Soil Science. 2012. Vol. 213, № 12. P. 1975–1989.
16. Халикова О.В., Исянюлова Р.Р. Влияние рекреации на состояние почвенного покрова Черноморского побережья России // Лесной вестн. / Forestry Bulletin. 2019. Т. 23, № 6. С. 51–59. Doi: 10.18698/2542-1468-2019-6-51-59.

17. Щербина В.Г. Рекреационные изменения аллелопатической активности корневых систем древостоя в лесных экосистемах // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2021. № 4 (212). С. 103–112. Doi: 10.18522/1026-2237-2021-4-103-112.
18. Щербина В.Г. Оценка рекреационного повреждения почвенного покрова // Экол. вестн. Северного Кавказа. 2007. Т. 3, № 4. С. 37–41.
19. Временная методика определения рекреационных нагрузок на природные комплексы при организации туризма, экскурсий, массового повседневного отдыха и временные нормы этих нагрузок. М.: ЦБНТИ лесхоза, 1987. 34 с.
20. Ивонин В.М. Рекреология. Ростов н/Д.: Изд-во ЮФУ, 2008. 240 с.
21. Ивонин В.М., Авдонин В.Е., Пеньковский Н.Д. Рекреационная экология горных лесов российского Причерноморья. Краснодар: Изд-во СКНЦ ВШ, 2000. 271 с.
22. Гродзинский А.М. Аллелопатия растений и почвоутомление. Киев: Наукова думка, 1991. 532 с.
23. Симагина Н.О., Лысякова Н.Ю. Динамика аллелопатической активности *Vulpurum fruticosum* L. в течение вегетации и онтогенеза // Учен. записки Таврического нац. ун-та им. В. И. Вернадского. Биология, химия. 2011. Т. 24 (63), № 4. С. 273–281.
24. Рокицкий П.Ф. Биологическая статистика. Минск: Высшая школа, 1964. 328 с.
25. Щербина В.Г., Белюченко И.С. Мониторинг окружающей среды: методологические основы. Сочи: Изд-во ИЭиВС, 2006. 356 с.
26. Щербина В.Г. Фоновые экосистемы санно-бобслейного комплекса. Кривой Рог: Видавничий дiм, 2010. 176 с.
27. Щербина В.Г. Экология самшитовых биогеоценозов. Донецк: Стандарт, 2008. 347 с.
28. Щербина В.Г., Щербина Ю.Г. Рекреационные ресурсы Северного Кавказа. Буковые экосистемы: в 4 ч. Кривой Рог: Минерал, 2006. Ч. 1. 500 с.
29. Гордиенко В.А., Солнцев Г.К. Лесные пользования на Северном Кавказе. М.: ВНИИЦлесресурс, 1999. 472 с.
30. Иванова Н.А. Влияние переувлажнения на микрофлору подзолисто-глеевых почв и использование ячменем азота и фосфора : автореф. дис. ... канд. биол. наук. Л., 1972. 26 с.
31. Гродзинский А.М., Головкин Е.А., Горобец С.А. Экспериментальная аллелопатия. Киев: Наукова думка, 1975. 230 с.
32. Баранецкий Г.Г. О фитocenотической роли колючих корней липы мелколистной // Физиолого-биохимические основы взаимодействия растений в фитocenозах. Киев: Наукова думка, 1973. Вып. 4. С. 100–103.
33. Гринева Г.М. О выделении веществ корнями растений при кратковременном анаэробии // Физиология растений. 1961. Т. 8, № 6. С. 123–131.
34. Гортинский Г.Б. Аллелопатия и биоценология // Бюл. Московского общества испытателей природы. 1963. Т. 68, № 6. С. 32–41.
35. Федотов Г.Н., Горепекин И.В., Позднякова А.Д., Завгородняя Ю. А., Исакова С.А. Взаимосвязь предистории использования и химических свойств почв с их аллелотоксичностью // Почвоведение. 2020. № 3. С. 379–386. Doi: 10.31857/S0032180X2003003X.
36. Прохоров В.Н. Аллелопатический потенциал адвентивных видов с высокой инвазионной активностью во флоре Беларуси // Изв. Нац. АНБ. Биол. науки. 2018. Т. 63, № 2. С. 163–170. Doi: 10.29235/1029-8940-2018-63-2-163-170.
37. Щербина В.Г. Аллелопатическая напряженность биотопов в лесных экосистемах влажных субтропиков // Системы контроля окружающей среды. 2021. № 1. С. 95–106. Doi: 10.33075/2220-5861-2021-1-95-106.
38. Федотов Г.Н., Шалаев В.С., Батырев Ю.П. Аллелотоксины в почвах и стимуляция развития семян // Лесной вестн. / Forestry Bulletin. 2019. Т. 23, № 5. С. 62–70.
39. Левченко П.В., Гетманец И.А., Викторов В.П. Результаты биотестирования эдафотопов некоторых видов широколиственных пород в Ашинском государственном природном биологическом заказнике (Челябинская обл.) // Вестн. Тверского гос. ун-та. Биология и экология. 2020. № 2 (58). С. 84–93.

#### References

1. Grodzinsky A.M., Bogdan G.P., Golovko E.Ya. *Allelopathic soil fatigue*. Kiev: Naukova dumka Publ.; 1979. 248 p. (In Russ.).
2. Gallet C., Pellissier F. Phenolic compounds in natural solutions of a coniferous forest. *Journal of Theoretical Biology*. 1997;(23):2401-2412.
3. Roshchina V.V., Roshchina V.D. External secretion. *The Excretory Function of Higher Plants*. Berlin: Springer; 1993:67-130.
4. Bertin C., Yang X., Weston L.A. The role of root exudates and allelochemicals in the rhizosphere. *Plant and Soil*. 2003;256(1):67-83.
5. Cheng F., Cheng Z. Research Progress on the use of Plant Allelopathy in Agriculture and the Physiological and Ecological Mechanisms of Allelopathy. *Frontiers in Plant Science*. 2015;6:1020.

