

ИЗВЕСТИЯ
ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

*Северо-Кавказский
регион*

ЕСТЕСТВЕННЫЕ

НАУКИ

2024

2

Журнал основан в 1972 г. Ю.А. Ждановым

Главная редакция:

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

Редакционная коллегия:

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

Учредители:

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

Journal was founded in 1972 by Yu.A. Zhdanov

Main Edition:

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

Editorial Board:

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

The Founders

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

ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ. СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ РЕГИОН

BULLETIN OF HIGHER EDUCATIONAL INSTITUTIONS. NORTH CAUCASUS REGION

doi: 10.18522/1026-2237-2024-2

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
№ 2 (222) 2024 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. 2 (222) 2024

ЕСТЕСТВЕННЫЕ НАУКИ

NATURAL SCIENCE

СОДЕРЖАНИЕ

CONTENTS

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ

PHYSICAL AND MATHEMATICAL SCIENCES

<i>Ашихмин С.С.</i> Об операторах типа свертки с ядрами из модифицированных пространств Морри 4	<i>Ashikhmin S.S.</i> On Convolution-Type Operators with Kernels from Modified Morrey Spaces 4
<i>Белявский Г.И., Мишин Н.А., Ажогин К.Э.</i> Алгоритм аппроксимации сигналов для классификации электроэнцефалограмм человека 12	<i>Belyavsky G.I., Mishin N.A., Azhogin K.E.</i> Signal Approximation Algorithm for Human Electroencephalograms Classification 12
<i>Ватульян А.О., Козаченко И.С.</i> О деформировании решетчатой пластинки глаза 21	<i>Vatulyan A.O., Kozachenko I.S.</i> About the Deformation of the Lamina Cribrosa of the Eye 21
<i>Зубов Л.М., Гайбарян С.А.</i> Задача нелинейной теории упругости о растяжении и кручении составного цилиндра с предварительно напряжённым включением, содержащим винтовую дислокацию 33	<i>Zubov L.M., Gaybaryan S.A.</i> The Problem of Nonlinear Elasticity Theory of Tension and Torsion of a Composite Cylinder with a Prestressed Inclusion, Containing a Screw Dislocation 33
<i>Сумбатян М.А., Черникова М.В.</i> Явные решения в проблеме звукоизоляции с использованием многослойных структур при нормальном прохождении волн 40	<i>Sumbatyan M.A., Chernikova M.V.</i> Explicit Solutions in the Problem of Sound Isolation by Using Multilayered Structures with the Normal Wave Propagation 40

НАУКИ О ЗЕМЛЕ

SCIENCES OF EARTH

<i>Аджиев А.Х., Куповых Г.В., Юрченко Н.В., Кереева З.М.</i> Аномальный грозовой процесс на территории Ростовской области 50	<i>Adzhiev A.Kh., Kupovykh G.V., Yurchenko N.V., Kerefova Z.M.</i> Anomal Thunderstorm Process in the Territory of the Rostov Region 50
<i>Белусова О.В., Тимошенко Д.В., Куповых Г.В.</i> Структура электрического поля в конвективно-турбулентном приземном слое атмосферы 57	<i>Belousova O.V., Timoshenko D.V., Kupovykh G.V.</i> Electric Field Structure in the Convective-Turbulent Atmospheric Surface Layer 57

Бурдуковский М.Л. Содержание и запасы подвижных форм фосфора в постагрогенных почвах Приморского края.....	66	Burdukovskii M.L. Content and Stocks of Mobile Phosphorus Forms in the Postagrogenic Soils of Primorsky Region.....	66
Гаевая Э.А., Безуглова О.С. Прогноз развития процессов деградации на эрозионно опасных склонах черноземов обыкновенных Ростовской области.....	72	Gaevaya E.A., Bezuglova O.S. Forecast of the Development of Degradation Processes on Erosion-Hazardous Slopes of Ordinary Chernozems of the Rostov Region...	72
Гузев О.А., Корвякова Н.П. О классификации и обусловленности факторов самонагрева углеродного отвала Донбасса.....	84	Guzeev O.A., Korvyakova N.P. On Classification and Conditionality of Self-Heating Factors of Coal Rock Dump of Donbass.....	84
Даукаев Ас.А., Забуряева Х.Ш., Даукаев Ар.А., Батукаев А.А. Основные маршруты экологического туризма в Чеченской Республике.....	92	Daukaev As.A., Zaburaeva Kh.Sh., Daukaev Ar.A., Batukaev A.A. The Main Routes of Ecological Tourism in the Chechen Republic	92
Карташев С.С., Безуглова О.С. Влияние гумата калия и гуминового препарата «Био-Дон» на азотный режим чернозема обыкновенного под горохом	100	Kartashev S.S., Bezuglova O.S. The Effect of Potassium Humate and a Humic Preparation “Bio-Don” on the Nitrogen Regime of the Calcic Chernozem under the Peas	100
Шагин С.И., Пшук А.М., Кокоева А.А., Блиева О.З. Изучение радиоактивности вод горных рек Кабардино-Балкарской Республики с использованием детектора NaI в низкофоновой защите	113	Shagin S.I., Pshukov A.M., Kokoeva A.A., Blieva O.Z. Study of Radioactivity of Mountain Rivers Waters of the Kabardino-Balkarian Republic Using the NaI De-tector in Low-Background Protection	113
Юзбеков А.К., Куманяев А.С. Оценка влияния старовозрастных ельников на углеродный баланс таежных лесов Валдая.....	123	Yuzbekov A.K., Kumanyaev A.S. Impact of Old-Aged Spruce Forests on the Carbon Balance of the Coniferous Forest Stand of the Valday Region	123

БИОЛОГИЧЕСКИЕ НАУКИ

BIOLOGICAL SCIENCES

Тимошенко А.Н., Колесников С.И., Евстегнеева Н.А., Кабакова В.С., Минникова Т.В., Казеев К.Ш., Денисова Т.В. Изменение активности оксидоредуктаз чернозема обыкновенного при загрязнении платиной..	131	Timoshenko A.N., Kolesnikov S.I., Evstegneeva N.A., Kabakova V.S., Minnikova T.V., Kazeev K.Sh., Denisova T.V. Changes in the Activity of Oxidoreductases of Ordinary Chernozem During Platinum Contamination	131
Цепина Н.И., Колесников С.И., Минникова Т.В., Русева А.С., Труфанов Д.А. Оценка фитотоксичности наночастиц серебра в черноземе обыкновенном	138	Tsepina N.I., Kolesnikov S.I., Minnikova T.V., Ruseva A.S., Trufanov D.A. Assessment of Phytotoxicity of Silver Nanoparticles in Ordinary Chernozem	138
Чистяков В.А., Денисенко Ю.В., Празднова Е.В., Емельянцева С.А. Старение и надежность: как вариации во времени интенсивности отказов влияют на форму кривых дожития стареющих организмов	144	Chistyakov V.A., Denisenko Yu.V., Prazdnova E.V., Emelyantsev S.A. Aging and Reliability: How Do Variations in the Failure Rate Affect the Shape of the Survival Curves of Aging Organisms.....	144

НАУЧНАЯ ЖИЗНЬ

SCIENTIFIC LIFE

Миноранский В.А., Тимофеев Ю.В. Фестиваль природного богатства и красоты донской степи.....	156	Minoransky V.A., Timofeenko Yu.V. Festival of Natural Wealth and Beauty of the Don Steppe	156
--	-----	--	-----

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ PHYSICAL AND MATHEMATICAL SCIENCES

Научная статья
УДК 517.9
doi: 10.18522/1026-2237-2024-2-4-11

ОБ ОПЕРАТОРАХ ТИПА СВЕРТКИ С ЯДРАМИ ИЗ МОДИФИЦИРОВАННЫХ ПРОСТРАНСТВ МОРРИ

Сергей Сергеевич Ашихмин
Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, Россия
sashihmin@sfedu.ru

Аннотация. Изучаются операторы вида $M_a H$, $H M_a$ и H_b , где M_a – оператор умножения на существенно ограниченную функцию a ; H – интегральный оператор свертки с ядром h ; H_b – интегральный оператор с ограниченной характеристикой $b(x, y)$. Предполагается, что ядро h принадлежит пересечению пространств Морри и Лебега, а сами операторы действуют при этом из пространства Лебега в пространство Морри. Сначала, используя условия предкомпактности множества в пространстве Морри, доказывается компактность оператора $M_a H$ в предположении, что функция a стремится к нулю на бесконечности. Далее рассматривается коммутатор операторов M_a и H . Показано, что если функция a принадлежит классу функций с определенным поведением на бесконечности, то коммутатор будет компактным оператором. Это, в свою очередь, позволяет установить компактность оператора $H M_a$. В частности, показано, что операторы $P_X H$ и $H P_X$, где P_X – оператор умножения на характеристическую функцию ограниченного измеримого множества X , являются компактными. В заключительной части работы рассматривается интегральный оператор H_b . Показано, что если характеристика b имеет заданное поведение на бесконечности, то оператор H_b компактен.

Ключевые слова: компактность, оператор свертки, оператор умножения, пространство Морри, модифицированное пространство Морри

Для цитирования: Ашихмин С.С. Об операторах типа свертки с ядрами из модифицированных пространств Морри // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2024. № 2. С. 4–11.

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

Original article

ON CONVOLUTION-TYPE OPERATORS WITH KERNELS FROM MODIFIED MORREY SPACES

Sergey S. Ashikhmin
Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia
sashihmin@sfedu.ru

© Ашихмин С.С., 2024

Abstract. We investigate operators of the form $M_a H$, $H M_a$, and H_b , where M_a is the multiplication operator on the function a , H is the integral convolution operator with the kernel h , and H_b is the integral operator with the bounded characteristic $b(x, y)$. It is assumed that the kernel h belongs to the intersection of the Lebesgue and Morrey spaces, and the operators themselves act from the Lebesgue space to the Morrey space. First, using conditions for the precompactness of a set in the Morrey space, we prove the compactness of the operator $M_a H$, wherein it is assumed that the function a approaches zero at infinity. Next, the commutator of the operators M_a and H is considered. It is shown that if the function a belongs to a certain class of functions with a given behavior at infinity, then the commutator is the compact operator. This, in turn, allows us to establish the compactness of the operator $H M_a$. In particular, we prove that the operators $P_X H$ and $H P_X$ are compact, where P_X is the multiplication operator on the characteristic function of a bounded measurable set X . Finally, the integral operator H_b is considered. It is shown that if characteristic b has a given behavior at infinity, then the operator H_b is compact.

Keywords: compactness, convolution operator, multiplication operator, Morrey space, modified Morrey space

For citation: Ashikhmin S.S. On Convolution-Type Operators with Kernels from Modified Morrey Spaces. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2024;(2):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).

Введение

Пространствам Морри и их обобщениям посвящено множество работ [1, 2]. Исследования этих пространств начались со знаменитой статьи Ч. Морри [3] и продолжают в настоящее время по нескольким направлениям. В последнее десятилетие обнаружился интерес к изучению интегральных операторов свертки в пространствах Морри. Так, в [4] рассмотрены операторы свертки в общих пространствах типа Морри и установлен аналог неравенства Юнга для свертки в этих пространствах. В [5, 6] были получены достаточные условия компактности в пространствах Морри и обобщенных пространствах Морри композиции оператора свертки и оператора умножения на существенно ограниченную функцию, а в [7] исследовалась обратимость оператора свертки в этих пространствах. Работа [8] посвящена операторам типа свертки с ядрами вида $b(x, y)h(x - y)$.

В данной статье исследуется компактность операторов типа свертки двух типов. Первый тип является произведением оператора свертки, ядро которого принадлежит модифицированному пространству Морри, и оператора умножения на функцию из $L_\infty(\mathbb{R}^n)$. Доказано, что если эта функция стремится к нулю на бесконечности, то произведение является компактным оператором. Рассматривается, кроме того, коммутатор оператора свертки и оператора умножения на функцию. Показано, что если выполнены определенные условия на поведение этой функции на бесконечности, то коммутатор компактен. Второй тип представляет собой оператор вида

$$(H_b \varphi)(x) = \int_{\mathbb{R}^n} b(x, y)h(x - y)\varphi(y)dy, \quad x \in \mathbb{R}^n. \quad (1)$$

Показано, что если функция $b(x, y)$, называемая характеристикой, отвечает заданным условиям поведения на бесконечности, то оператор H_b компактен.

Ниже использованы следующие обозначения: \mathbb{R}^n – n -мерное евклидово пространство; $x = (x_1, \dots, x_n) \in \mathbb{R}^n$; $\mathbb{B}(x, r)$ – открытый шар в \mathbb{R}^n радиуса r с центром в точке x ; $\mathbb{C}\mathbb{B}(x, r) = \mathbb{R}^n \setminus \mathbb{B}(x, r)$; P_X – оператор умножения на характеристическую функцию измеримого множества $X \subset \mathbb{R}^n$; $P_N := P_{\mathbb{B}(0, N)}$, $Q_N := P_{\mathbb{C}\mathbb{B}(0, N)}$, где N – натуральное число; $C_0(\mathbb{R}^n)$ – множество всех непрерывных на \mathbb{R}^n функций $v(t)$ таких, что $\lim_{t \rightarrow \infty} v(t) = 0$.

Предварительные сведения

Пусть $1 \leq p \leq \infty$, $X \subseteq \mathbb{R}^n$ – измеримое множество. Тогда $L_p(X)$ – пространство (классов) измеримых комплекснозначных функций с нормой $\|f\|_{L_p(X)} = (\int_X |f(t)|^p dt)^{1/p}$, $1 \leq p < \infty$; $\|f\|_{L_\infty(X)} = \text{ess sup}_{t \in X} |f(t)|$.

В случае $X = \mathbb{R}^n$ будем использовать обозначение $\|\cdot\|_p$ вместо $\|\cdot\|_{L_p(X)}$. Далее будем говорить, что $f \in L_p^{loc}(\mathbb{R}^n)$, если $f \in L_p(K)$ для любого компакта $K \subset \mathbb{R}^n$.

Определение 1. Пусть $1 \leq p \leq \infty$ и $\lambda \in \mathbb{R}$. Говорят, что функция $f \in L_{p,\lambda}(\mathbb{R}^n)$, если $f \in L_p^{loc}(\mathbb{R}^n)$ и

$$\|f\|_{L_{p,\lambda}(\mathbb{R}^n)} \equiv \|f\|_{p,\lambda} = \sup_{x \in \mathbb{R}^n, r > 0} \frac{\|f\|_{L_p(\mathbb{B}(x,r))}}{r^\lambda} < \infty. \quad (2)$$

Относительно обычных линейных операций и нормы, определяемой (2), множество $L_{p,\lambda}(\mathbb{R}^n)$ образует банахово пространство, которое называют пространством Морри.

Пространства Морри $L_{p,\lambda}(\mathbb{R}^n)$ являются нетривиальными, т.е. состоят не только из функций, эквивалентных нулю на \mathbb{R}^n , тогда и только тогда, когда $0 \leq \lambda \leq n/p$. При $\lambda = 0$ и $\lambda = n/p$ пространства Морри совпадают с L_p -пространствами: $L_{p,0}(\mathbb{R}^n) = L_p(\mathbb{R}^n)$, $L_{p,n/p}(\mathbb{R}^n) = L_\infty(\mathbb{R}^n)$.

Как известно, из того, что $f \in L_{p,\lambda}(\mathbb{R}^n)$, вообще говоря, не следует, что $f \in L_p(\mathbb{R}^n)$ [4, с. 11]. Поэтому наряду с пространствами Морри возникает необходимость рассматривать пересечение $L_p(\mathbb{R}^n) \cap L_{p,\lambda}(\mathbb{R}^n)$.

Определение 2. Пусть $1 \leq p < \infty$, $0 \leq \lambda \leq n/p$, $[r]_1 := \min\{1, r\}$. Говорят, что функция $f \in \hat{L}_{p,\lambda}(\mathbb{R}^n)$, если $f \in L_p^{loc}(\mathbb{R}^n)$ и $\|f\|_{\hat{L}_{p,\lambda}(\mathbb{R}^n)} \equiv \|f\|_{\hat{p},\lambda} = \sup_{x \in \mathbb{R}^n, r > 0} \frac{\|f\|_{L_p(\mathbb{B}(x,r))}}{[r]_1^\lambda} < \infty$.

Пространство $\hat{L}_{p,\lambda}(\mathbb{R}^n)$ называют модифицированным пространством Морри. Впервые оно было введено и изучено в [9] (см. также [10, 11]).

Лемма 1 [11]. Пусть $1 \leq p < \infty$, $0 \leq \lambda \leq n/p$. Тогда $\hat{L}_{p,\lambda}(\mathbb{R}^n) = L_p(\mathbb{R}^n) \cap L_{p,\lambda}(\mathbb{R}^n)$ и $\|f\|_{\hat{p},\lambda} = \max\{\|f\|_p, \|f\|_{p,\lambda}\}$.

Рассмотрим оператор свертки

$$(H\varphi)(x) = \int_{\mathbb{R}^n} h(x-y)\varphi(y)dy, \quad t \in \mathbb{R}^n, \quad (3)$$

с ядром $h \in \hat{L}_{s,\lambda p/s}(\mathbb{R}^n)$. В [4] показано, что при выполнении условий

$$1 < q < p < \infty, \quad 1 < s < p < \infty, \quad \frac{1}{q} + \frac{1}{s} = \frac{1}{p} + 1, \quad 0 < \lambda < \frac{n}{p} \quad (4)$$

оператор H ограничен из $L_q(\mathbb{R}^n)$ в $L_{p,\lambda}(\mathbb{R}^n)$, причем для любой функции $\varphi \in L_q(\mathbb{R}^n)$ справедливо неравенство

$$\|H\varphi\|_{p,\lambda} \leq \|h\|_{s,\lambda p/s}^{s/p} \|h\|_s^{1-s/p} \|\varphi\|_q. \quad (5)$$

Произведение оператора свертки и оператора умножения

Обозначим через M_a оператор умножения на функцию $a \in L_\infty(\mathbb{R}^n)$. Этот оператор ограничен в пространстве $L_{p,\lambda}(\mathbb{R}^n)$, и для любой функции $\psi \in L_{p,\lambda}(\mathbb{R}^n)$ справедливо неравенство

$$\|M_a\psi\|_{p,\lambda} \leq \|a\|_\infty \|\psi\|_{p,\lambda}. \quad (6)$$

Основным объектом исследования в данном пункте является оператор $M_a H$. Первоначально будем считать, что $a \in C_0(\mathbb{R}^n)$.

Для доказательства следующей леммы используем условия предкомпактности множества, лежащего в пространстве Морри.

Предложение 1 [12]. Пусть $1 \leq p \leq \infty$, $0 < \lambda < n/p$ и $\Psi = \{\psi\}$ – множество функций из $L_{p,\lambda}(\mathbb{R}^n)$ и выполнены следующие условия:

i) множество Ψ ограничено, т.е. существует $C > 0$ такое, что $\|\psi\|_{p,\lambda} \leq C$ для любой функции ψ из Ψ ;

ii) $\lim_{\delta \rightarrow 0} \|\psi(\cdot + \delta) - \psi(\cdot)\|_{p,\lambda} = 0$ равномерно относительно $\psi \in \Psi$;

iii) $\lim_{\rho \rightarrow 0} \|\psi\chi_\rho\|_{p,\lambda} = 0$ равномерно относительно $\psi \in \Psi$, где χ_ρ – характеристическая функция множества $\mathbb{R}^n \setminus \mathbb{B}(0, \rho)$.

Тогда множество Ψ предкомпактно в пространстве $L_{p,\lambda}(\mathbb{R}^n)$.

Лемма 2. Пусть выполнены условия (4), $a \in C_0(\mathbb{R}^n)$ и $h \in \hat{L}_{s,\lambda p/s}(\mathbb{R}^n)$. Тогда $M_a H$ – компактный оператор, действующий из $L_q(\mathbb{R}^n)$ в $L_{p,\lambda}(\mathbb{R}^n)$.

Доказательство. Пусть $\Phi = \{\varphi\}$ – произвольное ограниченное множество в $L_q(\mathbb{R}^n)$, т.е. существует такое число $C > 0$, что $\|\varphi\|_q \leq C$ для любой функции $\varphi \in \Phi$. Пользуясь предложением 1, покажем, что множество $\{M_a H\varphi\}$, где $\varphi \in \Phi$, предкомпактно в пространстве $L_{p,\lambda}(\mathbb{R}^n)$. Проверим все три условия.

С помощью неравенств (5) и (6) получаем

$$\|M_a H\varphi\|_{p,\lambda} \leq \|a\|_\infty \|H\varphi\|_{p,\lambda} \leq \|a\|_\infty \|h\|_{s,\lambda p/s}^{s/p} \|h\|_s^{1-s/p} \|\varphi\|_q \leq C \|a\|_\infty \|h\|_{s,\lambda p/s}^{s/p} \|h\|_s^{1-s/p},$$

т.е. условие i) выполнено.

Проверим условие ii). Отметим, что норма в пространстве Морри инвариантна относительно сдвига

$$\|f(\cdot + \delta)\|_{p,\lambda} = \|f\|_{p,\lambda}, \quad \delta \in \mathbb{R}^n. \tag{7}$$

Действительно, с помощью замены переменной $t + \delta = u$ имеем

$$\|f(\cdot + \delta)\|_{L_p(\mathbb{B}(x,r))} = \|f\|_{L_p(\mathbb{B}(x+\delta,r))}, \text{ а из биективности отображения } x \mapsto x + \delta \text{ получаем равенство}$$

$$\sup_{x \in \mathbb{R}^n, r > 0} \frac{\|f\|_{L_p(\mathbb{B}(x,r))}}{r^\lambda} = \sup_{x+\delta \in \mathbb{R}^n, r > 0} \frac{\|f\|_{L_p(\mathbb{B}(x+\delta,r))}}{r^\lambda}.$$

Далее для функции $\varphi \in \Phi$ имеем

$$\begin{aligned} \|(M_a H\varphi)(\cdot + \delta) - (M_a H\varphi)(\cdot)\|_{p,\lambda} &= \|a(\cdot + \delta)(H\varphi)(\cdot + \delta) - a(\cdot)(H\varphi)(\cdot)\|_{p,\lambda} \leq \\ &\leq \|(a(\cdot + \delta) - a(\cdot))(H\varphi)(\cdot + \delta)\|_{p,\lambda} + \|a(\cdot)((H\varphi)(\cdot + \delta) - (H\varphi)(\cdot))\|_{p,\lambda} \leq \\ &\leq \|a(\cdot + \delta) - a(\cdot)\|_\infty \|H\varphi(\cdot + \delta)\|_{p,\lambda} + \|a\|_\infty \|H\varphi(\cdot + \delta) - (H\varphi)(\cdot)\|_{p,\lambda}. \end{aligned}$$

Учитывая ограниченность множества Φ , неравенство (5) и равенство (7), получаем

$$\begin{aligned} \|(M_a H\varphi)(\cdot + \delta) - (M_a H\varphi)(\cdot)\|_{p,\lambda} &\leq \|a(\cdot + \delta) - a(\cdot)\|_\infty \|h\|_{s,\lambda p/s}^{s/p} \|h\|_s^{1-s/p} \|\varphi\|_q + \\ &+ \|a\|_\infty \|h(\cdot + \delta) - h(\cdot)\|_{s,\lambda p/s}^{s/p} \|h(\cdot + \delta) - h(\cdot)\|_s^{1-s/p} \|\varphi\|_q \leq \\ &\leq C (\|a(\cdot + \delta) - a(\cdot)\|_\infty \|h\|_{s,\lambda p/s}^{s/p} \|h\|_s^{1-s/p} + \|a\|_\infty (2\|h\|_{s,\lambda p/s})^{s/p} \|h(\cdot + \delta) - h(\cdot)\|_s^{1-s/p}). \end{aligned}$$

Так как $a \in C_0(\mathbb{R}^n)$, то $\|a(\cdot + \delta) - a(\cdot)\|_\infty \rightarrow 0$ при $\delta \rightarrow 0$. Поскольку $h \in L_s(\mathbb{R}^n)$, то $\|h(\cdot + \delta) - h(\cdot)\|_s \rightarrow 0$ при $\delta \rightarrow 0$. Тогда $\lim_{\delta \rightarrow 0} \|(M_a H\varphi)(\cdot + \delta) - (M_a H\varphi)(\cdot)\|_{p,\lambda} = 0$ равномерно относительно $\varphi \in \Phi$.

Наконец, проверим условие iii). Используя неравенство (5), получаем

$$\begin{aligned} \|\chi_\rho M_a H\varphi\|_{p,\lambda} &\leq \|\chi_\rho a\|_\infty \|H\varphi\|_{p,\lambda} \leq \sup_{|t| \geq \rho} |a(t)| \|h\|_{s,\lambda p/s}^{s/p} \|h\|_s^{1-s/p} \|\varphi\|_q \leq \\ &\leq C \sup_{|t| \geq \rho} |a(t)| \|h\|_{s,\lambda p/s}^{s/p} \|h\|_s^{1-s/p}. \end{aligned}$$

Так как $\lim_{t \rightarrow 0} a(t) = 0$, то $\lim_{\rho \rightarrow \infty} \|\chi_\rho M_a H\varphi\|_{p,\lambda} = 0$ равномерно относительно $\varphi \in \Phi$.

Будем говорить [13, р. 37], что функция $a \in L_\infty(\mathbb{R}^n)$ принадлежит классу $B^{\text{sup}}(\mathbb{R}^n)$, если существует такое число a_∞ , что $\lim_{N \rightarrow \infty} \text{ess sup}_{|t| > N} |a(t) - a_\infty| = 0$. Если $a_\infty = 0$, то $a \in B_0^{\text{sup}}(\mathbb{R}^n)$.

Теорема 1. Пусть выполнены условия (4) и $h \in \hat{L}_{s,\lambda p/s}(\mathbb{R}^n)$. Тогда:

- 1) если $a \in B_0^{\text{sup}}(\mathbb{R}^n)$, то $M_a H$ есть компактный оператор, действующий из $L_q(\mathbb{R}^n)$ в $L_{p,\lambda}(\mathbb{R}^n)$;
- 2) если $a \in B^{\text{sup}}(\mathbb{R}^n)$ и оператор $M_a H$ является компактным, то $a_\infty = 0$.

Доказательство. Докажем утверждение 1). Определим функцию $a_N(t)$ равенством

$$a_N(t) = \begin{cases} a(t), & |t| \leq N, \\ 0, & |t| > N. \end{cases}$$

Покажем, что оператор $M_{a_N} H$ компактен. Возьмем функцию $b \in C_0(\mathbb{R}^n)$ такую, что $b(t) \equiv 1$ при $|t| \leq N$. Тогда справедливо равенство $M_{a_N} H = M_{a_N} M_b H$. По лемме 2 оператор $M_b H$ компактен, следовательно, и оператор $M_{a_N} H$ компактен. Так как

$$\|M_a H - M_{a_N} H\|_{L_q \rightarrow L_{p,\lambda}} = \|(a - a_N)H\|_{L_q \rightarrow L_{p,\lambda}} \leq \text{ess sup}_{|t| > N} |a(t)| \|H\|_{L_q \rightarrow L_{p,\lambda}}$$

и $a \in B_0^{\text{sup}}(\mathbb{R}^n)$, то $\lim_{N \rightarrow \infty} \|M_a H - M_{a_N} H\|_{L_q \rightarrow L_{p,\lambda}} = 0$.

Значит, оператор $M_a H$ компактен.

Докажем утверждение 2). Так как $a \in B^{\text{sup}}(\mathbb{R}^n)$, то $(a - a_\infty) \in B_0^{\text{sup}}(\mathbb{R}^n)$, а значит, по доказанному выше $M_{a-a_\infty} H$ – компактный оператор. Легко убедиться, что справедливо равенство $M_a H - M_{a-a_\infty} H = a_\infty H$. Так как оператор в его левой части компактен, а H не является компактным оператором, то $a_\infty = 0$.

Следствие 1. Пусть X – ограниченное измеримое множество в \mathbb{R}^n . Тогда оператор $P_X H$ есть компактный оператор, действующий из $L_q(\mathbb{R}^n)$ в $L_{p,\lambda}(\mathbb{R}^n)$.

Коммутатор оператора свертки и оператора умножения

Коммутатором $[M_a, H]$ операторов M_a и H называется оператор $M_a H - H M_a$. С учетом (3) этот коммутатор имеет вид

$$([M_a, H]\varphi)(x) = \int_{\mathbb{R}^n} (a(x) - a(y))h(x-y)\varphi(y) dy = \int_{\mathbb{R}^n} (a(x) - a(x-t))h(t)\varphi(x-t) dt, \quad x \in \mathbb{R}^n.$$

Следуя [5, с. 486], обозначим через $\Omega_\infty(\mathbb{R}^n)$ совокупность таких функций $a \in L_\infty(\mathbb{R}^n)$, что для любого компакта $K \subset \mathbb{R}^n$ функция

$$A(x) := \text{ess sup}_{t \in K} |a(x) - a(x-t)| \tag{8}$$

принадлежит классу $B_0^{\text{sup}}(\mathbb{R}^n)$.

Лемма 3. Если $a \in \Omega_\infty(\mathbb{R}^n)$ и $h \in L_s(\mathbb{R}^n)$, то функция $J(x) = \int_{\mathbb{R}^n} |a(x) - a(x-t)|^s |h(t)|^s dt$ принадлежит классу $B_0^{\text{sup}}(\mathbb{R}^n)$.

Доказательство. Возьмем произвольное $\varepsilon > 0$ и зафиксируем такое $\rho > 0$, что $\int_{|t|>\rho} |h(t)|^s dt < \frac{\varepsilon}{2(2\|a\|_\infty)^s}$.

Тогда для почти всех $x \in \mathbb{R}^n$ справедливо

$$\begin{aligned} J(x) &= \int_{|t| \leq \rho} |a(x) - a(x-t)|^s |h(t)|^s dt + \int_{|t| > \rho} |a(x) - a(x-t)|^s |h(t)|^s dt \leq \\ &\leq \text{ess sup}_{|t| \leq \rho} |a(x) - a(x-t)|^s \int_{|t| \leq \rho} |h(t)|^s dt + (2\|a\|_\infty)^s \int_{|t| > \rho} |h(t)|^s dt < \\ &< \text{ess sup}_{|t| \leq \rho} |a(x) - a(x-t)|^s \|h\|_s^s + \frac{\varepsilon}{2} = (A(x))^s \|h\|_s^s + \frac{\varepsilon}{2}, \end{aligned}$$

где $A(x)$ определяется формулой (8). Так как $A \in B_0^{\text{sup}}(\mathbb{R}^n)$, то

$$\lim_{N \rightarrow \infty} \text{ess sup}_{|x| > N} (A(x))^s = \lim_{N \rightarrow \infty} (\text{ess sup}_{|x| > N} A(x))^s = 0.$$

Тогда найдется такое $N_0 > 0$, что для всех $N > N_0$ выполняется неравенство $\text{ess sup}_{|x| > N} (A(x))^s < \frac{\varepsilon}{2\|h\|_s^s}$.

Значит, $\text{ess sup}_{|x| > N} J(x) < \varepsilon$ для всех $N > N_0$, т.е. $J(x) \in B_0^{\text{sup}}(\mathbb{R}^n)$.

Теорема 2. Пусть выполнены условия (4), $a \in \Omega_\infty(\mathbb{R}^n)$ и $h \in \hat{L}_{s,\lambda p/s}(\mathbb{R}^n)$. Тогда коммутатор $[M_a, H]$ есть компактный оператор, действующий из $L_q(\mathbb{R}^n)$ в $L_{p,\lambda}(\mathbb{R}^n)$.

Доказательство. Покажем, что оператор $[M_a, H]$ можно приблизить по операторной норме с любой степенью точности компактными операторами. Возьмем произвольное $\varepsilon > 0$. По лемме 3 найдется $N > 0$ такое, что $\text{ess sup}_{|x| \geq N} \int_{\mathbb{R}^n} |a(x) - a(x-t)|^s |h(t)|^s dt < \frac{\varepsilon^{q'}}{(2\|a\|_\infty \|h\|_{s,\lambda p/s})^{sq'/p}}$.

Зафиксируем N и оценим норму оператора $Q_N[M_a, H]$. Из равенства $\frac{1}{q} + \frac{1}{s} = \frac{1}{p} + 1$ следуют соотношения $\frac{1}{q'} + \frac{1}{s'} + \frac{1}{p} = 1$, $\frac{q}{p} + \frac{q}{s'} = 1$, $\frac{s}{p} + \frac{s}{q'} = 1$.

Учитывая равенство $|(a(x) - a(x-t))h(t)|\varphi(x-t)| =$

$$= |(a(x) - a(x-t))h(t)|^{s/q'} (|(a(x) - a(x-t))h(t)|^{s/p} |\varphi(x-t)|^{q/p}) |\varphi(x-t)|^{q/s'}$$

и применяя обобщенное неравенство Гёльдера с показателями q' , p и s' , для почти всех $x \in \mathbb{C}\mathbb{B}(0, N)$ имеем

$$\begin{aligned}
 & |(Q_N[M_a, H]\varphi)(x)| \leq \int_{\mathbb{R}^n} |(a(x) - a(x-t))h(t)| |\varphi(x-t)| dt \leq \\
 & \leq \left(\int_{\mathbb{R}^n} |(a(x) - a(x-t))h(t)|^s dt \right)^{1/q'} \times \\
 & \times \left(\int_{\mathbb{R}^n} |(a(x) - a(x-t))h(t)|^s |\varphi(x-t)|^q dt \right)^{1/p} \left(\int_{\mathbb{R}^n} |\varphi(x-t)|^q dt \right)^{1/s'} \leq \\
 & \leq \left(\operatorname{ess\,sup}_{|x| \geq N} \int_{\mathbb{R}^n} |a(x) - a(x-t)|^s |h(t)|^s dt \right)^{1/q'} \times \\
 & \times (2\|a\|_\infty)^{s/p} \left(\int_{\mathbb{R}^n} |h(t)|^s |\varphi(x-t)|^q dt \right)^{1/p} \|\varphi\|_q^{q/s'} < \\
 & < \frac{\varepsilon}{(2\|a\|_\infty \|h\|_{s,\lambda p/s})^{s/p}} (2\|a\|_\infty)^{s/p} \left(\int_{\mathbb{R}^n} |h(t)|^s |\varphi(x-t)|^q dt \right)^{1/p} \|\varphi\|_q^{q/s'} = \\
 & = \varepsilon \|\varphi\|_q^{q/s'} \|h\|_{s,\lambda p/s}^{-s/p} \left(\int_{\mathbb{R}^n} |h(x-u)|^s |\varphi(u)|^q du \right)^{1/p}.
 \end{aligned}$$

Тогда для произвольных $x \in \mathbb{R}^n$ и $r > 0$ получаем

$$\begin{aligned}
 & \|Q_N[M_a, H]\varphi\|_{L_p(\mathbb{B}(x,r))} < \varepsilon \|\varphi\|_q^{q/s'} \|h\|_{s,\lambda p/s}^{-s/p} \left(\int_{\mathbb{B}(x,r)} dy \int_{\mathbb{R}^n} |h(y-u)|^s |\varphi(u)|^q du \right)^{1/p} = \\
 & = \varepsilon \|\varphi\|_q^{q/s'} \|h\|_{s,\lambda p/s}^{-s/p} \left(\int_{\mathbb{R}^n} |\varphi(u)|^q du \int_{\mathbb{B}(x,r)} |h(y-u)|^s dy \right)^{1/p}.
 \end{aligned}$$

После замены $y - u = z$ во внутреннем интеграле приходим к неравенству

$$\|Q_N[M_a, H]\varphi\|_{L_p(\mathbb{B}(x,r))} < \varepsilon \|\varphi\|_q^{q/s'} \|h\|_{s,\lambda p/s}^{-s/p} \left(\int_{\mathbb{R}^n} |\varphi(u)|^q \|h\|_{L_s(\mathbb{B}(x-u,r))}^s du \right)^{1/p}.$$

Используем это неравенство для оценки нормы функции $Q_N[M_a, H]\varphi$ в пространстве Морри.

Имеем

$$\begin{aligned}
 & \|Q_N[M_a, H]\varphi\|_{p,\lambda} = \sup_{x \in \mathbb{R}^n, r > 0} r^{-\lambda} \|Q_N[M_a, H]\varphi\|_{L_p(\mathbb{B}(x,r))} < \\
 & < \varepsilon \|\varphi\|_q^{q/s'} \|h\|_{s,\lambda p/s}^{-s/p} \sup_{x \in \mathbb{R}^n, r > 0} r^{-\lambda} \left(\int_{\mathbb{R}^n} |\varphi(u)|^q \|h\|_{L_s(\mathbb{B}(x-u,r))}^s du \right)^{1/p} = \\
 & = \varepsilon \|\varphi\|_q^{q/s'} \|h\|_{s,\lambda p/s}^{-s/p} \sup_{x \in \mathbb{R}^n, r > 0} \left(\int_{\mathbb{R}^n} |\varphi(u)|^q (r^{-\lambda p/s} \|h\|_{L_s(\mathbb{B}(x-u,r))}^s) du \right)^{1/p} \leq \\
 & \leq \varepsilon \|\varphi\|_q^{q/s'} \|h\|_{s,\lambda p/s}^{-s/p} \|h\|_{s,\lambda p/s}^{s/p} \left(\int_{\mathbb{R}^n} |\varphi(u)|^q du \right)^{1/p} = \varepsilon \|\varphi\|_q.
 \end{aligned}$$

Отсюда следует, что $\|Q_N[M_a, H]\|_{L_q \rightarrow L_{p,\lambda}} < \varepsilon$.

Учитывая, что $P_N + Q_N = I$, где I – тождественный оператор, перепишем это неравенство в виде $\|[M_a, H] - P_N[M_a, H]\|_{L_q \rightarrow L_{p,\lambda}} < \varepsilon$.

По следствию 1 оператор $P_N[M_a, H]$ является компактным. Тогда, в силу произвольности числа ε , оператор $[M_a, H]$ также является компактным.

Применим данную теорему вместе с результатами предыдущего пункта к решению вопроса о компактности операторов вида HM_a .

Лемма 4. Пусть выполнены условия (4), $a \in C_0(\mathbb{R}^n)$ и $h \in \hat{L}_{s,\lambda p/s}(\mathbb{R}^n)$. Тогда оператор HM_a является компактным оператором, действующим из $L_q(\mathbb{R}^n)$ в $L_{p,\lambda}(\mathbb{R}^n)$.

Доказательство. Так как $a \in C_0(\mathbb{R}^n)$, то $a \in \Omega_\infty(\mathbb{R}^n)$. Справедливо равенство $HM_a = M_a H - [M_a, H]$.

Учитывая лемму 2 и теорему 2, заключаем, что оператор HM_a компактен как сумма компактных операторов.