6. Derfling K. *Plant hormones. Systems approach*. Moscow: Mir Publ.; 1985. 303 p. (In Russ.).
7. Kavelenova L.M., Lishchinskaya S.N., Karandaeva L.N. Features of the seasonal dynamics of water-soluble phenolic compounds in the leaves of silver birch in an urban environment in the forest-steppe (for example, Samara). *Khimiya rastitel'nogo syr'ya = Chemistry of Plant Raw Materials*. 2001;(3):91-96. (In Russ.).
8. Barkosky R.R., Einhellig F.A. Allelopathic interference of plant-water relationships. *Journal of Theoretical Biology*. 2003;(44):53-58.
9. Booker F.L., Blum U., Fiscus E.L. Short-term effects of ferulic acid on ion uptake and water relations in cucumber seedlings. *The American Naturalist*. 1992;(93):649-655.
10. Yu J.Q., Matsui Y. Effects of root exudates of cucumber (*Cucumis sativus*) and allelochemicals on ion uptake by cucumber seedlings. *Forest Ecology and Management*. 1997;(23):817-827.
11. Sanchez-Moreiras A., Gonzalez L., Reigosa M.J. Small-scale distribution of plants in the vicinity of competitors: Possible effects of allelopathy. *Allelopathy*. 2003;(11):185-194.
12. Kagan I.A., Rimando A.M., Dayan F.E. Chromato-graphic separation and in vitro activity of sorgoleone congeners from the roots of Sorghum bicolor. *Journal of Theoretical Biology*. 2003;(51):7589-7595.
13. Duran-Serantes B., Gonzalez L., Reigosa M. Comparative physiological effects of three allelochemicals and two herbicides on *Dactylis glomerata*. *Forest Ecology and Management*. 2002;24:385-392.
14. Grodzinsky A.M. Some problems of studying the allelopathic interaction of plants. *Interaction of plants and microorganisms in phytocenoses*. Kiev: Naukova dumka Publ.; 1977:3-12. (In Russ.).
15. Cummings J.A., Parker I.M., Gilbert G.S. Allelopathy: a tool for weed management in forest restoration. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*. 2012;213(12):1975-1989.
16. Khalikova O.V., Isyanyulova R.R. The influence of recreation on the state of the soil cover of the Black Sea coast of Russia. *Forestry Bulletin*. 2019;23(6):51-59. Doi: 10.18698 / 2542-1468-2019-6-51-59. (In Russ.).
17. Scherbina V.G. Recreational changes in the allelopathic activity of the root systems of the stand in forest ecosystems. *Izv. vuzov. Sev.-Kavk. region. Estestv. nauki = Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science*. 2021;(4):103-112. Doi: 10.18522/1026-2237-2021-4-103-112. (In Russ.).
18. Shcherbina V.G. Assessment of recreational soil damage. *Ekol. vestn. Severnogo Kavkaza = The North Caucasus Ecological Herald*. 2007;3(4):37-41. (In Russ.).
19. *Temporary methodology for determining recreational loads on natural complexes when organizing tourism, excursions, mass everyday recreation and the time norms of these loads*. Moscow: Central Bureau of Scientific and Technical Information of the Leskhoz Press; 1987. 34 p. (In Russ.).
20. Ivonin V.M. *Recreology*. Rostov-on-Don: Southern Federal University Press; 2008. 240 p. (In Russ.).
21. Ivonin V.M., Avdonin V.E., Penkovsky N.D. *Recreational ecology of mountain forests of the Russian Black Sea region*. Krasnodar: North-Caucasian Scientific Center Higher School Press; 2000. 271 p. (In Russ.).
22. Grodzinsky A.M. *Allelopathy of plants and soil fatigue*. Kiev: Naukova dumka Publ.; 1991. 532 p. (In Russ.).
23. Simagina N.O., Lysyakova N.Yu. Dynamics of the allelopathic activity of *Bupleurum fruticosum* L. during the growing season and ontogenesis. *Uchen. zapiski Tavricheskogo nats. un-ta im. V. I. Vernadskogo. Biologiya, khimiya = Scientific Notes of the Vernadsky Tavrichesky National University. Biology, Chemistry*. 2011;24(4):273-281. (In Russ.).
24. Rokitsky P.F. *Biological statistics*. Minsk: Higher School Press; 1964. 328 p. (In Russ.).
25. Shcherbina V.G., Belyuchenko I.S. *Environmental monitoring: methodological foundations*. Sochi: IEiVS Publ.; 2006. 356 p. (In Russ.).
26. Shcherbina V.G. *Background ecosystems of the bobsleigh complex*. Krivoy Rog: Vidavnichii dim Publ.; 2010. 176 p. (In Russ.).
27. Shcherbina V.G. *Ecology of boxwood biogeocenoses*. Donetsk: Standard Publ.; 2008. 347 p. (In Russ.).
28. Shcherbina V.G., Shcherbina Yu.G. *Recreational resources of the North Caucasus. Beech ecosystems*: in 4 vol. Krivoy Rog: Mineral Publ.; 2006. Vol. 1. 500 p. (In Russ.).
29. Gordienko V.A., Solntsev G.K. *Forest uses in the North Caucasus*. Moscow: VNIITslesresurs Publ.; 1999. 472 p. (In Russ.).
30. Ivanova N.A. *Influence of waterlogging on the microflora of podzolic-gley soils and the use of nitrogen and phosphorus by barley*. Dissertation Thesis. Leningrad, 1972. 26 p. (In Russ.).
31. Grodzinsky A.M., Golovko E.A., Gorobets S.A. *Experimental allelopathy*. Kiev: Naukova dumka Publ.; 1975. 230 p. (In Russ.).
32. Baranetsky G.G. On the phytocenotic role of colins in the roots of small-leaved linden. *Physiological and biochemical bases of plant interaction in phytocenoses*. Kiev: Naukova dumka Publ.; 1973; Vol. 4:100-103. (In Russ.).
33. Grineva G.M. On the release of substances by plant roots during short-term anaerobiosis. *Fiziologiya rastenii = Russian Journal of Plant Physiology*. 1961;8(6):123-131. (In Russ.).
34. Gortinsky G.B. Allelopathy and biocenology. *Byul. Moskovskogo obshchestva ispytatelei prirody = Bulletin of the Moscow Society of Naturalists*. 1963;68(6):32-41. (In Russ.).
35. Fedotov G.N., Gorepekin I.V., Pozdnyakova A.D., Zavgorodnyaya Yu.A., Isakova S.A. The relationship between the history of the use and chemical properties of soils with their allelotoxicity. *Pochvovedenie = Eurasian Soil Science*. 2020;(3):379-386. Doi: 10.31857/S0032180X2003003X. (In Russ.).

36. Prokhorov V.N. Allelopathic potential of adventitious species with high invasive activity in the flora of Belarus. *Izv. Nats. ANB. Biol. nauki = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Biological Series.* 2018;63(2):163-170. (In Russ.).

37. Shcherbina V.G. Allelopathic intensity of biotopes in forest ecosystems of humid subtropics. *Sistemy kontrolya okruzhayushchei sredy = Monitoring Systems of Environment.* 2021;(1):95-106. Doi: 10.33075/2220-5861-2021-1-95-106. (In Russ.).

38. Fedotov G.N., Shalaev V.S., Batyrev Yu.P. Allelotoxins in soils and stimulation of seed development. *Forestry Bulletin.* 2019;23(5):62-70. (In Russ.).

39. Levchenko P.V., Getmanets I.A., Viktorov V.P. Results of biotesting of edaphotopes of some broad-leaved species in the Ashinsky State Natural Biological Reserve (Chelyabinsk region). *Vestn. Tverskogo gos. un-ta. Biologiya i ekologiya = Bulletin of Tver State University. Series: Biology and Ecology.* 2020;(2):84-93. (In Russ.).

#### **Информация об авторе**

Щербина В.Г. – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник.

#### **Information about the author**

Scherbina V.G. - Candidate of Science (Biology), Senior Researcher.

Статья поступила в редакцию 04.10.2021; одобрена после рецензирования 14.01.2022; принята к публикации 16.03.2022.

The article was submitted 04.10.2021; approved after reviewing 14.01.2022; accepted for publication 16.03.2022.