Совершенно аналогично теореме 1 доказывается

Теорема 3. Пусть выполнены условия (4) и $h \in \hat{L}_{s,\lambda p/s}(\mathbb{R}^n)$. Тогда:

- 1) если $a \in B_0^{sup}(\mathbb{R}^n)$, то HM_a есть компактный оператор, действующий из $L_q(\mathbb{R}^n)$ в $L_{p,\lambda}(\mathbb{R}^n)$;
- 2) если $a \in B^{sup}(\mathbb{R}^n)$ и оператор HM_a компактен, то $a_\infty = 0$.

Отсюда сразу вытекает

Следствие 2. Пусть X – ограниченное измеримое множество в \mathbb{R}^n . Тогда HP_X есть компактный оператор, действующий из $L_q(\mathbb{R}^n)$ в $L_{p,\lambda}(\mathbb{R}^n)$.

Оператор свертки с характеристикой

Определим на пространстве $L_q(\mathbb{R}^n)$ оператор H_b формулой (1), где $h \in \hat{L}_{s,\lambda p/s}(\mathbb{R}^n)$, а $b \in L_\infty(\mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^n)$. Учитывая неравенство (5), получаем следующую оценку:

$$\|H_b \varphi\|_{p,\lambda} \leq \|b\|_\infty \|h\|_{s,\lambda p/s}^{s/p} \|h\|_s^{1-s/p} \|\varphi\|_q. \quad (9)$$

Исследуем компактность оператора H_b . Для этого нам потребуется

Лемма 5. Пусть X – ограниченное измеримое множество в \mathbb{R}^n . Тогда операторы $P_X H_b$ и $H_b P_X$ являются компактными операторами, действующими из $L_q(\mathbb{R}^n)$ в $L_{p,\lambda}(\mathbb{R}^n)$.

Доказательство. Пусть сначала характеристика $b(x, y)$ принадлежит множеству \mathcal{S} функций из $L_\infty(\mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^n)$ вида $b(x, y) = \sum_{j=1}^m b_{1j}(x) b_{2j}(y)$, где m – произвольное натуральное число. Тогда оператор $P_X H_b = P_X \sum_{j=1}^m M_{b_{1j}} H M_{b_{2j}} = \sum_{j=1}^m M_{b_{1j}} P_X H M_{b_{2j}}$ является компактным, так как оператор $P_X H$ компактен по следствию 1.

Пусть $b(x, y)$ – произвольная функция из $L_\infty(\mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^n)$. Возьмем последовательность $\{b_k(x, y)\} \subset \mathcal{S}$ такую, что $\lim_{k \rightarrow \infty} \|b - b_k\|_\infty = 0$. Это возможно в силу того, что множество \mathcal{S} всюду плотно в пространстве $L_\infty(\mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^n)$. Учитывая (9), имеем

$$\|P_X H_b - P_X H_{b_k}\|_{L_q \rightarrow L_{p,\lambda}} \leq \|H_{b-b_k}\|_{L_q \rightarrow L_{p,\lambda}} \leq \|b - b_k\|_\infty \|h\|_{s,\lambda p/s}^{s/p} \|h\|_s^{1-s/p} \rightarrow 0$$

при $k \rightarrow \infty$. Значит, оператор $P_X H_b$ компактен.

Аналогично доказывается компактность оператора $H_b P_X$.

Следуя [13, р. 41], будем говорить, что функция $b \in L_\infty(\mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^n)$ принадлежит классу $B^{\text{sup}}(\mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^n)$, если существует такая постоянная b_∞ , что $\lim_{N \rightarrow \infty} \text{ess sup}_{|x|>N, |y|>N} |b(x, y) - b_\infty| = 0$.

Если $b_\infty = 0$, то будем говорить, что $b \in B_0^{\text{sup}}(\mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^n)$.

Теорема 4. Пусть выполнены условия (4) и $h \in \hat{L}_{s,\lambda p/s}(\mathbb{R}^n)$. Тогда:

1) если $b \in B_0^{\text{sup}}(\mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^n)$, то H_b есть компактный оператор, действующий из $L_q(\mathbb{R}^n)$ в $L_{p,\lambda}(\mathbb{R}^n)$;

2) если $b \in B^{\text{sup}}(\mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^n)$ и оператор H_b является компактным, то $b_\infty = 0$.

Доказательство. 1. Рассмотрим шар $\mathbb{B}(0, N)$, где N – произвольное натуральное число. Тогда $H_b = P_N H_b + Q_N H_b P_N + Q_N H_b Q_N$.

По лемме 5 оператор $T_N = P_N H_b + Q_N H_b P_N$ является компактным. Оценим норму $\|H_b - T_N\|_{L_q \rightarrow L_{p,\lambda}} = \|Q_N H_b Q_N\|_{L_q \rightarrow L_{p,\lambda}}$. Заметим, что $(Q_N H_b Q_N \varphi)(x) = \int_{\mathbb{R}^n} \chi_N(x) b(x, y) \chi_N(y) h(x - y) \varphi(y) dy$, где χ_N – характеристическая функция множества $\mathbb{S}\mathbb{B}(0, N)$. Тогда из неравенства (9) следует, что

$$\|Q_N H_b Q_N\|_{L_q \rightarrow L_{p,\lambda}} \leq \text{ess sup}_{|x|>N, |y|>N} |b(x, y)| \|h\|_{s,\lambda p/s}^{s/p} \|h\|_s^{1-s/p} \rightarrow 0 \text{ при } N \rightarrow \infty.$$

Так как $\|H_b - T_N\|_{L_q \rightarrow L_{p,\lambda}} \rightarrow 0$ и T_N – компактный оператор, то оператор H_b также является компактным.

2. Доказательство аналогично доказательству пункта 2) теоремы 1.

Список источников

1. Sawano Y., Di Fazio G., Hakim D.I. Morrey Spaces: Introduction and Applications to Integral Operators and PDE's. Chapman and Hall/CRC, 2020. Vol. I, II. 412 p.
2. Adams D.R. Morrey spaces // Lecture Notes in Applied and Numerical Harmonic Analysis. Birkhauser: Springer, Cham, 2015. 124 p.
3. Morrey C.B. On the solutions of quasi-linear elliptic partial differential equations // Transactions of the American on the Math. Society. 1938. Vol. 43. P. 126–166.
4. Буренков В.И., Тарарыкова Т.В. Аналог неравенства Юнга для свертки функций для общих пространств типа Морри // Функциональные пространства, теория приближений, смежные разделы математического анализа : сб. ст. к 110-летию со дня рождения акад. С.М. Никольского. Тр. МИАН. 2016. Т. 293. С. 113–132.
5. Авсянкин О.Г. О компактности операторов типа свертки в пространствах Морри // Матем. заметки. 2017. Т. 102, вып. 4. С. 483–489.

6. Авсянкин О.Г. Компактность некоторых классов операторов типа свертки в обобщенных пространствах Морри // Матем. заметки. 2018. Т. 104, вып. 3. С. 336–344.
7. Авсянкин О.Г. Об обратимости операторов типа свертки в пространствах Морри // Изв. вузов. Математика. 2019. № 6. С. 3–10.
8. Авсянкин О.Г., Ашихмин С.С. Об ограниченности и компактности одного класса операторов типа свертки в пространствах Морри // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2022. № 3 (215). С. 4–10.
9. Ильин В.П. О некоторых свойствах функций из пространства $W_{p,a,\kappa}^l(G)$ // Записки науч. семинаров ЛОМИ. 1971. Т. 23. С. 33–40.
10. Aykol C., Armutcu H., Omarova M.N. Maximal commutator and commutator of maximal function on modified Morrey spaces // Transactions of Azerbaijan National Academy of Sciences. 2016. Vol. 36, № 1. P. 29–35.
11. Guliyev V.S., Rahimova K. Parabolic fractional integral operator in modified parabolic Morrey spaces // Proc. A. Razmadze Math. Inst. 2013. Vol. 163. P. 59–80.
12. Chen Y., Ding Y., Wang X. Compactness of commutators for singular integrals on Morrey spaces // Canad. J. Math. 2012. Vol. 64, № 2. P. 257–281.
13. Karapetiants N.K., Samko S.G. Equations with Involutive Operators. Boston; Basel; Berlin: Birkhauser, 2001. 427 p.

References

1. Sawano Y., Di Fazio G., Hakim D. I. *Morrey Spaces: Introduction and Applications to Integral Operators and PDE's*. Chapman and Hall/CRC; 2020. Vol. 1, 2. 412 p.
2. Adams D. R. *Morrey spaces. Lect. Notes Appl. Numer. Harmon. Anal.* Birkhauser: Springer, Cham; 2015. 124 p.
3. Morrey C.B. On the solutions of quasi-linear elliptic partial differential equations. *Trans. Amer. Math. Soc.* 1938;43:126-166.
4. Burenkov V.I., Tararykova T.V. An analog of Young's inequality for convolutions of functions for general Morrey-type spaces. *Function spaces, approximation theory, related sections of mathematical analysis. Proc. Steklov Inst. Math.* 2016;293:107-126.
5. Avsyankin O.G. On the Compactness of Convolution-Type Operators in Morrey Spaces. *Mathematical Notes.* 2017;102(4):437-443.
6. Avsyankin O.G. Compactness of Some Operators of Convolution Type in Generalized Morrey Spaces. *Mathematical Notes.* 2018;104(3):331-338.
7. Avsyankin O.G. On Invertibility of Convolution Type Operators in Morrey Spaces. *Russian Mathematics.* 2019;63(6):1-7.
8. Avsyankin O.G., Ashikhmin S.S. On the Boundedness and Compactness of a Class of Convolution-Type Operators in Morrey Spaces. *Izv. vuzov. Sev.-Kavk. region. Estestv. nauki = Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2022;(3):4-10. (In Russ.).
9. Ilyin V.P. On some properties of the functions of spaces $W_{p,a,\kappa}^l(G)$. *Zap. nauch. sem. LOMI AN SSSR = LOMI Scientific Seminar Notes.* 1971;23:33-40. (In Russ.).
10. Aykol C., Armutcu H., Omarova M.N. Maximal commutator and commutator of maximal function on modified Morrey spaces. *Trans. Natl. Acad. Azerb. Ser. Phys.-Tech. Math. Sci., Mathematics.* 2016;36(1):29-35.
11. Guliyev V.S., Rahimova K. Parabolic fractional integral operator in modified parabolic Morrey spaces. *Proc. Razmadze Mathematical Institute.* 2013;163:59-80.
12. Chen Y., Ding Y., Wang X. Compactness of commutators for singular integrals on Morrey spaces. *Canad. J. Math.* 2012;64(2):257-281.
13. Karapetiants N.K., Samko S.G. *Equations with Involutive Operators*. Boston; Basel; Berlin: Birkhauser; 2001. 427 p.

Информация об авторе

С.С. Ашихмин – аспирант, кафедра дифференциальных и интегральных уравнений, Институт математики, механики и компьютерных наук им. И.И. Воровича.

Information about the author

S.S. Ashikhmin - Postgraduate Student, Department of Differential and Integral Equations, Vorovich Institute of Mathematics, Mechanics and Computer Science.

Статья поступила в редакцию 12.02.2024; одобрена после рецензирования 24.02.2024; принята к публикации 24.05.2024.
The article was submitted 12.02.2024; approved after reviewing 24.02.2024; accepted for publication 24.05.2024.

Научная статья

УДК 519.254

doi: 10.18522/1026-2237-2024-2-12-20

АЛГОРИТМ АППРОКСИМАЦИИ СИГНАЛОВ ДЛЯ КЛАССИФИКАЦИИ ЭЛЕКТРОЭНЦЕФАЛОГРАММ ЧЕЛОВЕКА

**Григорий Исаакович Белявский¹, Никита Александрович Мишин²,
Константин Эдуардович Ажогин³**

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

¹gbelyavski@sfedu.ru

²nmishin@sfedu.ru

³azhogin@sfedu.ru

Аннотация. Рассматривается актуальная проблема, связанная с классификацией электроэнцефалограмм (ЭЭГ). Возникающий шум в сигналах, обусловленный разнообразными факторами, препятствует эффективному анализу и интерпретации данных. Основной целью исследования является анализ эффективности алгоритма аппроксимации сигналов с применением вейвлет-техники с последующим кусочно-постоянным представлением сигнала, которое применяется для классификации сигналов сверточной нейронной сетью. Проведено сравнение точности классификации предложенного алгоритма с фильтром низких частот при различных частотах среза. Одним из ключевых результатов исследования является двухэтапный подход к обработке сигналов. На первом этапе модель обучается на необработанных данных, а затем применяется обученное ядро свертки с наибольшей дисперсией в качестве материнской функции для кусочно-постоянного представления сигнала – так решается проблема выбора материнской функции. Этот подход направлен на усиление информативных компонентов в сигнале. Второй этап обработки представляет собой применение предложенного алгоритма аппроксимации после свертки, что дополняет первый этап, создавая комплексный метод, который не только эффективно снижает уровень шумов в данных, но также обладает высоким потенциалом для улучшения общей точности в решении задач классификации ЭЭГ-сигналов. Таким образом, в работе получены важные практические и теоретические результаты, в перспективе возможно применение предложенного метода в области анализа сигналов.

Ключевые слова: электроэнцефалография, аппроксимация, классификация, сверточные нейронные сети, обработка сигналов, вейвлеты, подавление шума

Для цитирования: Белявский Г.И., Мишин Н.А., Ажогин К.Э. Алгоритм аппроксимации сигналов для классификации электроэнцефалограмм человека // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2024. № 2. С. 12–20.

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

Original article

SIGNAL APPROXIMATION ALGORITHM FOR HUMAN ELECTROENCEPHALOGRAMS CLASSIFICATION

Grigory I. Belyavsky¹, Nikita A. Mishin², Konstantin E. Azhogin³

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

¹gbelyavski@sfedu.ru

²nmishin@sfedu.ru

³azhogin@sfedu.ru

© Белявский Г.И., Мишин Н.А., Ажогин К.Э., 2024

Abstract. The article examines the problem of classification of electroencephalograms (EEG), where noise in the signals, caused by various factors, prevents effective analysis and interpretation of the data. The main goal of the study is to analyze the effectiveness of a signal approximation algorithm using a wavelet technique with the next piece-wise approximation in order to effectively remove noise and subsequently solve the problem of signal classification using a convolutional neural network. The classification accuracy of the proposed algorithm with a low-pass filter is compared at different cutoff frequencies. One of the key findings of the study is a two-step approach to signal processing. In the first stage, the model is trained on the raw data, and then the trained convolution kernel with the highest variance is applied to the original signals. This solves the problem of choosing the mother function. This approach aims to enhance the informative components in the signal. The second processing step involves applying the proposed approximation algorithm after the convolution, which complements the first step to create a comprehensive method. This method not only effectively reduces noise in the data, but also has high potential to improve the overall accuracy in solving EEG signal classification problems. Thus, the results of the study provide important practical and theoretical implications, highlighting the prospects for applying the proposed method in the field of signal analysis.

Keywords: electroencephalography, approximation, classification, convolutional neural networks, signal processing, wavelets, noise reduction

For citation: Belyavsky G.I., Mishin N.A., Azhogin K.E. Signal Approximation Algorithm for Human Electroencephalograms Classification. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2024;(2):12-20. (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

Электроэнцефалография (ЭЭГ) является важным инструментом в исследованиях и клинической практике, позволяющим мониторить электрическую активность мозга. Электрические сигналы, регистрируемые ЭЭГ, – результат сложных взаимодействий между множеством нейронов, исходящих из различных областей мозга [1]. Однако, несмотря на свой потенциал, ЭЭГ-сигналы обладают одним существенным недостатком – шумом.

Шум в ЭЭГ-сигналах может иметь разнообразное происхождение, включая электромагнитные помехи, мускульную активность, глазодвигательные артефакты и другие факторы. Это делает анализ и интерпретацию ЭЭГ-данных непростой задачей, особенно в контексте их применения в нейрофизиологических исследованиях и диагностике неврологических заболеваний.

Цель статьи заключается в рассмотрении проблемы классификации ЭЭГ-сигналов и выявления методов, позволяющих эффективно устранить шум и повысить точность распознавания паттернов в данных. Мы утверждаем, что успешное подавление шума в ЭЭГ-сигналах существенно улучшает качество и достоверность результатов анализа, что имеет критическое значение как для научных исследований, так и для клинической практики.

Для достижения поставленной цели применяется алгоритм аппроксимации сигнала с вейвлет-техникой, использующей материнскую функцию $\varphi(t)$, $t \in [0, T]$ для построения двухпараметрического семейства функций $\varphi_{i,j}(t) = \varphi(2^i(t - a_j))$, $t \in [a_j, a_j + 2^{-i}T]$, с последующим кусочно-постоянным представлением сигнала: $\bar{s}(t) = \sum_{k=1}^m \alpha_k \bar{\varphi}_{i_k, j_k}(t) I_{\{t \in R_k\}}$. Здесь $\{R_k\}$ – разбиение отрезка $[0, T]$; $\bar{\varphi}_{i_k, j_k}(t) = \frac{1}{\|\varphi_{i_k, j_k}\|} \varphi_{i_k, j_k}(t)$; $\alpha_k = (s I_{R_k}, \bar{\varphi}_{i_k, j_k})$. Скалярное произведение и норма вычисляются в пространстве L_2 . Нетрудно убедиться, что неравномерное квантование является частным случаем данного алгоритма для материнской функции, которая является константой.

Данный алгоритм не является методом представления сигнала в вейвлет-базисе. Для его успешного использования необходимы удачный выбор материнской функции и построение хорошего разбиения.

Для выбора разбиения применяется специальная хааровская фильтрация, т.е. на каждой итерации дробится на два только один интервал, выбор которого осуществляется с целью уменьшить максимальную локальную среднеквадратическую ошибку.

Для выбора материнской функции используется сверточная нейронная сеть. Она обучается на необработанных сигналах с целью выделения главного ядра, которое далее используется в качестве материнской функции.

Таким образом, к новым результатам относятся обобщение метода неравномерного квантования и схема машинного обучения: нейронная сеть \rightarrow кусочно-постоянное представление \rightarrow нейронная сеть.

Полученные результаты позволяют эффективно сокращать размерность пространства признаков при интерпретации электрической активности мозга, что делает результаты машинного обучения робастными.

Структура работы такова: сначала описывается метод кусочно-постоянной аппроксимации, далее приводятся результаты обработки синтезированных сигналов, затем изучается задача распознавания ЭЭГ.

Метод

Сигнал $s(t)$ и материнская функция $\varphi(t)$ задаются $n+1$ -отсчетами (n – степень двойки): $s_i = s\left(i\frac{T}{n}\right)$, $\varphi_i = \varphi\left(i\frac{T}{n}\right)$, $i = 0, 1, \dots, n$.

Вычисляем первую аппроксимацию $\bar{s}^1 = (s, \bar{\varphi}_1^1)\bar{\varphi}_1^1 = \alpha_1^1\bar{\varphi}_1^1$, $\bar{\varphi}_1^1 = \frac{\varphi}{\sum_{i=0}^n (\varphi_i)^2}$, и средний квадрат ошибки $err^1 = \frac{1}{n+1} \sum_{i=0}^n (s_i - \bar{s}_i)^2$.

Если ошибка меньше ε , то процесс можно остановить. В противном случае делим множество индексов на две равные части по числу отсчетов: $I_1^2 = \left\{0, 1, \dots, \frac{n}{2}\right\}$ и $I_2^2 = \left\{\frac{n}{2}, \frac{n}{2} + 1, \dots, n\right\}$ с общим элементом $\frac{n}{2}$. Рассматриваем на каждой из этих частей вышеописанную аппроксимацию, для чего определим новые функции, опираясь на процедуру сжатия в два раза и сдвига материнской функции: $\varphi_1^2(t) = \varphi(2t)$, $0 \leq t \leq \frac{T}{2}$; $\varphi_2^2(t) = \varphi\left(2\left(t - \frac{T}{2}\right)\right)$, $\frac{T}{2} \leq t \leq T$.

Например, если исходная материнская функция φ имела вид гауссиана, то ее трансформация в функции φ_1^2 и φ_2^2 показана на рис. 1. На каждом из подмножеств выполняем процедуру аппроксимации:

$$s_j^2 = \left(\sum_{i=0}^{n/2} \bar{\varphi}_{1,i}^2 s_i\right) \bar{\varphi}_{1,j}^2 = \alpha_1^2 \bar{\varphi}_{1,j}^2, \quad \bar{\varphi}_{1,j}^2 = \frac{\varphi_{1,j}^2}{\sum_{i=0}^{n/2} (\varphi_{1,i}^2)^2}, \quad j = 1, 2, \dots, n/2 - 1;$$

$$s_j^2 = \left(\sum_{i=n/2}^n \bar{\varphi}_{2,i}^2 s_i\right) \bar{\varphi}_{2,j}^2 = \alpha_2^2 \bar{\varphi}_{2,j}^2, \quad \bar{\varphi}_{2,j}^2 = \frac{\varphi_{2,j}^2}{\sum_{i=0}^n (\varphi_{1,i}^2)^2}, \quad j = n/2, n/2 + 1, \dots, n.$$

Для I_1^2 локальная погрешность $err_1^2 = \frac{2}{n} \sum_{i=0}^{n/2-1} (s_i - s_i^{2,1})^2$, для I_2^2 – $err_2^2 = \frac{2}{n+2} \sum_{i=n/2}^n (s_i - s_i^{2,2})^2$, общая погрешность $err^2 = \max\{err_1^2, err_2^2\}$. Если $err < \varepsilon$, то процесс останавливается, иначе – продолжается.

Выбор интервала для последующего деления производится по максимальной ошибке аппроксимации. Если $err^2 = err_1^2$, то разбивается первый интервал I_1^2 , иначе – второй I_2^2 . Допустим, разбивается первый интервал, тогда по этому разбиению вычисляются элементы для третьей итерации следующим образом: $\varphi_1^3(t) = \varphi\left(\frac{1}{4}t\right)$, $\varphi_2^3(t) = \varphi\left(\frac{1}{4}\left(t - \frac{T}{4}\right)\right)$, $\varphi_3^3(t) = \varphi_2^2(t)$. Остальные элементы: $\bar{\varphi}_1^3(t)$, $\bar{\varphi}_2^3(t)$, $\bar{\varphi}_3^3(t)$, α_1^3 , α_2^3 вычисляются по аналогичным формулам предыдущей итерации, $\alpha_3^3 = \alpha_2^2$.

Итерации продолжаются до тех пор, пока не будет достигнута заданная точность ε .

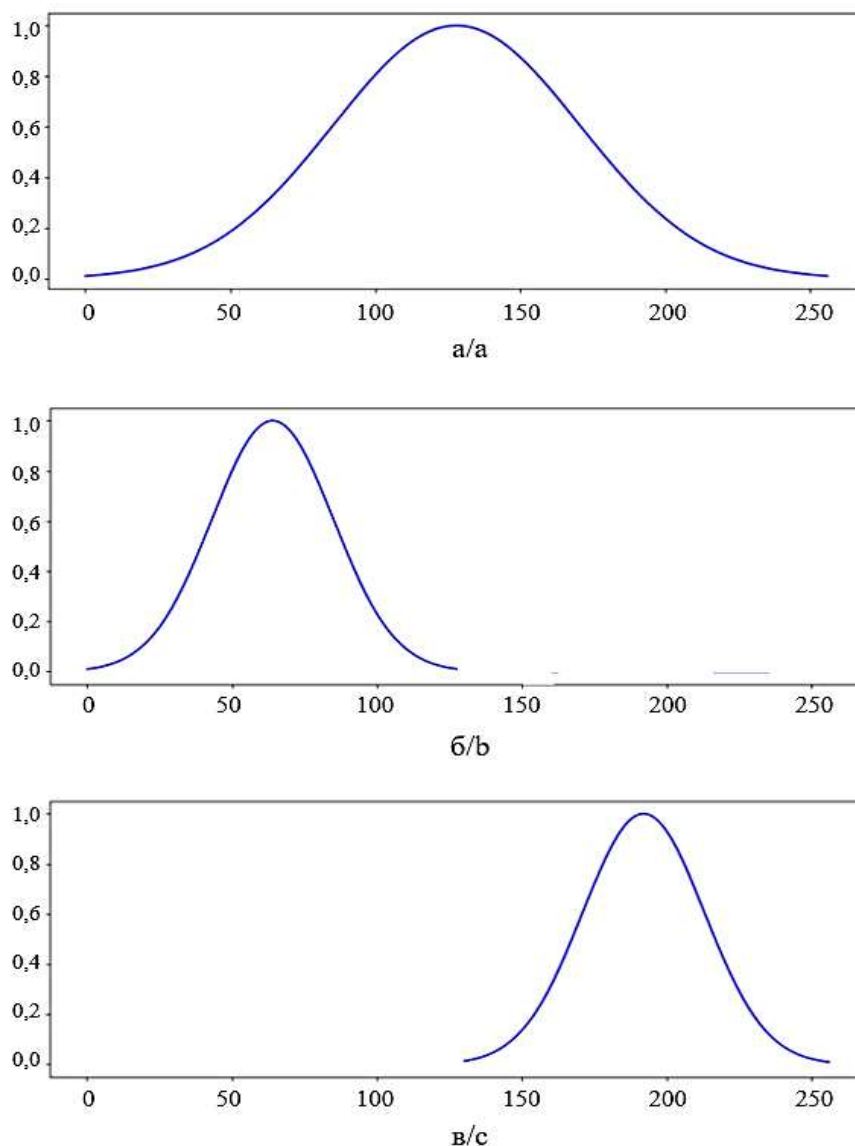


Рис. 1. Вид материнской функции на первой (а) и последующих (б, в) итерациях алгоритма
 / Fig. 1. View of the mother function at the first (a) and subsequent (b, c) iterations of the algorithm

Представим данную процедуру в виде информационного дерева (рис. 2).

Допустим, алгоритм остановился после k итераций. В результате вычислена последовательность $\{(I_1^k, \bar{\varphi}_1^k, \alpha_1^k), \dots, (I_k^k, \bar{\varphi}_k^k, \alpha_k^k)\}$. Числовая последовательность $\{(\beta_1^k, \alpha_1^k), \dots, (\beta_k^k, \alpha_k^k)\}$, где β_j^k – правые концы отрезков разбиения, содержит достаточную информацию для восстановления сигнала. Поэтому разбиение можно считать удачным, если оно описывается меньшими $n/2$ числами.

Если с разбиением интервала алгоритм справляется: при заданной материнской функции строится последовательность приближений с монотонно убывающей максимальной локальной ошибкой, то выбор хорошей материнской функции является сложной задачей.

В литературе описаны различные материнские функции. Перечислим некоторые из них.

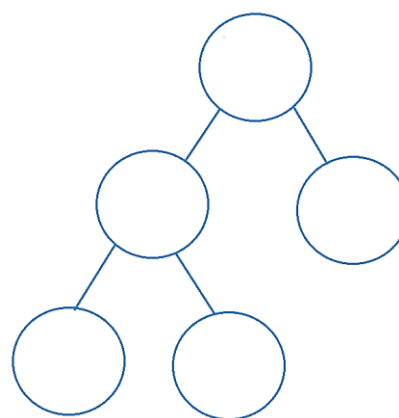


Рис. 2. Информационное дерево
 / Fig. 2. Information tree

Функция Гаусса [2] имеет следующий вид: $\varphi(t) = we^{\left(\frac{-(t-m)^2}{2s^2}\right)}$, где $w, m, s \neq 0$ – произвольные вещественные числа.

График гауссовой функции при $w > 0$ и $s \neq 0$ – колоколообразная кривая (рис. 1), параметр w определяет максимальную высоту графика – пик колокола, m отвечает за сдвиг пика от нуля (при $b = 0$ – пик в нуле), а s влияет на ширину (размах) колокола.

Вейвлет Морле. Материнская функция [3, 4] $\varphi(t) = we^{\left(\frac{-(t-m)^2}{2s^2}\right)} \cos(l(t-m))$, где $w, m, s \neq 0$ – произвольные вещественные числа, параметр $l > 0$ определяет частоту колебаний.

Экспоненциально модифицированное нормальное распределение [5] описывает сумму независимых нормальных и экспоненциальных случайных величин. Такая случайная величина Z может быть выражена как $Z = X + Y$, где X и Y независимы, X распределена по Гауссу со средним значением μ и дисперсией σ^2 , а Y – экспоненциально с интенсивностью l , поэтому данная материнская функция $\varphi(t) = wl \int_0^\infty e^{\left(\frac{-(t-\tau)-m)^2}{2s^2}\right) - l\tau} d\tau$ получается сверткой нормальной и экспоненциальной плотности распределений.

Материнская функция имеет характерный положительный перекосяк, возникающий от экспоненциальной составляющей.

Данная функция имеет вид $\varphi(t) = w \frac{l}{2} e^{\frac{l}{2}(2m+ls^2-2t)} \operatorname{erfc}\left(\frac{m+ls^2-t}{\sqrt{2}s}\right)$, где $w, m, s \neq 0$ – произвольные вещественные числа; параметр $l > 0$ определяет интенсивность показательного закона распределения. В зависимости от его значения форма распределения может меняться от почти экспоненциальной до почти нормальной, erfc – дополнительная функция ошибок.

Асимметричное нормальное распределение по сравнению с экспоненциально модифицированным нормальным распределением [6] позволяет получить перекосяк в материнской функции как в положительном, так и в отрицательном направлениях. Материнская функция имеет нормальные хвосты относительного k . Напротив, экспоненциально модифицированное нормальное распределение имеет экспоненциальный хвост в направлении перекосяка.

Материнская функция $\varphi(t) = \frac{w}{s\sqrt{2\pi}} e^{\frac{-(t-m)^2}{2s^2}} \left(1 + \operatorname{erf}\left(\frac{(t-m)}{\sqrt{2}s}\right)\right)$, где $w, m, s \neq 0, l$ – произвольные вещественные числа; erf – функция ошибок.

Можно убедиться, что получается нормальное распределение, когда $l = 0$, и что абсолютное значение асимметрии увеличивается по мере роста абсолютного значения l . Распределение скошено вправо, если $l > 0$, и скошено влево, если $l < 0$.

Распределение Гумбеля. Материнская функция [7] $\varphi(t) = we^{-\left(\frac{t-m}{2s} + e^{-\frac{(t-m)}{s}}\right)}$, где $w, m, s \neq 0$ – произвольные вещественные числа.

Логистическое распределение. Материнская функция [8] $\varphi(t) = w \frac{1}{4s} \left(\frac{1}{\cosh\left(\frac{t-m}{2s}\right)}\right)^2$, где $w, m, s \neq 0$ – произвольные вещественные числа.

Примеры. Сгенерированы синтетические сигналы для демонстрации метода аппроксимации: меандр, пилообразный, синусоидальный, сигнал с экспоненциально возрастающими частотой и амплитудой, с экспоненциально возрастающей частотой и убывающей амплитудой. Испробованы перечисленные выше материнские функции для $\varepsilon = 0,05$. Результаты получались примерно одинаковые. На рис. 3 приведен пример аппроксимации данных сигналов гауссианом.

Видно, что предложенный метод способен аппроксимировать различные сигналы, однако не исключается возникновения шумов.

Число отсчетов равно 256, число разбиений колебалось от 32 для меандра до 6 для экспоненциально затухающего сигнала.

Далее рассматривается машинное обучение с предварительной обработкой данных. Предложенный метод сравнивается с полосовыми фильтрами.

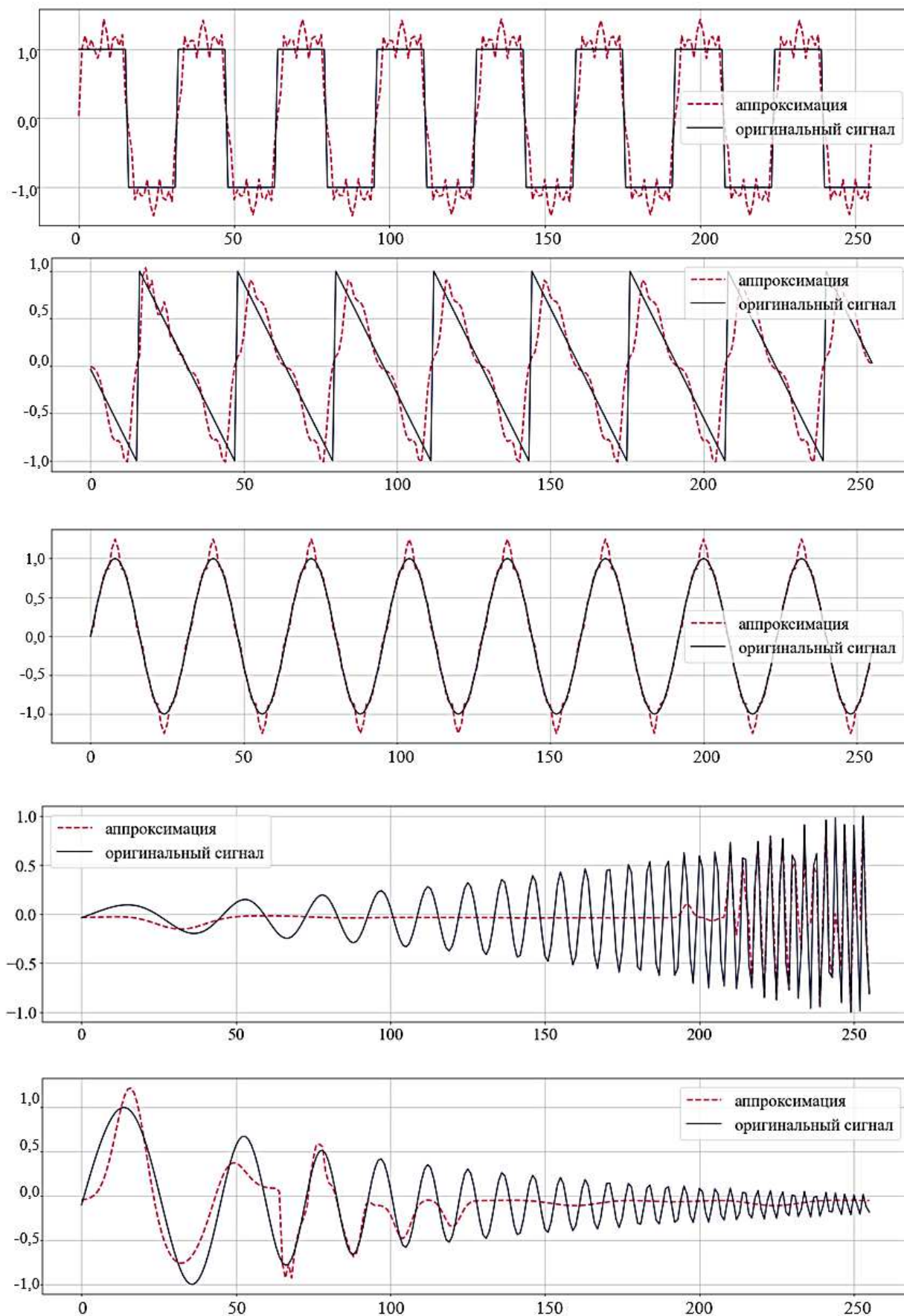


Рис. 3. Аппроксимация синтетических сигналов / Fig. 3. Approximation of synthetic signals

Данные. Для экспериментов использовался датасет BCI Competition IV 2a [9]. Датасет BCI Competition IV 2a – это набор данных, предназначенный для исследования в области интерфейсов мозг – компьютер (BCI). Он содержит электроэнцефалограммы, сделанные во время выполнения различных ментальных задач, таких как воображение движений конечностей. Данные разделены на четыре класса для многоклассовой классификации и характеризуются сложностью и наличием шумов.

Эксперимент. Архитектура сверточной сети EEGNet представляет собой инновационный метод анализа ЭЭГ-сигналов, который был разработан с целью улучшить качество классификации и интерпретируемость модели. EEGNet включает сверточные слои, Depthwise Separable Convolution для более эффективной обработки сложных сигналов [10].

Каждый прецедент длиной 4 с и частотой дискретизации 250 Гц нарезался на семплы длиной 512 отсчетов, с шагом в 1 отсчет. Это дает 36 864 обучающих примера для каждого класса. Были обучены модели на оригинальных сигналах после применения фильтра низких частот (фильтр Баттерворта 8-го порядка) с частотой среза 20 и 10 Гц с использованием предложенного метода аппроксимации с различными материнскими функциями.

Результаты приведены в таблице.

Результаты эксперимента / Experiment results

Тип сигнала	Точность классификации, %	Точность аппроксимации (средний квадрат ошибки \pm ст. откл.)
Оригинал	75	–
ФНЧ 20 Гц	71	0,03 \pm 0,015
ФНЧ 10 Гц	59	0,069 \pm 0,028
Аппроксимация гауссианом	67	0,059 \pm 0,042
Аппроксимация вейвлетом Морле	67	0,051 \pm 0,033
Аппроксимация экспоненциально модифицированным нормальным распределением	60	0,086 \pm 0,051
Аппроксимация асимметричным нормальным распределением	64	0,067 \pm 0,04
Аппроксимация распределением Гумбеля	67	0,063 \pm 0,043
Аппроксимация логистическим распределением	66	0,049 \pm 0,032

В первой строке представлены результаты распознавания после обучения на необработанной выборке. Основной вывод – фильтр низких частот 20 Гц существенно не снижает качество обучения. Аналогичный вывод можно сделать по отношению к вейвлетам Гаусса, Морле и Гумбеля. Однако во втором случае снижается размерность признакового пространства – это хорошее качество метода, непосредственно влияющее на робастность распознавания.

Далее совершена попытка выбора хорошей материнской функции.

Двухэтапная предобработка данных. Для выбора материнской функции применяется та же нейронная сеть, которая обучается на необработанных сигналах. После обучения выбирается ядро из первого сверточного слоя, обладающее наибольшей дисперсией (рис. 4).

Искомая материнская функция является результатом свертки выбранного ядра с вейвлетом Морле. На рис. 5. представлен результат аппроксимации сигнала сверточным вейвлетом Морле.

Далее нейронная сеть обучалась на аппроксимированных сигналах. В результате точность классификации составила 75 %, т.е. получена максимальная точность распознавания.