---

## БИОЛОГИЧЕСКИЕ НАУКИ

## BIOLOGICAL SCIENCES

Научная статья

УДК 581.52: 582.572.42

doi: 10.18522/1026-2237-2022-1-107-113

**МОРФОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ РЕДКОГО ВИДА  
*SCILLA MONANTHOS* С. КОЧ. В РИЦИНСКОМ РЕЛИКТОВОМ  
НАЦИОНАЛЬНОМ ПАРКЕ (РЕСПУБЛИКА АБХАЗИЯ)****Инга Васильевна Тания<sup>1, 2</sup>, Альфия Науфалевна Мустафина<sup>3</sup>, Лариса Михайловна Абрамова<sup>4</sup>**<sup>1</sup>Рицинский реликтовый национальный парк, Гудаута, Республика Абхазия<sup>2</sup>Абхазский государственный университет, Сухум, Республика Абхазия<sup>3, 4</sup>Южно-Уральский ботанический сад-институт УФИЦ РАН, Уфа, Республика Башкортостан, Россия<sup>1, 2</sup>agnainat@mail.ru<sup>3</sup>alfverta@mail.ru<sup>4</sup>abramova.lm@mail.ru

**Аннотация.** Морфометрическими методами проанализировано состояние четырех ценопопуляций (ЦП) редкого вида *Scilla monanthos* С. Koch. (пролеска одноцветковая) на территории Рицинского реликтового национального парка (Республика Абхазия). По большинству морфометрических параметров лидирует ЦП, расположенная на склоне левого берега р. Ауадхара, на окраине смешанного леса, где, по-видимому, формируются наиболее благоприятные условия произрастания растений (эколого-фитоценотический оптимум). Минимальные значения по большинству параметров отмечены в ЦП, расположенной на окраине букового криволесья по тропе к оз. Мзымна с высокой антропогенной нагрузкой (выпас скота, туристская тропа). Изменчивость большинства признаков находится в пределах нормы реакции вида. Дискриминантный анализ выявил морфоструктурное различие в большинстве ЦП. По виталитету одна ЦП относится к процветающей, остальные – к депрессивным. Несмотря на достаточно стабильное состояние ЦП вида, необходим дальнейший мониторинг мест его произрастания. В особенности это относится к ЦП, которые стабильно подвергаются антропогенному воздействию.

**Ключевые слова:** *Scilla monanthos* С. Koch., Республика Абхазия, ценопопуляция, морфометрические параметры, изменчивость, виталитет

**Для цитирования:** Тания И.В., Мустафина А.Н., Абрамова Л.М. Морфологические особенности редкого вида *Scilla monanthos* С. Koch. в Рицинском реликтовом национальном парке (Республика Абхазия) // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. 2022. № 1. С. 107–113.

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

Original article

**MORPHOLOGICAL FEATURES OF THE RARE SPECIES *SCILLA MONANTHOS*  
С. KOCH. IN THE RITSA RELIC NATIONAL PARK (ABKHAZIA REPUBLIC)**

© Тания И.В., Мустафина А.Н., Абрамова Л.М., 2022

Inga V. Taniya<sup>1,2</sup>, Alfiya N. Mustafina<sup>3✉</sup>, Larisa M. Abramova<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Ritsa Relic National Park, Gudauta, Abkhazia Republic

<sup>2</sup>Abkhaz State University, Suhum, Abkhazia Republic

<sup>3,4</sup>South Ural Botanical Garden-Institute, Ufa Federal Research Center, Russian Academy of Sciences, Ufa, Republic of Bashkortostan, Russia

<sup>1,2</sup>agnaainat@mail.ru

<sup>3</sup>alfverta@mail.ru✉

<sup>4</sup>abramova.lm@mail.ru

**Abstract.** Using morphometric methods, we analyzed the state of four coenopopulations (CP) of the rare species *Scilla monanthos* C. Koch. in the territory of the Ritsa Relic National Park (Abkhazia Republic). According to most morphometric parameters, the CP located on the slope of the left bank of the river Auadkhara, on the outskirts of a mixed forest, where, apparently, the most favorable conditions for the growth of plants are formed (ecological-phytocenotic optimum). The minimum values for most of the parameters were noted in the coenopopulation located on the outskirts of the beech crooked forest along the trail on the lake. Mzymna with a high anthropogenic load (cattle grazing, hiking trail). The variability of most of the characters is within the normal range for the reaction of the species. Discriminant analysis revealed a morphostructural difference in most coenopopulations. In terms of vitality, one coenopopulation belongs to the prosperous, the rest - to the depressive. Despite the fairly stable state of coenopopulations of the species, further monitoring of its habitat is required. In particular, this applies to coenopopulations that are stably exposed to anthropogenic impact.

**Keywords:** *Scilla monanthos* S. Koch., Abkhazia Republic, coenopopulation, morphometric parameters, variability, vitality

**For citation:** Taniya I.V., Mustafina A.N., Abramova L.M. Morphological Features of the Rare Species *Scilla monanthos* C. Koch. in the Ritsa Relic National Park (Abkhazia Republic). *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2022;(1):107-113. (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 и эффективных направлений современной биологической науки является многоаспектное изучение редких видов растений. Сведения о состоянии ценопопуляций (ЦП) многих из них весьма малочисленны или отсутствуют, поэтому детальное изучение биологии и современного состояния популяций редких видов – важная научно-практическая задача, являющаяся основой для научно обоснованных рекомендаций по их охране.

В последнее время нами проводятся исследования современного состояния популяций редких видов в Рицинском реликтовом национальном парке (РРНП, Республика Абхазия), расположенном на юго-западе Большого Кавказского хребта [1–5]. К числу редких и малоизученных видов растений РРНП принадлежит *Scilla monanthos* C. Koch. из семейства Nyacinthaceae.

*Scilla monanthos* (пролеска одноцветковая) – редкий декоративный кавказско-переднеазиатский вид. Число локалитетов крайне ограничено, их численность сокращается [6]. Произрастает в лесных сообществах нижнего и среднего горных поясов только в юго-восточных районах Черноморского побережья. Внесен в Красную книгу Краснодарского края [6] в категории 3 УВ (уязвимые). Ареал распространения – Юго-Западная Азия (Турция, Иран, Ирак) и Центральный Кавказ [7]. Вид взят под охрану на территории Кавказского биосферного заповедника, а также в Сочинском национальном парке [6].

Цель исследования – изучить фенотипические особенности и жизненное состояние ЦП *S. monanthos* в РРНП. Биологические и морфометрические особенности вида ранее не изучались.

## Объекты и методы исследования

*Scilla monanthos* – травянистое луковичное поликарпическое растение. Стебли 10–20 см высотой, до четырех из одной луковицы. Луковица яйцевидная, 15–18 мм в диаметре. Листья линейные или линейно-ланцетные. Соцветие – обедненная кисть с одним-двумя цветками. Листочки околоцветника линейно-ланцетные, светло-голубые, до белого. Тычинки почти в 2 раза короче околоцветника. Завязь

овальной формы, немного сужающаяся к низу. Встречается в нижнем и среднем лесном поясах, в дубовых и других лиственных лесах. Средиземногорный колхидский лесной эфемероид [8]. Цветение приходится на март, плодоношение – на май. Размножается семенами и вегетативно [9].

Изучение биологии *S. monanthos* на территории РРНП проводилось в пределах Ауадхарского лесничества, в урочище Ауадхара на высоте 1550–1800 м над уровнем моря. Здесь вид приурочен к окраинам ольховых лесов, букового криволесья и ледниковых морен субальпийского пояса.

С целью поддержания единообразия в оценке морфологических данных в естественных местообитаниях вида отбирали только генеративные особи. Изучение морфометрических параметров проведено в четырех ЦП *S. monanthos* по методу В.Н. Голубева [10], на 25 средневозрастных генеративных особях. Общий объем выборки составил 100 особей. В фазу массового цветения растений измерялись следующие параметры: высота генеративного побега, диаметр стебля, число листьев на одном генеративном побеге, длина листа, ширина листа, число цветков, диаметр цветка, длина лепестка, ширина лепестка.