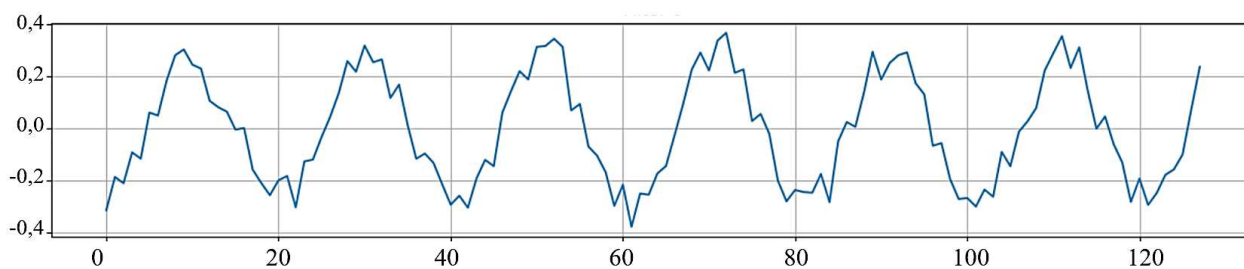


Рис. 4. Выбранное ядро / Fig. 4. Selected kernel

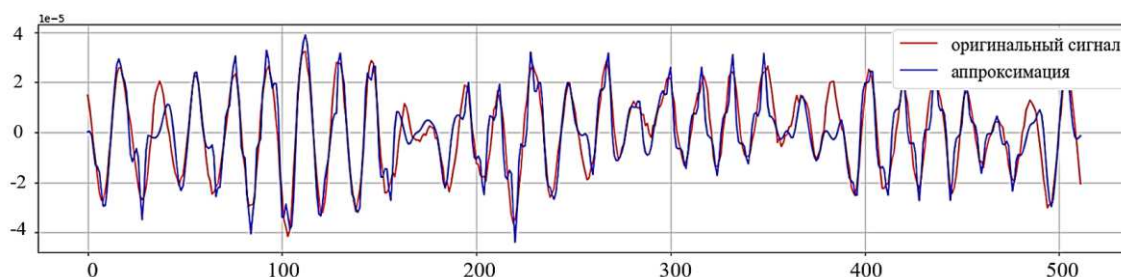


Рис. 5. Результат аппроксимации после свертки / Fig. 5. Result of approximation after convolution

Заключение

Качество предложенного метода предварительной обработки связано прежде всего с выбором материнской функции, которая должна зависеть от обучающей выборки и может быть получена в результате применения машинного обучения.

Двухэтапный метод позволил избавиться от некоторых шумов в сигнале, не жертвуя точностью классификации. Поэтому данный подход демонстрирует высокий потенциал в решении задач классификации ЭЭГ-сигналов при условии воздействия шумов.

Список источников

1. Электроэнцефалография (ЭЭГ) // CMI Brain Research. URL: <https://cmi.to/электроэнцефалография-ээг> (дата обращения: 01.12.2023).
2. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. 10-е изд., стереотип. М.: Academia, 2005. 576 с.
3. Новиков И.Я., Стечкин С.Б. Основы теории всплесков // Успехи матем. наук. 1998. Т. 53, вып. 6 (324). С. 53–128.
4. Morlet wavelet // Mathworks. URL: <https://www.mathworks.com/help/wavelet/ref/morlet.html> (дата обращения: 01.12.2023).
5. Grushka E. Characterization of Exponentially Modified Gaussian Peaks in Chromatography // Analytical Chemistry. 1972. Vol. 44 (11). P. 1733–1738.
6. O'Hagan A., Leonard T. Bayes estimation subject to uncertainty about parameter constraints // Biometrika. 1976. Vol. 63 (1). P. 201–203.
7. Gumbel E.J. The return period of flood flows // The Annals of Mathematical Statistics. 1941. Vol. 12. P. 163–190.
8. Balakrishnan N. Handbook of the Logistic Distribution. New York: Marcel Dekker, 1992. 624 p.
9. Leeb R., Brunner C., Müller-Putz G.R., Schlögl A., Pfurtscheller G. BCI Competition 2008 – Graz data set A. URL: https://bbci.de/competition/iv/desc_2b.pdf (дата обращения: 01.12.2023).
10. Lawhern V.J., Solon A.J., Waytowich N.R., Gordon S.M., Hung Ch.P., Lance B.J. EEGNet: A Compact Convolutional Neural Network for EEG-based Brain-Computer Interfaces // J. of Neural Engineering. 2018. Vol. 15(5).

References

1. Electroencephalography (EEG). CMI Brain Research. Available from: <https://cmi.to/электроэнцефалография-ээг> [Accessed 1st December 2023]. (In Russ.).
2. Ventzel E.K. Probability theory. 10th ed. Stereotype. Moscow: Academia Publ.; 2005. 576 p. (In Russ.).
3. Novikov I.Ya., Stetchkin S.B. Basic Theory of Flares. Uspekhi matem. nauk = Advances in Mathematical Sciences. 1998;53(6):53-128. (In Russ.).
4. Morlet wavelet. Mathworks. Available from: <https://www.mathworks.com/help/wavelet/ref/morlet.html> [Accessed 1st December 2023].
5. Grushka E. Characterization of Exponentially Modified Gaussian Peaks in Chromatography. Analytical Chemistry. 1972;44(11):1733-1738.
6. O'Hagan A., Leonard T. Bayes estimation subject to uncertainty about parameter constraints. Biometrika. 1976;63(1):201-203.
7. Gumbel E.J. The return period of flood flows. The Annals of Mathematical Statistics. 1941;12:163-190.
8. Balakrishnan N. Handbook of the Logistic Distribution. New York: Marcel Dekker; 1992. 624 p.

9. Leeb R., Brunner C., Müller-Putz G.R., Schlögl A., Pfurtscheller G. *BCI Competition 2008 – Graz data set A*. Available from: https://bbci.de/competition/iv/desc_2b.pdf [Accessed 1st December 2023].

10. Lawhern V.J., Solon A.J., Waytowich N.R., Gordon S.M., Hung Ch.P., Lance B.J. EEGNet: A Compact Convolutional Neural Network for EEG-based Brain-Computer Interfaces. *Journal of Neural Engineering*. 2018;15(5).

Информация об авторах

Г.И. Белявский – доктор технических наук, профессор, кафедры высшей математики и исследования операций, Институт математики, механики и компьютерных наук им. И.И. Воровича.

Н.А. Мишин – аспирант, кафедры высшей математики и исследования операций, Институт математики, механики и компьютерных наук им. И.И. Воровича.

К.Э. Ажогин – аспирант, младший научный сотрудник, Научно-исследовательский технологический центр нейротехнологий.

Information about the authors

G.I. Belyavsky - Doctor of Science (Technical), Professor, Department of Higher Mathematics and Operations Research, Vorovich Institute of Mathematics, Mechanics and Computer Sciences.

N.A. Mishin - Postgraduate Student, Department of High Mathematics and Operations Research, Vorovich Institute of Mathematics, Mechanics and Computer Sciences.

K.E. Azhogin - Postgraduate Student, Junior Researcher, Research Technology Center for Neurotechnology.

*Статья поступила в редакцию 24.12.2023; одобрена после рецензирования 15.03.2024; принята к публикации 24.05.2024.
The article was submitted 24.12.2023; approved after reviewing 15.03.2024; accepted for publication 24.05.2024.*

Научная статья

УДК 539.3; 577.1

doi: 10.18522/1026-2237-2024-2-21-32

О ДЕФОРМИРОВАНИИ РЕШЕТЧАТОЙ ПЛАСТИНКИ ГЛАЗА

Александр Ованесович Ватульян¹, Иван Сергеевич Козаченко²

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

¹ aovatulyan@sfnu.ru

² ikozachenko@sfnu.ru

Аннотация. Рассмотрено несколько задач о деформировании круглой упругой изотропной пластины переменной жесткости при наличии упругого опирания на краю. В первой рассматривается модель Тимошенко. Во второй изучается деформирование многослойной пластины с кусочно-постоянными по толщинной координате коэффициентами Ламе, которые принимаются постоянными внутри одного слоя. Для моделирования применяется гипотеза ломаной нормали (Zig-zag-method). Для построения решения обеих задач использован вариационный принцип Лагранжа для пластины. Численное решение построено с помощью метода Рунге. В ходе работы сравнивались прогибы и точки перегиба решетчатой пластинки здорового глаза и больного (различные стадии первичной открытоугольной глаукомы) как для постоянных коэффициентов Ламе, так и для их экспоненциально убывающего в радиальном направлении распределений. Исследовано влияние внутриглазного давления на прогиб решетчатой пластинки. Решена задача о прогибе решетчатой пластинки глаза при учете преламинарного слоя на основе гипотезы ломаной нормали. Решение задачи сравнивалось для здорового и больного глаза.

Ключевые слова: решетчатая пластинка глаза, модель Тимошенко, гипотеза ломаной нормали, метод Рунге, деформирование многослойной пластины, первичная открытоугольная глаукома

Для цитирования: Ватульян А.О., Козаченко И.С. О деформировании решетчатой пластинки глаза // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2024. № 2. С. 21–32.

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

Original article

ABOUT THE DEFORMATION OF THE LAMINA CRIBROSA OF THE EYE

Alexander O. Vatulyan¹, Ivan S. Kozachenko²

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

¹ aovatulyan@sfnu.ru

² ikozachenko@sfnu.ru

Abstract. Several problems pertaining to deformation of the circular elastic isotropic plate of variable rigidity in the presence of elastic support on the edge were study. In the first problem Timoshenko model was considered. In the second problem the deformation of a multilayer plate with piecewise constant Lamé coefficient along the thickness coordinate which are assumed to be constant within one layer was researched, the Zig-zag method is used for modeling. The basis for constructing a solution for both problems is the use of Lagrange's variation principle of plates, numerical solution constructed using the Ritz method. During the research work the deflection and inflection points of the lamina cribrosa were compared for a healthy eye and for an eye with different stages of primary open-angle glaucoma for constant Lamé coefficient as well as for their exponentially decreasing above. The problem of deflection of the lamina cribrosa when tacking into account the prelaminar layer was solved based on the Zig-zag method, the solution to this problem was also compared for a healthy eye and for an eye with various stages of primary open-angle glaucoma.

Keywords: lamina cribrosa of the eye, Timoshenko model, Zig-zag method, Ritz method, deformation of the multilayer plate, primary open-angle glaucoma

© Ватульян А.О., Козаченко И.С., 2024

For citation: Vatulyan A.O., Kozachenko I.S. About the Deformation of the Lamina Cribrosa of the Eye. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2024;(2):21-32. (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 задачи о моделировании деформирования различных тканей глаза имеют широкий спектр применения в офтальмологии. Отметим, что уже сейчас на основе некоторых биомеханических моделей и соответствующих решений можно диагностировать и предупреждать ряд болезней глаза, что способствует своевременному принятию мер по их лечению.

Рассматриваются уточнённые модели деформирования решетчатой пластинки глаза. Этой теме посвящено большое количество работ. Так, в [1] сравниваются две модели. В структуру первой входит только решетчатая пластинка глаза, а во вторую также включается склера. Сравняется влияние увеличения внутриглазного давления (ВГД) на диаметр склерального кольца. Анализируется действие деформации склеральной оболочки глаза на прогиб решетчатой пластинки. Сделан вывод, что учет склеры мало влияет на деформирование, и, следовательно, деформация решетчатой пластинки может быть проанализирована отдельно от деформации склеральной оболочки.

В [2] рассматривается модель решетчатой пластинки глаза как круглой пластины заданного радиуса с кольцевым отверстием в центре. Нижняя и верхняя поверхности пластины нагружены равномерным ВГД и внутричерепным давлением соответственно. С помощью теории С.А. Амбарцумяна построено общее уравнение для определения смещения пластины. Изучено влияние ВГД на его решение.

В [3] исследовано деформирование двух сопряженных оболочек (склеры и решетчатой пластинки). Декомпрессионная операция для снижения прогиба решетчатой пластинки моделируется как срез слоя склеры недалеко от точки сопряжения с решетчатой пластинкой. Для упрощения расчетов использовалась полусфера. Сравнялись решения поставленной задачи до декомпрессионной операции и после нее при нормальном ВГД и повышенном. Проведён анализ зависимости прогиба решетчатой пластинки от геометрических параметров среза склеры.

В [4] решетчатая пластинка глаза рассматривается как многослойная оболочка вращения. Предполагается, что слои могут проскальзывать относительно друг друга. В ходе решения получены графики прогиба до и после нагружения верхней и нижней частей решетчатой пластинки для случая трехслойной структуры.

В [5] получено решение задачи о прогибе решетчатой пластинки с использованием геометрически нелинейной обобщенной теории С.А. Амбарцумяна и уточненной итерационной теории Родионова – Титаевой – Черных. Оно сравнивалось с численным решением трехмерной задачи теории упругости, полученным методом конечных элементов.

В [6] решетчатая пластинка глаза моделируется как пластина с упруго опертым краем, для которой выполняются кинематические гипотезы Эйлера – Бернулли. Решён ряд обратных задач по восстановлению параметров модели. Продолжением этой статьи выступает [7], где в дополнение к предыдущим результатам решена задача о реконструкции трех параметров и исследовано влияние упругой заделки на деформирование.

В [8] обсуждаются некоторые вопросы моделирования решетчатой пластинки: удерживается ли решетчатая пластинка только вдоль границы раздела со склерой или существуют дополнительные ограничения на вращение вдоль этой линии; необходимо ли учитывать эффект предварительного натяжения из-за расширения склеры; анализ жесткостей решетчатой пластинки при растяжении и при изгибе; пространственная неоднородность биомеханических свойств решетчатой пластинки; определяющие соотношения материала решетчатой пластинки.

В [9] решетчатая пластинка глаза моделируется как нелинейно-упругая однородная изотропная круглая пластинка, внутренняя поверхность которой подвергается ВГД, тогда как задняя поверхность – ретроламинарному тканевому давлению.

В [10] решетчатая пластинка глаза рассматривается как пороупругая среда, состоящая из эластичного твердого вещества и сосудистого порового пространства, заполненного кровью, которая моделируется как ньютоновская жидкость. В предположении, что решение осесимметрично, описана взаимосвязь между механическими деформациями и кровотоком в решетчатой

пластинке, а также получено численное решение для поставленной задачи. Отличительной особенностью этой статьи является использование гипотезы ломаной нормали [11] для определения прогиба решетчатой пластинки глаза.

Постановка задач

Отметим, что модели, описывающие деформирование решетчатой пластинки глаза, постоянно совершенствуются и уточняются. Первые работы были выполнены в рамках моделей типа Кирхгофа с переменной жесткостью. Уточнение в последние годы идёт в нескольких направлениях, среди которых важную роль занимают модели, в которых происходит учет касательных напряжений в пластине, поскольку именно они играют важную роль в ослаблении нервных окончаний. Среди таких моделей отметим модели типа Тимошенко и ломаной нормали, поскольку реальная решетчатая пластинка глаза состоит из достаточно большого числа слоев, между которыми располагаются фрагменты нервных окончаний. В настоящей статье решетчатая пластинка глаза моделируется как круглая изотропная упругая пластина радиусом a и толщиной $2h$, упругое опирание – двумя упругими связями на краю. В рамках осесимметричной постановки будем считать, что на пластину действует распределенная нагрузка q .

Модель 1 (Тимошенко). Будем считать, что для пластины выполняются гипотезы Тимошенко, в рамках которых $u_r = z\theta(r)$, $u_\varphi = 0$, $u_z = W(r)$, где u_r, u_φ, u_z – перемещения в цилиндрической системе координат; θ – угол поворота; W – прогиб. Ненулевые компоненты тензора деформации имеют вид $\varepsilon_r = \frac{\partial u_r}{\partial r} = z\theta'$, $\varepsilon_\varphi = \frac{1}{r} \frac{\partial u_\varphi}{\partial \varphi} + \frac{u_r}{r} = \frac{u_r}{r} = \frac{z\theta}{r}$, $\varepsilon_{rz} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_z}{\partial r} + \frac{\partial u_r}{\partial z} \right) = \frac{1}{2} (W' + \theta)$.

Предполагается, что $\varepsilon_z \neq 0$, но при этом осевое напряжение $\sigma_z = 0$, откуда в силу закону Гука для изотропного материала $\sigma_z = \lambda(\varepsilon_r + \varepsilon_\varphi + \varepsilon_z) + 2\mu\varepsilon_z = 0$, $\varepsilon_z = -\frac{\lambda}{\lambda+2\mu}(\varepsilon_r + \varepsilon_\varphi)$.

Здесь λ, μ – коэффициенты Ламе материала пластинки, зависящие от радиальной координаты. Далее находим ненулевые напряжения:

$$\sigma_r = \frac{4\mu(\lambda+\mu)z\theta'}{\lambda+2\mu} + \frac{2\mu\lambda z\theta}{r(\lambda+2\mu)}, \quad \sigma_\varphi = \frac{2\mu\lambda z\theta'}{\lambda+2\mu} + \frac{4\mu(\lambda+\mu)z\theta}{r(\lambda+2\mu)}, \quad \sigma_{rz} = \mu(W' + \theta).$$

Выпишем функционал энергии для пластинки:

$$F = \frac{1}{2} \int_0^a \left[f(r) \left(\theta'^2 + \frac{\theta^2}{r^2} \right) + \frac{g(r)\theta\theta'}{r} \right] r dr + \int_0^a p(r)(W' + \theta)^2 r dr - \int_0^a qWr dr + \frac{g_1}{2} W^2(a) + \frac{g_2}{2} \theta^2(a). \quad (1)$$

Здесь введены следующие функции: $f(r) = \frac{8h^3\mu(\lambda+\mu)}{3(\lambda+2\mu)}$; $g(r) = \frac{8h^3\mu\lambda}{3(\lambda+2\mu)}$; $p(r) = h\mu$; g_1, g_2 – коэффициенты упругости при учете упругого опирания на краю. Нетрудно заметить, что если положить $\theta = -W'$, толщину пластины взять равной h и перейти от коэффициентов Ламе к модулю Юнга и коэффициенту Пуассона, то приведенный выше функционал совпадет с функционалом, полученным в [2].

Приведем задачу к безразмерному виду, вводя

$$r = a\xi, \quad \theta(a\xi) = \theta(\xi), \quad W(a\xi) = aW(\xi), \quad f(\xi) = \frac{f(a\xi)}{f(0)}, \quad g(\xi) = \frac{g(a\xi)}{f(0)}, \\ p(\xi) = \frac{p(a\xi)}{p(0)}, \quad q_0 = \frac{qa^3}{f(0)}, \quad S_1 = \frac{g_1 a^2}{f(0)}, \quad S_2 = \frac{g_2}{f(0)}, \quad \gamma = \frac{a^2 p(0)}{f(0)}. \quad (2)$$

В соответствии с преобразованиями (2) функционал (1) с точностью до множителя примет вид

$$F = \frac{1}{2} \int_0^1 \left[f(\xi) \left(\theta'^2 + \frac{\theta^2}{\xi^2} \right) + \frac{g(\xi)\theta\theta'}{\xi} \right] \xi d\xi + \gamma \int_0^1 p(\xi)(W' + \theta)^2 \xi d\xi - \int_0^1 q_0 W \xi d\xi + \frac{S_1}{2} W^2(1) + \frac{S_2}{2} \theta^2(1). \quad (3)$$

Отметим, что функционал (3) соответствует приведенному в [12].

Модель 2 (многослойная пластина в рамках гипотезы ломаной нормали). Будем рассматривать пластинку как многослойную и введем обозначения: $h^{(k)}$ – половина толщины k -го слоя; $\mu^{(k)}$ – модуль сдвига k -го слоя.

Опираясь на модели в [11], перемещение k -го слоя представим следующим образом: $u_r^{(k)}(r, z) = U(r) + z\theta(r) + (\gamma^{(k)} + \beta^{(k)}z)\psi(r)$, $u_z(r) = W(r)$, где $U(r)$ – среднее смещение верхней и нижней границ пластины; $\psi(r)$ – функция, отвечающая за зигзагообразный сдвиг;

$\gamma^{(k)}, \beta^{(k)}$ – кусочно-постоянные функции, постоянные внутри каждого слоя: $\beta^{(k)} = \frac{\mu}{\mu^{(k)}} - 1$, где

$$\mu = h \left(\sum_{k=1}^N \frac{h^{(k)}}{\mu^{(k)}} \right)^{-1}, \quad \gamma^{(k)} = 2 \sum_{i=1}^k h^{(i)} \beta^{(i)} - \beta^{(k)} z_k.$$

Здесь z_k – толщинная координата, отсчитываемая от верхней границы k -го слоя. Далее имеем

$$\varepsilon_r^{(k)} = \frac{\partial u^{(k)}}{\partial r} = U' + z\theta' + (\gamma^{(k)} + \beta^{(k)} z)\psi', \quad \varepsilon_\varphi^{(k)} = \frac{1}{r} \frac{\partial u_\varphi}{\partial \varphi} + \frac{u_r^{(k)}}{r} = \frac{u_r^{(k)}}{r} = \frac{(U + z\theta + (\gamma^{(k)} + \beta^{(k)} z)\psi)}{r},$$

$$\varepsilon_{rz}^{(k)} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_z}{\partial r} + \frac{\partial u_r^{(k)}}{\partial z} \right) = \frac{1}{2} (W' + \theta + \beta^{(k)} \psi).$$

Предполагается, что $\varepsilon_z^{(k)} \neq 0$, но при этом осевое напряжение $\sigma_z^{(k)} = 0$, откуда аналогично описанному выше случаю имеем $\varepsilon_z^{(k)} = -\frac{\lambda^{(k)}}{\lambda^{(k)} + 2\mu^{(k)}} (\varepsilon_r^{(k)} + \varepsilon_\varphi^{(k)})$.

Далее находим ненулевые компоненты тензора напряжений:

$$\begin{aligned} \sigma_r^{(k)} &= \frac{4\mu^{(k)}(\lambda^{(k)} + \mu^{(k)})(U' + z\theta' + (\gamma^{(k)} + \beta^{(k)} z)\psi')}{\lambda^{(k)} + 2\mu^{(k)}} + \frac{2\mu^{(k)}\lambda^{(k)}(U + z\theta + (\gamma^{(k)} + \beta^{(k)} z)\psi)}{r(\lambda^{(k)} + 2\mu^{(k)})}, \\ \sigma_\varphi^{(k)} &= \frac{2\mu^{(k)}\lambda^{(k)}(U' + z\theta' + (\gamma^{(k)} + \beta^{(k)} z)\psi')}{\lambda^{(k)} + 2\mu^{(k)}} + \frac{4\mu^{(k)}(\lambda^{(k)} + \mu^{(k)})(U + z\theta + (\gamma^{(k)} + \beta^{(k)} z)\psi)}{r(\lambda^{(k)} + 2\mu^{(k)})}, \\ \sigma_{rz}^{(k)} &= \mu^{(k)}(W' + \theta + \beta^{(k)} \psi). \end{aligned} \quad (4)$$

Функционал энергии для этой модели после обезразмеривания и введения новых функций принимает вид

$$U(r) = aU(\xi), \quad \psi(r) = \psi(\xi), \quad C_i(\xi) = \frac{c_i(a\xi)}{f(0)}, \quad i = 1 \dots 6, \quad C_i(\xi) = \frac{c_i(a\xi)a}{f(0)}, \quad i = 7 \dots 10,$$

$$C_i(\xi) = \frac{c_i(a\xi)a^2}{f(0)}, \quad i = 11 \dots 15, \quad S_3 = \frac{g_3}{f(0)}, \quad S_4 = \frac{g_4 a^2}{f(0)}, \quad f = \frac{8h^3 \mu^{(1)}(\lambda^{(1)} + \mu^{(1)})}{3(\lambda^{(1)} + 2\mu^{(1)})},$$

$$\begin{aligned} F &= \int_0^1 C_1(\xi) \left(\theta'^2 + \frac{\theta^2}{\xi^2} \right) \xi d\xi + \int_0^1 C_2(\xi) \left(\theta' \psi' + \frac{\theta \psi}{\xi^2} \right) \xi d\xi + \int_0^1 C_3(\xi) \left(\psi'^2 + \frac{\psi^2}{\xi^2} \right) \xi d\xi + \\ &+ \int_0^1 C_4(\xi) \theta \theta' d\xi + \int_0^1 C_5(\xi) (\theta \psi' + \theta' \psi) d\xi + \int_0^1 C_6(\xi) \psi \psi' d\xi + \int_0^1 C_7(\xi) \left(U' \theta' + \frac{U \theta}{\xi^2} \right) \xi d\xi + \\ &+ \int_0^1 C_8(\xi) \left(U' \psi' + \frac{U \psi}{\xi^2} \right) \xi d\xi + \int_0^1 C_9(\xi) (U' \theta + U \theta') d\xi + \int_0^1 C_{10}(\xi) (U' \psi + U \psi') d\xi + \\ &+ \int_0^1 C_{11}(\xi) \left(U'^2 + \frac{U^2}{\xi^2} \right) \xi d\xi + \int_0^1 C_{12}(\xi) U U' d\xi + \int_0^1 C_{13}(\xi) (W' + \theta)^2 \xi d\xi + \\ &+ \int_0^1 C_{14}(\xi) \psi (W' + \theta) \xi d\xi + \int_0^1 C_{15}(\xi) \psi^2 r dr - \int_0^1 q_0 W \xi dr + \frac{S_1}{2} W^2(1) + \\ &+ \frac{S_2}{2} \theta^2(1) + \frac{S_3}{2} \psi^2(1) + \frac{S_4}{2} U^2(1). \end{aligned}$$

Отметим, что нахождение прогиба пластинки в рамках описанных выше моделей осуществляется на основе вариационного принципа Лагранжа и сводится к отысканию минимума приведенных выше функционалов энергии, которые будем находить с помощью метода Ритца.

Численное решение задач с помощью метода Ритца

Модель 1 (Тимошенко). Неизвестные функции аппроксимируются следующим образом:

$\theta = \sum_{i=1}^N a_{1i} \phi_{1i}$, $W = \sum_{i=1}^N a_{2i} \phi_{2i}$; a_{1i} , a_{2i} , $i = 1 \dots N$, – неизвестные константы, подлежащие определению; $\phi_{1i} = r^{2i-1}$, $\phi_{2i} = r^{2(i-1)}$ – координатные функции. Такой выбор координатных функций продиктован нечетностью θ и четностью W по радиальной координате.

Используя необходимое условие экстремума, получим систему линейных уравнений для определения коэффициентов a_{1i} , a_{2i} :

$$\begin{cases} K_{11ij} a_{1i} + K_{12ij} a_{2i} = 0, \\ K_{21ij} a_{1i} + K_{22ij} a_{2i} = f_j, \end{cases}$$

где коэффициенты системы и правые части имеют громоздкий вид и в работе не приводятся.

Модель 2 (многослойная пластина в рамках гипотезы ломаной нормали). Неизвестные функции аппроксимируются следующим образом: $\theta = \sum_{i=1}^N a_{1i} \phi_{1i}$; $W = \sum_{i=1}^N a_{2i} \phi_{2i}$; $\psi = \sum_{i=1}^N a_{3i} \phi_{3i}$; $U = \sum_{i=1}^N a_{4i} \phi_{4i}$; a_{1i} , a_{2i} , a_{3i} , a_{4i} , $i = 1 \dots N$, – неизвестные константы, подлежащие определению; $\phi_{1i} = r^{2i-1}$, $\phi_{2i} = r^{2(i-1)}$, $\phi_{3i} = r^{2i-1}$, $\phi_{4i} = r^{2i-1}$ – координатные функ-

ции. Подставляя в формулу (4) вместо неизвестных функций их аппроксимации и используя необходимое условие экстремума, приходим к системе уравнений для определения коэффициентов разложений $a_{1i}, a_{2i}, a_{3i}, a_{4i}, i = 1 \dots N$:

$$\begin{cases} K_{11ij}a_{1i} + K_{12ij}a_{2i} + K_{13ij}a_{3i} + K_{14ij}a_{4i} = 0 \\ K_{21ij}a_{1i} + K_{22ij}a_{2i} + K_{23ij}a_{3i} + K_{24ij}a_{4i} = f_j \\ K_{31ij}a_{1i} + K_{32ij}a_{2i} + K_{33ij}a_{3i} + K_{34ij}a_{4i} = 0 \\ K_{41ij}a_{1i} + K_{42ij}a_{2i} + K_{43ij}a_{3i} + K_{44ij}a_{4i} = 0 \end{cases} \quad (5)$$

причем коэффициенты системы представлены в виде однократных интегралов.

Найдя решение системы (5), получим значения искомых постоянных, при помощи которых определяется прогиб в центре пластины и через него – точки перегиба.

Задание параметров системы

В [13] приведены модули сдвига решетчатой пластинки и преламинарного слоя для здорового глаза, а также при различных заболеваниях (глазная гипертензия (ГГТ), первичная открытоугольная глаукома (ПОУГ), первичная закрытоугольная глаукома (ПЗУГ)), полученные в ходе эксперимента на испытуемых, достигших 50-летнего возраста, без внутриглазных операций. В ходе эксперимента глаза испытуемого обрабатывали 1%-м тропикамидом, затем измеряли базовое ВГД и объем с помощью тонометра Топорен, после производилось мягкое вдавливание на височную сторону нижнего века офтальмодинамометром с силой 0,64 Н, затем снова измерялись ВГД и объем глаза. Данные о модулях сдвига взяты из [13] и представлены в табл. 1.

Таблица 1 / Table 1

Модуль сдвига для решетчатой пластинки и преламинарного слоя здорового глаза и с различными заболеваниями, МПа / Shear modulus for the lamina cribrosa and prelaminar layer, healthy eye and with various diseases, MPa

Структура глаза	Здоровый	ГГТ	ПЗУГ	ПОУГ
Преламинарный слой	0,056±0,037	0,082±0,040	0,058±0,025	0,062±0,038
Решетчатая пластинка	0,057±0,043	0,079±0,046	0,080±0,051	0,078±0,050

В табл. 2 приведены коэффициенты Ламе, используемые при расчетах, модули сдвига брались как среднее значение модуля сдвига из табл. 1. Коэффициенты Ламе λ найдены из предположения, что коэффициент Пуассона равен 0,49 как для решетчатой пластинки, так и для преламинарного слоя.

Таблица 2 / Table 2

Коэффициенты Ламе для решетчатой пластинки и преламинарного слоя глаз, здорового и с различными заболеваниями, принимающиеся в качестве расчетных, МПа / Lamé coefficient for the lamina cribrosa and the prelaminar layer of the eye, healthy and with various diseases, accepted as settlement, MPa

Структура глаза		Здоровый	ГГТ	ПЗУГ	ПОУГ
Преламинарный слой	μ	0,056	0,082	0,058	0,062
	λ	2,744	4,018	2,842	3,038
Решетчатая пластинка	μ	0,057	0,079	0,08	0,078
	λ	2,793	3,871	3,92	3,822

В [14] приведены данные о величине толщины решетчатой пластинки и преламинарного слоя для здорового и больного глаза (с различными стадиями ПОУГ), полученные в ходе эксперимента на 39 пациентах, возраст которых варьировался от 62 до 83 лет. Измерения проводились методом стандартной автоматизированной периметрии на приборе Tomey AP-3000.

В [15] указаны данные о толщине решетчатой пластинки для здорового и больного глаза с различными стадиями ПОУГ, полученные в ходе эксперимента на 30 пациентах с глаукомой. Всем пациентам было проведено комплексное офтальмологическое обследование, включающее измерение остроты зрения с наилучшей коррекцией, биомикроскопию с использованием щелевой лампы, гониоскопию, аппланационную тонометрию по Гольдману, расширенное стереоскопическое ис-

следование головки зрительного нерва и глазного дна, а также ахроматическую автоматизированную периметрию с использованием стандартной программы Swedish Interactive Threshold Algorithm 30-2. Средние данные о толщинах, основанные на результатах [14, 15], приведены в табл. 3.

В [16] отмечено, что диаметр решетчатой пластинки варьируется от 1,2 до 1,7 мм, в расчетах будем принимать его равным 1,45 мм.

Таблица 3 / Table 3

Толщина решетчатой пластинки и преламинарного слоя глаз (здорового и с различными стадиями ПОУГ), мм / The thickness of the lamina cribrosa and the prelaminar layer of the eye (healthy and with various stages of primary open-angle glaucoma (POAG)), mm

Структура глаза	Здоровый	Стадия ПОУГ		
		1-я	2-я	3-я
Преламинарный слой макс.	0,334	0,205	0,175	0,121
Преламинарный слой мин.	0,238	0,158	0,084	0,075
Решетчатая пластинка	0,244	0,198	0,182	0,130

Определение оптимального количества координатных функций в методе Ритца

Согласно [17], прогиб, полученный с помощью метода Ритца, монотонно возрастает с увеличением числа координатных функций, при этом приближенное решение стремится к точному. В качестве параметров системы выбраны значения из табл. 2, 3, соответствующие здоровому глазу. Расчет произведен для двухслойной пластины, у которой нижний слой – преламинарный, а верхний – решетчатая пластинка. Толщина для модели 2 определялась как сумма толщин всех слоев, а коэффициенты Ламе – по формулам $\mu = \frac{\mu^{(1)}h^{(1)} + \mu^{(2)}h^{(2)}}{h^{(1)} + h^{(2)}}$, $\lambda = \frac{\lambda^{(1)}h^{(1)} + \lambda^{(2)}h^{(2)}}{h^{(1)} + h^{(2)}}$. Полученный результат показал, что значение прогиба в центре пластины стабилизируется при $N=13$.

Результаты

На рис. 1 показан прогиб решетчатой пластинки здорового глаза и с различными стадиями ПОУГ. В качестве параметров системы взяты значения из табл. 2, 3; коэффициенты Ламе полагаются равными для всех стадий ПОУГ. Все дальнейшие расчеты ведутся для радиуса пластины 0,725 мм при среднем нормальном ВГД [13], равном 19,1 мм рт.ст., что приблизительно соответствует 0,0025 МПа.

На основе рис. 1 делается вывод, что при ПОУГ прогиб решетчатой пластинки заметно увеличивается, при этом первая и вторая стадии ПОУГ имеют незначительные изменения в прогибе друг относительно друга, однако при третьей стадии ПОУГ прогиб заметно увеличивается. Также важную роль играют точки перегиба прогиба. Они приведены в табл. 4 для здорового глаза и для глаз с различными стадиями ПОУГ.

Таблица 4 / Table 4

Точки перегиба решетчатой пластинки для здорового глаза и с различными стадиями ПОУГ / The inflection points of the lamina cribrosa for a healthy eye and with various stages POAG

Решетчатая пластинка глаза	Здоровый	Стадия ПОУГ		
		1-я	2-я	3-я
Точка перегиба	0,657	0,631	0,623	0,601

Как видно из табл. 4, местоположение точки перегиба смещается ближе к центру пластины при увеличении стадии ПОУГ, при этом максимальное изменение происходит при переходе от здорового глаза к первой стадии ПОУГ. Во многих работах также отмечается, что модуль Юнга не постоянен по радиальной координате, а убывает в направлении от виска к носу [17]. Для учета этого фактора положим, что модуль Юнга является экспоненциально убывающей функцией от радиальной координаты. Так как коэффициенты Ламе зависят линейно от модуля Юнга, то они будут экспоненциально убывающими функциями. Возьмем коэффициенты Ламе в виде be^{-r} , где b – значение из табл. 2. На рис. 1 сравниваются графики прогиба для здорового глаза,

а также для глаз с различными стадиями ПОУГ при экспоненциально убывающем распределении по радиальной координате коэффициентов Ламе.

На рис. 1б видно, что характер изменения прогибов друг относительно друга схож с полученным при постоянных коэффициентах Ламе (рис. 1а), это же можно сказать о точках перегиба. В табл. 5 приведены точки перегиба для здорового глаза и глаз с различными стадиями ПОУГ при экспоненциально убывающем распределении для коэффициентов Ламе. Как и в табл. 4, различие в точках перегиба графика прогиба для здорового глаза и с разными стадиями ПОУГ мало, а максимальное различие достигается при переходе от здорового глаза к первой стадии ПОУГ. Зачастую ПОУГ сопровождается повышением ВГД [19]. Предположим, что при первой и второй стадиях ПОУГ происходит умеренное повышение ВГД. Согласно [19], умеренно повышенным считается ВГД от 21 до 32 мм рт.ст. Возьмем среднее значение умеренно повышенного ВГД (26,5 мм рт.ст.), что приблизительно соответствует 0,0035 Мпа. В третьей стадии ПОУГ происходит высокое повышение ВГД (свыше 32 мм рт.ст.). Примем его равным 34 мм рт.ст., что приблизительно соответствует 0,0045 МПа. Результат расчетов представлен на рис. 2.

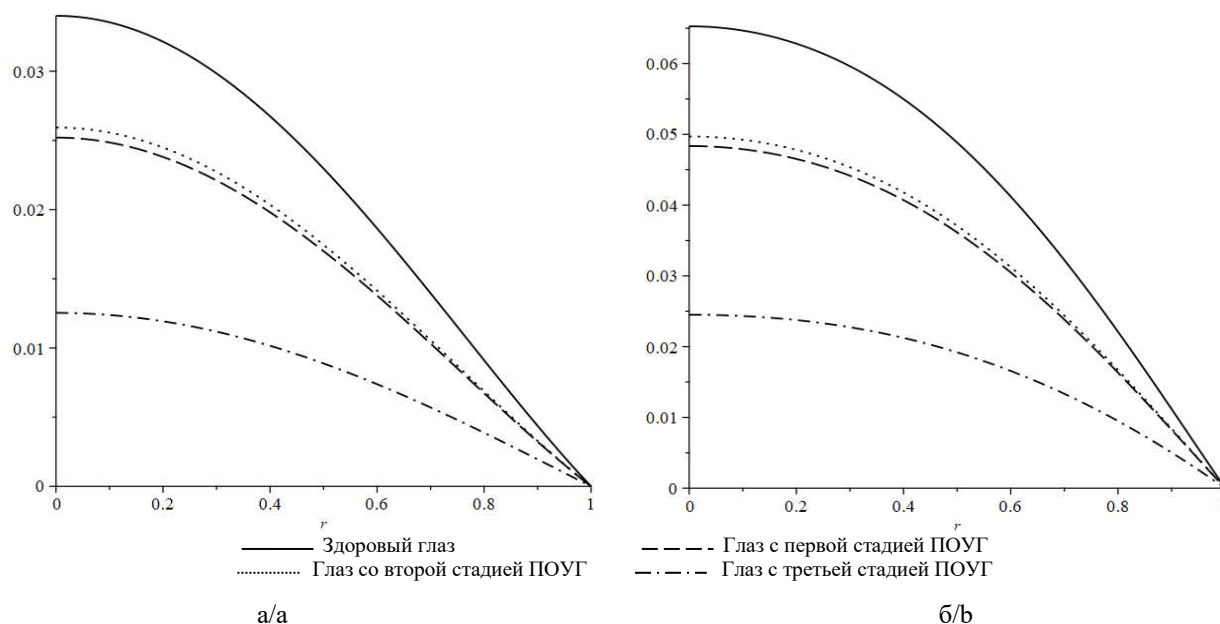


Рис. 1. Прогиб в рамках модели Тимошенко для здорового глаза и с различными стадиями ПОУГ: а – при постоянных коэффициентах Ламе; б – при экспоненциально убывающем законе распределения коэффициентов Ламе / Fig. 1. Deflection within the framework of the Timoshenko model for the healthy eye and with various stages of POAG: a - with constant Lamé coefficients; b - with exponentially decreasing distribution of Lamé coefficients

Таблица 5 / Table 5

Точки перегиба решетчатой пластинки для здорового глаза и с различными стадиями ПОУГ при экспоненциально убывающем распределении коэффициентов Ламе / The inflection points of the lamina cribrosa for a healthy eye and with various stages POAG with exponentially decreasing distribution of Lamé coefficients

Решетчатая пластинка глаза	Здоровый	ПОУГ1	ПОУГ2	ПОУГ3
Точка перегиба	0,942	0,937	0,928	–

Учет повышения ВГД слабо влияет на характер изменения прогибов при различных стадиях ПОУГ в отношении к здоровому глазу, однако стоит отметить общее увеличение прогиба, что закономерно в силу увеличения нагрузки.