Оценку виталитетной структуры ЦП *S. monanthos* проводили по результатам факторного анализа. Определяющим комплексом признаков избраны высота генеративного побега и число цветков, которые в дальнейшем использовали для оценки виталитетного спектра. Определен индекс качества ЦП и виталитетные типы [11].

Дискриминантный многомерный анализ провели в программе Statistica 6.0 для всего комплекса морфометрических параметров 4 выборок. В процессе этого анализа вычисляли фенотипическую дистанцию, выраженную расстоянием Махаланобиса [12, 13].

Статистическая обработка данных выполнена с применением программы MS Excel 2010 с использованием стандартных показателей. Рассчитаны средние арифметические значения, среднее квадратичное отклонение  $\sigma$ , коэффициенты вариации ( $C_v$ ) [14].

### Результаты и обсуждение

Биология *S. monanthos* на территории РРНП изучалась в четырех местах произрастания вида:

ЦП 1 – ледниковая морена в субальпийском поясе по тропе к оз. Мзымна. Подвержена постоянному выпасу, проходят конные маршруты и туристская тропа. Продолжительность вегетации недлительная.

ЦП 2 – окраина букового криволесья по тропе к оз. Мзымна. Проходят скотоводческие тропы, конные маршруты и туристская тропа. Продолжительность вегетации недлительная.

ЦП 3 – окраина ольхового леса, вдоль дороги от пансионата «Ауадхара» к озеру Мзымна. Находится вдоль оживленной дороги близ Ауадхарского минерального источника. Продолжительность вегетации длительная.

ЦП 4 – окраина смешанного леса, левый берег р. Ауадхара. Находится на освещенном склоне на границе (экотон) ольхового и букового леса, чуть удалена от дороги. Продолжительность вегетации длительная.

Измерение морфометрических параметров *S. monanthos* показало (табл. 1), что практически по всем показателям лидирует ЦП 4, где хорошие условия освещения и увлажнения, что благоприятно отражается на габитусе особей. Самые низкие значения по многим параметрам выявлены в ЦП 2, которая подвергается постоянному рекреационному воздействию. Наибольшие различия отмечены по диаметру побега, длине листа, ширине листа и числу цветков. Максимальны эти признаки в ЦП 4, минимальны – в ЦП 2. Значительных различий не выявлено по высоте генеративного побега и размерным показателям цветка.

На рис. 1 представлена изменчивость морфометрических признаков *S. monanthos* в природных ЦП. Степень варьирования признаков во всех изученных ЦП однотипна. Большая изменчивость отмечена у числа цветков в ЦП 2 ( $C_v$  - 67,1 %). Повышенное варьирование признаков у растений в ЦП наблюдается в ситуациях высокой фенотипической пластичности и понимается как способность растений адаптироваться к условиям обитания. У остальных признаков выявлена нормальная степень изменчивости ( $C_v$  - 10,2–42,7%).

Для установления уровня фенотипического сходства популяций *S. monanthos* использовали дискриминантный анализ. Для его проведения учитывался весь комплекс морфометрических параметров у особей, находящихся в генеративном состоянии. Значения  $\lambda$  Уилкса и уровень достоверности модели (значения Фишера) дают основную оценку сходства и различия особей в изученных популяциях. Не-

большие значения Уилкса ( $\lambda = 0,128-0,223$ ),  $p < 0,000$ , показывают высокую статистическую достоверность итоговых данных. Выявлено, что основной вклад в разделение кластеров принадлежит диаметру стебля ( $F = 22,984$ ), наименьший – диаметру цветка ( $F = 0,667$ ).

Таблица 1 / Table 1

Средние значения морфометрических признаков в ЦП *S. monanthos*  
/ Average values of morphometric characters in *S. monanthos* cenopopulations

| Морфометрический параметр       | ЦП 1      | ЦП 2      | ЦП 3      | ЦП 4      |
|---------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Высота генеративного побега, см | 21,5±0,91 | 18,8±0,69 | 21,7±0,49 | 25,7±0,57 |
| Диаметр побега, см              | 0,3±0,02  | 0,2±0,02  | 0,6±0,03  | 0,8±0,05  |
| Количество листьев, шт.         | 2,0±0,10  | 2,1±0,06  | 2,0±0,04  | 2,2±0,08  |
| Длина листа, см                 | 16,6±0,64 | 15,2±0,74 | 17,3±0,53 | 20,0±0,58 |
| Ширина листа, см                | 1,8±0,09  | 1,2±0,06  | 1,7±0,06  | 2,2±0,07  |
| Количество цветков, шт.         | 4,6±0,34  | 2,0±0,27  | 3,3±0,28  | 8,1±0,68  |
| Диаметр цветка, см              | 2,1±0,11  | 1,9±0,11  | 2,1±0,11  | 2,0±0,10  |
| Длина лепестка, см              | 1,5±0,04  | 1,4±0,05  | 1,6±0,04  | 1,5±0,04  |
| Ширина лепестка, см             | 0,5±0,02  | 0,4±0,02  | 0,5±0,02  | 0,5±0,01  |

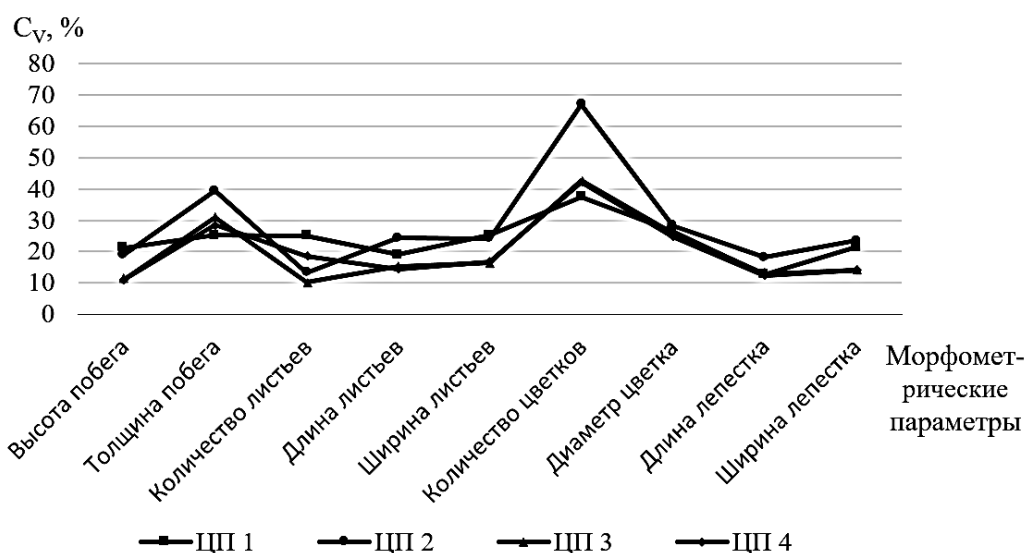


Рис. 1. Коэффициенты вариации ( $C_v$ ) морфометрических признаков в ЦП *S. monanthos*  
/ Fig. 1. Coefficients ( $C_v$ ) of variation of morphometric characters in *S. monanthos* cenopopulations

Вычислено расстояние Махаланобиса, или фенотипическая дистанция, между объектами. Во всех ЦП особи имеют равное разнообразие по морфоструктуре. Анализ фенотипической структуры *S. monanthos* выявил максимальное морфоструктурное разнообразие в ЦП 1 ( $10,7 \pm 2,03$ ), где, видимо, сказываются особенности местообитания (ледниковая морена в субальпийском поясе) с присутствием антропогенного воздействия, минимальное – в ЦП 2 ( $6,9 \pm 0,77$ ), где отмечены минимальные размерные данные особей. Также расстояние Махаланобиса показывает сходство или различие особей между ЦП. Максимальная дистанция между ЦП 2 и 4 (21,423), минимальная – между ЦП 1 и 3 (4,903). Чем меньше дистанция, тем выше фенотипическое сходство особей.