Из табл. 2, 3 следует, что ПОУГ оказывает значительное влияние не только на решетчатую пластинку глаза, но и на преламинарный слой. Зачастую принимается [20], что преламинарный и ретроламинарный слои являются частью решетчатой пластинки глаза. Рассмотрим её как двухслойную структуру, нижним слоем которой является сама решетчатая пластинка, верхним – преламинарный слой, толщина которого имеет линейно убывающий характер и вычисляется по формуле $p_{max} - (p_{max} - p_{min})\xi$, где p_{max}, p_{min} – максимальная и минимальная толщина соответственно.

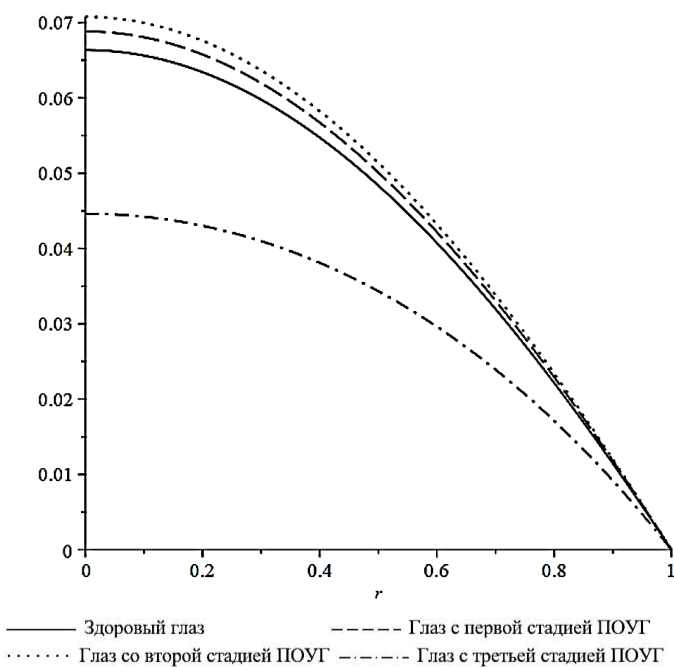


Рис. 2. Прогиб в рамках модели Тимошенко для здорового глаза и с различными стадиями ПОУГ при экспоненциально убывающем законе распределения коэффициентов Ламе с учетом повышения ВГД / Fig. 2. Deflection within the framework of the Timoshenko model for the healthy eye and with various stages of POAG with exponentially decreasing distribution of Lamé coefficients, taking into account the increase in intraocular pressure

Сравним решения, построенные на основе двух описанных выше моделей, принимая за параметры системы для метода, построенного на основе гипотезы ломаной нормали, значения из табл. 2, 3 для глаза с первой стадией ПОУГ (без учета повышения ВГД), а для модели Тимошенко – толщину пластины, равную общей толщине решетчатой пластинки и преламинарного слоя. Коэффициенты Ламе при этом усреднены по толщине, и для них по-прежнему полагается экспоненциально убывающая зависимость вида be^{-r} . Максимальная относительная разница между двумя моделями достигается в центре пластины и равна 5 %.

Графики прогиба для здорового глаза и с различными стадиями ПОУГ, построенные в рамках предположения, что преламинарный слой является частью решетчатой пластинки глаза, при учете повышенного ВГД (рис. 3а) и при нормальном ВГД (рис. 3б), позволяют увидеть картину, схожую с полученной при рассмотрении модели 1, однако стоит отметить большее расхождение между здоровым глазом и ПОУГ первых двух стадий. Для случая без учета ВГД первая стадия ПОУГ заметно ближе к здоровому глазу, нежели к ПОУГ второй стадии.

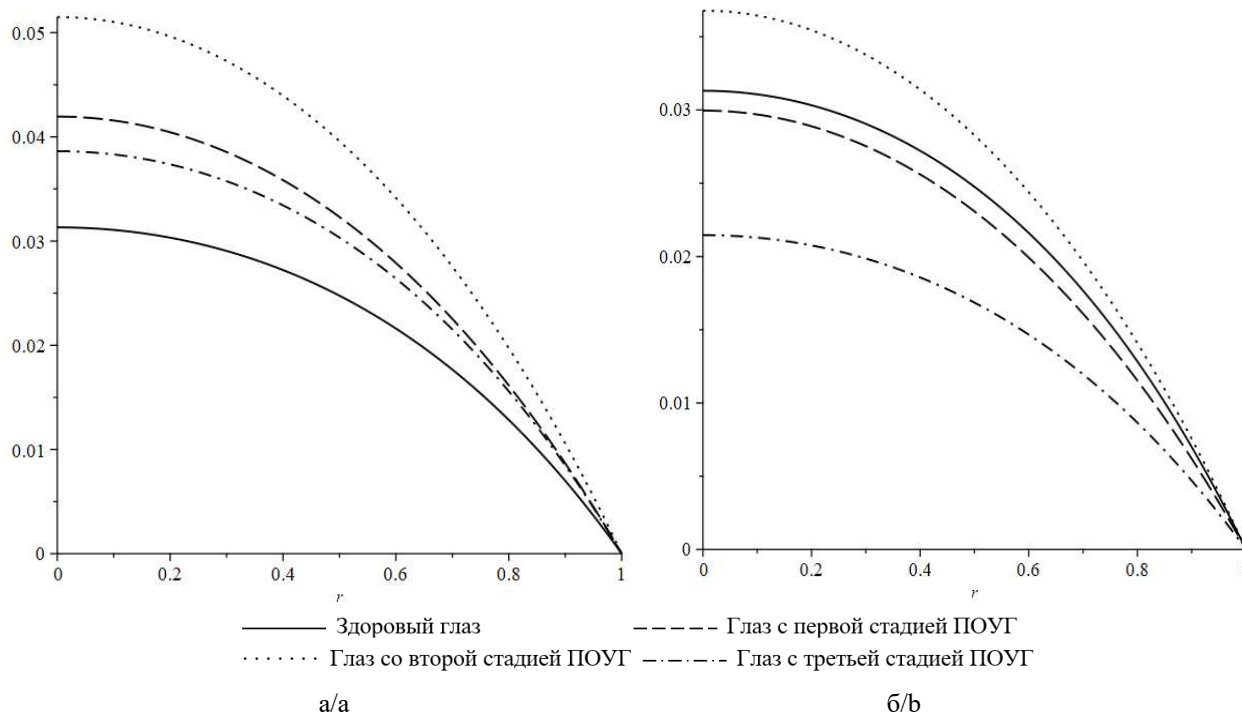


Рис. 3. Прогиб в рамках модели ломаной нормали для здорового глаза и с различными стадиями ПОУГ при экспоненциально убывающем законе распределения коэффициентов Ламе: а – с учетом ВГД; б – без учета повышения ВГД / Fig. 3. Deflection within the framework of the broken normal model for a healthy eye and with various stages of POAG with an exponentially decreasing law of distribution of Lamé coefficients: a - taking into account intraocular pressure; b - without taking into account the increase in intraocular pressure

В табл. 6 приведены точки перегиба для здорового глаза и с различными стадиями ПОУГ при учете преламинарного слоя как части решетчатой пластинки.

Таблица 6 / Table 6

Точки перегиба решетчатой пластинки для здорового глаза и с различными стадиями ПОУГ для модели 2 / The inflection points of the lamina cribrosa for a healthy eye and with various stages POAG for model 2

Решетчатая пластинка глаза	Здоровый	ПОУГ1	ПОУГ2	ПОУГ3
Точка перегиба без учета повышения ВГД	–	0,938	0,87	0,784
Точка перегиба с учетом повышения ВГД	–	0,895	0,866	0,788

Касательные напряжения, полученные в рамках модели ломаной нормали, демонстрируют существенное различие между слоями при ПОУГ, что может свидетельствовать об их проскальзывании друг относительно друга. Это приводит к передавливанию нервных окончаний, что способствует повышению ВГД (рис. 4).

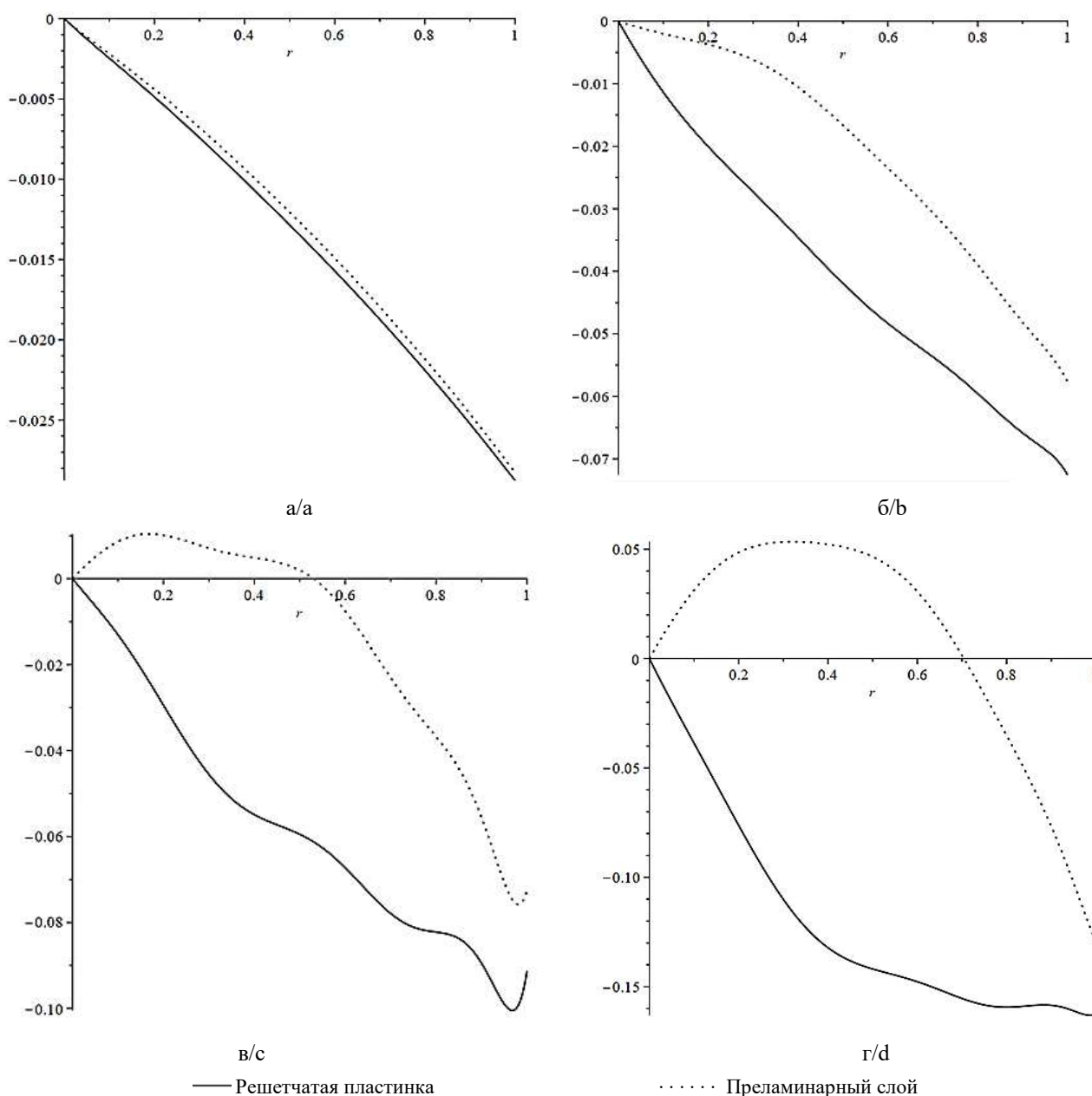


Рис. 4. Касательные напряжения, полученные в рамках модели ломаной нормали: а – здоровый глаз; б – 1-я стадия ПОУГ; в – 2-я стадия ПОУГ; г – 3-я стадия ПОУГ / Fig. 4. Shear stresses obtained within the framework of the broken normal model: a - healthy eye; b - 1st stage of POAG; c - 2nd stage; d - 3rd stage

В табл. 7 приведены значения разницы касательных напряжений на краю между слоями для здорового глаза и с различными стадиями ПОУГ, округленные до 0,0001.

Касательные напряжения, полученные в рамках модели Тимошенко, приведены на рис. 5. При всех стадиях ПОУГ наблюдается линейно убывающий характер касательных напряжений, их значения на краю тем меньше, чем выше стадия ПОУГ.

Таблица 7 / Table 7

Значения разницы касательных напряжений на краю между слоями для здорового глаза и с различными стадиями ПОУГ / Values of the difference in shear stress at the edge between layers for a healthy eye and with different stages of POAG

Модель ломаной нормали	Здоровый	ПОУГ1	ПОУГ2	ПОУГ3
Разница касательных напряжений на краю	1,754386	20,5128191	20,5128182	20,5128174

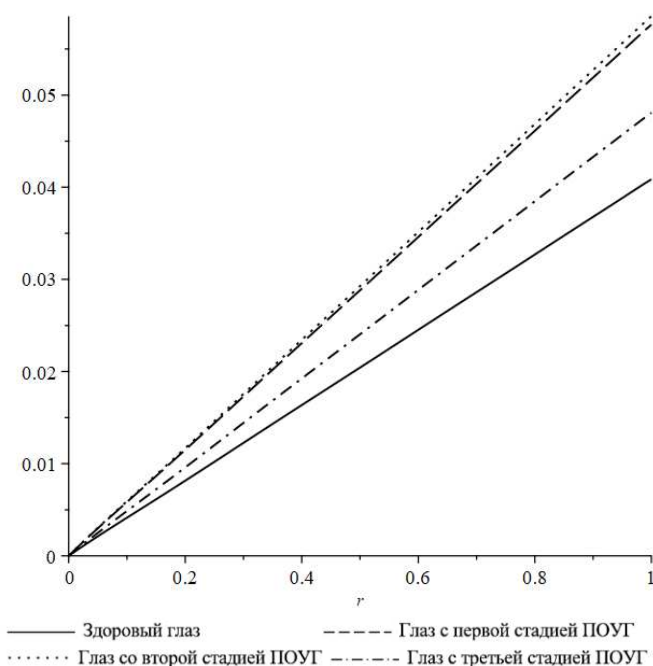


Рис. 5. Касательные напряжения, полученные в рамках модели Тимошенко, для здорового глаза и при всех стадиях ПОУГ в условиях повышенного ВГД / Fig. 5. Tangential stresses obtained within the Timoshenko model for a healthy eye and for all stages of POAG, subject to increased intraocular pressure

Заключение

В рамках рассмотренных моделей найдены прогибы решетчатой пластинки здорового глаза и с ПОУГ, вычислены точки перегиба и посчитаны касательные напряжения. Полученные результаты свидетельствуют о том, что прогиб в центре пластины увеличивается при ПОУГ с ростом ее стадии. Найденные точки перегиба прогибов показали тенденцию к смещению к центру решетчатой пластинки в рамках обеих моделей, при этом в модели 2 при учете преламинарного слоя точка перегиба прогиба для здорового глаза отсутствовала. Касательные напряжения в рамках модели 1 показали окололинейный убывающий характер, при этом значение на конце уменьшалось с ростом стадии ПОУГ. Для модели 2 расхождение касательных напряжений между нижней границей решетчатой пластинки и верхней границей преламинарного слоя увеличивалось с увеличением стадии ПОУГ. Это может свидетельствовать о передавливании слоями сосудов, что приводит к росту ВГД.

Список источников

1. Bauer S.M., Romanova A.A., Smirnov A.L. On formulation of the problem on deformation on the lamina cribrosa // Russian J. of Biomechanics. 2001. Vol. 5, № 3. P. 18–22.
2. Bauer S.M., Voronkova E.B. On the deformation of the lamina cribrosa under intraocular pressure // Russian J. of Biomechanics. 2001. Vol. 5, № 1. P. 73–82.
3. Краковская Е.В. Об изменении деформации решетчатой пластинки диска зрительного нерва после депрессионных операций // Рос. журн. биомеханики. 2008. Т. 12, № 2(40). С. 55–59.
4. Золотухина Л.А. О деформации многослойной решетчатой пластинки диска зрительного нерва // Рос. журн. биомеханики. 2008. Т. 12, № 4(42). С. 40–46.
5. Бауэр С.М., Воронкова Е.Б. Модели теории оболочек и пластин в задачах офтальмологии // Вестн. СПбГУ. Серия 1. 2014. Т. 1(59), вып. 3. С. 438–458.
6. Ватульян А.О., Потетюнко О.А. О колебаниях неоднородной пластины с упруго опертым краем // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2016. № 2. С. 35–40.
7. Ватульян А.О., Потетюнко О.А. К оценке деформативности решетчатой пластинки глаза // Рос. журн. биомеханики. 2017. Т. 21, № 1. С. 8–17.

8. Newson T., El-Sheikh A. Mathematical modeling of the biomechanics of the lamina cribrosa under elevated intraocular pressures // *J. of Biomechanical Engineering*. 2006. Vol. 128. P. 496–504.
9. Guidoboni G., Harris A., Carichino L., Arieli Y., Siesky B.A. Effect of intraocular pressure hemodynamics of the central retinal artery: a mathematical model // *Mathematical Biosciences and Engineering*. 2014. Vol. 11, № 3. P. 523–546.
10. Gausin P., Guidoboni G., Harris A., Prada D., Sacco R., Terragni S.A. Poroelastic model for the perfusion of the lamina cribrosa in the optic nerve head // *Mathematical Biosciences*. 2014. Vol. 257. P. 33–41.
11. Di Sciuva M., Cherlone M., Tessler A.A. Robust and consistent first-order zigzag theory for multilayered beams // *Solid Mechanics and Its Applications*. 2009. Vol. 168. P. 255–268.
12. Vatulyan A.O., Potetyunko O.A., Bogachev I.V., Modeling of an inhomogeneous circular Timoshenko plate with an elastically supported boundary // *Recent Approaches in Theory of Plates and Plate-Like Structures*. 2021. Ch. 21. P. 277–286.
13. Zhang L., Beotra M., Baskaran M., Tun T.A., Wang, X., Perera S.A., Strouthidis N.G., Aung T., Boote C., Girard M.J.A. In Vivo measurements of prelamina and lamina cribrosa biomechanical properties in humans // *Investigative Ophthalmology & Visual Science*. 2020. Vol. 61(3), art. 27. P. 10.
14. Арутюнян Л.Л., Анисимова С.Ю., Морозова Ю.С., Анисимов С.И. Биометрические и морфометрические параметры решетчатой пластинки у пациентов с разными стадиями первичной открытоугольной глаукомы // *Нац. журн. глаукома*. 2021. Т. 20, № 3. С. 11–19.
15. Inoue R., Hangai M., Kotera Y., Nakanishi H., Mori S., Morishita S., Yoshimura N. Three-dimensional high-speed optical coherence tomography imaging of lamina cribrosa in glaucoma // *Ophthalmology*. 2009. Vol. 116, № 2. P. 214–222.
16. Бегун П.И., Афонин П.Н. Моделирование в биомеханике. М.: Высшая школа, 2004. 389 с.
17. Михлин С.Г. Вариационные методы в математической физике. М.: Наука, 1970. 512 с.
18. Иомдина Е.Н., Бауэр С.М., Котляр К.Е. Биомеханика глаза: теоретические аспекты и клинические приложения. М.: Реал Тайм, 2015. 208 с.
19. Нестеров А.П. Глаукома. М.: Медицина, 1995. 360 с.
20. Ho Cho K., Sato N., Yamamoto M., Watanabe G., Taniguchi S., Murakami G., Abe S. Histology of the optic nerve head with special reference to the layer-specific distribution of composite fiber at and near the lamina cribrosa: An immunohistochemical study using specimens from elderly donated cadavers // *Annals of Anatomy*. 2023. Vol. 247. P. 152051.

References

1. Bauer S.M., Romanova A.A., Smirnov A.L. On formulation of the problem on deformation on the lamina cribrosa. *Russian Journal of Biomechanics*. 2001;5(3):18-22.
2. Bauer S.M., Voronkova E.B. On the deformation of the lamina cribrosa under intraocular pressure. *Russian Journal of Biomechanics*. 2001;5(1):73-82.
3. Krakovskaya E.V. On the change in the deformation of the lamina cribrosa of the optic disc after decompression operations. *Ros. zhurn. biomekhaniki = Russian Journal of Biomechanics*. 2008;12(2):55-59. (In Russ.).
4. Zolotukhina L.A. On the deformation of a multilayer lamina cribrosa of the optic disc. *Ros. zhurn. biomekhaniki = Russian Journal of Biomechanics*. 2008;12(4):40-46. (In Russ.).
5. Bauer S.M., Voronkova E.B. Models of the theory of shells and plates in the problems of ophthalmology. *Vestnik SPbSU = Bulletin of Saint Petersburg University. Series 1*. 2014;1(3):438-458. (In Russ.).
6. Vatul'yan A.O., Potetyunko O.A. On vibrations of an inhomogeneous plate with an elastically supported edge. *Izv. vuzov. Sev.-Kavk. region. Estestv. nauki = Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science*. 2016;(2):35-40. (In Russ.).
7. Vatul'yan A.O., Potetyunko O.A. To assess the deformability of the lamina cribrosa of the eye. *Ros. zhurn. biomekhaniki = Russian Journal of Biomechanics*. 2017;21(1):8-17. (In Russ.).
8. Newson T., El-Sheikh A. Mathematical modeling of the biomechanics of the lamina cribrosa under elevated intraocular pressures. *Journal of Biomechanical Engineering*. 2006;128:496-504.
9. Guidoboni G., Harris A., Carichino L., Arieli Y., Siesky B.A. Effect of intraocular pressure hemodynamics of the central retinal artery: a mathematical model. *Mathematical Biosciences and Engineering*. 2014;11(3):523-546.
10. Gausin P., Guidoboni G., Harris A., Prada D., Sacco R., Terragni S. A. Poroelastic model for the perfusion of the lamina cribrosa in the optic nerve head. *Mathematical Biosciences*. 2014;257:33-41.
11. Di Sciuva M., Cherlone M., Tessler A.A. Robust and consistent first-order zigzag theory for multilayered beams. *Solid Mechanics and Its Applications*. 2009;168:255-268.
12. Potetyunko O.A., Bogachev I.V., Vatulyan A.O. Modeling of an inhomogeneous round Timoshenko plate with an elastically supported boundary. *Recent approaches in theory of plates and plate-like structure*. 2021;(21):277-286.

13. Zhang L., Beotra M., Baskaran M., Tun T.A., Wang X., Perera S.A., Strouthidis N.G., Aung T., Boote C., Girard M.J.A. In vivo measurements of prelamina and lamina cribrosa biomechanical properties in humans. *Investigative Ophthalmology & Visual Science*. 2020;61(3):10.

14. Arutyunyan L.L., Anisimova S.Yu., Morozova Yu.S., Anisimov S.I. Biometric and morphometric parameters of the trellis plate in patients with different stages of primary open-angle glaucoma. *Nats. zhurn. glaukoma = National Glaucoma Journal*. 2021;20(3):11-19. (In Russ.).

15. Inoue R., Hangai M., Kotera Y., Nakanishi H., Mori S., Morishita S., Yoshimura N. Three-dimensional high-speed optical coherence tomography imaging of lamina cribrosa in glaucoma. *Ophthalmology*. 2009;116(2):214-222.

16. Begun P.E., Afonin P.N. *Modeling in biomechanics*. Moscow: Vysshaya shkola Publ.; 2004. 390 p. (In Russ.).

17. Mikhlin S.G. *Variational methods in mathematical physics*. Moscow: Nauka Publ.; 1970. 512 p. (In Russ.).

18. Iomdina E.N., Bauer S.M., Kotlyar K.E. *Biomechanics of the eye: Theoretical aspects and clinical provisions*. Moscow: Real Taim Publ.; 2015. 208 p. (In Russ.).

19. Nesterov A.P. *Glaucoma*. Moscow: Meditsina Publ.; 1995. 360 p. (In Russ.).

20. Ho Cho K., Sato N., Yamamoto M., Watanabe G., Taniguchi S., Murakami G., Abe S. Histology of the optic nerve head with special reference to the layer-specific distribution of composite fiber at and near the lamina cribrosa: An immunohistochemical study using specimens from elderly donated cadavers. *Annals of Anatomy*. 2023;247:152051.

Информация об авторах

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

И.С. Козаченко – студент, кафедра теории упругости, Институт математики, механики и компьютерных наук им. И.И. Воровича.

Information about the authors

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

I.S. Kozachenko - Student, Department of Elasticity Theory, Vorovich Institute of Mathematics, Mechanics and Computer science of the Southern Federal University.

*Статья поступила в редакцию 14.02.2024; одобрена после рецензирования 03.03.2024; принята к публикации 24.05.2024.
The article was submitted 14.02.2024; approved after reviewing 03.03.2024; accepted for publication 24.05.2024.*

Научная статья

УДК 539.3

doi: 10.18522/1026-2237-2024-2-33-39

ЗАДАЧА НЕЛИНЕЙНОЙ ТЕОРИИ УПРУГОСТИ О РАСТЯЖЕНИИ И КРУЧЕНИИ СОСТАВНОГО ЦИЛИНДРА С ПРЕДВАРИТЕЛЬНО НАПРЯЖЁННЫМ ВКЛЮЧЕНИЕМ, СОДЕРЖАЩИМ ВИНТОВУЮ ДИСЛОКАЦИЮ

Леонид Михайлович Zubov¹, Сусанна Арутюновна Гайбарян² ✉

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

¹zubovl@yandex.ru

²sgaybaryan@sfnedu.ru ✉

Аннотация. Рассмотрена задача о больших деформациях кручения и растяжения-сжатия составного кругового цилиндра из несжимаемого материала Бартенева – Хазановича. Цилиндр содержит центральное круговое цилиндрическое включение, в котором образована сосредоточенная винтовая дислокация и которое предварительно скручено, и растянуто (или сжато) вдоль оси и скреплено с ненапряжённым внешним полым цилиндром. При решении задачи используется единая для составного тела отсчётная конфигурация. Она является естественной (ненапряжённой) для внешнего полого цилиндра и предварительно напряжённой для внутреннего сплошного цилиндра. При записи определяющих соотношений материала внутреннего цилиндра применяется теория наложения больших деформаций. При решении задачи о предварительно напряжённом состоянии внутреннего включения используется нелинейная теория кручения упругих цилиндров, содержащих винтовую дислокацию. Эта теория физически корректна не для любых моделей изотропных упругих материалов, а только для таких, у которых винтовая дислокация в цилиндре обладает конечной погонной энергией и создаёт продольную силу конечной величины. К этому классу относится модель Бартенева – Хазановича. Задача для составного цилиндра решается полуобратным методом, при помощи которого она приводится к нелинейным обыкновенным дифференциальным уравнениям. Предположение об изотропности и несжимаемости материала позволило найти точное решение задачи.

Ключевые слова: нелинейная упругость, сосредоточенная дислокация, несжимаемый материал, точное решение

Для цитирования: Zubov Л.М., Гайбарян С.А. Задача нелинейной теории упругости о растяжении и кручении составного цилиндра с предварительно напряжённым включением, содержащим винтовую дислокацию // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2024. № 2. С. 33–39.

Благодарности: работа выполнена за счёт гранта Российского научного фонда (проект № 23-21-00123, <https://rscf.ru/project/23-21-00123/>).

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

Original article

THE PROBLEM OF NONLINEAR ELASTICITY THEORY OF TENSION AND TORSION OF A COMPOSITE CYLINDER WITH A PRESTRESSED INCLUSION, CONTAINING A SCREW DISLOCATION

Leonid M. Zubov¹, Susanna A. Gaybaryan² ✉

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

¹zubovl@yandex.ru

²sgaybaryan@sfnedu.ru ✉

© Zubov Л.М., Гайбарян С.А., 2024

Abstract. The problem of large torsional and tension-compression deformations of a composite circular cylinder of incompressible Bartenev-Khazanovich material is considered. The cylinder contains a central circular cylindrical inclusion in which a concentrated screw dislocation is formed. It is pre-twisted and stretched (or compressed) along the axis and bonded to an unstressed external hollow cylinder. A single reference configuration is used when solving a problem for a composite body. This configuration is natural (unstressed) for the outer hollow cylinder and prestressed for the inner solid cylinder. The large deformation superposition theory is used to write the determining ratios of the material of the inner cylinder. The nonlinear theory of torsion of elastic cylinders containing a screw dislocation is used to solve the problem of the prestressed state of the internal inclusion. This theory is physically correct not for any models of isotropic elastic materials, but only for those for which the screw dislocation in the cylinder has a finite linear energy and creates a longitudinal force of finite value. The Bartenev-Khazanovich model belongs to this class. The problem for a composite cylinder is solved by a semi-inverse method. Using this method, it is reduced to nonlinear ordinary differential equations. The assumption of isotropy and incompressibility of the material makes it possible to find an exact solution to the problem.

Keywords: nonlinear elasticity, concentrated dislocation, incompressible material, exact solution

For citation: Zubov L.M., Gaybaryan S.A. The Problem of Nonlinear Elasticity Theory of Tension and Torsion of a Composite Cylinder with a Prestressed Inclusion, Containing a Screw Dislocation. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2024;(2):33-39. (In Russ.).

Acknowledgments: the work was supported by Russian Science Foundation (project No. 23-21-00123, <https://rscf.ru/project/23-21-000123/>).

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

Введение

В современной технике широко используются композиционные материалы, содержащие предварительно напряжённые элементы. В работах [1–7] исследован ряд задач о больших деформациях нелинейно-упругих тел с предварительно напряжёнными частями. Один из видов предварительных напряжений – собственные напряжения, обусловленные дефектами микроструктуры твердых тел, в том числе дислокациями. Дислокации играют важную роль в таких явлениях, как рост кристаллов, пластическое течение, внутреннее трение и др. Прямолинейные винтовые дислокации влияют на механическое поведение нитевидных кристаллов, нанотрубок, наностержней и других элементов конструкций. В представленной работе решается задача о нелинейном деформировании составного цилиндра с предварительно напряжённым включением. Причина появления предварительных напряжений состоит в наличии сосредоточенной винтовой дислокации.

Предварительное состояние внутреннего цилиндра

Задача о сосредоточенной винтовой дислокации в круговом цилиндре с точки зрения нелинейной теории упругости была решена в [8] без учёта его кручения и осевого растяжения-сжатия. Было показано, что строгий нелинейный подход позволяет устранить такой парадокс линейной теории упругости, как бесконечное значение погонной энергии деформации, а также коренным образом меняет порядок сингулярности напряжений и деформаций на оси дислокации. Решение задачи о больших деформациях кручения и растяжения-сжатия сплошного кругового цилиндра с прямолинейной винтовой дислокацией было найдено в [9]. Следуя [8], поле конечных деформаций цилиндра с дислокацией будем разыскивать в виде отображения

$$r = r(\rho), \phi = \theta + \psi_0 \zeta, z = b\theta + \lambda_0 \zeta. \quad (1)$$

Здесь b, λ_0, ψ_0 – постоянные; ρ, θ, ζ – цилиндрические координаты точек упругого цилиндра в отсчетной (ненапряжённой) конфигурации; r, ϕ, z – цилиндрические координаты в промежуточной деформированной конфигурации внутреннего цилиндра; величина $\lambda_0 - 1$ есть относительное осевое удлинение; $2\pi|b|$ – длина вектора Бюргерса винтовой дислокации.

Градиент деформации, соответствующий отображению (1), вычисляется по формуле

$$\mathbf{P} = \frac{dr}{d\rho} \mathbf{e}_\rho \otimes \mathbf{e}_r + \frac{r}{\rho} \mathbf{e}_\theta \otimes \mathbf{e}_\phi + \frac{b}{\rho} \mathbf{e}_\theta \otimes \mathbf{i}_3 + \psi_0 r \mathbf{i}_3 \otimes \mathbf{e}_\phi + \lambda_0 \mathbf{i}_3 \otimes \mathbf{i}_3, \quad (2)$$

$$\mathbf{e}_\rho = \mathbf{i}_1 \cos \theta + \mathbf{i}_2 \sin \theta, \mathbf{e}_\theta = -\mathbf{i}_1 \sin \theta + \mathbf{i}_2 \cos \theta,$$

$$\mathbf{e}_r = \mathbf{i}_1 \cos \phi + \mathbf{i}_2 \sin \phi, \mathbf{e}_\phi = -\mathbf{i}_1 \sin \phi + \mathbf{i}_2 \cos \phi.$$

В (2) $\mathbf{i}_1, \mathbf{i}_2, \mathbf{i}_3$ – постоянные орты декартовых координат $x_1 = r \cos \phi, x_2 = r \sin \phi, x_3 = z$.

Считая упругий материал несжимаемым, из условия несжимаемости $\det \mathbf{P} = 1$ получим дифференциальное уравнение для функции $r(\rho)$:

$$r \frac{dr}{d\rho} = \frac{\rho}{\lambda_0 - b\psi_0}, \quad (3)$$

Решение уравнения (3), удовлетворяющее граничному условию $r(0) = 0$, имеет вид

$$r = \frac{\rho}{\sqrt{\lambda_0 - b\psi_0}}. \quad (4)$$

В дальнейшем предполагается выполненным неравенство $\lambda_0 > b\psi_0$.

Если задачу о винтовой дислокации исследовать на основе линейной теории упругости, то погонная энергия цилиндра с сосредоточенной дислокацией оказывается бесконечной [10, 11]. Этот парадокс сохраняется и в нелинейной теории упругости для некоторых материалов, например для широко распространённых моделей Трелоара и Муни – Ривлина [8]. Кроме того, для указанных моделей материалов продольная сила, обусловленная наличием дислокации, также оказывается бесконечной [8]. Вместе с тем в нелинейной теории упругости существует класс материалов, для которых винтовая дислокация в цилиндре обладает конечной погонной энергией и создаёт продольную силу конечной величины [8]. К этому классу относится модель несжимаемого материала Бартенева – Хазановича [12], задаваемая следующим определяющим соотношением:

$$\mathbf{T} = 2\mu\mathbf{V} - p_0\mathbf{E}. \quad (5)$$

Здесь \mathbf{T} – тензор напряжений Коши; μ – модуль сдвига; \mathbf{E} – единичный тензор; p_0 – давление в несжимаемом теле, не выражаемое через деформацию; \mathbf{V} – тензор растяжения, являющийся положительно определённым квадратным корнем из меры деформации Фингера; \mathbf{F} – градиент деформации, отсчитываемый от натурального, ненапряжённого состояния упругого тела.

По указанным выше причинам при решении поставленной задачи о деформации составного цилиндра будем использовать модель материала Бартенева – Хазановича.

Деформация составного цилиндра

За отсчётную конфигурацию составного цилиндра примем такую, в которой точки тела имеют цилиндрические координаты r, ϕ, z . Эта конфигурация является естественной для внешней цилиндрической оболочки и предварительно напряжённой для центрального включения. Цилиндрические координаты точек составного цилиндра в финальной деформированной конфигурации обозначим R, Φ, Z . Решение задачи о совместном кручении и растяжении составного цилиндра ищем в виде

$$R = R(r), \Phi = \phi + \psi z, Z = \lambda z, \quad (6)$$

где ψ и λ – угол закручивания и кратность осевого удлинения в составном цилиндре. Условие несжимаемости позволяет определить функцию

$$R(r) = \lambda^{-\frac{1}{2}} r. \quad (7)$$

С учётом (7) градиент деформации, соответствующий отображению (6), записывается в виде

$$\mathbf{F} = \lambda^{-\frac{1}{2}} (\mathbf{e}_r \otimes \mathbf{e}_R + \mathbf{e}_\phi \otimes \mathbf{e}_\Phi) + \psi R \mathbf{i}_3 \otimes \mathbf{e}_\phi + \lambda \mathbf{i}_3 \otimes \mathbf{i}_3, \quad (8)$$

$$\mathbf{e}_R = \mathbf{i}_1 \cos \Phi + \mathbf{i}_2 \sin \Phi, \mathbf{e}_\Phi = -\mathbf{i}_1 \sin \Phi + \mathbf{i}_2 \cos \Phi.$$

Выражение (8), подставленное в (5), даёт представление тензора напряжений Коши во внешнем цилиндре. Для того чтобы найти напряжения Коши во внутреннем цилиндре с дислокацией, в (5) следует заменить \mathbf{F} на $\mathbf{P} \cdot \mathbf{F}$, где тензорные множители \mathbf{P} и \mathbf{F} выражаются соотношениями (2) и (8). Имеем

$$\begin{aligned} \mathbf{P} \cdot \mathbf{F} = & \frac{1}{\sqrt{\lambda(\lambda_0 - b\psi_0)}} \mathbf{e}_\rho \otimes \mathbf{e}_R + \left(\frac{1}{\sqrt{\lambda(\lambda_0 - b\psi_0)}} + \frac{b\psi R}{\rho} \right) \mathbf{e}_\theta \otimes \mathbf{e}_\Phi + \\ & + \frac{b\lambda}{\rho} \mathbf{e}_\theta \otimes \mathbf{i}_3 + \left(\frac{\psi_0 r}{\sqrt{\lambda}} + \lambda_0 \psi R \right) \mathbf{i}_3 \otimes \mathbf{e}_\phi + \lambda_0 \lambda \mathbf{i}_3 \otimes \mathbf{i}_3. \end{aligned} \quad (9)$$

При решении уравнений равновесия, описывающих деформацию составного цилиндра, за независимую переменную удобно принять эйлерову радиальную координату R . Для этого координаты ρ и r при помощи формул (4) и (7) следует выразить через R . Результат имеет вид

$$\rho = \sqrt{\lambda(\lambda_0 - b\psi_0)}R, r = \lambda^{\frac{1}{2}}R. \quad (10)$$

Особенностью модели материала Бартенева – Хазановича является запись определяющего соотношения через тензор растяжения \mathbf{V} , который вычисляется путём извлечения квадратного корня из тензора. Хотя эта операция в общем случае нетривиальна, для её осуществления известны явные формулы [13]. Используя их, находим с учётом (9), (10) выражение тензора \mathbf{V} , отсчитываемого от натуральной конфигурации внутреннего цилиндра:

$$\mathbf{V} = (\mathbf{F}^T \cdot \mathbf{P}^T \cdot \mathbf{P} \cdot \mathbf{F})^{\frac{1}{2}} = V_{RR}\mathbf{e}_R \otimes \mathbf{e}_R + V_{\Phi\Phi}\mathbf{e}_\Phi \otimes \mathbf{e}_\Phi + V_{\Phi Z}(\mathbf{e}_\Phi \otimes \mathbf{i}_3 + \mathbf{i}_3 \otimes \mathbf{e}_\Phi) + V_{ZZ}\mathbf{i}_3 \otimes \mathbf{i}_3, \quad (11)$$

$$V_{RR} = \frac{1}{\sqrt{\lambda(\lambda_0 - b\psi_0)}}, V_{\Phi\Phi} = \frac{pB_{11} - qB_{21}}{\sqrt{\lambda(\lambda_0 - b\psi_0)}}, V_{\Phi Z} = \frac{B_{11}B_{12} + B_{22}B_{21}}{\sqrt{p^2 + q^2}}, V_{ZZ} = \frac{pB_{22} + qB_{12}}{\sqrt{p^2 + q^2}}, \quad (12)$$

$$B_{11} = \frac{1 + b\psi}{\sqrt{\lambda(\lambda_0 - b\psi_0)}}, B_{12} = \frac{b\sqrt{\lambda}}{\sqrt{\lambda_0 - b\psi_0}}, B_{21} = (\psi_0 + \lambda_0\psi)R, B_{22} = \lambda_0\lambda, p = B_{11} + B_{22}, q = B_{12} - B_{21}. \quad (13)$$

Выражения для компонент тензора $\mathbf{V} = (\mathbf{F}^T \cdot \mathbf{F})^{\frac{1}{2}}$, отсчитываемого от ненапряжённого состояния внешнего цилиндра, более просты:

$$V_{RR} = \frac{1}{\sqrt{\lambda}}, V_{\Phi\Phi} = \frac{(\lambda^{-\frac{1}{2}} + \lambda)\lambda^{-\frac{1}{2}} + \psi^2 R^2}{\sqrt{(\lambda^{-\frac{1}{2}} + \lambda)^2 + \psi^2 R^2}}, V_{\Phi Z} = \frac{\lambda\psi R}{\sqrt{(\lambda^{-\frac{1}{2}} + \lambda)^2 + \psi^2 R^2}}, V_{ZZ} = \frac{(\lambda^{-\frac{1}{2}} + \lambda)\lambda}{\sqrt{(\lambda^{-\frac{1}{2}} + \lambda)^2 + \psi^2 R^2}}. \quad (14)$$

Обозначим через R_0 радиус составного цилиндра в конечном деформированном состоянии, а через R_1 – радиус границы раздела внутреннего и внешнего цилиндров. Таким образом, центральное включение, содержащее винтовую дислокацию, занимает в деформированной конфигурации область $0 \leq R \leq R_1$, а внешний полый цилиндр – область $R_1 \leq R \leq R_0$. Очевидно, справедливы формулы $R_1 = \lambda^{-\frac{1}{2}}r_1$, $R_0 = \lambda^{-\frac{1}{2}}r_0$, где r_1 и r_0 – внутренний и внешний радиусы внешнего цилиндра.