Дискриминантный анализ визуализирован на рис. 2. Особи исследованных ЦП *S. monanthos* расположены в пространстве двух канонических корней. Растения морфоструктурно различаются между собой, лишь особи из ЦП 1 и 3 частично пересекаются. Особи ЦП 2 и 4 несут значительные различия между собой по максимальным и минимальным значениям большинства морфометрических параметров. Каждая из них занимает свою площадь в каноническом пространстве, перекрытие между ними отсутствует.



Оценка жизненного состояния ЦП *S. monanthos* представлена в табл. 2. В ЦП 4 преобладают особи высшего класса. Ее отнесли к категории процветающих. Индекс качества ЦП здесь максимальный и равен 0,48. Эта ЦП занимает окраину смешанного леса, где достаточное освещение и наблюдаются оптимальные условия для произрастания растений. В оставшихся ЦП лидирующей стала доля особей низшего класса (с). Их отнесли к депрессивным ( $Q = 0,08-0,28$ ).

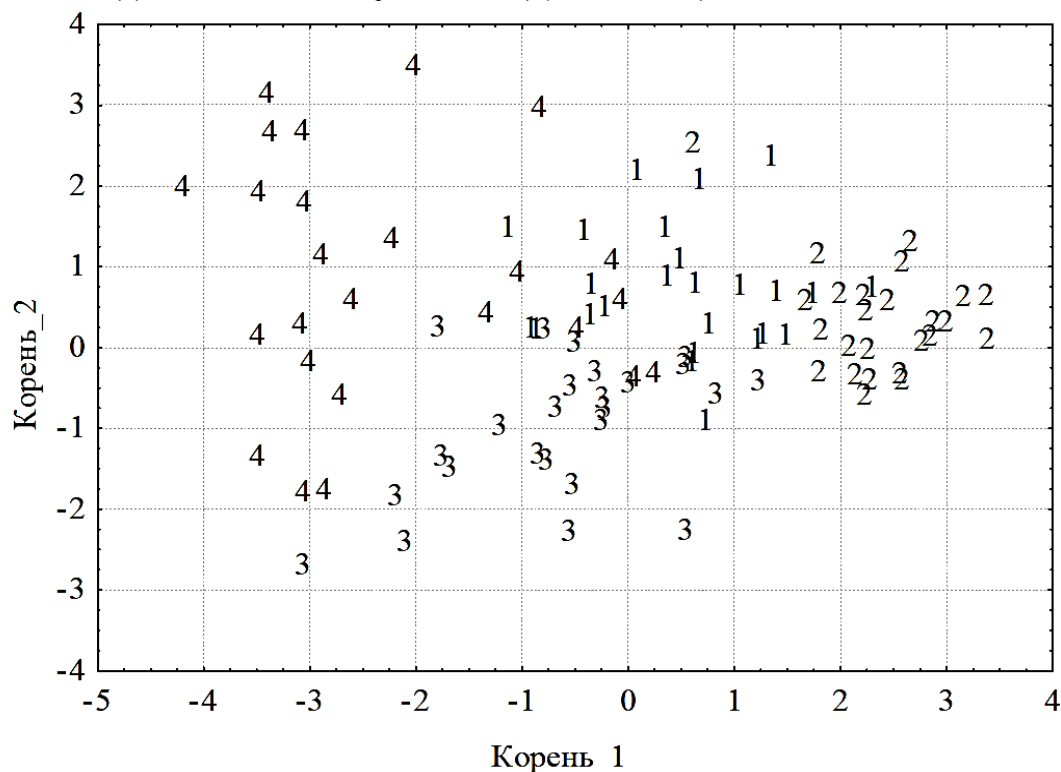


Рис. 2. Дискриминантный анализ ЦП *S. monanthos* по комплексу морфометрических признаков  
/ Fig. 2. Discriminant analysis of *S. monanthos* coenopopulations by a complex of morphometric characters

Таблица 2/ Table 2

Распределение особей *S. monanthos* по классам виталитета  
/ Distribution of *S. monanthos* individuals by vitality classes

| ЦП | Частота размерных классов, % |      |      | Индекс качества ЦП Q | Виталитетный тип ЦП |
|----|------------------------------|------|------|----------------------|---------------------|
|    | с                            | б    | а    |                      |                     |
| 4  | 0,04                         | 0,08 | 0,88 | 0,48                 | Процветающая        |
| 1  | 0,44                         | 0,24 | 0,32 | 0,28                 | Депрессивная        |
| 3  | 0,60                         | 0,20 | 0,20 | 0,20                 | «                   |
| 2  | 0,84                         | 0,08 | 0,28 | 0,08                 | «                   |

### Заключение

Проведенное изучение четырех ЦП редкого и малоизученного вида *Scilla monanthos* С. Koch. на территории РРНП (Республика Абхазия) выявило удовлетворительное состояние ЦП этого вида. Отдельные популяции подвергаются постоянному рекреационному воздействию, что крайне негативно сказывается на развитии вида в этих местообитаниях. Проведенный анализ морфометрических параметров показал, что по большинству показателей лидирует ЦП 4, где хорошие условия увлажнения и освещения; минимальные значения отмечены в ЦП 2, которая подвергается постоянному рекреационному воздействию (вытаптывание вдоль туристских троп или дорог). Для всех признаков отмечена нормальная степень изменчивости (10,2–42,7 %), только для числа цветков в ЦП 2 выявлена большая изменчивость ( $C_v=67,1\%$ ).

Результаты дискриминантного анализа показали, что растения морфоструктурно различаются между собой. Анализ фенотипической структуры *S. monanthos* выявил максимальное морфоструктурное разнообразие в ЦП 1, минимальное – в ЦП 2. Виталитетный анализ показал, что только ЦП 4 относится к процветающей ( $Q=0,48$ ), остальные ЦП – депрессивные ( $Q=0,08-0,28$ ).

По основным показателям наиболее оптимальные условия для произрастания *S. monanthos* складываются на склоне по опушке смешанного леса, где благоприятные по температурно-водному режиму климатические условия. Несмотря на достаточно стабильное состояние ЦП вида, необходим дальнейший мониторинг мест его произрастания. В особенности это относится к ЦП, которые стабильно подвергаются рекреационному воздействию.

#### Список источников

1. Тания И.В., Абрамова Л.М. К биологии эндемика *Fritilaria latifolia* Willd. в Ритинском реликтовом национальном парке (Республика Абхазия) // Изв. Самарского науч. центра РАН. 2013. Т. 15, № 3. С. 103–107.
2. Тания И.В., Абрамова Л.М. Современное состояние некоторых краснокнижных видов растений в Ритинском реликтовом национальном парке (Республика Абхазия) // Изв. Уфимского науч. центра РАН. 2015. № 2. С. 11–18.
3. Тания И.В., Абрамова Л.М., Мустафина А.Н. К биологии редкого эндемика *Primula farinosa* L. в Ритинском реликтовом национальном парке (Республика Абхазия) // Изв. Саратовского ун-та. 2015. Т. 15, вып. 3. С. 85–89.
4. Тания И.В., Абрамова Л.М., Мустафина А.Н. Узколокальные эндемичные виды Ритинского реликтового национального парка (Республика Абхазия): *Aquilegia gegica* и *Campanula mirabilis* // Вестн. Академии наук РБ. 2015. Т. 20, № 4 (80). С. 21–28.
5. Тания И.В., Абрамова Л.М., Мустафина А.Н. Современное состояние популяций редкого эндемика лилии Кессельринга в Ритинском реликтовом национальном парке (Республика Абхазия) // Вестн. Волгоградского ун-та. 2016. Т. 11, № 3 (17). С. 6–14.
6. Красная книга Краснодарского края. Растения и грибы. 3-е изд. / отв. ред. С.А. Литвинская [и др.]. Краснодар: Администрация Краснодар. края, 2017. 850 с.
7. Литвинская С.А. Атлас растений природной флоры Кавказа. М.: ЛАКОЛ, 2011. 364 с.
8. Колаковский А.А. Флора Абхазии. Тбилиси: Мецниереба, 1986. Т. IV. 281 с.
9. Литвинская С.А., Муртазаев Р.А. Флора Северного Кавказа: атлас-определитель. М.: Фитон XXI, 2013. 688 с.
10. Голубев В.Н. Основы биоморфологии травянистых растений центральной лесостепи // Тр. Центрально-черноземного заповедника им. В.В. Алехина. Воронеж: Воронежский ун-т, 1962. Вып. 7. 602 с.
11. Злобин Ю.А., Скляр В.Г., Клименко А.А. Популяции редких видов растений: теоретические основы и методика изучения. Сумы: Университетская книга, 2013. 439 с.
12. Халафян А.А. STATISTICA 6. Статистический анализ данных. М.: Бином-Пресс, 2008. 512 с.
13. McLachlant G.J. Discriminant analysis and statistical pattern recognition. New Jersey: John Wiley & Sons, 2005. 544 p.
14. Зайцев Г.Н. Математика в экспериментальной биологии. М.: Наука, 1990. 296 с.

#### References

1. Tania I.V., Abramova L.M. On the biology of the endemic *Fritilaria latifolia* Willd. in the Ritsa relict national park (Republic of Abkhazia). *Izv. Samarskogo nauch. tsentra RAN = Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2013;15(3):103-107. (In Russ.).
2. Tania I.V., Abramova L.M. The current state of some Red Book plant species in the Ritsa relict national park (Republic of Abkhazia). *Izv. Ufmskogo nauch. tsentra RAN = News of the Ufa Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2015;(2):11-18. (In Russ.).
3. Tania I.V., Abramova L.M., Mustafina A.N. Biology of the rare endemic *Primula farinosa* L. in the Ritsa relict national park (Republic of Abkhazia). *Izv. Saratovskogo un-ta = Izvestiya of Saratov University*. 2015;15(3):85-89. (In Russ.).
4. Tania I.V., Abramova L.M., Mustafina A.N. Narrow-local endemic species of the Ritsa relict national park (Republic of Abkhazia): *Aquilegia gegica* and *Campanula mirabilis*. *Vest. Akademii nauk RB = The Herald of the ASRB*. 2015;20(4):21-28. (In Russ.).
5. Tania I.V., Abramova L.M., Mustafina A.N. The current state of populations of a rare endemic Kesselring lily in the Ritsa relict national park (Republic of Abkhazia). *Vest. Volgogradskogo un-ta = Science Journal of Volgograd State University*. 2016;11(3):6-14. (In Russ.).

6. Litvinskaya S.A., ed. *Red Data Book of the Krasnodar Territory*. Plants and mushrooms. 3rd ed. Krasnodar: Administration of the Krasnodar territory Press; 2017. 850 p. (In Russ.).
7. Litvinskaya S.A. *Atlas of plants of the natural flora of the Caucasus*. Moscow: LAKOL Publ.; 2011. 364 p. (In Russ.).
8. Kolakovskiy A.A. *Flora of Abkhazia*. Tbilisi: Metsniereba Publ.; 1986. Vol. IV. 281 p. (In Russ.).
9. Litvinskaya S.A., Murtazaliev R.A. *Flora of the North Caucasus: Key Atlas*. Moscow: Fiton XXI Publ.; 2013. 688 p. (In Russ.).
10. Golubev V.N. Basic of biomorphology of herbaceous plants of central forest steppe. *Proceedings of the Alekhin Central Black Earth Reserve*. Voronezh: Voronezh University Press; 1962. Iss. 7. 602 p. (In Russ.).
11. Zlobin Yu.A., Sklyar V.G., Klimenko A.A. *Populations of rare plant species: theoretical bases and methods of study*. Sumy: Universitetskaya kniga Publ.; 2013. 439 p. (In Russ.).
12. Khalafyan A.A. *STATISTICA 6. Statistical Data Analysis*. Moscow: Binom-Press Publ.; 2008. 512 p. (In Russ.).
13. McLachlan G.J. *Discriminant analysis and statistical pattern recognition*. New Jersey: John Wiley & Sons Publ.; 2005. 544 p.
14. Zaytsev G.N. *Mathematics in experimental biology*. Moscow: Nauka Publ.; 1990. 296 p. (In Russ.).

#### **Информация об авторах**

Тания И.В. – кандидат географических наук, заведующая отделом науки и экологического просвещения, Рицинский реликтовый национальный парк; доцент кафедры географии, биолого-географический факультет, Абхазский государственный университет.

Мустафина А.Н. – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории дикорастущей флоры и интродукции травянистых растений.

Абрамова Л.М. – доктор биологических наук, профессор, заведующая лабораторией дикорастущей флоры и интродукции травянистых растений.

#### **Information about the authors**

Taniya I. V. - Candidate of Science (Geography), Head of the Department of Science and Environmental Education, Ritsa Relic National Park; Associate Professor of the Department of Geography, Faculty of Biology and Geography, Abkhaz State University.

Mustafina A.N. - Candidate of Science (Biology), Senior Researcher of Laboratory of Wild-Growing Flora and Introduction of Grassy Plants.

Abramova L.M. - Doctor of Science (Biology), Professor, Head of Laboratory of Wild-Growing Flora and Introduction of Grassy Plants.

Статья поступила в редакцию 04.12.2021; одобрена после рецензирования 11.01.2022; принята к публикации 16.03.2022.  
The article was submitted 04.12.2021; approved after reviewing 11.01.2022; accepted for publication 16.03.2022.