Решение уравнений равновесия

Согласно (5), (11), тензор напряжений Коши для материала Бартенева – Хазановича как во внутреннем, так и во внешнем цилиндрах имеет такое представление в базисе цилиндрических координат:

$$\mathbf{T} = \sigma_R(R)\mathbf{e}_R \otimes \mathbf{e}_R + \sigma_\Phi(R)\mathbf{e}_\Phi \otimes \mathbf{e}_\Phi + \tau_{Z\Phi}(R)(\mathbf{e}_\Phi \otimes \mathbf{i}_3 + \mathbf{i}_3 \otimes \mathbf{e}_\Phi) + \sigma_Z(R)\mathbf{i}_3 \otimes \mathbf{i}_3. \quad (15)$$

Уравнения равновесия при отсутствии массовых сил ($\text{div}\mathbf{T} = 0$) в силу (15) приводятся к одному скалярному уравнению

$$\frac{d\sigma_R}{dR} + \frac{\sigma_R - \sigma_\Phi}{R} = 0. \quad (16)$$

Исключая давление p_0 из (5), получим в области $0 \leq R < R_1$ соотношения

$$\sigma_R - \sigma_\Phi = 2\mu(V_{RR} - V_{\Phi\Phi}), \quad (17)$$

$$\sigma_Z - \sigma_R = 2\mu(V_{ZZ} - V_{RR}), \quad (18)$$

$$\tau_{\Phi Z} = 2\mu V_{\Phi Z}, \quad (19)$$

где компоненты тензора растяжения выражаются формулами (12), (13) и известны как функции переменной R . Уравнение (16) с учётом (17) интегрируется в квадратурах относительно функции $\sigma_R(R)$. После определения $\sigma_R(R)$ напряжение σ_Z находится по формуле (18).

В области $R_1 < R \leq R_0$, занимаемой внешним цилиндром, на основании (5), (14) имеем

$$\sigma_R - \sigma_\Phi = 2\mu_1 \left(\lambda^{-\frac{1}{2}} - \frac{(\lambda^{-\frac{1}{2}} + \lambda)\lambda^{-\frac{1}{2}} + \psi^2 R^2}{\sqrt{(\lambda^{-\frac{1}{2}} + \lambda)^2 + \psi^2 R^2}} \right), \quad (20)$$

$$\sigma_Z - \sigma_R = 2\mu_1 \left(\frac{\left(\lambda^{-\frac{1}{2}} + \lambda\right)\lambda}{\sqrt{\left(\lambda^{-\frac{1}{2}} + \lambda\right)^2 + \psi^2 R^2}} - \lambda^{-\frac{1}{2}} \right), \quad (21)$$

$$\tau_{\phi Z} = 2\mu_1 \frac{\lambda\psi R}{\sqrt{\left(\lambda^{-\frac{1}{2}} + \lambda\right)^2 + \psi^2 R^2}}. \quad (22)$$

Здесь через μ_1 обозначен модуль сдвига материала внешнего цилиндра. Формулы (20)–(22) служат для решения уравнения (16) относительно σ_R в области $R_1 < R \leq R_0$ и определения всех напряжений в этой области. Касательное напряжение $\tau_{\phi Z}$ имеет явное представление (19), (12), (13) в области $0 \leq R < R_1$ и (22) – в области $R_1 < R \leq R_0$ и может быть построено как функция радиальной координаты $0 \leq r \leq r_0$ согласно соотношению (7) для функции $R(r)$ (рис. 1).

Граничные условия, которыми необходимо дополнить уравнение (16), имеют вид

$$\sigma_R(R_1 - 0) = \sigma_R(R_1 + 0), \sigma_R(R_0) = 0. \quad (23)$$

Поскольку, согласно (17), (20), разность $(\sigma_R - \sigma_\phi)$ – известная функция в области $0 \leq R \leq R_0$, напряжение σ_R находится в квадратурах из уравнения (16) с учётом граничного условия (23) в виде
$$\sigma_R = 2\mu \int_R^{R_0} \frac{V_{RR}(R') - V_{\phi\phi}(R')}{R'} dR'.$$

После этого при помощи (17)–(22) определяются все остальные напряжения.

Для численного исследования влияния сосредоточенной винтовой дислокации на деформации кручения и растяжения-сжатия составного цилиндра модули сдвига материалов внутреннего цилиндрического включения и внешнего полого цилиндра возьмем равными $\mu = \mu_1 = 1$.

Крутящий момент G и продольная сила Q , действующие на торцах цилиндра, вычисляются по формулам

$$G = 2\pi \int_0^{R_1} \tau_{\phi Z} R^2 dR + 2\pi \int_{R_1}^{R_0} \tau_{\phi Z} R^2 dR, \quad Q = 2\pi \int_0^{R_1} \sigma_Z R dR + 2\pi \int_{R_1}^{R_0} \sigma_Z R dR. \quad (24)$$

Величины G и Q являются функциями переменных ψ , λ и параметрически зависят от ψ_0 , λ_0 , b .

На рис. 2 приведены диаграммы кручения и продольной деформации составного цилиндра для различных значений длины вектора Бюргерса. Влияние сосредоточенной дислокации на полученные зависимости крутящего момента от угла закручивания $G(\psi)$ при $\lambda = 1$ и продольной силы от кратности осевого удлинения $Q(\lambda)$ при $\psi = 0$ рассмотрено в случае значений параметров $\psi_0 = 0$, $\lambda_0 = 1$.

Согласно диаграмме крутящего момента (рис. 2а), при одном и том же значении угла закручивания с увеличением длины вектора Бюргерса сосредоточенной дислокации (абсолютного значения b) крутящий момент возрастает (по абсолютному значению). Продольная сила (рис. 2б) не зависит от знака длины вектора Бюргерса дислокации. Согласно диаграмме $Q(\lambda)$, для задания одного и того же значения кратности осевого удлинения требуется приложение большей силы при образовании во внутреннем цилиндре сосредоточенной дислокации. Для рассмотренного случая винтовая дислокация в предварительно напряжённом цилиндрическом включении увеличивает сопротивление составного цилиндра кручению и продольному деформированию.

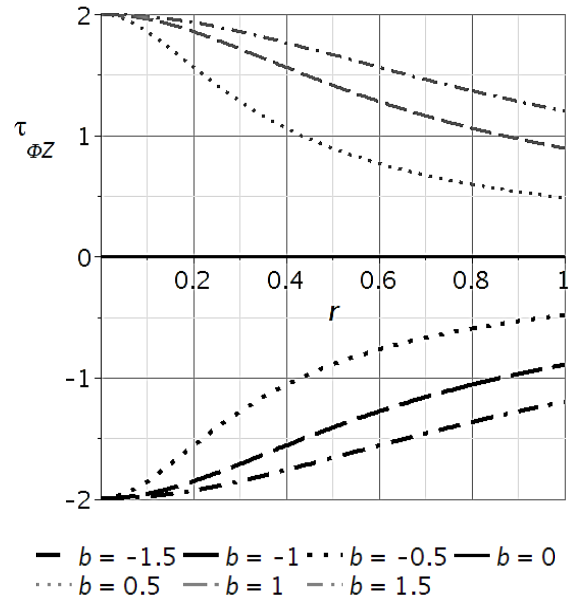


Рис. 1. Распределение касательного напряжения $\tau_{\phi Z}(r)$ для различных значений длины вектора Бюргерса и при фиксированных значениях параметров $\psi = 0$, $\lambda = 1$ и $\psi_0 = 0$, $\lambda_0 = 1$ / Fig. 1. Tangential stress diagram for different values of the length of the Burgers vector and for fixed values $\psi = 0$, $\lambda = 1$ and $\psi_0 = 0$, $\lambda_0 = 1$

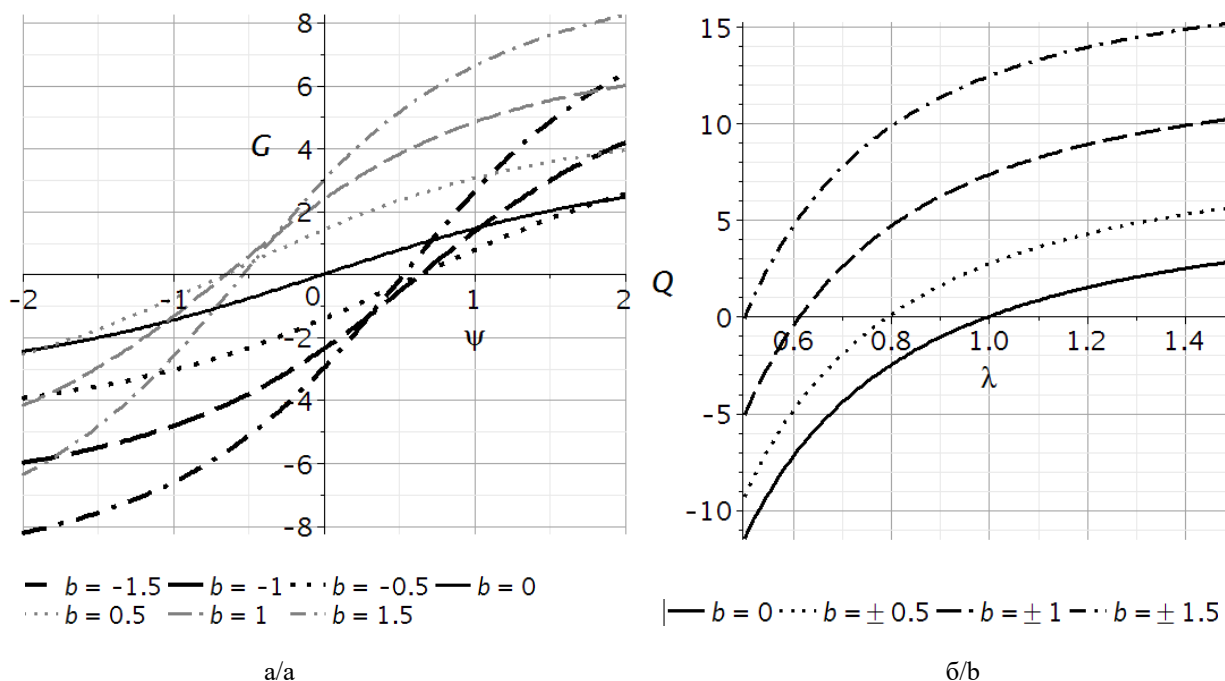


Рис. 2. Диаграммы кручения и продольной деформации составного цилиндра при различных значениях длины вектора Бюргерса и фиксированных значениях параметров $\psi_0 = 0$, $\lambda_0 = 1$: а – зависимость крутящего момента от угла закручивания $G(\psi)$ при кратности осевого удлинения $\lambda = 1$; б – зависимость продольной силы от кратности осевого удлинения $Q(\lambda)$ при угле закручивания $\psi = 0$ / Fig. 2. Diagrams of torsion and longitudinal deformation of a composite cylinder at different values of the length of the Burgers vector and fixed values of parameters $\psi_0 = 0$, $\lambda_0 = 1$: a – the dependence of torque on the torsion angle $G(\psi)$ with a multiplicity of axial elongation $\lambda = 1$; b – the dependence of the longitudinal force on the multiplicity of axial elongation $Q(\lambda)$ at the torsion angle $\psi = 0$

Заключение

В данной работе найдено точное решение новой задачи нелинейной теории упругости о больших деформациях растяжения-сжатия и кручения составного упругого цилиндра. Внутреннее цилиндрическое включение содержит предварительные напряжения, обусловленные наличием сосредоточенной прямолинейной винтовой дислокации. Материал цилиндра считается изотропным и несжимаемым. При помощи полуобратного метода поле напряжений в теле определяется в квадратурах. Получены формулы для крутящего момента и продольной силы, выражающие эти величины как функции осевого удлинения и угла закручивания.

Список источников

1. Levin V.A., Zubov L.M., Zingerman K.M. The torsion of a composite, nonlinear-elastic cylinder with an inclusion having initial large strains // Int. J. of Solids and Structures. 2014. Vol. 51, iss. 6. P. 1403–1409.
2. Levin V. A., Zubov L. M., Zingerman K. M. An exact solution for the problem of flexure of a composite beam with preliminarily strained layers under large strains // Int. J. of Solids and Structures. 2015. Vol. 67–68. P. 244–249.
3. Levin V.A., Zubov L.M., Zingerman K.M. An exact solution for the problem of flexure of a composite beam with preliminarily strained layers under large strains. Part 2. Solution for different types of incompressible materials // Int. J. of Solids and Structures. 2016. Vol. 100–101. P. 558–565.
4. Levin V.A., Zubov L.M., Zingerman K.M. Multiple joined prestressed orthotropic layers under large strains // Int. J. of Engineering Science. 2018. Vol. 133. P. 47–59.
5. Zubov L.M. Universal solution of nonlinear elasticity for a hollow cylinder with prestressed coatings // Acta Mechanica. 2019. Vol. 230. P. 4137–4143.
6. Levin V.A., Zubov L.M., Zingerman K.M. An exact solution to the problem of biaxial loading of a micropolar elastic plate made by joining two prestrained arc-shaped layers under large strains // European J. of Mechanics. A Solids. 2021. Vol. 88. P. 104237.

7. Zubov L.M., Karyakin M.I. Nonlinear deformations of a cylindrical pipe with pre-stressed thin coatings // *Mathematics and Mechanics of Solids*. 2022. Vol. 27, № 9. P. 1703–1720.
8. Zubov L.M. *Nonlinear Theory of Dislocations and Disclinations in Elastic Bodies*. Berlin: Springer, 1997. 208 p.
9. Галаско А.А., Зубов Л.М. Нелинейная теория кручения упругих цилиндров с винтовой дислокацией // *Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки*. 2015. № 4. С. 35–43.
10. Хирт Дж.П., Лоте И. Теория дислокаций. М.: Мир, 1972. 599 с.
11. Теодосиу К. Упругие модели дефектов в кристаллах. М.: Мир, 1985. 352 с.
12. Лурье А.И. Нелинейная теория упругости. М.: Наука, 1980. 512 с.
13. Зубов Л.М., Рудев А.Н. Явное выражение для элементов полярного разложения тензора второго ранга // *Докл. РАН*. 1996. Т. 351, № 2. С. 188–191.

References

1. Levin V.A., Zubov L.M., Zingerman K.M. The torsion of a composite, nonlinear-elastic cylinder with an inclusion having initial large strains. *Int. J. of Solids and Structures*. 2014;51(6):1403-1409.
2. Levin V. A., Zubov L. M., Zingerman K. M. An exact solution for the problem of flexure of a composite beam with preliminarily strained layers under large strains. *Int. J. of Solids and Structures*. 2015;67-68:244-249.
3. Levin V.A., Zubov L.M., Zingerman K.M. An exact solution for the problem of flexure of a composite beam with preliminarily strained layers under large strains. Part 2. Solution for different types of incompressible materials. *Int. J. of Solids and Structures*. 2016;100-101:558-565.
4. Levin V.A., Zubov L.M., Zingerman K.M. Multiple joined prestressed orthotropic layers under large strains. *Int. J. of Engineering Science*. 2018;133:47-59.
5. Zubov L.M. Universal solution of nonlinear elasticity for a hollow cylinder with prestressed coatings. *Acta Mechanica*. 2019;230:4137-4143.
6. Levin V.A., Zubov L.M., Zingerman K.M. An exact solution to the problem of biaxial loading of a micropolar elastic plate made by joining two prestrained arc-shaped layers under large strains. *European J. of Mechanics. A Solids*. 2021;88:104237.
7. Zubov L.M., Karyakin M.I. Nonlinear deformations of a cylindrical pipe with prestressed thin coatings. *Mathematics and Mechanics of Solids*. 2022; 27(9):1703-1720.
8. Zubov L.M. *Nonlinear Theory of Dislocations and Disclinations in Elastic Bodies*. Berlin: Springer; 1997. 208 p.
9. Galasko A.A., Zubov L.M. Nonlinear theory of torsion of elastic cylinder with a screw dislocation. *Izv. vuzov. Sev.-Kavk. region. Estestv. nauki = Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science*. 2015;(4):35-43. (In Russ.).
10. Hirth J.P., Lothe J. *Theory of dislocations*. Moscow: Mir Publ.; 1972. 599 p. (In Russ.).
11. Teodosiu C. *Elastic models of crystal defects*. Moscow: Mir Publ.; 1985. 352 p. (In Russ.).
12. Lur'e A.I. *Nonlinear theory of elasticity*. Moscow: Nauka Publ.; 1980. 512 p. (In Russ.).
13. Zubov L.M., Rudev A.N. An explicit expression for elements of the polar representation of a second-rank tensor. *Doklady Akademii nauk*. 1996;41(11):544-547.

Информация об авторах

Л.М. Зубов – доктор физико-математических наук, профессор, кафедра теории упругости, Институт математики, механики и компьютерных наук им. И.И. Воровича.

С.А. Гайбарян – преподаватель, научно-образовательный центр «Перспективные решения в образовании».

Information about the authors

L.M. Zubov - Doctor of Science (Physics and Mathematics), Professor, Department of the Elasticity Theory, Vorovich Institute of Mathematics, Mechanics and Computer Science.

S.A. Gaybaryan - Lecturer, Scientific and educational center "Promising solutions in education".

Статья поступила в редакцию 04.02.2024; одобрена после рецензирования 20.02.2024; принята к публикации 24.05.2024.
The article was submitted 04.02.2024; approved after reviewing 20.02.2024; accepted for publication 24.05.2024.

Научная статья

УДК 534.2

doi: 10.18522/1026-2237-2024-2-40-49

ЯВНЫЕ РЕШЕНИЯ В ПРОБЛЕМЕ ЗВУКОИЗОЛЯЦИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МНОГОСЛОЙНЫХ СТРУКТУР ПРИ НОРМАЛЬНОМ ПРОХОЖДЕНИИ ВОЛН

Межлум Альбертович Сумбатян^{1✉}, Мария Вадимовна Черникова²

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

¹masumbatyan@sfedu.ru✉

²machernikova@sfedu.ru

Аннотация. Рассматривается задача о звукоизоляции на сверхнизких частотах (30–200 Гц) с помощью многослойных конструкций при одномерном нормальном прохождении плоской волны и произвольном числе слоев. Предполагается, что многослойная конструкция состоит из параллельных друг другу акустических слоев, соединенных между собой по вертикальным граничным линиям. Слева и справа от неё расположены акустические полупространства (воздух). Для исследования поставленной задачи определены акустические параметры, описаны волновые уравнения гармонического процесса для её левых и правых полупространств. При помощи уравнения Гельмгольца и систем линейных алгебраических уравнений для заданных граничных условий получены явные аналитические решения для нахождения коэффициента прохождения (коэффициента прозрачности) при произвольном количестве слоев. Рассмотрены примеры решения задач звукопоглощения на низких частотах для строительных конструкций с разным количеством слоев чередующихся между собой строительных материалов и воздушных пространств. Для звукопоглощения на низких частотах при помощи оценки уровня шумоподавления подтверждена эффективность применения смешанных конструкций, в которых воздушные слои расположены между слоями с высоким импедансом.

Ключевые слова: звукоизоляция, многослойные конструкции, системы линейных алгебраических уравнений, нормальное прохождение плоской волны, низкие частоты, акустический импеданс, коэффициент прохождения

Для цитирования: Сумбатян М.А., Черникова М.В. Явные решения в проблеме звукоизоляции с использованием многослойных структур при нормальном прохождении волн // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2024. № 2. С. 40–49.

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

Original article

EXPLICIT SOLUTIONS IN THE PROBLEM OF SOUND ISOLATION BY USING MULTILAYERED STRUCTURES WITH THE NORMAL WAVE PROPAGATION

Mezhlum A. Sumbatyan^{1✉}, Mariya V. Chernikova²

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

¹masumbatyan@sfedu.ru✉

²machernikova@sfedu.ru

Abstract. The problem of sound isolation at ultra-low frequencies (30–200 Hz) by using multilayered structures is considered, taking into account the normal wave propagation and an arbitrary number of layers. It is assumed that the multilayered structure consists of parallel acoustic layers, connected to each other along vertical boundary lines; acoustic half-spaces (air) are located to the left and right of the structure. For the problem, we define the acoustic parameters of the structure. The wave equations of the harmonic process are described for the left and right half-spaces of the structure, using the Helmholtz equation and a system of

© Сумбатян М.А., Черникова М.В., 2024

linear algebraic equations with given boundary conditions. Besides, explicit analytical solutions are obtained to find the transmission coefficient (transparency coefficient), with an arbitrary number of layers. Examples of solution for low-frequency sound absorption for building structures with different numbers of layers of alternating building materials and air spaces are considered. The effectiveness of using mixed structures, in which air layers are sandwiched between high impedance layers, for low-frequency sound absorption has been confirmed by assessing the level of noise reduction.

Keywords: *sound isolation, multilayered structures, systems of linear algebraic equations, the normal wave propagation, low frequencies, acoustic impedance, transmission coefficient*

For citation: Sumbatyan M.A., Chernikova M.V. Explicit Solutions in the Problem of Sound Isolation by Using Multilayered Structures with the Normal Wave Propagation. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2024;(2):40-49. (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

Задача звукоизоляции с помощью многослойных конструкций является классической [1–4]. Если многослойная среда представляет набор параллельных друг другу слоев, идеально соединенных между собой по параллельным границам, то в данной постановке задача интенсивно исследовалась для произвольного угла падения различными методами [3–5]. В серии монографий одних и тех же авторов [5] рассматриваются как минимум шесть различных методов решения этой задачи, что косвенно говорит о том, что одного надежного метода решения для произвольного числа слоев, который явно выделялся бы на фоне других своей более высокой эффективностью, так и не было найдено. Этот факт кажется странным, так как данная волновая задача в своей постановке достаточно проста и совершенно простой является ее математическая формулировка, а также система определяющих уравнений и граничных условий.

В исходной постановке задача может быть сведена к системе линейных алгебраических уравнений (СЛАУ), размерность которой на единицу больше числа слоев [3–5]. Решение такой СЛАУ не представляет серьезных трудностей для современных компьютеров. Качественные волновые свойства подобной многослойной конструкции обычно получаются аналитически, так как при большом числе слоев количество физических параметров столь велико, что численный анализ не позволяет определить такую комбинацию параметров, при которой получаются оптимальные акустические характеристики. В то же время аналитические решения построены только для малого числа слоев – для одного, двух или трех; при этом сложность явных аналитических представлений возрастает в геометрической прогрессии при дальнейшем росте числа слоев. В связи с этим одной из целей данной работы является построение явных аналитических решений для коэффициента прохождения (коэффициент прозрачности [3]) волны через среду с произвольным числом акустических слоев. При этом мы ограничиваемся случаем прохождения плоской волны с направлением распространения, ортогональным к границам слоев.

Заметим, что волновые свойства рассматриваемой многослойной конструкции на средних и высоких частотах определяются интерференцией системы волн при их многочисленных отражениях и преломлениях на границах раздела соседних сред с учетом их фаз [3]. Так, большой интерес представляет толщина слоев, сопоставимая с четвертью длины волны (с половиной длины волны и т.д.). Настоящая работа нацелена на оценку возможности звукоизоляции на сверхнизких частотах. Данный режим слабо изучен в литературе и практически не связан с фазовой интерференцией преломляющихся и отражающихся волн.

С инженерно-физической точки зрения звукоизоляция на сверхнизких частотах (басах) (ниже 200 Гц) актуальна при строительстве сооружений в окрестности аэродромов, звукоизоляции музыкальных студий, развлекательных учреждений, располагающихся в жилых и общественных зданиях, а также в ряде других ситуаций. Так, например, уровень звука порядка 120 дБ достаточно типичен для ударного музыкального инструмента [6]. При этом частота его звучания опускается гораздо ниже 50 Гц. Способы шумоподавления в этом случае практически не описываются в строительных нормах и правилах. Громкость на рок-концерте может достигать 140 дБ, а шум реактивного двигателя современного самолета при взлете может доходить до

160 дБ [7]. Таким образом, актуальной является постановка задачи о звукоизоляции со снижением уровня шума на низких частотах на 100–110 дБ. Эта задача считается практически неподъемной при использовании стандартных методов. Так, современные материалы позволяют достичь уровня звукоизоляции (индекс звукоизоляции R_w) с усреднением по частотному диапазону 100–3150 Гц порядка 50–60 дБ [8]. Поскольку эффективность звукоизоляции монотонно возрастает с ростом частоты, то на сверхнизких частотах снижение на 20–30 дБ считается большим успехом. Такая звукоизоляция на базах совершенно недостаточна.

В данной работе показывается, что в некоторых случаях можно достичь звукоизоляции, решающей сформулированную выше задачу. При этом качественные выводы основаны на явных аналитических выражениях.

Постановка задачи и сведение ее к СЛАУ

На рис. 1 изображена конструкция, состоящая из параллельных друг другу вертикальных акустических слоев, соединенных между собой по вертикальным граничным линиям. Всего различных слоев $N = M - 1$ при $m = 1, \dots, N$. Слева от этой конструкции расположено акустическое полупространство (его номер $m = 0$), из которого на данную многослойную конструкцию ортогонально к ее границе падает плоская акустическая волна с круговой частотой ω .

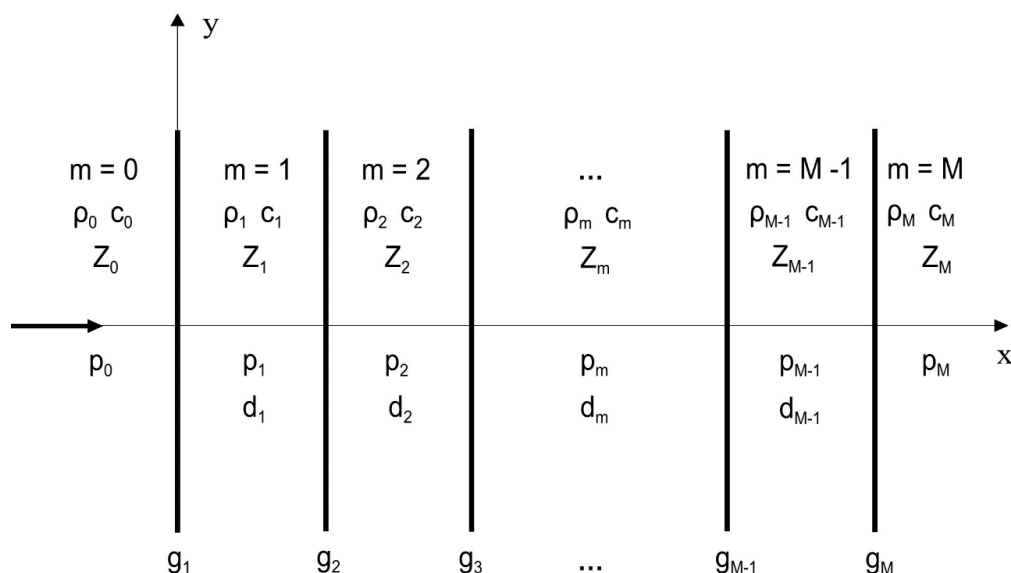


Рис. 1. Прохождение плоской акустической волны через многослойную среду
 / Fig. 1. Propagation of the plane acoustic wave through a multilayered medium

Будем считать волновой процесс гармоническим во времени, с множителем $e^{-i\omega t}$, который во всех дальнейших формулах опущен. Справа от многослойной конструкции расположено другое акустическое полупространство ($m=M$), в которое проходит падающая слева волна после многократных преломлений на границах соседних слоев [3].

В принятой здесь системе обозначений общее число геометрических областей, содержащих однородные акустические материалы, равно $N + 2 = M + 1$ (с номерами $m = 0, \dots, M$).

Для практических целей звукоизоляции полагаем, что физический материал в левом ($m=0$) и правом ($m=M$) полупространствах одинаков (воздух). Основным интерес представляет амплитуда волны, прошедшей в правое полупространство. Параметры задачи: массовые плотности всех сред $\rho_m, m=0, \dots, M$; скорости распространения звука в этих средах $c_m, m=0, \dots, M$; толщина каждого слоя $d_m, m=1, \dots, N$. Через массовую плотность и скорость определяются акустические импедансы всех сред: $Z_m = \rho_m c_m, m=0, \dots, M$. Через скорость звука определим волновые числа: $k_m = \omega / c_m, m=0, \dots, M$. При этом $\rho_M = \rho_0, c_M = c_0, Z_M = Z_0, k_M = k_0$.

Волновое уравнение в любой из областей для гармонического по времени процесса является уравнением Гельмгольца [3], которое в данной одномерной задаче сводится к обыкновенному дифференциальному уравнению для акустического давления:

$$\Delta p + k^2 p = 0, \rightarrow p''(x) + k^2 p(x) = 0, \quad k = \frac{\omega}{c}.$$

В левом полупространстве волновое поле состоит из падающей и отраженной волн: $p_0(x) = \exp(ik_0x) + R \exp(-ik_0x)$, $x \leq 0$, а в правом – только из волны, прошедшей через все слои: $p_M(x) = T \exp[ik_0(x-H)]$, $x \geq H$, где $H = \sum_{m=1}^N d_m$ – полная толщина всей изолирующей конструкции. Амплитуда давления в падающей волне принимается равной единице, а коэффициенты отражения R и прохождения T – некоторые неизвестные постоянные.

Пусть левая и правая границы m -го слоя имеют координаты $x = x_{m-1}$ и $x = x_m$, $m = 1, \dots, N$. При этом $x_0 = 0$ и $x_N = x_{M-1} = H$. Тогда структура решения внутри m -го слоя может быть представлена в виде $p_m(x) = A_m \cos[k_m(x - x_{m-1})] + B_m \cos[k_m(x - x_m)]$, $x_{m-1} \leq x \leq x_m$, где A_m и B_m – неизвестные постоянные.

Неизвестные константы должны быть найдены из граничных условий, которые в рассматриваемой задаче означают непрерывность давления и нормальной (т.е. горизонтальной) компоненты скорости. Используя связь между вектором скорости и градиентом давления ($\mathbf{v} = [1/(i\rho\omega)] \text{grad } p$), последнее условие легко переводится в условие на производные от давлений на границах слоев [3]. В результате приходим к следующим соотношениям:

$$x = 0: p_0 = p_1, \quad \sim 1 + R = A_1 + B_1 \cos(k_1 d_1),$$

$$x = 0: \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p_0}{\partial x} = \frac{1}{\rho_1} \frac{\partial p_1}{\partial x} = g_1, \quad \sim \frac{i(1-R)}{Z_0} = \frac{B_1}{Z_1} \sin(k_1 d_1) = g_1, \quad (1)$$

$$x = x_{m-1}: p_{m-1} = p_m, \quad \sim A_{m-1} \cos(k_{m-1} d_{m-1}) + B_{m-1} = A_m + B_m \cos(k_m d_m), \quad m = 2, \dots, M-1,$$

$$x = x_{m-1}: \frac{1}{\rho_{m-1}} \frac{\partial p_{m-1}}{\partial x} = \frac{1}{\rho_m} \frac{\partial p_m}{\partial x} = g_m, \quad \sim$$

$$\sim -\frac{A_{m-1}}{Z_{m-1}} \sin(k_{m-1} d_{m-1}) = \frac{B_m}{Z_m} \sin(k_m d_m) = g_m, \quad m = 2, \dots, M-1,$$

$$x = x_{M-1}: p_{M-1} = p_M, \quad \sim T = A_{M-1} \cos(k_{M-1} d_{M-1}) + B_{M-1},$$

$$x = x_{M-1}: \frac{1}{\rho_{M-1}} \frac{\partial p_{M-1}}{\partial x} = \frac{1}{\rho_M} \frac{\partial p_M}{\partial x} = g_M, \quad \sim -\frac{A_{M-1}}{Z_{M-1}} \sin(k_{M-1} d_{M-1}) = \frac{iT}{Z_M} = g_M, \quad (3)$$

где введены неизвестные величины g_m , $m=0, \dots, M$, определенные на границах слоев. При этом коэффициент отражения R и коэффициент прохождения T устанавливаются из соотношений (1) и (3) в виде

$$R = 1 + i Z_0 g_1, \quad T = -i Z_M g_M. \quad (4)$$

Выражая все неизвестные коэффициенты A_m, B_m , $m=1, \dots, M-1$, в соотношениях (1)–(3) через коэффициенты g_m , $m=1, \dots, M$, и вводя вместо последних новые неизвестные величины $G_m = Z_m g_m$, $m=1, \dots, M$, приходим к СЛАУ трехдиагонального вида размерностью M для нахождения коэффициентов G_m , $m=1, \dots, M$:

$$\left(C_1 - i \frac{Z_0}{Z_1} \right) G_1 - \frac{Z_1}{Z_2} \frac{G_2}{S_1} = 2,$$

$$-\frac{G_{m-1}}{S_{m-1}} + \left(\frac{Z_{m-1}}{Z_m} C_{m-1} + C_m \right) G_m - \frac{Z_m}{Z_{m+1}} \frac{G_{m+1}}{S_m} = 0, \quad m = 2, \dots, M-1,$$

$$-\frac{G_{M-1}}{S_{M-1}} + \left(\frac{Z_{M-1}}{Z_0} C_{M-1} - i \right) G_M = 0. \quad (5)$$

Поскольку $M = N + 1$, то размерность СЛАУ (5) на единицу больше числа слоев N в рассматриваемой многослойной изолирующей конструкции. Здесь обозначено $S_m = \sin(k_m d_m)$, $C_m = \text{ctg}(k_m d_m)$. При этом коэффициенты отражения R и прохождения T в (4) принимают вид

$$R = 1 + i \frac{Z_0}{Z_1} G_1, \quad T = -i G_M. \quad (6)$$

В задаче звукоизоляции основной интерес представляет коэффициент прохождения T . По формуле (6) он выражается через последний из неизвестных коэффициентов G_M , который, в свою очередь, находится из СЛАУ (5). Для современных компьютеров трёхдиагональная СЛАУ (5) не представляет трудностей практически при любой размерности системы, так как быстрый метод простой прогонки дает ее устойчивое решение [9]. В то же время при возрастании числа слоев количество физических и геометрических параметров задачи резко возрастает, что затрудняет оптимизационный анализ коэффициента прохождения при его минимизации. В связи с этим желательно получить явное выражение для этого коэффициента. Авторам неизвестны публикации, в которых такое решение было бы построено.

Явное выражение для коэффициента прохождения

По правилу Крамера [10] $G_M = \Delta_M / \Delta$, где Δ – главный определитель СЛАУ (5); Δ_M – определитель, который получается из главного, если в нем последний столбец заменить на вектор свободных членов. Поскольку у вектора свободных членов отличен от нуля лишь первый элемент, то имеем

$$\Delta_M = \frac{2}{\Pi_S}, \quad \Pi_S = \prod_{m=1}^N S_m. \quad (7)$$

В дальнейшем ограничимся случаем нечетного числа слоев N (четное M). Формулу для главного определителя Δ можно получить из частных случаев.

Для трех слоев ($N = 3, M = 4$) имеем

$$\begin{aligned} \frac{\Delta}{C_1 C_2 C_3} = & - \left(\frac{Z_0}{Z_1} + \frac{Z_1}{Z_0} \right) \frac{1}{C_1} - \left(\frac{Z_0}{Z_2} + \frac{Z_2}{Z_0} \right) \frac{1}{C_2} - \left(\frac{Z_0}{Z_3} + \frac{Z_3}{Z_0} \right) \frac{1}{C_3} + \left(\frac{Z_0 Z_2}{Z_1 Z_3} + \frac{Z_1 Z_3}{Z_0 Z_2} \right) \frac{1}{C_1 C_2 C_3} + \\ & + i \left(\frac{Z_1}{Z_3} + \frac{Z_3}{Z_1} \right) \frac{1}{C_1 C_3} + i \left(\frac{Z_1}{Z_2} + \frac{Z_2}{Z_1} \right) \frac{1}{C_1 C_2} + i \left(\frac{Z_2}{Z_3} + \frac{Z_3}{Z_2} \right) \frac{1}{C_2 C_3} - 2i, \end{aligned} \quad (8)$$

что может быть переписано в виде

$$\begin{aligned} \frac{\Delta}{\Pi_C} = & - \sum_{j=1}^3 \left(\frac{Z_0}{Z_j} + \frac{Z_j}{Z_0} \right) \frac{1}{C_j} + \left(\frac{Z_0 Z_2}{Z_1 Z_3} + \frac{Z_1 Z_3}{Z_0 Z_2} \right) \frac{1}{\Pi_C} + \\ & + i \sum_{j_1=1}^3 \sum_{j_2=j_1+1}^3 \left(\frac{Z_{j_1}}{Z_{j_2}} + \frac{Z_{j_2}}{Z_{j_1}} \right) \frac{1}{C_{j_1} C_{j_2}} - 2i, \quad \Pi_C = \prod_{m=1}^3 C_m. \end{aligned} \quad (9)$$

Для классического случая одного слоя ($N = 1, M = 2$) [3], где

$$\Delta = - \left(\frac{Z_0}{Z_1} + \frac{Z_1}{Z_0} \right) - 2i C_1, \quad (10)$$

(10) также можно переписать в виде (9). При этом последний член в первой строке формулы (9) выпадает, поскольку в случае одного слоя отсутствуют все импедансы, начиная с Z_2 . Кроме того,

Π_C принимает вид $\Pi_C = \prod_{m=1}^1 C_m = C_1$. В итоге по аналогии с (9) имеем для случая одного слоя

$$\frac{\Delta}{\Pi_C} = - \sum_{j=1}^1 \left(\frac{Z_0}{Z_j} + \frac{Z_j}{Z_0} \right) \frac{1}{C_j} + i \sum_{j_1=1}^1 \sum_{j_2=j_1+1}^1 \left(\frac{Z_{j_1}}{Z_{j_2}} + \frac{Z_{j_2}}{Z_{j_1}} \right) \frac{1}{C_{j_1} C_{j_2}} - 2i. \quad (11)$$

Поскольку во второй сумме в (11) в суммировании по j_2 верхний предел всегда меньше нижнего, то в ней нет ни одного члена, и вся сумма выпадает. В итоге выражение (11) приводится к виду

$$\frac{\Delta}{C_1} = -\sum_{j=1}^1 \left(\frac{Z_0}{Z_j} + \frac{Z_j}{Z_0} \right) \frac{1}{C_j} - 2i, \quad (12)$$

что эквивалентно выражению (10), хорошо известному в литературе.

Для пяти слоев (где $N = 5, M = 6$) имеет место представление, обобщающее формулу (9):

$$\begin{aligned} \frac{\Delta}{\Pi_C} = & -\sum_{j=1}^5 \left(\frac{Z_0}{Z_j} + \frac{Z_j}{Z_0} \right) \frac{1}{C_j} + \sum_{j_1=1}^5 \sum_{j_2=j_1+1}^5 \sum_{j_3=j_2+1}^5 \left(\frac{Z_0 Z_{j_2}}{Z_{j_1} Z_{j_3}} + \frac{Z_{j_1} Z_{j_3}}{Z_0 Z_{j_2}} \right) \frac{1}{C_{j_1} C_{j_2} C_{j_3}} - \\ & - \left(\frac{Z_0 Z_2 Z_4}{Z_1 Z_3 Z_5} + \frac{Z_1 Z_3 Z_5}{Z_0 Z_2 Z_4} \right) \frac{1}{\Pi_C} + i \sum_{j_1=1}^5 \sum_{j_2=j_1+1}^5 \left(\frac{Z_{j_1}}{Z_{j_2}} + \frac{Z_{j_2}}{Z_{j_1}} \right) \frac{1}{C_{j_1} C_{j_2}} - \\ & - i \sum_{j_1=1}^5 \sum_{j_2=j_1+1}^5 \sum_{j_3=j_2+1}^5 \sum_{j_4=j_3+1}^5 \left(\frac{Z_{j_1} Z_{j_3}}{Z_{j_2} Z_{j_4}} + \frac{Z_{j_2} Z_{j_4}}{Z_{j_1} Z_{j_3}} \right) \frac{1}{C_{j_1} C_{j_2} C_{j_3} C_{j_4}} - 2i, \quad \Pi_C = \prod_{m=1}^5 C_m, \end{aligned} \quad (13)$$

что может быть переписано в виде

$$\begin{aligned} \frac{\Delta}{\Pi_C} = & -\sum_{j=1}^5 \left(\frac{Z_0}{Z_j} + \frac{Z_j}{Z_0} \right) \frac{1}{C_j} + \sum_{j_1=1}^5 \sum_{j_2=j_1+1}^5 \sum_{j_3=j_2+1}^5 \left(\frac{Z_0 Z_{j_2}}{Z_{j_1} Z_{j_3}} + \frac{Z_{j_1} Z_{j_3}}{Z_0 Z_{j_2}} \right) \frac{1}{C_{j_1} C_{j_2} C_{j_3}} - \\ & - \sum_{j_1=1}^5 \sum_{j_2=j_1+1}^5 \sum_{j_3=j_2+1}^5 \sum_{j_4=j_3+1}^5 \sum_{j_5=j_4+1}^5 \left(\frac{Z_0 Z_{j_2} Z_{j_4}}{Z_{j_1} Z_{j_3} Z_{j_5}} + \frac{Z_{j_1} Z_{j_3} Z_{j_5}}{Z_0 Z_{j_2} Z_{j_4}} \right) \frac{1}{C_{j_1} C_{j_2} C_{j_3} C_{j_4} C_{j_5}} + \\ & + i \sum_{j_1=1}^5 \sum_{j_2=j_1+1}^5 \left(\frac{Z_{j_1}}{Z_{j_2}} + \frac{Z_{j_2}}{Z_{j_1}} \right) \frac{1}{C_{j_1} C_{j_2}} - \\ & - i \sum_{j_1=1}^5 \sum_{j_2=j_1+1}^5 \sum_{j_3=j_2+1}^5 \sum_{j_4=j_3+1}^5 \left(\frac{Z_{j_1} Z_{j_3}}{Z_{j_2} Z_{j_4}} + \frac{Z_{j_2} Z_{j_4}}{Z_{j_1} Z_{j_3}} \right) \frac{1}{C_{j_1} C_{j_2} C_{j_3} C_{j_4}} - 2i, \quad \Pi_C = \prod_{m=1}^5 C_m, \end{aligned} \quad (14)$$

поскольку здесь в пятикратной сумме второй строки присутствует лишь один член при $j_1 = 1, j_2 = 2, j_3 = 3, j_4 = 4, j_5 = 5$, совпадающий с первым членом во второй строке формулы (13).

Опишем общую закономерность в (9), (14). Это позволит выписать формулу для главного определителя СЛАУ (5) в явном виде при произвольном количестве слоев. Выражения (9), (14) имеют как вещественную, так и мнимую части. Они представляют собой набор кратных сумм, в которых верхние пределы равны числу слоев N в рассматриваемой многослойной среде.

В вещественной части идут по нарастающей кратности многократные суммы нечетного порядка, т.е. одинарная, трехкратная, пятикратная суммы и т.д. Аналогично в мнимой части идут по нарастающей кратности многократные суммы четного порядка, т.е. двукратная сумма, четырехкратная и т.д. При этом знаки перед многократными суммами чередуются как в вещественной, так и в мнимой частях.

Все суммы вещественной части непременно содержат импеданс воздуха Z_0 , а все суммы мнимой части его не содержат. Другими словами, вклад импеданса внешнего воздушного пространства содержится лишь в вещественной части детерминанта, а в мнимой части имеем лишь вклад импедансов внутренних слоев многослойной структуры.

Любая многократная сумма применяется к выражениям, которые представляют собой круглую скобку, деленную на произведение величин вида C_j . При этом кратность произведения величин C_j совпадает с кратностью соответствующей суммы и проходит по тем же индексам j , что и само суммирование.

Каждая круглая скобка, которая присутствует под знаком многократных сумм, представляет собой сумму двух дробей, вторая из которых является перевернутой первой. В свою очередь, первая дробь определяется в зависимости от того, входит ли она в вещественную или в мнимую часть главного определителя. В первом случае (вещественная часть определителя) в числителе стоит множитель Z_0 , который умножается на все четные импедансы, стоящие в данной многократной сумме, а в знаменателе – произведение всех нечетных импедансов. Для сумм из мнимой части определителя в числителе стоит произведение нечетных импедансов по всем индексам данной суммы, а в знаменателе – произведение импедансов по всем четным индексам данной суммы.

Данная закономерность позволяет обобщить выражения (9), (14) на случай произвольного числа слоев. Для этого введем следующие обозначения: $o \sum_{\ell=1}^N$ – сумма по всем нечетным индексам ℓ – от нечетного значения 1 до нечетного значения N (o – первая буква от слова odd – «нечетный»). Символ $e \sum_{\ell=2}^{N-1}$ будет обозначать сумму по всем четным значениям индекса ℓ – от четного значения 2 до четного значения $N-1$ (e – первая буква от слова even – «четный»). Аналогичные обозначения введем для произведений – соответственно $o \prod_{q=1}^N$ и $e \prod_{q=2}^{N-1}$. При этом индексы, обозначающие суммирование или произведение, могут быть другими, как другими могут быть нижний и верхний пределы, но буква «о» перед знаком суммы или произведения всегда обозначает только нечетные значения индекса, а буква «е» – только четные.

С учетом принятых обозначений значение главного детерминанта СЛАУ (5) для произвольного нечетного числа слоев N может быть выписано в виде

$$\frac{\Delta}{\Pi_C} = o \sum_{\ell=1}^N (-1)^{(\ell+1)/2} \sum_{j_1=1}^N \sum_{j_2=j_1+1}^N \dots \sum_{j_{\ell-1}=j_{\ell-2}+1}^N \sum_{j_{\ell}=j_{\ell-1}+1}^N \frac{D_o^{\ell} + 1 / D_o^{\ell}}{\prod_{m=1}^{\ell} C_{j_m}} -$$

$$- i \cdot e \sum_{\ell=2}^{N-1} (-1)^{\ell/2} \sum_{j_1=1}^N \sum_{j_2=j_1+1}^N \dots \sum_{j_{\ell-1}=j_{\ell-2}+1}^N \sum_{j_{\ell}=j_{\ell-1}+1}^N \frac{D_e^{\ell} + 1 / D_e^{\ell}}{\prod_{m=1}^{\ell} C_{j_m}} - 2i, \quad (15)$$

где $D_o^{\ell} = \frac{Z_0 \left(e \prod_{q=2}^{\ell-1} Z_{j_q} \right)}{o \prod_{q=1}^{\ell} Z_{j_q}}, \quad D_e^{\ell} = \frac{o \prod_{q=1}^{\ell-1} Z_{j_q}}{e \prod_{q=2}^{\ell} Z_{j_q}}, \quad \Pi_C = \prod_{m=1}^N C_m.$

При использовании формул (15) следует иметь в виду, что если в какой-нибудь сумме верхний предел меньше нижнего, то эта сумма равна нулю. Если в каком-то произведении верхний предел меньше нижнего, то это произведение равно единице.

Таким образом, главный определитель СЛАУ (5) находится по явным формулам (15). Тогда последняя компонента вектора неизвестных в этой СЛАУ, величина G_M , вычисляется как отношение частного определителя Δ_M (7) к главному определителю Δ (15). После этого коэффициент прохождения T может быть найден по (6).

Формулы для вариантов $N = 1$ ((10)–(12)), $N = 3$ ((8), (9)), $N = 5$ ((13), (14)) получаются из (15) как частные случаи. Прямые численные расчеты для СЛАУ (5) показывают, что во всех частных случаях результаты, полученные по аналитической формуле (15) и численным методом, совпадают с точностью в 10 значащих цифр при оперировании с арифметикой двойной точности. Очевидно, что отклонение численного решения от аналитического связано только с погрешностью вычислений с плавающей точкой. Для строгого обоснования верности аналитического представления (15) следует применить метод математической индукции, что ввиду сложности выражений не является простой задачей.

Примеры звукоизоляции многослойными конструкциями

Как отмечено во введении, стандартные методы [8, 11, 12] не могут обеспечить уровень снижения шума на низких частотах басов более чем на 30 дБ, хотя актуальным является снижение шума на величину порядка 100 дБ.

Рассмотрим практический пример звукоизоляции многослойной конструкцией для достижения указанных целей. Расчеты основаны на явных аналитических выражениях для коэффициента прохождения T , полученных в предыдущем разделе. Пересчет абсолютных выражений в децибелы осуществляется по известной формуле и выражается через десятичный логарифм:

$$|T|, \text{ дБ} = 20 \lg(|T|). \quad (16)$$

Например, если при амплитуде падающей волны, которая принята равной единице, коэффициент прохождения $|T|$ остается единичным, то никакого выигрыша в децибелах нет, т.е. в этом случае $|T|$, дБ = $20 \lg(1) = 0$ дБ. Например, подавление уровня звука на 60 дБ соответствует величине в формуле (16), равной $|T|$, дБ = -60 дБ. При этом абсолютное значение коэффициента прохождения равно одной тысячной: $|T|$, дБ = $20 \lg(10^{-3}) = -60$ дБ и т.д.

Представим, что для звукоизоляции на сверхнизких басах решено построить стену толщиной в 1,5 стандартного кирпича, т.е. в этом случае многослойная конструкция фактически состоит из одного слоя ($N = 1$, $M = 2$) и ее толщина равна примерно $d_1 = H = 1,5 \times 24$ см = 36 см. При этом акустические параметры задачи: воздух – $\rho_M = \rho_0 = 1,2$ кг/м³; $c_M = c_0 = 340$ м/с; $Z_M = Z_0 = \rho_0 c_0$; $k_M = k_0 = \omega / c_0 = 2\pi f / c_0$; кирпич – $\rho_1 = 1800$ кг/м³; $c_1 = 4000$ м/с; $Z_1 = \rho_1 c_1$; $k_1 = \omega / c_1 = 2\pi f / c_1$. Изменение уровня прошедшего звукового сигнала по частоте для этого случая представлено на рис. 2 чёрной линией. При этом циклическая частота f , Гц, связана с круговой частотой ω , 1/с, соотношением $\omega = 2\pi f$.

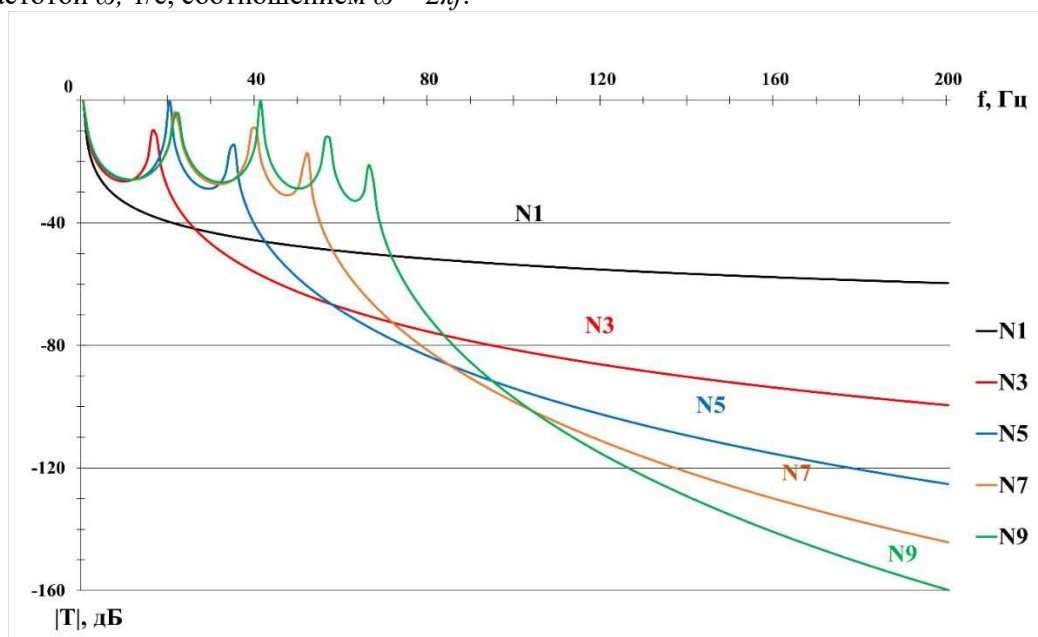


Рис. 2. Зависимость модуля коэффициента прохождения от частоты: N1 – N=1; N3 – N=3; N5 – N=5; N7 – N=7; N9 – N=9 / Fig. 2. Dependence of the transmission coefficient versus frequency: N1 – N=1; N3 – N=3; N5 – N=5; N7 – N=7; N9 – N=9

Если рассматривать интервал низких частот в диапазоне 30–200 Гц, то среднее значение для кривой $N = 1$ на рис. 2 примерно 47 дБ, что совершенно недостаточно для целей звукоизоляции. Тем более будет недостаточным еще меньший уровень шумоподавления на сверхнизких частотах 30–100 Гц.

Теперь, сохраняя общую толщину $H = 36$ см, возьмем трехслойную конструкцию ($N = 3$, $M = 4$), в которой внешние слои с номерами 1 и 3 останутся кирпичными толщиной $d_1 = d_3 = 12$ см (полкирпича), а внутренний слой с такой же толщиной $d_2 = 12$ см оставим воздушным. Этому случаю на рис. 2 соответствует красная кривая $N = 3$. Здесь, начиная с частоты примерно 25 Гц, звукоизоляция заметно лучше, чем в однослойной конструкции. Средний уровень звукоизоляции в интервале 30–200 Гц составляет 70 дБ, что заметно лучше однослойного случая. И даже на сверхнизких частотах 30–100 Гц этот средний уровень – порядка 60 дБ.

Сохраняя слои с нечетными номерами из материала с тем же импедансом, что и кирпич, а четные слои – воздушными, при этом все слои равной толщины $d_m = d = H / N$, $m = 1, \dots, N$, с примерно одной и той же общей толщиной H , будем увеличивать общее число слоев N . Результаты расчетов отражены на рис. 2, где синий цвет соответствует пяти слоям толщиной по 7 см каждый (общая толщина конструкции $H = 35$ см), оранжевый – семи слоям толщиной 5 см каж-

дый (общая толщина конструкции $H = 35$ см) и зеленый – девяти слоям толщиной 4 см каждый (общая толщина конструкции $H = 36$ см).

Из рис. 2 видно, что выбор оптимального числа слоев зависит от того, в каком частотном диапазоне требуется максимальное звукопоглощение. Например, если рабочим интервалом является частотный диапазон 100–200 Гц, то лучшим выбором здесь будет 9 слоев (среднее звукопоглощение порядка 125 дБ). На отрезке 60–120 Гц наиболее предпочтительно взять $N = 5$ (со средним звукопоглощением 85 дБ). А $N = 3$ будет наилучшим, например, на интервале 30–100 Гц (среднее звукопоглощение 60 дБ), а также 30–200 Гц (среднее звукопоглощение 70 дБ).

Заключение

По результатам проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Построено явное аналитическое представление для коэффициента прохождения (коэффициент прозрачности) в задаче о звукоизоляции с помощью многослойных конструкций при одномерном нормальном прохождении плоской волны и произвольном числе слоев. Заметим, что мы работаем со скалярными акустическими полями, в то время как в рассмотренных примерах некоторые слои на самом деле являются твердыми упругими материалами. Однако хорошо известно [3], что при одномерном нормальном прохождении через многослойные конструкции сохраняются соотношения скалярной акустики, если в упругом материале при вычислении соответствующего импеданса в качестве скорости звука брать скорость продольной волны.

2. Приведенные примеры показывают, что уровень шумоподавления с помощью таких конструкций заметно выше, чем в однослойных, что, в принципе, известно и описано в литературе. В данной работе этот вывод подтверждается для произвольного числа слоев, что обобщает известные результаты. Один из практических выводов состоит в том, что лучшим решением для целей звукоизоляции является чередование твердых (с максимально возможным импедансом) и воздушных (как обладающих наименьшим импедансом) слоев. Общая идея такого подхода также известна в литературе. Однако вместо воздушных слоев на практике рекомендуют засыпать сухой сыпучий материал (типа сухого песка). Считается, что за счет внутреннего трения проскальзывания между микрочастицами подобная конструкция должна обладать более высоким вязким звукопоглощением, что на самом деле справедливо в области более высоких частот, но на низких басах не подтверждается ни конкретными расчетами, ни экспериментальными измерениями.

3. Главный вывод состоит в том, что воздушные слои между слоями с высоким импедансом работают намного лучше, чем слои с внутренним вязким или пористым наполнителем – звукопоглотителем, так как последние, как правило, имеют высокий импеданс, что нивелирует преимущества многослойной геометрии. Косвенно это подтверждается тем, что индекс звукопоглощения строительных материалов, используемых сегодня на практике, заметно ниже, чем возможности описанной в данной работе многослойной конструкции с воздушными наполнителями. При этом оптимальное число слоев в низкочастотной области зависит от того, на каком конкретно частотном интервале необходима максимальная звукоизоляция.

Список источников

1. *Beranek L.L.* Acoustical properties of homogeneous, isotropic rigid tiles and flexible blankets // J. of the Acoustical Society of America. 1947. Vol. 19. P. 556–568.
2. *Beranek L.L., Work G.A.* Sound transmission through multiple structures containing flexible blankets // J. of the Acoustical Society of America. 1949. Vol. 21. P. 419–428.
3. *Бреховских Л.М.* Волны в слоистых средах. М.: Наука, 1973. 344 с.
4. *Попов П.А., Осипов А.С., Синдюков А.А.* Расчет звукоизоляции многослойной конструкции на основе метода «обратной матрицы» // Вестн. Самарского гос. аэрокосм. ун-та. 2014. № 3 (45). С. 53–60.
5. *Антонец И.В., Щеглов В.И.* Распространение волн через многослойные структуры. Сыктывкар: Изд-во Сыктывкарского ун-та. Ч. 1: Прямой метод. 2011. 134 с.; Ч. 2: Метод матрицы. 2012. 122 с.; Ч. 3: Метод импеданса. 2012. 138 с.; Ч. 4: Специфические методы. 2013. 120 с.; Ч. 5: Алгоритмические методы. 2014. 120 с.; Ч. 6: Метод исключения. 2015. 106 с.
6. *Ньюэлл Ф.* Звукозапись: Акустика помещений. М.: Шоу-Мастер, 2004. 182 с.

7. Glibe P.R., Brausch J.F., Majjigi R.K., Lee R. Jet Noise Suppression // *Aeroacoustics of Flight Vehicles. Theory and Practice*. Vol. 2: Noise Control. Ed. H.H. Hubbard. New York: ASA Publ., 1995. P. 207–269.
8. СНиП 23-03-2003. Защита от шума. М.: Министерство регионального развития РФ, 2011. 46 с.
9. Press W.H., Teukolsky S.A., Vetterling W.T., Flannery B.P. *Numerical Recipes: The Art of Scientific Computing*. 3rd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2007. 1235 p.
10. Курош А.Г. Курс высшей алгебры. М.: Наука, 1968. 432 с.
11. Vigran E. *Building Acoustics*. Abingdon, Oxon: Taylor & Francis, 2008. 362 p.
12. Rindel J.H. *Sound Insulation in Buildings*. Boca Raton, Florida: CRC Press, 2020. 476 p.

References

1. Beranek L.L. Acoustical properties of homogeneous, isotropic rigid tiles and flexible blankets. *J. of the Acoustical Society of America*. 1947;19:556-568.
2. Beranek L.L., Work G.A. Sound transmission through multiple structures containing flexible blankets. *J. of the Acoustical Society of America*. 1949;21:419-428.
3. Brekhovskikh L.M. *Waves in layered environments*. Moscow: Nauka Publ.; 1973. 344 p. (In Russ.).
4. Popov P.A., Osipov A.C., Sindyukov A.A. Calculation of sound isolation of a multilayered construction on the basis of “inverse matrix” method. *Vestn. Samarskogo gos. aerokosm. un-ta = Bulletin of Samara State Aerospace University*. 2014;(3):53-60. (In Russ.).
5. Antonets I.V., Scheglov V.I. *Wave Propagation through Multilayered Structures*. Syktyvkar: Syktyvkar University Press. Part 1: Direct method. 2011. 134 p. Part 2: Matrix method. 2012. 122 p. Part 3: Impedance method. 2012. 138 p. Part 4: Specific methods. 2013. 120 p. Part 5: Algorithmic methods. 2014. 120 p. Part 6: Method of exclusion. 2015. 106 p. (In Russ.).
6. Newell F. *Recording: Acoustics of the Rooms*. Moscow: Shou-Master Publ.; 2004. 182 p. (In Russ.).
7. Glibe P.R., Brausch J.F., Majjigi R.K., Lee R. Jet Noise Suppression. *Aeroacoustics of Flight Vehicles. Theory and Practice*. Vol. 2: Noise Control. Ed. H.H. Hubbard. New York: ASA Publ.; 1995:207-269.
8. *Building Regulations 23-03-2003. Noise Protection*. Moscow: Ministry of Regional Development Press; 2011. 46 p. (In Russ.).
9. Press W.H., Teukolsky S.A., Vetterling W.T., Flannery B.P. *Numerical Recipes: The Art of Scientific Computing*. 3rd ed. Cambridge: Cambridge University Press; 2007. 1235 p.
10. Kurosh A.G. *Course of higher algebra*. Moscow: Nauka Publ.; 1968. 432 p. (In Russ.).
11. Vigran E. *Building Acoustics*. Abingdon, Oxon: Taylor & Francis Publ.; 2008. 362 p.
12. Rindel J.H. *Sound Insulation in Buildings*. Boca Raton, Florida: CRC Press; 2020. 476 p.

Информация об авторах

М.А. Сумбатян – доктор физико-математических наук, профессор, кафедра теоретической и компьютерной гидроаэродинамики, Институт математики, механики и компьютерных наук им. И.И. Воровича.

М.В. Черникова – аспирант, кафедра теоретической и компьютерной гидроаэродинамики, Институт математики, механики и компьютерных наук им. И.И. Воровича.

Information about the authors

M.A. Sumbatyan - Doctor of Science (Physics and Mathematics), Professor, Department of the Theoretical and Computational Hydroaerodynamics, Vorovich Institute of Mathematics, Mechanics and Computer Science.

M.V. Chernikova - Postgraduate Student, Department of Theoretical and Computational Hydroaerodynamics, Vorovich Institute of Mathematics, Mechanics and Computer Science.

Статья поступила в редакцию 26.02.2024; одобрена после рецензирования 15.03.2024; принята к публикации 24.05.2024.
The article was submitted 26.02.2024; approved after reviewing 15.03.2024; accepted for publication 24.05.2024.

НАУКИ О ЗЕМЛЕ

SCIENCES OF EARTH

Научная статья

УДК 551.554

doi: 10.18522/1026-2237-2024-2-50-56

АНОМАЛЬНЫЙ ГРОЗОВОЙ ПРОЦЕСС НА ТЕРРИТОРИИ РОСТОВСКОЙ ОБЛАСТИ

**Анатолий Хабасович Аджиев^{1✉}, Геннадий Владимирович Куповых²,
Наталья Владимировна Юрченко³, Залина Музариновна Керефова⁴**

^{1,3,4}Высокогорный геофизический институт, Нальчик, Кабардино-Балкарская Республика, Россия

²Южный федеральный университет, Таганрог, Россия

¹adessa1@yandex.ru ✉

²kupovykh@sfedu.ru

³ynatalya64@mail.ru

³zknyaz-kbsu@mail.ru

Аннотация. Рассматривается аномальный грозовой процесс, происходивший на территории Ростовской области 27 июня 2023 г. Он наблюдался и в других регионах Северного Кавказа, но наибольшая интенсивность грозовой деятельности отмечалась на территории Ростовской области, где гроза продолжалась более суток. Анализ грозовой активности выполнен по данным грозопеленгационной сети ФГБУ «Высокогорный геофизический институт». За сутки на данной территории зафиксировано около 60 000 молний, из которых 7635 – наземные разряды (отрицательные молнии – 6625, положительные – 1010). Доля отрицательных разрядов молний от общего числа наземных разрядов на указанной территории – 87 %. Наибольшее количество отрицательных молний (более 70 %) имело значение до 20 кА, более 50 % положительных молниевых разрядов – от 21 до 40 кА. Среднее значение токов отрицательной полярности составило –19,19 кА, а положительной полярности +39,7 кА. Такой масштабный грозовой процесс является следствием регионального изменения климата. При проведении молниезащитных мероприятий для объектов на территории Ростовской области рекомендуется учесть аномальные значения грозовой активности.

Ключевые слова: грозовая активность, грозопеленгация, молниевый разряд, атмосферное электричество, молниезащита, наукастинг, град, опасные явления погоды

Для цитирования: Аджиев А.Х., Куповых Г.В., Юрченко Н.В., Керефова З.М. Аномальный грозовой процесс на территории Ростовской области // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2024. № 2. С. 50–56.

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

Original article

ANOMAL THUNDERSTORM PROCESS IN THE TERRITORY OF THE ROSTOV REGION

Anatoly Kh. Adzhiev^{1✉}, **Gennady V. Kupovykh**², **Natalya V. Yurchenko**³, **Zalina M. Kerefova**⁴

^{1, 3, 4}High Mountain Geophysical Institute, Nalchik, Kabardino-Balkarian Republic, Russia

²Southern Federal University, Taganrog, Russia

¹adessa1@yandex.ru ✉

²kupovykh@sfedu.ru

³ynatalya64@mail.ru

³zknyaz-kbsu@mail.ru

Abstract. The work examines the anomalous thunderstorm process that occurred on the territory of the Rostov region on June 27, 2023. This thunderstorm process was observed in other regions of the North Caucasus, but the greatest intensity of thunderstorm activity was observed in the territory of the Rostov region, where the thunderstorm lasted more than a day. The analysis of thunderstorm activity was carried out using data from the lightning direction network of the Federal State Budgetary Institution "High Mountain Geophysical Institute". During the day, about 60,000 lightning strikes were recorded in this territory, of which 7,635 were ground strikes. Of the registered 7635 ground-based lightning discharges in the Rostov region, negative lightning amounted to 6625, and positive lightning – 1010. The share of negative lightning discharges from the total number of ground-based lightning discharges in the specified territory was 87 %. The largest number of negative lightning (more than 70 %) had values up to 20 kA. More than 50 % of positive lightning discharges had values from 21 to 40 kA. The average value of the negative polarity currents was -19.19 kA, and the positive polarity was +39.7 kA. Such a large-scale thunderstorm process is a consequence of regional climate change. When carrying out lightning protection measures for facilities in the Rostov region, it is recommended to take into account abnormal values of thunderstorm activity.

Keywords: lightning activity, lightning direction finding, lightning discharge, atmospheric electricity, lightning protection, nowcasting, hail, hazardous weather phenomena

For citation: Adzhiev A.Kh., Kupovykh G.V., Yurchenko N.V., Kerefova Z.M. Anomal Thunderstorm Process in the Territory of the Rostov Region. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2024;(2):50-56. (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

В настоящее время исследования грозовой деятельности на различных территориях являются актуальной научно-прикладной задачей [1–3], которая включает в себя получение информации об общем числе гроз, их параметрах, характерных значениях параметров молниевых разрядов для различных территорий, зависящих от физико-географических условий и климатических факторов [4–9].

В последние годы одной из важнейших проблем мирового сообщества является глобальное и локальное изменение климата. Наличие такого изменения является общепризнанным [10–13]. Климат на Земле заметно меняется: одни страны страдают от аномальной жары, другие – от слишком суровых и снежных зим, непривычных для этих мест. По данным [2], среднегодовая температура на Земле оказалась на 1,02 °C выше той, которую фиксировали в прошлом столетии (когда обратили внимание на изменения глобальной температуры). Порог в один градус был превышен впервые в современной истории. Нет единого мнения о причинах потепления [3]. Утверждается, что именно деятельность человека – сжигание нефти, газа и угля – приводит к парниковому эффекту, который вызывает повышение средней температуры. Эксперты отмечают, что в период с 2000 по 2020 г. наблюдался самый мощный рост выбросов парниковых газов за последние 100 лет [4].

Признаками потепления климата являются рост экстремальных погодных явлений, нарушение среднесезонного режима осадков в различных регионах, увеличение частоты экстремальных явлений, таких как ураганы, наводнения, засухи, градобития, грозы.

Исследования отечественных ученых свидетельствуют, что в России также наблюдается заметное изменение климата. Для неё характерно увеличение количества экстремальных погодных явлений, последствие которых – рост повторяемости опасных грозоградных процессов, наводнений, деградации горного оледенения и др. Наблюдается положительная динамика случаев опасных гидрометеорологических событий и неблагоприятных условий погоды, наносящих социально-экономический ущерб [14]. В среднем ежегодный прирост составляет более 10 явлений в год.

В данной работе представлен анализ динамики развития такого аномального погодного феномена, как гроза. Рассмотрен грозовой процесс, прошедший на Северном Кавказе 27 июня 2023 г. Он существенно отличался от среднестатистических как по продолжительности, так и по параметрам молний. Анализ выполнен на примере Ростовской области, хотя аномальные грозы 27 июня 2023 г. имели место и на территории других субъектов Северного Кавказа.

Грозы также относятся к числу наиболее опасных явлений погоды. Оперативный мониторинг местоположения грозовой активности, параметров молниевых разрядов имеет большое практическое значение для хозяйственной деятельности. В последние годы параметры грозовой активности используют для наукастинга погодных явлений.

Материалы и методы исследования

Анализ грозовой активности выполнен по данным грозопеленгационной сети (ГПС) ФГБУ «Высокогорный геофизический институт» (ВГИ). В настоящее время ГПС «ВГИ» принимает данные разрядов молний из двух грозопеленгационных сетей: ГПС «ВГИ» и ГПС «Планета» [5].

В состав ГПС «ВГИ» и ГПС «Планета» входят датчики двух моделей LS8000 и LS7002 производства фирмы Vaisala. Оба оснащены низкочастотным LF (low frequency) сенсором. Более ранняя модель LS8000 обладает расширенным функционалом за счет дополнительного высокочастотного VHF (very high frequency) сенсора. Низкочастотный сенсор LF фиксирует в основном наземные молниевые разряды. Высокочастотный датчик VHF определяет только межоблачные молниевые разряды.

Зоны обзора для разных типов молниевых разрядов различные. Для наземных молниевых разрядов радиус области обзора составляет 625 км от центра сети, а разрядов межоблачных – 325 км. Зона обзора LF-сенсоров ГПС «ВГИ» приведена на рис. 1.

От датчиков LF и VHF приходит информация в центральный процессор (CP8000), расположенный в центре приема и обработки информации. По каждому молниевому разряду получаем до 25 параметров. Ниже приведены наиболее основные параметры наземных молниевых разрядов из числа выдаваемых ГПС: дата и время, координаты, сила тока и полярность сигнала в канале молнии, разделение разрядов на положительные и отрицательные, время роста сигнала до пикового значения, время спада сигнала от пикового значения до нуля.

Для анализа грозовой активности по Ростовской области за 27 июня 2023 г. отобрано количество наземных разрядов молнии положительной и отрицательной полярности, а также значения токов молнии.

Результаты и обсуждение

Впервые за весь период наблюдения за грозами, с 60-х гг. XX в. по настоящее время, на Северном Кавказе 27 июня 2023 г. имел место аномальный грозовой процесс, при котором гроза продолжалась более 24 ч.

Наибольшая интенсивность грозовой деятельности наблюдалась на территории Ростовской области более суток. По информации гидрометцентра, на территории области на этот день прогнозировалась переменная облачность, местами – кратковременный дождь, гроза, в отдельных районах – сильный дождь.

В Ростовской области 27 июня ночью и утром местами шли сильные дожди, ливни в сочетании с грозой, градом и усилением ветра до 20–23 м/с. Наблюдался юго-восточный ветер с пере-

ходом на юго-западный и западный 6–11 м/с. При грозе порывы ветра достигали 12–14 м/с, ночью и утром в отдельных районах – 20–23 м/с. Температура воздуха ночью была от +16 до +21 °С, по северу и западу – до 11 °С; а днём зафиксировано от +20 до 25 °С, по югу – до 30 °С. Грозовая деятельность 27.06.2023 на территории Ростовской области была вызвана прохождением фронтального процесса.

На рис. 2 представлено распределение в течение суток 27.06.2023 наземных молниевых разрядов по данным ГПС «ВГИ».