## НАШИ ЮБИЛЯРЫ

### OUR PERSONS

Персоналии

doi: 10.18522/1026-2237-2022-1-114-115

#### ВЛАДИМИР ЕВГЕНЬЕВИЧ ЗАКРУТКИН

(к 75-летию со дня рождения)

Personalities

#### VLADIMIR EVGENIEVICH ZAKRUTKIN

(on the Occasion of His 75th Birthday)



Владимир Евгеньевич Закруткин, доктор геолого-минералогических наук, профессор, в 1970 г. окончил Ростовский госуниверситет, в 1974 г. в Геологическом институте РАН защитил кандидатскую диссертацию, а в 1982-м там же – докторскую. С 1974 г. и по настоящее время работает в Южном федеральном университете. С 1991 по 2021 г. трудился в должности заведующего кафедрой геоэкологии и прикладной геохимии, в настоящее время – профессор этой кафедры. Создал и возглавляет научную школу «Закономерности формирования вещественного состава основных компонентов биосферы в условиях техногенеза».

В круг научных интересов Владимира Евгеньевича входят общая эволюция биосферы и причины биотических кризисов геологического прошлого, интегральная оценка состояния и районирование территорий по степени экологической напряженности, прогнозирование чрезвычайных ситуаций, связанных с опасными природными явлениями, техногенными авариями и катастрофами, геохимические закономерности антропогенных преобразований геосистем и нормирование техногенного воздействия

на природную среду. Результаты научных исследований Владимира Евгеньевича опубликованы более чем в 270 работах.

Владимир Евгеньевич – один из самых авторитетных экологов на Юге России, разработавших региональные экологические программы Ростовской области, утвержденные Законодательным собранием и губернатором. Главным результатом реализации этих программ явились комплексная оценка

состояния окружающей среды Ростовской области и районирование ее территории по степени экологической напряженности, на основании которой большим коллективом ученых и специалистов во главе с В.Е. Закруткиным создан «Экологический атлас Ростовской области». По полноте охвата экологических проблем, комплексности подхода он представляет собой уникальное исследование, вносящее значительный вклад в оценку экологического состояния одного из крупнейших субъектов Российской Федерации, и служит основой для реализации путей перехода Ростовской области к устойчивому развитию.

Владимир Евгеньевич Закруткин долгие годы являлся председателем экспертной комиссии Управления Росприроднадзора по Ростовской области. В настоящее время он – эксперт Экспертного совета при Правительстве РФ, член Консультативного совета при полномочном представителе Президента РФ в ЮФО, эксперт Департамента Росприроднадзора по Южному федеральному округу, эксперт РАН, член Экспертного совета РФФИ по региональным конкурсам.

За большой личный вклад в улучшение состояния окружающей среды и работу по пропаганде экологических знаний среди населения В.Е. Закруткин удостоен звания лауреата премии Госкомэкологии Ростовской области, имеет благодарственное письмо полномочного представителя Президента РФ в Южном федеральном округе за большой личный вклад в дело организации охраны окружающей среды и экологической безопасности Юга России. Награжден почетной грамотой Министерства образования Российской Федерации, медалью за заслуги перед Южным федеральным университетом.

Владимир Евгеньевич ведет плодотворную научно-педагогическую работу, воспитание и подготовку специалистов высокого класса. На протяжении 15 лет он был председателем диссовета по двум географическим специальностям. Под его руководством и научным консультированием защищены 11 кандидатских и одна докторская диссертация. В.Е. Закруткин пользуется заслуженным авторитетом у студентов и преподавателей. Он щедро делится своим опытом с коллегами по Институту наук о Земле ЮФУ, вносит большой вклад в достижение ключевых стратегических целей развития университета и высокое качество выполняемых работ.

Много лет Владимир Евгеньевич является председателем редколлегии журнала «Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки» и способствует развитию и распространению научных знаний.

Поздравляем Владимира Евгеньевича с юбилеем, желаем ему дальнейших творческих успехов, здоровья, жизненного благополучия!

*Г.Ю. Складенко, О.В. Назаренко*

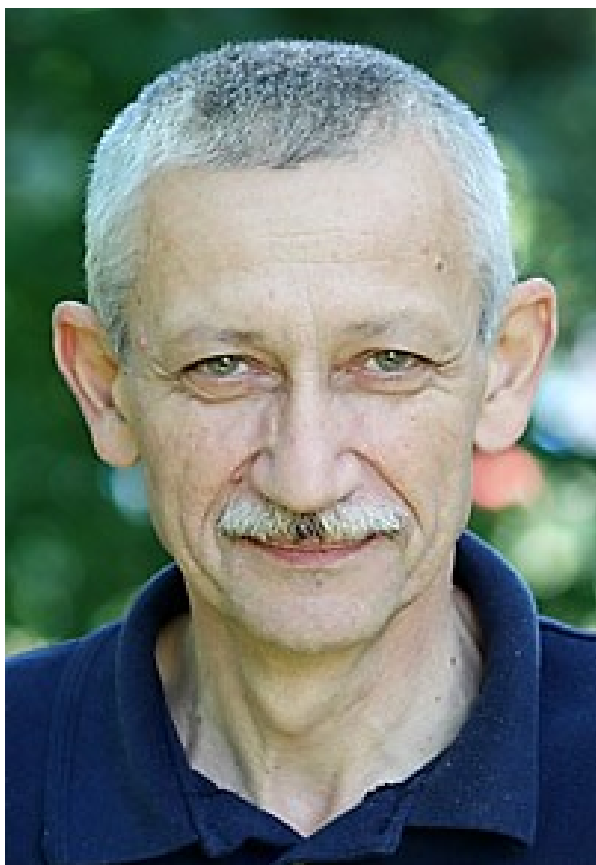
Персоналии

doi: 10.18522/1026-2237-2022-1-116-118

**ЯКОВ МИХАЙЛОВИЧ ЕРУСАЛИМСКИЙ**  
(к 75-летию со дня рождения)

Personalities

**YAKOV MIKHAILOVICH ERUSALIMSKY**  
(on the Occasion of His 75th Birthday)



28 марта 2022 г. исполнилось 75 лет заслуженному работнику высшей школы РФ, доктору технических наук, профессору кафедры алгебры и дискретной математики Южного федерального университета Якову Михайловичу Ерусалимскому.

После окончания с золотой медалью средней школы № 22 г. Ростова-на-Дону в 1965 г., механико-математического факультета РГУ по специальности «Математика» в 1970 г. и аспирантуры Яков Михайлович прошел путь в родном университете от ассистента до доктора наук, профессора, декана факультета. С 1983 г. он работал заместителем декана механико-математического факультета РГУ сначала по учебной, затем по научной работе, а с 1988 по 2008 г. был деканом мехмата. Неценима его роль в развитии и сохранении научных, педагогических и этических традиций факультета, в формировании атмосферы профессионализма и высокой требовательности. Значительны его заслуги в организации работы факультета в новом корпусе, в создании достойных условий для студентов и преподавателей.

Научные интересы Якова Михайловича достаточно разнообразны. В кандидатской диссертации «Операторы мультипликативной дискретной свертки. Нетеровость и индекс» (1976 г., научный руководитель – профессор, заслуженный деятель

науки РФ И.Б. Симоненко) им был предложен новый оригинальный подход к исследованию дискретных операторов на нетеровость с помощью их континуальных аналогов. Традиционно в математике действуют либо наоборот, переходя от континуальных операторов к дискретным, либо такие объекты изучают на основе иных подходов. Эти исследования в значительной мере опирались на общую теорию операторов локального типа, разработанную И.Б. Симоненко.

В дальнейшем Я.М. Ерусалимский переключился на исследования в области теории графов и её приложений. Основная особенность изучаемых им и его учениками задач состоит в том, что не все пути на графе допустимы в силу наложенных ограничений. Это делает невозможным применение напрямую хорошо известных алгоритмов нахождения кратчайших путей, максимальных потоков и т.п. Существенным для решения задач в такой постановке является построение вспомогательного графа, на котором отсутствуют ограничения на достижимость. Между множеством путей на вспомогательном и множеством допустимых путей на исходном графе имеется некоторое соответствие, что

позволяет применять известные алгоритмы на вспомогательном графе, получать результаты для исходного графа. В 2015 г. Яков Михайлович защитил докторскую диссертацию по специальности «теоретические основы информатики» на тему «Разработка и исследование методов решения экстремальных задач на ориентированных графах и сетях с ограничениями на достижимость». На базе этих исследований он создал и возглавляет в ЮФУ научную школу «Нестандартная достижимость на ориентированных графах и сетях».

Исследования Я.М. Ерусалимского поддержаны международными и российскими грантами, в процессе создания своей научной школы были подготовлены 10 кандидатов и один доктор наук.

Значительна роль Якова Михайловича в формировании научной тематики в журнале «Известия вузов. Северо-Кавказский регион» (серия «Естественные науки»), членом редколлегии которого он является многие годы. Он также является членом редколлегий журналов «Вестник Санкт-Петербургского университета», (прикладная математика, информатика, теория управления), *Universal Journal of Applied Mathematics*, «Вестник ВГУ. Серия: Физика. Математика», «Вестник ДГУ. Естественные науки», референтом *Zentralblatt MATH*.

Профессор Я.М. Ерусалимский – прекрасный лектор, уже много лет читающий курсы «Алгебра и геометрия», «Дискретная математика» на механико-математическом факультете (ныне Институт математики, механики и компьютерных наук ЮФУ). Его лекции стали основой для написанных им учебников, широко используемых не только в ЮФУ, но и в других университетах России. И лекции, и учебники отличаются глубиной содержания и ясным языком, методическая целостность, разнообразие примеров и приложений. Учебное пособие «Дискретная математика: теория, задачи, приложения» (М.: Вузовская книга, 1999) имеет гриф Министерства образования РФ; увидели свет уже 12 его изданий. Учебник «Математика. Общий курс», написанный им в соавторстве с Б.М. Владимирским и А.Б. Горстко, стал в 1998 г. победителем проведенного Министерством образования РФ Всероссийского конкурса учебников нового поколения по общим фундаментальным и естественно-научным дисциплинам, имеет гриф «Допущено Министерством образования РФ в качестве учебника для бакалавров естественно-научных направлений» и выпущен издательством «Лань» (Санкт-Петербург) в 2002 г. Это первый учебник математики для естественно-научных направлений и специальностей, полностью соответствующий по своему содержанию новым стандартам высшего образования, в который впервые включены и такие современные разделы, как «Дискретная математика», «Методы оптимизации», «Математическое моделирование». Выход в 2004 г. второго издания и в 2006 г. – третьего свидетельствует о его востребованности. Нельзя не отметить и его учебник «Дискретная математика. Теория и практикум» (СПб.: Лань, 2018), который стал настольной книгой преподавателей и студентов, изучающих дискретную математику, а также учебник «Алгебра и геометрия» (соавт. И.А. Чернявская, 2020 г.), адресованный студентам, изучающим механику и компьютерные науки. Он автор и соавтор 5 монографий, в том числе не только по математике, но и по вопросам организации высшего образования и методике преподавания математических дисциплин. Всего им опубликовано уже более 240 научных и учебно-методических работ.

За разработку учебников и учебных пособий для высшей школы Я.М. Ерусалимский в 2005 г. награжден медалью им. К.Д. Ушинского, его деятельность в области образования высоко оценена, он удостоен званий «Заслуженный работник высшей школы РФ» (2007 г.), «Почетный работник высшего профессионального образования РФ» (2000 г.). В 2015 г. награжден двумя медалями: «За доблестный труд на благо Донского края» и «За заслуги перед Южным федеральным университетом» I степени.

Яков Михайлович – блестящий популяризатор математики. Он неоднократно читал лекции учителям, студентам и школьникам Волгограда, Ставрополя, Краснодар, Майкопа, Ростова-на-Дону, Черкесска. Большую помощь он оказывает школам Ростова и области не только в деле подготовки абитуриентов, но и в совершенствовании педагогического мастерства учителей математики, участвуя в семинарах и конференциях, делясь своим богатым опытом решения задач повышенной сложности, методикой преподавания различных разделов элементарной (и далеко не элементарной) математики. Его лекции о красоте и простоте математики стали основой для его научно-популярных книг «Треугольник Паскаля: комбинаторика и случайные блуждания» (ЮФУ, 2017; М.: Вузовская книга, 2019), «Эта "простая" математика» (ЮФУ, 2018), «Эта "простая" и "красивая" математика» (2021), последняя написана совместно с Г.Р. Малонекком из Университета Авейро (Португалия).

Благодаря научно-организационному и педагогическому опыту Яков Михайлович приносит большую пользу родному университету. Он входит в состав и является членом следующих научных и

педагогических структур: ученого совета ЮФУ, совета института математики, механики и компьютерных наук им. И.И. Воровича, кадровой комиссии ЮФУ, комиссии ученого совета ЮФУ по кадровой политике и работе с молодыми учеными, аттестационной комиссии ЮФУ по вопросам защиты диссертаций на соискание ученой степени, а также ФУМО по компьютерным наукам.

В последние годы он был председателем рейтинговой комиссии Южного федерального университета, активно участвовал в формулировке ясных и понятных требований к оценке качества работы преподавателей, способствуя научному и педагогическому росту сотрудников университета.

Яков Михайлович – обаятельный человек, прекрасный и эрудированный собеседник. Ему присущи доброжелательность и теплота в отношениях с людьми, отзывчивость, контактность и порядочность. Он прост в общении, готов всегда прийти на помощь в трудной ситуации, оказать содействие и словом, и делом.

Коллектив Института математики, механики и компьютерных наук им. И.И. Воровича ЮФУ поздравляет Якова Михайловича с юбилейной датой, желает здоровья и новых творческих успехов в деле воспитания новых поколений студентов и преподавателей!

*А.О. Ватульян, М.И. Карякин*

*Редколлегия и редакция журнала поздравляют Владимира Евгеньевича и Якова Михайловича с их замечательным юбилеем, желают им крепкого здоровья и благополучия, новых творческих успехов, благодарных учеников и последователей!*



**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](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. Текст должен быть набран в редакторе Microsoft Office Word 2000, 2003, 2007, 2010, 2016 через 1,5 интервала, шрифтом Times New Roman, размером 14 пт, страницы пронумерованы.
3. 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). В неподписной период отдельные номера журнала за нынешний и прошлые годы можно приобрести в редакции.

Адрес для переписки: 344006, г. Ростов-на-Дону, ул. Б. Садовая, 105/42, ЮФУ, редакция журнала «Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки».

Тел./факс главной редакции (863) 218-40-00, добавочный 11-093, 11-094.

E-mail: [izvestiya@sfedu.ru](mailto:izvestiya@sfedu.ru)

Адрес в Интернете: [www.izvestiya.sfedu.ru](http://www.izvestiya.sfedu.ru)

ISSN 1026-2237. Doi 10.18522/1026-2237-2022-1. Известия высших учебных заведений.  
Северо-Кавказский регион. Естественные науки.

2022. № 1