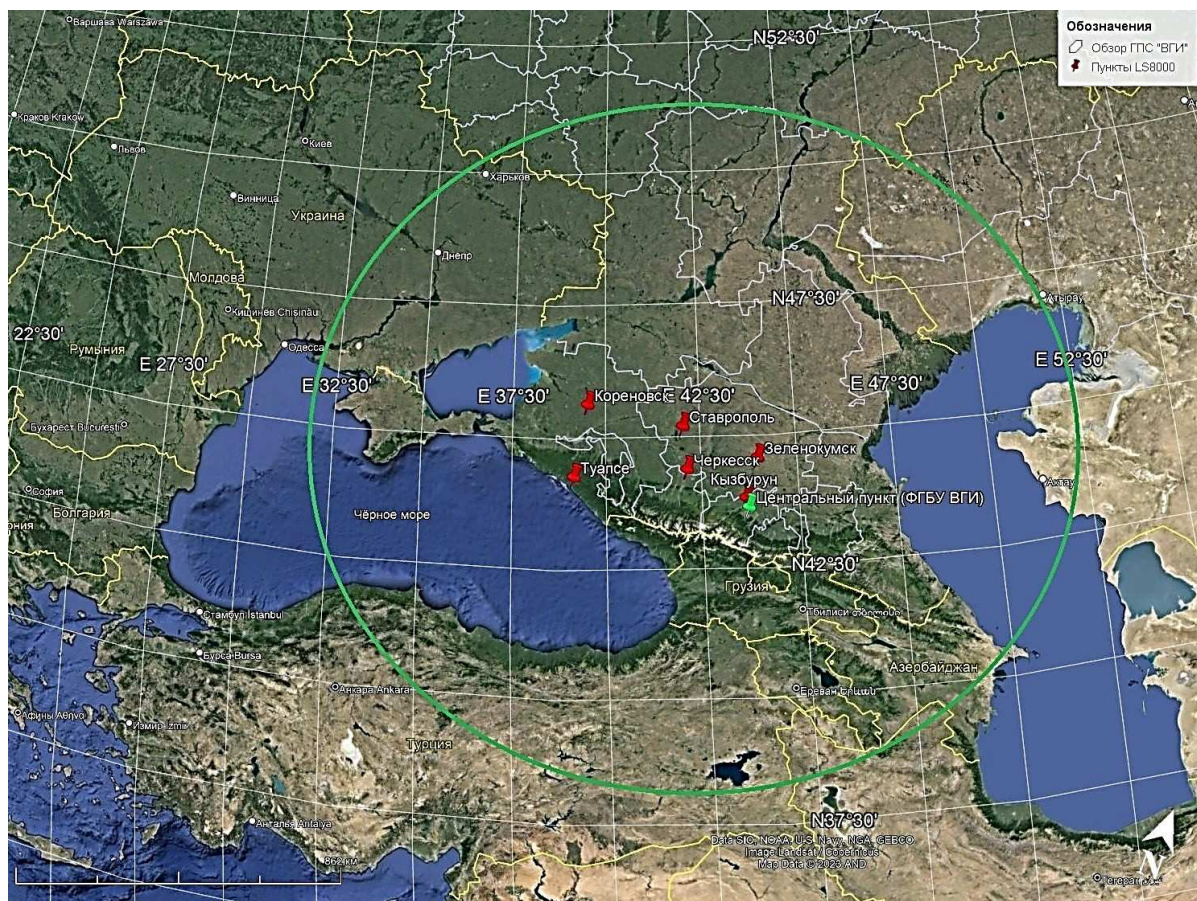


Рис. 1. Зоны обзора LF-сенсоров ГПС «ВГИ»
 / Fig. 1. Viewing areas of LF-sensors of GPS “VGI”

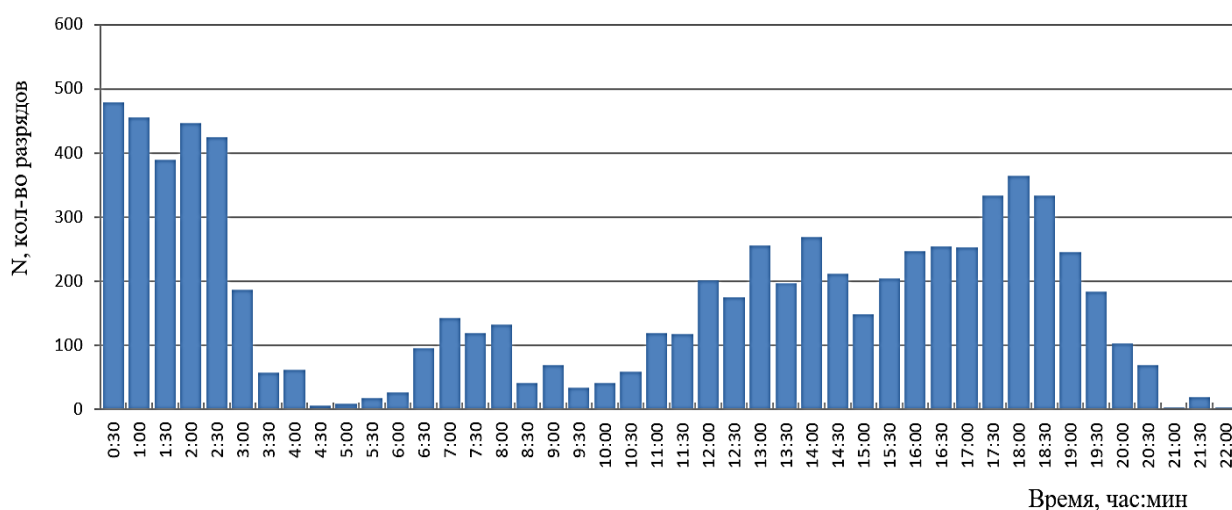


Рис. 2. Временной ход количества молниевых разрядов на землю по Ростовской области за 27.06.2023
 / Fig. 2. Time course of the number of lightning discharges to the ground in the Rostov region for June 27, 2023

Как видно из рис. 2, грозовой процесс, сформировавшийся над Ростовской областью 26 июня 2023 г., в ночь на 27 июня 2023 г. имел максимальную активность – до 500 разрядов на землю в течение получаса. За сутки вся территория поражена молниями 7635 раз. Учитывая, что площадь Ростовской области составляет 101,0 тыс. км², суточная удельная поражаемость составила 0,07 кол/км², что является аномальным явлением. Ночные грозы, как правило, являются редким явлением погоды.

Также из рис. 2 видно, что максимальная грозовая активность на данной территории имела место в ночное время с 00.00 до 04.00, а минимальная – в утренние часы.

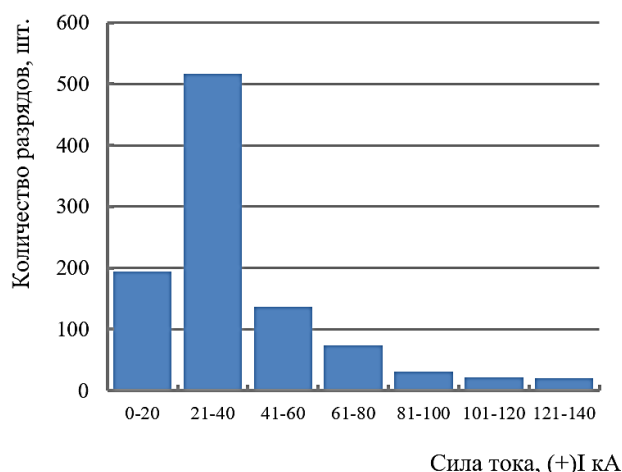
Из зарегистрированных 7635 наземных разрядов молний по Ростовской области отрицательные молнии составили 6625, а положительные – 1010. Доля наземных молниевых разрядов (положительных и отрицательных) – примерно 13 % от общего числа зарегистрированных молний, что достаточно хорошо согласуется с ранее выполненными исследованиями на территории Северного Кавказа [6]. Общее количество зарегистрированных молний всех типов за сутки (27.06.2023) на территории Ростовской области составило около 60 000.

Доля отрицательных разрядов молнии от общего числа наземных разрядов на указанной территории составила 87 %, что также соответствует данным, полученным по многолетним наблюдениям на территории Северного Кавказа [6].

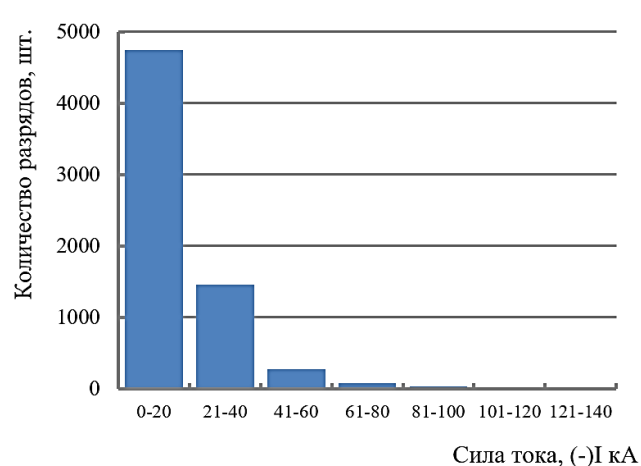
В таблице и на рис. 3 приведено распределение молний токов положительной и отрицательной полярности. Как видно из таблицы, наибольшее количество отрицательных молний (более 70 %) имеет значение до 20 кА, а положительных молниевых разрядов (более 50 %) – от 21 до 40 кА. Среднее значение токов отрицательной полярности составило –19,19 кА, а положительной полярности – +39,7 кА.

Количество и значения токов молний положительной и отрицательной полярности
 / **Number and values of lightning currents of positive and negative polarity**

Диапазон значений токов, кА	Количество токов, шт.	
	+	-
0–20	194	4748
21–40	517	1460
41–60	137	273
61–80	74	82
81–100	31	34
101–120	21	13
121–140	20	9



a/a



б/б

Рис. 3. Распределение значений токов: а – положительной полярности; б – отрицательной полярности
 / Fig. 3. Distribution of current values: a - positive polarity; b - negative polarity

Заключение

27 июня 2023 г. на территории Ростовской области наблюдался аномальный грозовой процесс. Гроза продолжалась непрерывно более суток. За сутки по данной территории ГПС «ВГИ» зафиксировано около 60 000 молний, включая 7635 разрядов на землю. Из них отрицательные молнии составили 6625, а положительные – 1010. Доля отрицательных разрядов молнии от общего числа наземных разрядов на указанной территории – 87 %.

Наибольшее количество отрицательных молний (более 70 %) имело значение до 20 кА, более 50 % положительных молниевых разрядов – от 21 до 40 кА.

Среднее значение токов отрицательной полярности составило –19,19 кА, а положительной полярности – +39,7 кА.

По мнению авторов, рассмотренный грозовой процесс на территории Ростовской области является следствием регионального изменения климата. При проведении молниезащитных мероприятий для объектов хозяйственной деятельности на территории Ростовской области рекомендуется учесть аномальные значения грозовой активности.

Список источников

1. *Uman M.A.* Natural and artificially lightning and test standards // Proceedings of the IEEE. 1988. Vol. 76, № 12. P. 5–26.
2. *Poelman D.R., Schulz W., Vergeiner C.* Performance characteristics of three distinct lightning detection networks covering Belgium // 22nd Int. Lightning Detection Conf. April 2–3, 2012, Broomfield, Colorado, USA. URL: https://www.researchgate.net/publication/264124232_Performance_Characteristics_of_Distinct_Lightning_Detection_Networks_Covering_Belgium (дата обращения: 20.01.2024).
3. *Schulz W., Saba M.M.F.* First results of correlated lightning video images and electric field measurements in Austria // 10th Int. Symposium on Lightning Protection. November 9–13, 2009. Curitiba, Brazil, 2009. P. 503–505.
4. *Аджиев А.Х., Куповых Г.В., Гятов Р.А., Керефова З.М.* Взаимосвязь числа дней с грозой и продолжительности гроз по данным визуальных и инструментальных наблюдений // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2020. № 3. С. 30–36.
5. *Аджиев А.Х., Юрченко Н.В., Куповых Г.В., Кудринская Т.В.* Наблюдения за грозовой активностью и параметрами молниевых разрядов на территории юга европейской части России // Распространение радиоволн : тр. XXVII Всерос. открытой науч. конф. Калининград: Изд-во БФУ им. И. Канта, 2021. С. 828–832.
6. *Аджиев А.Х., Куповых Г.В.* Исследование грозовых явлений на Северном Кавказе и электродинамики приземного слоя // Материалы IX Всерос. науч. конф. по атмосферному электричеству. СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2023. С. 10–17.
7. *Аджиева А.А., Куповых Г. В., Керефова З.М.* Результаты анализа грозовой деятельности на территории Республики Северная Осетия – Алания // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2023. № 4. С. 61–69.
8. *Аджиев А.Х., Кулиев Д.Д., Стасенко В.Н.* Оценка параметров работоспособности грозопеленгационных систем LS8000 и ENTLS в регионе Северного Кавказа // Метеорология и гидрология. 2022. № 4. С. 117–126.
9. *Аджиев А.Х., Кулиев Д.Д.* Характеристики грозовой активности и параметры молниевых разрядов на территории юга европейской части России // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2018. Т. 54, № 4. С. 437–445.
10. *Груза Г.В., Ранькова Э.Я.* Обнаружение изменений климата: состояние, изменчивость и экстремальность климата // Метеорология и гидрология. 2004. № 4. С. 50–66.
11. Заявление ВМО о состоянии глобального климата в 2004 г. // ВМО. 2005. № 983. 14 р. URL: <http://www.wmo.ch/web/wcp/wcpprog.htm> (дата обращения: 20.01.2024).
12. Russian National Report // Meteorology and Atmospheric Sciences. 2011–2014. Eds. I.I. Mokhov, A.A. Krivolitsky. National Geophysical Committee RAS. M.: MAX Press, 2015. 270 p.
13. Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации / под ред. В. М. Катцова; Росгидромет. СПб.: Научно-технологические технологии, 2022. 676 с.
14. *Коршунов А.А., Шаймарданов В.М., Шаймарданов М.З., Шамин С.И.* Повторяемость опасных гидрометеорологических явлений, нанесших социально-экономический ущерб в 1998–2017 гг. // Метеорология и гидрология. 2019. № 11. С. 13–19.

References

1. Uman M.A. Natural and artificially lightning and test standards. *Proceedings of the IEEE*. 1988;76(12):5-26.
2. Poelman D. R., Schulz W., Vergeiner C. Performance characteristics of three distinct lightning detection networks covering Belgium. *22nd International Lightning Detection Conference*. April 2-3, 2012. Broomfield, Colorado, USA. Available from: <https://www.researchgate.net/publication/264124232> [Accessed 20th January 2024].
3. Schulz W., Saba M.M.F. First results of correlated lightning video images and electric field measurements in Austria. *10th International Symposium on Lightning Protection*. November 9-13, 2009. Curitiba, Brazil, 2009:503-505.
4. Adzhiev A.H., Kupov G.V., Gyatov R.A., Kerefova Z.M. The relationship of the number of days with a thunderstorm and the duration of thunderstorms according to visual and instrumental observations. *Izv. vuzov. Sev.-Kavk. region. Estestv. nauki = Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science*. 2020;(3):30-36. (In Russ.).
5. Adzhiev A. H., Yurchenko N. V., Kupovykh G. V., Kudrinskaya T. V. Observations of thunderstorm activity and parameters of lightning discharges in the south of the European part of Russia. *Propagation of radio waves. Proceedings of the XXVII All-Russian Open Scientific Conference*. Kaliningrad: Kant BFU Press; 2021:828-832. (In Russ.).
6. Adzhiev A.H., Kupovykh G.V. Investigation of thunderstorm phenomena in the North Caucasus and electro-dynamics of the surface layer. *Proceedings of the IX All-Russian Scientific Conference on Atmospheric Electricity*. St. Petersburg: Mozhaisky MSA Press; 2023:10-17. (In Russ.).
7. Adzhieva A.A., Kupovykh G. V., Kerefova Z.M. The results of the analysis of thunderstorm activity on the territory of the Republic of North Ossetia – Alania. *Izv. vuzov. Sev.-Kavk. region. Estestv. nauki = Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science*. 2023;(4):61-69. (In Russ.).
8. Adzhiev A.H., Kuliyevev D.D., Stasenko V.N. Assessment of the parameters of the operability of LS8000 and ENTLS lightning direction finding systems in the North Caucasus region. *Meteorologiya i gidrologiya = Meteorology and Hydrology*. 2022;(4):117-126. (In Russ.).
9. Adzhiev A.H., Kuliyevev D.D. Characteristics of thunderstorm activity and parameters of lightning discharges in the south of the European part of Russia. *Izv. RAN. Fizika atmosfery i okeana = Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Atmospheric and Oceanic Physics*. 2018;54(4):437-445. (In Russ.).
10. Gruza G.V., Rankova E.Ya. Detection of climate change: the state, variability and extremity of climate. *Meteorologiya i gidrologiya = Meteorology and Hydrology*. 2004;(4):50-66. (In Russ.).
11. WMO Statement on the state of the Global climate in 2004. *WMO*. 2005;(983). 14 p. Available from: <http://www.wmo.ch/web/wcp/wcprog.htm> [Accessed 20th January 2024]. (In Russ.).
12. Mokhov I.I., Krivolitsky A.A., eds. Russian National Report. *Meteorology and Atmospheric Sciences. 2011-2014*. National Geophysical Committee RAS. Moscow: MAX Press; 2015. 270 p.
13. Kattsov V. M., ed. *The third assessment report on climate change and its consequences on the territory of the Russian Federation*. Roshydromet. St. Petersburg: Naukoemkie tekhnologii Publ.; 2022. 676 p. (In Russ.).
14. Korshunov A.A., Shaimardanov V.M., Shaimardanov M.Z., Shamin S.I. The recurrence of dangerous hydrometeorological phenomena that caused socio-economic damage in 1998-2017. *Meteorologiya i gidrologiya = Meteorology and Hydrology*. 2019;(11):13-19. (In Russ.).

Информация об авторах

А.А. Аджиев – доктор физико-математических наук, профессор.

Г.В. Куповых – доктор физико-математических наук, профессор, кафедра физико-математических основ инженерного образования, Инженерно-технологическая академия.

Н.В. Юрченко – младший научный сотрудник.

З.М. Керефова – кандидат физико-математических наук, научный сотрудник.

Information about the authors

A.A. Adzhieva - Doctor of Science (Physics and Mathematics), Professor.

G.V. Kupovykh - Doctor of Science (Physics and Mathematics), Professor, Academy of Engineering and Technology.

N.V. Yurchenko - Junior Researcher.

Z.M. Kerefova - Candidate of Science (Physics and Mathematics), Researcher.

Статья поступила в редакцию 28.01.2024; одобрена после рецензирования 29.02.2024; принята к публикации 24.05.2024.
The article was submitted 28.01.2024; approved after reviewing 29.02.2024; accepted for publication 24.05.2024.

Научная статья

УДК 551.594+504.3

doi: 10.18522/1026-2237-2024-2-57-65

СТРУКТУРА ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ В КОНВЕКТИВНО-ТУРБУЛЕНТНОМ ПРИЗЕМНОМ СЛОЕ АТМОСФЕРЫ

Ольга Васильевна Белоусова¹, Дмитрий Владимирович Тимошенко²,
Геннадий Владимирович Куповых³✉

^{1,2,3} Южный федеральный университет, Таганрог, Россия

¹obelousova@sfnu.ru

²dmitrytim@sfnu.ru

³kupovykh@sfnu.ru✉

Аннотация. Построены и исследованы электродинамические модели приземного слоя атмосферы, учитывающие турбулентный и конвективный переносы. В основу моделей положено так называемое уравнение полного тока, получаемое из уравнений теории электродного эффекта в атмосфере. С точки зрения математики это уравнение в частных производных параболического типа с переменными коэффициентами. Поскольку в такого типа уравнениях дифференциальный оператор необязательно является оператором Штурма – Лиувилля, в соответствующих случаях необходимо использовать различные подходы к его интегрированию. Это, в свою очередь, вызывает необходимость рассмотреть различные гипотезы о соотношении интенсивностей локальных факторов, которые влияют на структуру уравнения. В работе рассмотрено несколько случаев модели, соответствующих конвективному турбулентному и конвективно-турбулентному электродному слою. Получены аналитические решения стационарного уравнения полного электрического тока в различных приближениях. Построены и исследованы профили напряженности электрического поля в приземном слое атмосферы для различных физических условий.

Ключевые слова: напряженность электрического поля, приземный слой, атмосфера, электродный эффект, электрическое поле, турбулентность, конвекция

Для цитирования: Белоусова О.В., Тимошенко Д.В., Куповых Г.В. Структура электрического поля в конвективно-турбулентном приземном слое атмосферы // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2024. № 2. С. 57–65.

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

Original article

ELECTRIC FIELD STRUCTURE IN THE CONVECTIVE-TURBULENT ATMOSPHERIC SURFACE LAYER

Olga V. Belousova¹, Dmitry V. Timoshenko², Gennady V. Kupovykh³✉

^{1,2,3} Southern Federal University, Taganrog, Russia

¹obelousova@sfnu.ru

²dmitrytim@sfnu.ru

³kupovykh@sfnu.ru✉

Abstract. Electrodynamics models of the surface layer of the atmosphere, taking into account turbulent and convective transport, are constructed and studied. The models are based on the so-called total current equation derived from the equations of the theory of the electrode effect in the atmosphere. From the point of view of mathematics, this is a partial differential equation of a parabolic type with variable coefficients. Since in this

© Белоусова О.В., Тимошенко Д.В., Куповых Г.В., 2024

type of equations the differential operator is not necessarily the Sturm-Liouville operator, in appropriate cases it is necessary to use different approaches to integrating the total current equation. This, in turn, makes it necessary to consider various hypotheses about the ratio of the intensities of local factors that affect the structure of the equation. The paper considers several cases of the model corresponding to the convective turbulent and convective-turbulent electrode layer. Analytical solutions of the stationary equation of the total electric current are obtained in various approximations. Electric field strength profiles in the surface layer of the atmosphere for various physical conditions are constructed and studied.

Keywords: electric field strength, surface layer, atmosphere, electrode effect, electric field, turbulence, convection

For citation: Belousova O.V., Timoshenko D.V., Kupovykh G.V. Electric Field Structure in the Convective-Turbulent Atmospheric Surface Layer. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2024;(2):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

Электродинамические процессы, происходящие в приземном слое и объединяемые термином «электродный эффект», являются составной частью атмосферной глобальной электрической цепи (ГЭЦ). Теория электродного эффекта и функционирование ГЭЦ подробно описаны в [1, 2].

ГЭЦ представляет собой совокупность взаимосвязанных электрических токов, протекающих в магнитосфере и ионосфере, а также в примыкающих нижних слоях атмосферы. Преимущественное влияние на состояние ГЭЦ оказывают следующие явления: грозы в экваториальной области планеты (грозовой генератор), высотные источники, образованные взаимодействием магнитного поля Земли, солнечного ветра (магнитосферный генератор) и лунных и солнечных приливов (ионосферное динамо), но при этом непосредственное влияние на электрические процессы в приземном слое поверхности оказывает электродный эффект [1, 2]. Результатом их взаимодействия является так называемая суточная (унитарная) вариация электрического поля атмосферы, или глобальная вариация потенциала ионосферы.

В работе [1] построена математическая квазистационарная модель электрического поля атмосферы, учитывающая действие грозových токовых генераторов и космических факторов. Она, в частности, показывает, что изменчивость грозовой активности в нижней атмосфере приводит к вариациям напряженности электрического поля в атмосфере, которая, в свою очередь, ведет к изменению характеристик поля приземного слоя.

Математическая модель электрического поля приземного слоя, рассматриваемая в настоящей работе, позволяет учесть влияние указанного процесса на суточные вариации напряженности электрического поля. Она представляет собой так называемое уравнение полного электрического тока, вытекающее из уравнений электродного эффекта в приземном слое. Действие грозových токовых генераторов и космических факторов задает суточную вариацию плотности полного тока, входящую в правую часть указанного уравнения [3]. Соответствующие исследования проведены для классического и турбулентного электродного эффектов [4, 5]. Показано, что при классическом электродном эффекте кривая суточного хода напряженности электрического поля повторяет кривую Карнеги [6, 7] с поправкой на условия наблюдений (значения напряженности и проводимости в пункте наблюдений) [5]. В случае турбулентного электродного эффекта выявлены изменения амплитудных значений суточной вариации электрического поля, а также временные сдвиги утреннего минимума и вечернего максимума [4]. Кроме того, отмечалось появление дополнительных экстремумов. С увеличением интенсивности турбулентной диффузии наблюдалось усиление описанных эффектов [5]. Наряду с явлениями турбулентного переноса значительное влияние на вариации электрического поля оказывают конвективные процессы. В частности, в [8–10] было исследовано воздействие турбулентных и конвективных процессов в пограничном слое атмосферы на вариации напряженности электрического поля. В [1] построена стационарная модель этого влияния в масштабах ГЭЦ.

В данной работе построена математическая модель влияния конвективного и турбулентного переносов как в отдельности, так и совместно на структуру электрического поля в приземном слое атмосферы. Подобный подход позволит говорить о структурной повторяемости электродинамических процессов в масштабах ГЭЦ и приземного слоя атмосферы.

Постановка задачи моделирования структуры электрического поля в конвективно-турбулентном приземном слое

Дальнейшие исследования строятся на одном из вариантов модели электродного эффекта в приземном слое – уравнении плотности полного электрического тока $j(t)$ [1, 3]:

$$\frac{\partial E}{\partial t} - \varepsilon_0 D_T(t, z) \frac{\partial^2 E}{\partial z^2} + \varepsilon_0 v(z) \frac{\partial E}{\partial z} + \lambda(z) E = j(t), \quad (1)$$

где $D(t, z)$ – коэффициент турбулентной диффузии; $V(z)$ – скорость вертикального конвективного переноса (в общем случае две эти величины являются функцией высоты); λ – электрическая проводимость атмосферы; j – плотность полного тока; z_0 – параметр шероховатости; L – высота электродного слоя; E_0 – значение напряженности электрического поля у поверхности земли.

Граничные условия для уравнения (1) могут быть заданы в виде

$$E|_{z=z_0} = E_0, \quad E|_{z=L} = j_0/\lambda. \quad (2)$$

Уравнение (1) представляет собой неоднородное дифференциальное уравнение второго порядка параболического типа с переменными коэффициентами. Оно применимо для описания широкого класса задач электродинамики приземного слоя атмосферы, поскольку позволяет учитывать одновременно воздействие локальных факторов на местности (проводимость атмосферы, температура, метеоусловия) посредством соответствующих слагаемых в левой части, содержащих компоненты тока. Одновременно с этим модель отражает воздействие на электрическое поле приземного слоя глобальной вариации потенциала ионосферы, описываемого соответствующим законом изменения плотности полного тока в правой части уравнения (1). Решение уравнения (1) определяет зависимость напряженности электрического поля от времени и высоты в пределах приземного слоя.

Следствием описанных особенностей (1) является разнообразие подходов к его решению. Рациональным с точки зрения физических постановок и методов решения представляется вначале рассмотреть более простые варианты задачи (1), (2), соответствующие учету отдельных компонент полного тока, с постепенным добавлением новых, что в итоге позволит получить наиболее полную модель электродного эффекта. На первом этапе данный подход был реализован в [4, 5], где было рассмотрено влияние процессов турбулентной диффузии на суточные вариации напряженности электрического поля приземного слоя. Исследовано два случая поведения коэффициента турбулентной диффузии: $D_T = const$ и $D_T(t) = D_0(2 - \cos \omega t)$. Первый соответствует постоянству турбулентной диффузии в области наблюдений, а второй – повторению коэффициентом D_T суточной вариации потенциала ионосферы. Проводимость приземного слоя в обоих случаях принималась постоянной. Процесс конвективного переноса считался незначительным и не учитывался в модели. Для нахождения суточных вариаций напряженности поля задача (1), (2) рассматривалась в нестационарной постановке, преобразовываясь к уравнению

$$\frac{\partial E}{\partial t} - \varepsilon_0 D_T(t) \frac{\partial^2 E}{\partial z^2} + \lambda E = j(t). \quad (3)$$

Уравнение (3), как и (1), является неоднородным уравнением параболического типа относительно неизвестной функции $E(t, z)$. Граничные условия к уравнению (3) сохраняются в форме (2). Дифференциальный оператор в левой части (3) является оператором Штурма – Лиувилля [11], что позволяет построить полную ортонормированную систему его собственных функций и решить задачу (3), (2) методом Фурье [9]. Соответствующие решения получены и исследованы в работах [4, 5].

Предположим теперь, что конвективный перенос сопоставим или превосходит по интенсивности турбулентное перемешивание. Если в этом случае рассматривать задачу (1), (2) как нестационарную, то дифференциальный оператор в левой части уравнения (1) в общем случае перестает быть оператором Штурма – Лиувилля [11].

Согласно методу Фурье [11], в данной ситуации допустимо существование так называемого весового множителя $g(z)$, при умножении на который обеих частей уравнения (1) соответствующий дифференциальный оператор вновь становится оператором Штурма – Лиувилля, а система собственных функций этого оператора является ортогональной с «весом» $g(z)$. Таким образом, задача (1), (2) может быть решена методом Фурье и в указанном случае.

Однако построенная модель допускает упрощение. Рассмотрим задачу (1), (2) в стационарной форме, основываясь на том, что время установления поля 250 с, что существенно меньше времени протекания остальных атмосферных процессов [3]. Проводимость приземного слоя также будем считать постоянной.

При указанных предположениях общий вид уравнения плотности полного тока в конвективно-турбулентном приземном слое в стационарном случае будет иметь вид

$$-\varepsilon_0 D_T(t, z) \frac{\partial^2 E}{\partial z^2} + \varepsilon_0 V(z) \frac{\partial E}{\partial z} + \lambda E = j(t). \quad (4)$$

Последовательно рассмотрим различные случаи соотношения и представления конвективного и турбулентного факторов в предлагаемой модели.

Конвективно-неустойчивый приземный слой

1. Проанализируем случай, когда конвективный перенос преобладает над турбулентным перемешиванием, т.е. $V \gg D$. Положим в (4) $D_T = 0$. При этом будем предполагать, что конвективные процессы проходят равномерно в пределах электродного приземного слоя, что соответствует условию $V(z) = V_0 = const$. Плотность тока принимаем постоянной в пределах электродного слоя ($j = j_0$). Тогда уравнение полного тока (3) примет вид

$$\varepsilon_0 V_0 \frac{dE}{dz} + \lambda E = j. \quad (5)$$

Задача сведена к обыкновенному дифференциальному уравнению первого порядка относительно неизвестной функции напряженности электрического поля.

В качестве граничного условия выбираем условие на верхней границе $E|_{z=L} = j_0 / \lambda$.

Решение уравнения (5) представляется соотношением $E(z) = \frac{j}{L\lambda} e^{\lambda \varepsilon_0 V_0 (L-z)} \cdot z$.

На рис. 1 построены профили напряженности электрического поля ($j = 3 \cdot 10^{-12} \text{ A/m}^2$, $\lambda = 12 \cdot 10^{-15} \text{ См/м}$, $L = 10 \text{ м}$) при постоянной скорости конвективного переноса $V_0 = -0,01 \text{ м/с}$ и различных значениях E_0 и V_0 .

Представленные профили для трех случаев интенсивности поля приповерхностного слоя подтверждают характерный выход функции напряженности электрического поля на стационарные значения при приближении к верхней границе электродного слоя. При увеличении интенсивности электрического поля возрастает величина соотношения E/E_0 на одинаковых по высоте уровнях.

2. Рассмотрим зависимость скорости конвекции от высоты внутри электродного слоя [3]:

$$V(z) = V_1 \frac{z}{l} \left(1 - \frac{z}{l} \right).$$

Условие $D_T = 0$ по-прежнему сохраняем. В этом случае уравнение (4) принимает вид

$$\varepsilon_0 V_1 \frac{z}{l} \left(1 - \frac{z}{l} \right) \frac{dE}{dz} + \lambda E = j_0. \quad (6)$$

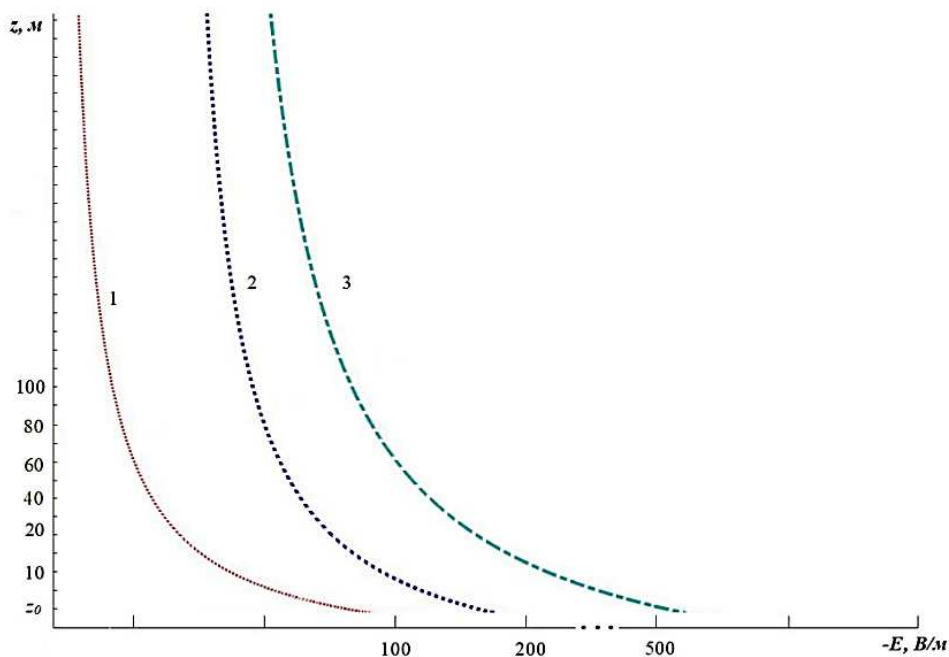


Рис. 1. Профили электрического поля при постоянной скорости конвективного переноса: 1 – $E_0 = -100$ В/м; 2 – $E_0 = -200$ В/м; 3 – $E_0 = -500$ В/м / Fig. 1. Electric field profiles at a constant rate of convective transfer: 1 - $E_0 = -100$ V/m; 2 - $E_0 = -200$ V/m; 3 - $E_0 = -500$ V/m

Уравнение (6) также является обыкновенным дифференциальным уравнением с разделяющимися переменными и допускает решение вида $E(z) = E_0 \left(\frac{L-z_0}{z_0} \right)^{\frac{\lambda L}{\epsilon_0 V_1}} \left(\frac{L-z}{z} \right)^{-\frac{\lambda L}{\epsilon_0 V_1}} + \frac{j_0}{\lambda}$.

Профили напряженности электрического поля ($j = 3 \cdot 10^{-12}$ А/м², $\lambda = 12 \cdot 10^{-15}$ См/м, $L = 10$ м) при переменной скорости конвективного переноса ($V_1 = -0,01$ м/с) приведены на рис. 2. Их анализ, соответствующий переменной конвекции для трех случаев напряженности поля, показывает, что рассмотренная зависимость скорости от координаты приводит к усилению обратной зависимости E от координаты, что проявляется в ускоренном, по сравнению со случаем постоянной скорости, выходе напряженности электрического поля на свои стационарные значения при снижении высоты.

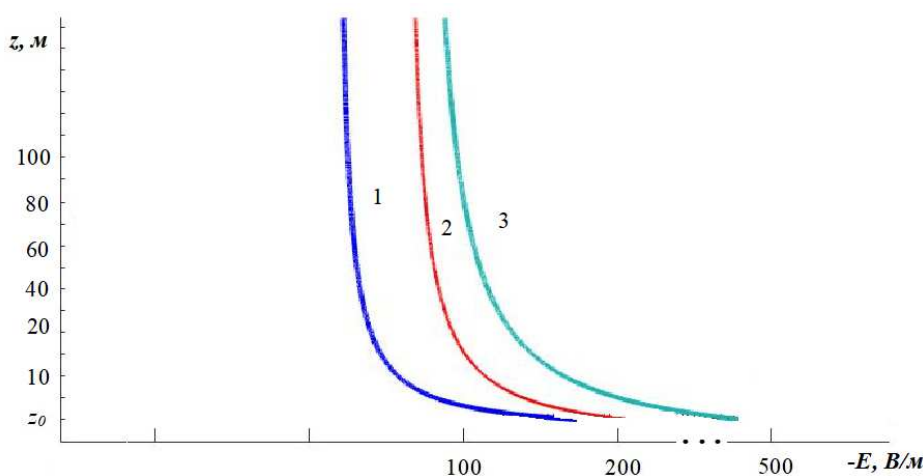


Рис. 2. Профили электрического поля при переменной скорости конвективного переноса: 1 – $E_0 = -100$ В/м; 2 – $E_0 = -200$ В/м; 3 – $E_0 = -500$ В/м / Fig. 2. Electric field profiles at a constant rate of convective transfer: 1 - $E_0 = -100$ V/m; 2 - $E_0 = -200$ V/m; 3 - $E_0 = -500$ V/m

Турбулентный приземный слой

Рассмотрим случай, когда турбулентный перенос преобладает над конвективным, и при этом коэффициент турбулентной диффузии является функцией высоты: $D(z) = D_1 z$. Уравнение (1)

принимает вид $-\varepsilon_0 D_1 z \frac{d^2 E}{dz^2} + \lambda E = j_0$, а граничные условия сохраняют форму (2). Решение этого уравнения может быть найдено в виде степенного ряда [10] функции напряжённости электрического поля относительно высоты:

$$E(z) = \sum_{k=1}^{\infty} E_0 e^{-\frac{(k+3)\varepsilon_0 D_1}{\lambda z_0} \left(\frac{z}{z_0}\right)^{3k}} + \frac{j_0}{\lambda}.$$

Профили напряжённости электрического поля ($D_1 = 0,01 \text{ м/с}$, $j = 3 \cdot 10^{-12} \text{ А/м}^2$, $\lambda = 12 \cdot 10^{-15} \text{ См/м}$, $L = 10 \text{ м}$, $k=3$) для различных значений начальных условий приведены на рис. 3.

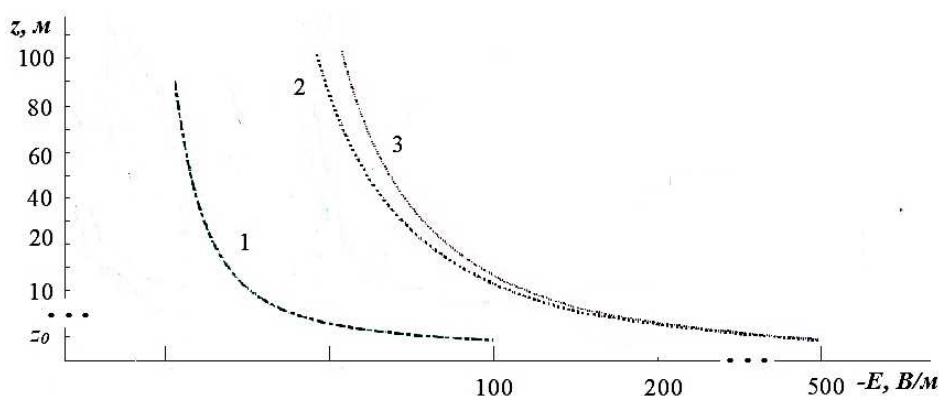


Рис. 3. Профили электрического поля в турбулентном приземном слое при постоянном коэффициенте переноса: 1 – $E_0 = -100 \text{ В/м}$; 2 – $E_0 = -200 \text{ В/м}$; 3 – $E_0 = -500 \text{ В/м}$ / Fig. 3. Electric field profiles in a turbulent surface layer at a constant transfer coefficient: 1 - $E_0 = -100 \text{ V/m}$; 2 - $E_0 = -200 \text{ V/m}$; 3 - $E_0 = -500 \text{ V/m}$

Переменный характер коэффициента турбулентной диффузии приводит к еще более существенным искажениям в поведении напряжённости электрического поля с ростом высоты, так как происходит функциональный рост значений коэффициента турбулентной диффузии.

Турбулентно-конвективный приземный слой

1. Рассмотрим случай, когда коэффициент турбулентной диффузии ($D(z) = D_0 = const$) и скорость конвективного переноса ($V(z) = V_0 = const$) имеют соизмеримые значения.

Уравнение (4) примет вид $-\varepsilon_0 D_0 \frac{d^2 E}{dz^2} + \varepsilon_0 V_0 \frac{dE}{dz} + \lambda E = j_0$, а граничные условия сохранятся в форме соотношений (2). Из уравнения (6) получаем зависимость напряжённости электрического поля от высоты:

$$E(z) = \frac{(E_0 - j_0/\lambda)}{e^{k_2 z_0} - e^{(-k_2)L + k_2 z_0}} e^{k_2 z} + j_0/\lambda, \quad k_2 = \frac{-\varepsilon_0 V_0 + \sqrt{(\varepsilon_0 V_0)^2 + 4\varepsilon_0 D_0 \lambda}}{-2\varepsilon_0 D_0}.$$

Профили напряжённости электрического поля при постоянных коэффициентах турбулентного и конвективного переносов ($V_0 = 0,01 \text{ м/с}$, $D_0 = 0,01 \text{ м/с}$, $j = 3 \cdot 10^{-12} \text{ А/м}^2$, $\lambda = 12 \cdot 10^{-15} \text{ См/м}$, $L = 10 \text{ м}$) приведены на рис. 4.

Учет турбулентности наряду с конвекцией приводит к заметным искажениям значений электрического поля с увеличением высоты z , что проявляется в росте величины $E(z)/E_0$ с ростом поля E_0 .

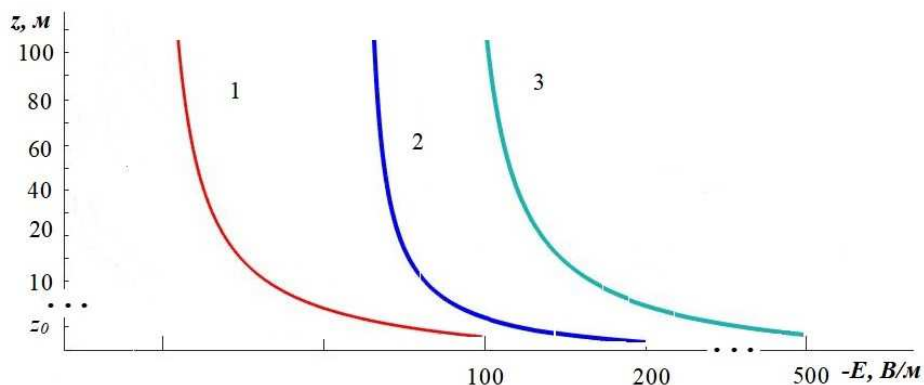


Рис. 4. Профили электрического поля в конвективно-турбулентном приземном слое: 1 – $E_0 = -100$ В/м; 2 – $E_0 = -200$ В/м; 3 – $E_0 = -500$ В/м / Fig. 4. Profiles of the electric field in the convective-turbulent surface layer: 1 - $E_0 = -100$ V/m; 2 - $E_0 = -200$ V/m; (3) $E_0 = -500$ V/m

2. Рассмотрим модель, описывающую одновременное влияние на поведение напряженности электрического поля турбулентных и конвективных процессов. В качестве законов, регулирующих поведение соответствующих коэффициентов, примем следующие:

$$D(z) = D_1 z, \quad V(z) = V_1 \frac{z}{l} \left(1 - \frac{z}{l} \right). \quad (7)$$

В этом случае уравнение (4) принимает вид $-\varepsilon_0 D_1 z \frac{d^2 E}{dz^2} + \varepsilon_0 V_1 \frac{z}{l} \left(1 - \frac{z}{l} \right) \frac{dE}{dz} + \lambda E = j_0$, а граничные условия сохраняют форму (2).

Решением уравнения (7) является степенной ряд [11] для профиля напряженности электрического поля:

$$E(z) = \sum_{k=1}^{\infty} E_0 e^{-\frac{(k+3)\varepsilon_0(D_1+V_1)}{\lambda z_0} \left(\frac{z}{z_0} \right)^{3k+2}} + \frac{j_0}{\lambda}.$$

Распределение напряженности электрического поля по высоте ($V_1 = 0,01$ м/с, $D_1 = 0,01$ м/с, $j = 3 \cdot 10^{-12}$ А/м², $\lambda = 12 \cdot 10^{-15}$ См/м, $L = 10$ м, $k=3$) приведено на рис. 5.

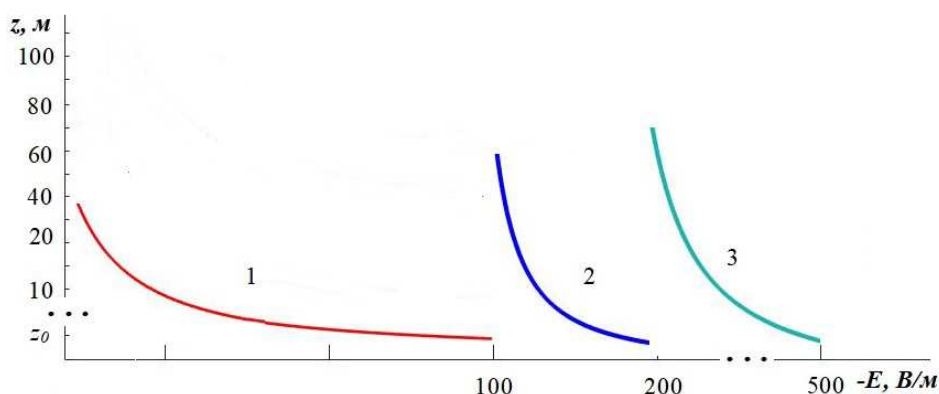


Рис. 5. Профили электрического поля в конвективно-турбулентном приземном слое при переменных коэффициентах переноса: 1 – $E_0 = -100$ В/м; 2 – $E_0 = -200$ В/м; 3 – $E_0 = -500$ В/м / Fig. 5. Electric field profiles in the convective-turbulent surface layer with variable transfer coefficients: 1 - $E_0 = -100$ V/m; 2 - $E_0 = -200$ V/m; 3 - $E_0 = -500$ V/m

Профили, представленные на рис. 5, показывают, что эффект искажения значений напряженности электрического поля сглаживается (по сравнению с рис. 4), что может объясняться действием функции конвективного переноса.

Заключение

Построены и исследованы электродинамические модели приземного слоя атмосферы, учитывающие процессы турбулентного и конвективного переносов как по отдельности, так и при совместном действии. При этом учтен постоянный и функциональный характер указанных параметров. Для всех рассмотренных случаев получены точные или приближенные решения уравнения полного тока, описывающие поведение профиля напряженности электрического поля в приземном слое. Результаты анализа показывают необходимость дальнейшего более детального изучения влияния совокупности метеорологических факторов на электрическое поле вблизи поверхности земли.

Список источников

1. Морозов В.Н., Куповых Г.В. Математическое моделирование глобальной атмосферной электрической цепи и электричества приземного слоя. СПб.: Астерион, 2017. 307 с.
2. Куповых Г.В., Морозов В.Н., Шварц Я.М. Теория электродного эффекта в атмосфере. Таганрог: Изд-во ТРТУ, 1998. 123 с.
3. Куповых Г.В. Электродинамические процессы в приземном слое атмосферы. Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2009. 114 с.
4. Аджиев А.Х., Клово А.Г., Кудринская Т.В., Куповых Г.В., Тимошенко Д.В. Суточные вариации электрического поля в приземном слое атмосферы // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2021. Т. 57, № 4. С. 452–461.
5. Куповых Г.В., Тимошенко Д.В., Клово А.Г., Кудринская Т.В. Влияние электродного эффекта на суточные вариации электрического поля атмосферы в приземном слое // Оптика атмосферы и океана. 2023. Т. 36, № 10. С. 834–838.
6. Mauchly S.J. Studies in atmosphere electricity based on observations made on the Carnegie (1915-1921) // Researches of the Department of Terrestrial Magnetism. Washington: Carnegie Institution, 1926. № 175. P. 385–424.
7. Harrison R.G. The Carnegie curve // Surveys in Geophysics. 2013. Vol. 34 (2). P. 209–232.
8. Редин А.А., Куповых Г.В., Болдырев А.С. Электродинамическая модель конвективно-турбулентного приземного слоя атмосферы // Изв. вузов. Радиофизика. 2013. Т. 56, № 11–12. С. 820–828.
9. Белоусова О.В., Тимошенко Д.В., Куповых Г.В. Математическое моделирование электрической структуры турбулентно-конвективного приземного слоя // Радиотехн. и телекоммун. системы. 2023. № 3. С. 12–18.
10. Куповых Г.В., Белоусова О.В., Тимошенко Д.В., Клово А.Г., Кудринская Т.В. Электродинамическая модель турбулентно-конвективного приземного слоя: приближенные аналитические решения // Материалы IX Всерос. науч. конф. по атмосферному электричеству. СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2023. С. 488–496.
11. Тихонов А.Н., Самарский А.А. Уравнения математической физики. 6-е изд. М.: Изд-во МГУ, 1999. 736 с.

References

1. Morozov V.N., Kupovykh G.V. *Mathematical modeling of the global atmospheric electric circuit and electricity of the surface layer*. St. Petersburg: Asterion Publ.; 2017. 307 p. (In Russ.).
2. Kupovykh G.V., Morozov V.N., Schwartz Ya.M. *Theory of the electrode effect in the atmosphere*. Taganrog: TRTU Press; 1998. 123 p. (In Russ.).
3. Kupovykh G.V. *Electrodynamic processes in the surface layer of the atmosphere*. Taganrog: TTI SFU Press; 2009. 114 p. (In Russ.).
4. Adzhiev A.H., Klovo A.G., Kudrinskaya T.V., Kupovykh G.V., Timoshenko D.V. Diurnal variations of the electric field in the surface layer of the atmosphere. *Izv. RAN. Fizika atmosfery i okeana = Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Atmospheric and Oceanic Physics*. 2021;57(4):452-461. (In Russ.).
5. Kupovykh G.V., Timoshenko D.V., Klovo A.G., Kudrinskaya T.V. Influence of the electrode effect on daily variations of the atmospheric electric field in the surface layer. *Optika atmosfery i okeana = Optics of the Atmosphere and Ocean*. 2023;36(10):834-838. (In Russ.).
6. Mauchly S.J. Studies in atmospheric electricity based on observations made on the Carnegie (1915-1921). *Research of the Department of Terrestrial Magnetism*. Washington: Carnegie Institution Press; 1926;(175):385-424.
7. Harrison R.G. The Carnegie curve. *Surveys in Geophysics*. 2013;34(2):209-232.

8. Redin A.A., Kupovykh G.V., Boldyrev A.S. Electrodynamic model of convective-turbulent surface layer of the atmosphere. *Izv. vuzov. Radiofizika = University Proceedings. Radiophysics*. 2013;56(11-12):820-828. (In Russ.).

9. Belousova O.V., Timoshenko D.V., Kupovykh G.V. Mathematical modeling of the electrical structure of a turbulent-convective surface layer. *Radiotekhn. i telekommun. sistemy = Radio Engineering and Telecommunication Systems*. 2023;(3):12-18. (In Russ.).

10. Kupovykh G.V., Belousova O. V., Timoshenko D. V., Klovo A.G., Kudrinskaya T. V. Electrodynamic model of a turbulent-convective surface layer: approximate analytical solutions. *Proceedings of the IX All-Russian Scientific Conference on Atmospheric Electricity*. St. Petersburg: Mozhaisky MSA Press; 2023:488-496. (In Russ.).

11. Tikhonov A.N., Samarsky A.A. *Equations of mathematical physics*. 6th ed. Moscow: Moscow State University Press; 1999. 736 p. (In Russ.).

Информация об авторах

О.В. Белоусова – ассистент, кафедра физико-математических основ инженерного образования, Инженерно-технологическая академия.

Д.В. Тимошенко – кандидат физико-математических наук, доцент, кафедра физико-математических основ инженерного образования, Инженерно-технологическая академия.

Г.В. Куповых – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой физико-математических основ инженерного образования, Инженерно-технологическая академия.

Information about the authors

O.V. Belousova - Assistant, Department of Physics and Mathematics Fundamentals of Engineering, Academy of Engineering and Technology.

D.V. Timoshenko - Candidate of Science (Physics and Mathematics), Associate Professor, Department of Physics and Mathematics Fundamentals of Engineering, Academy of Engineering and Technology.

G.V. Kupovykh - Doctor of Science (Physics and Mathematics), Professor, Head of Department of Physics and Mathematics Fundamentals of Engineering, Academy of Engineering and Technology.

*Статья поступила в редакцию 20.12.2023; одобрена после рецензирования 15.02.2024; принята к публикации 24.05.2024.
The article was submitted 20.12.2023; approved after reviewing 15.02.2024; accepted for publication 24.05.2024.*

Научная статья
УДК 631.425
doi: 10.18522/1026-2237-2024-2-66-71

СОДЕРЖАНИЕ И ЗАПАСЫ ПОДВИЖНЫХ ФОРМ ФОСФОРА В ПОСТАГРОГЕННЫХ ПОЧВАХ ПРИМОРСКОГО КРАЯ

Максим Леонидович Бурдуковский

Федеральный научный центр биоразнообразия наземной биоты Восточной Азии ДВО РАН,
Владивосток, Россия
mburdukovskii@gmail.com

Аннотация. Почвы юга Дальнего Востока характеризуются низким содержанием подвижных форм фосфора при повышенной концентрации его валовых форм. Цель данной работы состоит в изучении динамики содержания подвижных форм фосфора и их запасов в залежных и антропогенно трансформированных агротемногумусовых подбелах юга Приморского края. Работа проведена на залежах 15-, 20-, 35- и 80-летнего возраста. В качестве контроля использовались образцы с пашины. Установлено, что в основном подвижные формы фосфора в почвах аккумулировались в верхнем пахотном горизонте, особенно в варианте современной пашины. В целом в исследуемых почвах содержание подвижных форм фосфора оценивается как очень низкое. В течение изученного постагрогенного периода происходило снижение запасов подвижных форм фосфора по всему почвенному профилю.

Ключевые слова: почвы залежей, фосфор, темногумусовые подбелы, Приморский край

Для цитирования: Бурдуковский М.Л. Содержание и запасы подвижных форм фосфора в постагрогенных почвах Приморского края // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2024. № 2. С. 66–71.

Благодарности: работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № 124012400285-7).

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

Original article

CONTENT AND STOCKS OF MOBILE PHOSPHORUS FORMS IN THE POSTAGROGENIC SOILS OF PRIMORSKY REGION

Maksim L. Burdukovskii

Federal Scientific Center of the East Asia Terrestrial Biodiversity, Far Eastern Branch, Russian Academy
of Science, Vladivostok, Russia
mburdukovskii@gmail.com

Abstract. The soils of the southern Far East are characterized by low levels of mobile phosphorus forms with an elevated concentration of its residual forms. The aim of this work is to study the dynamics of mobile phosphorus forms and their stocks in abandoned and anthropogenically transformed dark-humus podbels in Primorsky region of Russia. The study was conducted on abandoned agricultural fields (15, 20, 35, and 80 years after abandonment). As a reference site, we used samples from arable land. During the study, it was established that predominantly mobile phosphorus forms accumulated in the upper plow layer, especially in the soils of arable land. Overall, the content of mobile phosphorus forms in the studied soils is assessed as very low. Throughout the examined postagrogenic development, there was a decrease in the stocks of mobile phosphorus forms throughout the soil profile.

© Бурдуковский М.Л., 2024

Keywords: fallow soils, phosphorus, dark-humus podbels, Primorsky region

For citation: Burdukovskii M.L. Content and Stocks of Mobile Phosphorus Forms in the Postagrogenic Soils of Primorsky Region. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2024;(2):66-71. (In Russ.).

Acknowledgments: the work was carried out within the framework of the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (topic No. 124012400285-7).

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

Введение

Содержание фосфора в почве является сложным и динамичным процессом, который подвержен влиянию различных факторов природной среды. Фосфатное состояние пахотных земель – важный показатель плодородия и окультуренности пашни. При этом дефицит элемента невозможно восполнить ничем, кроме как с помощью искусственных мер – использования фосфорсодержащих удобрений.

Почвы юга Дальнего Востока характеризуются низким содержанием подвижных форм фосфора при повышенной концентрации его валовых форм, что подтверждается работами многих исследователей [1, 2].

Первые обширные агрохимические обследования земель Приморского края показали, что более 80 % исследуемой территории относится к группам низкой и очень низкой обеспеченности подвижными формами фосфора, составляя 10–25 мг P₂O₅ на 1 кг почвы [3]. В последующий многолетний период химизации в пахотные почвы было внесено значительное количество известковых удобрений, органических и минеральных (преимущественно фосфоритной муки). Данная мера благоприятно сказалась на улучшении фосфатного режима. Однако использование удобрений происходило неравномерно и с разной интенсивностью. В результате возникли значительные различия в обеспеченности почв подвижными формами фосфора: встречаются территории как с избыточным содержанием, так и с явным недостатком элемента в пахотном горизонте.

Цель работы – изучить динамику содержания подвижных форм фосфора и их запасов в залежных и пахотных аллювиально серогумусовых почвах юга Приморского края.

Материалы и методы

Исследование проводилось в Уссурийском городском округе Приморского края (пос. Тимирязевский) в августе 2021 г. Исследуемые почвы классифицируются как агротемногумусовые подбелы [4]. Объектами служили почвы полей, которые в залежном состоянии находились 15, 20, 35 и 80 лет. В прошлом поля использовались под полевые и овощные севообороты.

В Приморском крае темногумусовые подбелы формируются на озерно-аллювиальных отложениях под остепненной разнотравно-злаковой растительностью. Характеризуются тяжелым механическим составом, высокой степенью гумусированности (табл. 1). Широко распространены в пределах Западно-Приморской равнины, а также на территории Среднеамурской равнины в нижнем течении р. Усури. Темногумусовые подбелы имеют высокий балл бонитета, составляют основу фонда агрономически ценной пашни региона (34,5 %).

Исследуемые темногумусовые подбелы расположены в пределах территории стационара ФНЦ агробιοтехнологий Дальнего Востока им. А.К. Чайки. На стационаре введена система севооборотов с опытами по изучению влияния длительного внесения удобрений на почвенные характеристики и урожайность. В качестве контроля использовались образцы с пашни с контрольного варианта опыта (без использования удобрений); возделываемая культура в год исследований – соя. Почву с залежных участков отбирали по горизонтам по профилю разреза и прикопок (по три на каждом поле).

Таблица 1 / Table 1

**Агро- и физико-химические характеристики агротемногумусовых подбелов
/ Agro- and physico-chemical characteristics of agro-dark-humus podbels**

Показатель	Значение
Гумус, %	4,0±0,2
Нобш, %	0,18±0,03
pH KCl	4,3±0,3
K ₂ O ₅ подвижный, мг/кг почвы	179,2±20,0
P ₂ O ₅ подвижный, мг/кг почвы	27,5±2,1
Сумма обменных оснований мг-экв/100 г почвы	14,7±0,5
Плотность, г/см ³	1,1±0,05
Физическая глина, %	54,2±1,73
Физический ил, %	9,0±0,23

Подвижные формы P₂O₅ определяли в 0,2 н солянокислой вытяжке (по методу Кирсанова) колориметрическим методом на КФК-2 (колориметр фотоэлектрический концентрационный) [5].

Запасы подвижных форм P₂O₅ в почвенном горизонте вычислены в кг/га по формуле $Q = m \times h \times dv$, где Q – запасы подвижных форм P₂O₅, кг/га, для почвенного горизонта h ; m – содержание P₂O₅, мг/кг; h – мощность горизонта, см; dv – плотность сложения почвенного горизонта, г/см³.

Все определения выполнены в трехкратной повторности. Оценка содержания элемента в почве проводилась по шкале, разработанной В.И. Ознобихиным и Э.П. Синельниковым для почв Приморского края [6].

При обработке данных применяли общепринятые статистические методы с использованием программы Statistica v.13.

Анализ образцов проходил в специализированной лаборатории, на технической базе Центра коллективного пользования биотехнологии и генетической инженерии (ФНЦ биоразнообразия ДВО РАН).

Результаты и обсуждение

В ходе исследования было установлено, что в основном подвижные формы P₂O₅ в почвах аккумулировались в верхнем пахотном горизонте, особенно в варианте современной пашни (табл. 2). Поскольку контрольный вариант полевого опыта не подразумевает использования удобрений, ежегодная распашка почвы могла привести к изменению интенсивности микробиологических процессов, влияющих на активизацию перехода фосфатов в подвижные формы [7].

При сравнении показателей контроля с залежными аналогами установлено, что именно пахотный горизонт являлся основным источником подвижных форм P₂O₅ [8–10] – на протяжении изученного хронорядя содержание фосфатов снижается. Конкретные причины этого трудно объяснить. Возможно, под воздействием биологических факторов почва стремится к равновесному состоянию и подвижные формы фосфора стали трансформироваться в малоподвижные [11]. Также можно предположить, что смена растительности повлияла на истощение и миграцию подвижных форм элемента за пределы почвенного слоя [12]. Полученные результаты соотносятся с данными исследований других авторов, отмечающих снижение содержания подвижных форм P₂O₅ в почве в первые годы после вывода полей из сельскохозяйственной практики [13, 14].

При этом высокое содержание подвижных форм P₂O₅ отмечено и в бывшем пахотном горизонте 80-летней залежи. В данном случае накопление можно объяснить процессом образования дернины. Известно, что деятельность корневых систем растений способствует поступлению фосфора в верхний горизонт [10]. В зрелой залежи данный горизонт отчетливо выделялся морфологически. А ежегодное поступление и разложение косимого опада дополнительно способствовали биогенной аккумуляции элементов минерального питания в корнеобитаемом слое посредством повышенной микробиологической активности [7].

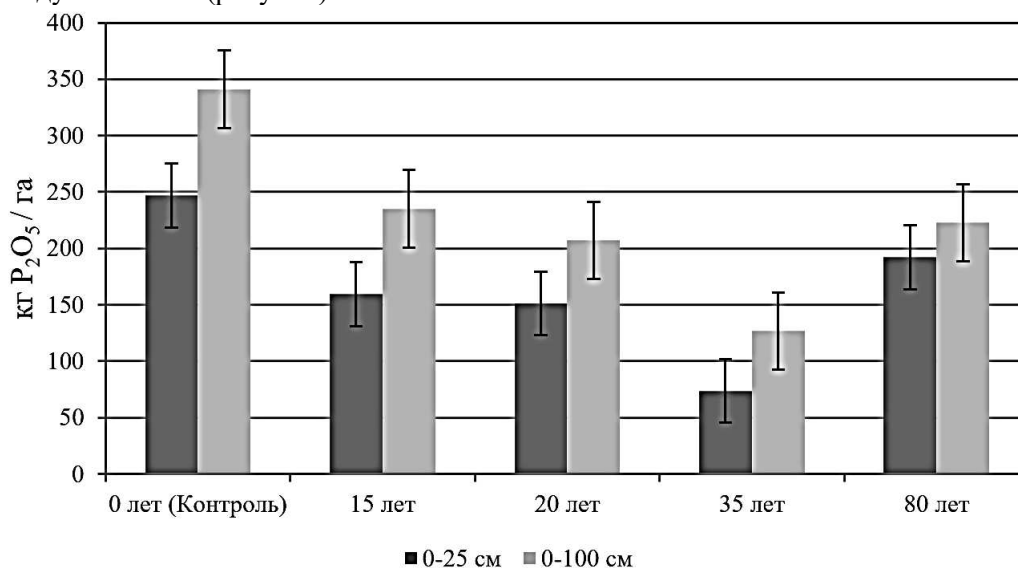
Таблица 2 / Table 2

**Содержание подвижных форм фосфора в агротемногумусовых подбелах
 / Content of mobile phosphorus form in agro-dark-humus podbels**

Возраст залежи, лет	Горизонт	Глубина, см	P ₂ O ₅ , мг/кг
0 (пашня)	PU	0–27	10,39±2,65
	ELnn	27–42	5,24±0,19
	BTnn, g	42–91	0,02±0,01
	G	91–132	следы
15	PU	0–15	8,33±1,28
	PU–ELnn	15–25	3,02±0,08
	ELnn	25–50	1,05±0,03
	BTnn, g	50–90	следы
20	BTnn	0–15	7,61±1,11
	PU–ELnn	15–25	2,23±0,07
	ELnn	25–50	1,02±0,01
	BTnn	50–90	следы
35	PU	0–15	6,47±1,32
	PU–ELnn	15–25	2,36±0,08
	ELnn	25–50	0,90±0,02
	BTnn, g	50–90	следы
80	PU	4–11	10,53±2,44
	PU–ELnn	11–35	3,40±0,09
	ELnn	35–55	1,36±0,04
	BTnn	55–111	следы

Почвы Дальнего Востока в основном характеризуются высоким содержанием валовых форм фосфора при низком содержании его подвижных форм [1, 2]. Часто подвижные формы P₂O₅ аккумулируются только в пределах верхнего (пахотного) горизонта, практически исчезая в горизонтах нижележащих [11, 13]. Это связано с тем, что у фосфора – низкая способность к миграции из-за быстрой абиотической фиксации элемента в труднорастворимых минеральных соединениях [14]. В Дальневосточном регионе на низкое содержание подвижных форм P₂O₅ влияет и процесс конкрециобразования, в результате которого элемент переходит в недоступное фиксированное состояние – железомарганцевые конкреции [15–17]. В исследуемых почвах содержание подвижных форм P₂O₅ оценивается как очень низкое.

Максимальные запасы подвижных форм P₂O₅ выявлены в пахотном и подпахотном горизонтах исследуемых почв (рисунок).



Запасы подвижных форм фосфора в агротемногумусовых подбелах, кг P₂O₅/га
 / Stocks of mobile phosphorus form in agro-dark-humus podbels, kg P₂O₅/ha

В течение постагрогенного периода происходило значительное снижение запасов подвижных форм P_2O_5 по всему почвенному профилю. Наименьшими запасами характеризуются 35-летние залежные участки, составляя $73,7 \pm 4,5$ кг/га в верхнем горизонте и $126 \pm 7,1$ кг/га в толще 0–100 см.

Заключение

Изменение условий функционирования агроценозов и перевод их в залежное состояние приводят к снижению содержания подвижных фосфатов в почве. При условии отсутствия интенсивного окультуривания с использованием удобрений содержание подвижных форм P_2O_5 в агротемногумусовых подбелах оценивается как очень низкое. Запасы подвижных форм P_2O_5 устойчиво снижались в течение исследованного периода постагрогенеза. Так, в 35-летних залежах запасы в толще 0–100 см составляют 126 кг/га, что в 2,7 раза меньше, чем в почве современной пашни. В 80-летних, за счет процесса задерновывания, большого поступления опада и повышенной микробиологической активности, запасы составили 222,8 кг/га, однако эта величина также ниже величины контрольного варианта в 1,5 раза. Результаты исследования могут служить основой для эффективного использования темногумусовых подбелов в системе сельскохозяйственной отрасли.

Список источников

1. Синельников Э.П., Слабко Ю.И. Агрогенезис почв Приморья. М.: ГНУ ВНИИА, 2005. 280 с.
2. Ивлев А.М., Дербенцева В.И., Голов В.И., Трегубова В.Г. Агрохимия почв юга Дальнего Востока. М.: Круглый год, 2001. 104 с.
3. Стрельченко Н.Е. Фосфатный режим переувлажненных почв Дальнего Востока. Владивосток: Дальневост. кн. изд-во, 1982. 143 с.
4. Шишов Л.Л., Тонконогов В.Д., Лебедева И.И., Герасимова М.И. Классификация и диагностика почв России. Смоленск: Ойкумена, 2004. 342 с.
5. Аринушкина Е.В. Руководство по химическому анализу почв. М.: МГУ, 1970. 488 с.
6. Ознобихин В.И., Синельников Э.П. Характеристика основных свойств почв Приморского края и пути их рационального использования. Уссурийск: Изд-во Приморского СХИ, 1985. 72 с.
7. Kuznetsova I.V., Tikhonravova P.I., Bondarev A.G. Changes in the properties of cultivated gray forest soils after their abandoning // Eurasian Soil Sci. 2009. № 9. P. 1062–1070.
8. Compton J.E., Boone R. Long-term impacts of agriculture on soil carbon and nitrogen in New England forests // Ecology. 2000. Vol. 81, № 8. P. 2314–2330.
9. Smal H., Olszewska M. The effect of afforestation with Scots pine (*Pinus silvestris* L.) of sandy post-arable soils on their selected properties. II. Reaction, carbon, nitrogen and phosphorus // Plant Soil. 2008. Vol. 305. P. 171–187.
10. Telesnina V.M., Vaganov I.E., Karlisen A.A., Ivanova A.E., Zhukov M.A., Lebedev S.M. Specific features of the morphology and chemical properties of coarse-textured postagrogenic soils of the southern taiga, Kostroma Oblast // Eurasian Soil Sci. 2016. Vol. 49, № 1. P. 102–115.
11. Афанасьев Р.А., Мёрзлая Г.Е. Динамика подвижных форм фосфора и калия в почвах длительных опытов // Докл. РАСХН. 2013. № 3. С. 30–33.
12. Чертов О. Г. Экология лесных земель: почвенно-экологическое исследование лесных местообитаний. Л.: Наука, 1981. 192 с.
13. Kalinina O., Goryachkin S.V., Karavaeva N.A., Lyuri D.I., Najdenko L., Giani L. Self-restoration of post-agrogenic sandy soil in the southern Taiga of Russia: Soil development, nutrient status, and carbon dynamics // Geoderma. 2009. Vol. 152 (1–2). P. 35–42.
14. Brogowski Z., Chojnicki J. Distribution of phosphorus in granulometric fractions of cambisol developed from morainic loam // J. Elementol. 2020. Vol. 25, № 1. P. 181–191.
15. Сычѳв В.Г., Куртичников Н.А. Приемы оптимизации фосфатного режима почв в агротехнологиях. М.: ВНИИА, 2009. 176 с.
16. Иванов Г.И. Почвообразование на юге Дальнего Востока. М.: Наука, 1976. 200 с.
17. Gasparatos D., Massas I., Godelitsas A. Fe-Mn concretions and nodules formation in redoximorphic soils and their role on soil phosphorus dynamics: Current knowledge and gaps // Catena. 2019. № 182. P. 104106.

References

1. Sinelnikov E.P., Slabko Yu.I. *Agrogenesis of the soils of Primorye*. Moscow: Pryanishnikov All-Russian Research Institute of Agrochemistry Press; 2005. 280 p. (In Russ.).
2. Ivlev A.M., Derbentseva V.I., Golov V.I., Tregubova V.G. *Agrochemistry of soils of the South of the Far East*. Moscow: Kruglyi god Publ.; 2001. 104 p. (In Russ.).
3. Strelchenko N.E. *The phosphate regime of waterlogged soils of the Far East*. Vladivostok: Far Eastern Publishing House; 1982. 143 p. (In Russ.).
4. Shishov L.L., Tonkonogonov V.D., Lebedeva I.I., Gerasimova M.I. *Classification and diagnosis of soils of Russia*. Smolensk: Oikumena Publ.; 2004. 342 p. (In Russ.).
5. Arinushkina E.V. *A guide in chemical analysis of soils*. Moscow: Moscow State University Press; 1970. 488 p. (In Russ.).
6. Oznobikhin V.I., Sinelnikov E.P. *Characterization of the main properties of the soils of the Primorsky Territory and the way of their rational use*. Ussuriysk: Maritime State Agricultural Academy Press; 1985. 72 p. (In Russ.).
7. Kuznetsova I.V., Tikhonravova P.I., Bondarev A.G. Changes in the properties of cultivated gray forest soils after their abandoning. *Eurasian Soil Sci.* 2009;(9):1062-1070.
8. Compton J.E., Boone R. Long-term impacts of agriculture on soil carbon and nitrogen in New England forests. *Ecology.* 2000;81(8):2314-2330.
9. Smal H., Olszewska M. The effect of afforestation with Scots pine (*Pinus silvestris* L.) of sandy post-arable soils on their selected properties. II. Reaction, carbon, nitrogen and phosphorus. *Plant Soil.* 2008;305:171-187.
10. Telesnina V.M., Vaganov I.E., Karlsen A.A., Ivanova A.E., Zhukov M.A., Lebedev S.M. Specific features of the morphology and chemical properties of coarse-textured postagrogenic soils of the southern taiga, Kostroma Oblast. *Eurasian Soil Sci.* 2016;49(1):102-115.
11. Afanasyev R.A., Merzlaya G.E. The dynamics of mobile forms of phosphorus and potassium in the soils of long-term experiments. *Dokl. RASKhN = Reports of the Russian Academy of Agricultural Sci.* 2013;(3):30-33. (In Russ.).
12. Chertov O.G. *Ecology of forest lands. Soil-ecological study of forest habitats*. Leningrad: Nauka Publ.; 1981. 192 p. (In Russ.).
13. Kalinina O., Goryachkin S.V., Karavaeva N.A., Lyuri D.I., Najdenko L., Giani L. Self-restoration of post-agrogenic sandy soil in the southern Taiga of Russia: Soil development, nutrient status, and carbon dynamics. *Geoderma.* 2009;152(1-2):35-42.
14. Brogowski Z., Chojnicki J. Distribution of phosphorus in granulometric fractions of cambisol developed from morainic loam. *J. Elementol.* 2020;25(1):181-191.
15. Sychev V.G., Kirpichnikov N.A. *Techniques for optimizing the phosphate soil regime in agricultural technology*. Moscow: Pryanishnikov All-Russian Research Institute of Agrochemistry Press; 2009. 176 p. (In Russ.).
16. Ivanov G.I. *Soil formation in the south of the Far East*. Moscow: Nauka Publ.; 1976. 200 p. (In Russ.).
17. Gasparatos D., Massas I., Godelitsas A. Fe-Mn concretions and nodules formation in redoximorphic soils and their role on soil phosphorus dynamics: Current knowledge and gaps. *Catena.* 2019;182:104106.

Информация об авторе

М.Л. Бурдуковский – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, лаборатория почвоведения и экологии почв.

Information about the author

M.L. Burdukovskii - Candidate of Science (Biology), Senior Researcher, Laboratory of Soil Science and Soil Ecology.

Статья поступила в редакцию 13.02.2024; одобрена после рецензирования 15.05.2024; принята к публикации 24.05.2024.
The article was submitted 13.02.2024; approved after reviewing 15.05.2024; accepted for publication 24.05.2024.

Научная статья
УДК 631.459.21:632.125
doi: 10.18522/1026-2237-2024-2-72-83

ПРОГНОЗ РАЗВИТИЯ ПРОЦЕССОВ ДЕГРАДАЦИИ НА ЭРОЗИОННО ОПАСНЫХ СКЛОНАХ ЧЕРНОЗЕМОВ ОБЫКНОВЕННЫХ РОСТОВСКОЙ ОБЛАСТИ

Эмма Анатольевна Гаевая^{1✉}, Ольга Степановна Безуглова²

^{1,2}Федеральный Ростовский аграрный научный центр, п. Рассвет, Россия

¹emmaksay@inbox.ru✉

²lola314@mail.ru

Аннотация. Снижение почвенного плодородия в последние десятилетия повлекло за собой ряд проблем в земледелии. Распространение процессов деградации вынуждает использовать современные методы моделирования и прогнозирования эрозии. Целью данной работы было составление долгосрочного прогноза процессов деградации черноземов обыкновенных на склоновых землях в севооборотах различных конструкций и при использовании различных агротехнологий с помощью автоматизированных нейронных сетей. Исследования были проведены в многофакторном длительном опыте, который расположен на склоне балки Большой Лог, в 1990–2022 гг. Севообороты были заложены в 1986 г. в системе контурно-ландшафтной организации территории склона крутизной до 3,5–4°. Изучались севообороты с различным соотношением доли чистого пара и многолетних трав в структуре посевов, а также две системы обработки почвы. В результате исследований был составлен прогноз на 100 лет с использованием автоматизированных нейронных сетей, который выявил общую тенденцию затухания процессов эрозии на склонах, но с различной степенью интенсивности как в севооборотах различной конструкции, так и при использовании различных агротехнологий возделывания сельскохозяйственных культур. Возделывание культур в севооборотах с различной долей от 20 до 40 % многолетних трав в структуре посевных площадей сокращает сток талых и ливневых вод на 22,9–24,9 %, смыв почвы – на 26,4–28,6 %, а в отдельных случаях – полностью. Применение почвозащитной обработки сократит сток талых и ливневых вод на 39,2–72,0 %, а смыв – на 41,5 %.

Ключевые слова: прогноз, автоматизированные нейронные сети, сток, смыв, севооборот, способ обработки почвы

Для цитирования: Гаевая Э.А., Безуглова О.С. Прогноз развития процессов деградации на эрозионно опасных склонах черноземов обыкновенных Ростовской области // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2024. № 2. С. 72–83.

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

Original article

FORECAST OF THE DEVELOPMENT OF DEGRADATION PROCESSES ON EROSION-HAZARDOUS SLOPES OF ORDINARY CHERNOZEMS OF THE ROSTOV REGION

Emma A. Gaevaya^{1✉}, Olga S. Bezuglova²

^{1,2}Federal Rostov Agricultural Research Centre, Rassvet, Russia

¹emmaksay@inbox.ru✉

²lola314@mail.ru

© Гаевая Э.А., Безуглова О.С., 2024

Abstract. *The decline in soil fertility in recent decades has led to a number of problems in agriculture. The spread of degradation processes forces the use of modern methods of modeling and forecasting erosion. The purpose of this work was to make a long-term forecast of the degradation processes of ordinary chernozems on sloping lands in crop rotations of various designs and using various agricultural technologies using automated neural networks. The research was conducted in a multifactorial long-term experiment, which is located on the slope of the Bolshoy Log beam, in 1990-2022. The experience was laid down in 1986 in the system of contour and landscape organization of the slope area with a steepness of up to 3.5-4°. In the experiment, crop rotations with a different ratio of the proportion of pure steam and perennial grasses in the structure of crops, as well as two tillage systems, were studied. As a result of the research, a forecast was made for a hundred years ahead using automated neural networks, which revealed a general trend of attenuation of erosion processes on slopes, but with varying degrees of intensity, both in crop rotations of various designs and when using various agricultural technologies for cultivating crops. Cultivation of crops in crop rotations with a different proportion from 20 to 40 % of perennial grasses in the structure of sown areas reduces the runoff of meltwater and stormwater by 22.9-24.9 %, washing away the soil by 26.4-28.6 %, and in some cases completely, under existing conditions. The use of soil protection treatment will reduce the runoff of meltwater and stormwater by 39.2-72.0 %, and flushing by 41.5 %.*

Keywords: *forecast, automated neural networks, runoff, flushing, crop rotation, method of tillage*

For citation: Gaevaya E.A., Bezuglova O.S. Forecast of the Development of Degradation Processes on Erosion-Hazardous Slopes of Ordinary Chernozems of the Rostov Region. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2024;(2):72-83. (In Russ.).

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

Введение

Проблема почвенного плодородия появилась вместе со сложными процессами освоения земель не сегодня и не вчера. Водная эрозия приводит к деградации земель, которая затрагивает около миллиарда гектаров в мире. Особенно возросла нагрузка на почву в последние десятилетия с внедрением интенсивных систем земледелия, созданием новых сортов, увеличением урожайности сельскохозяйственных культур и процессов деградации [1].

Последствия водной эрозии: снижение плодородия почвы, сокращение роста растительности, заполнение долин и водохранилищ, опустынивание и разрушение инфраструктуры человека, ухудшение качества воды, экономический и экологический ущерб [2].

Повсеместное распространение процессов деградации вынуждает использовать современные методы моделирования и прогнозирования эрозионных процессов. Долгосрочные прогнозы позволяют своевременно проводить комплекс предупредительных мероприятий по защите земель сельскохозяйственного назначения от эрозии, планировать систему лесомелиоративных и агротехнических почвозащитных мероприятий, оптимизировать организацию системы землепользования [3].

При составлении долгосрочных прогнозов с помощью искусственного интеллекта анализируются большие объемы данных, выявляются скрытые закономерности, будущие тенденции и зависимости, что помогает улучшить их точность. Искусственные нейронные сети (ANN) являются полезным инструментом, поскольку они могут иметь дело с нелинейной функциональной регрессией. Использование ANN позволяет сделать долгосрочные прогнозы: развития темпов эрозии [4, 5], моделирования стока [6, 7], качества ливневой воды в городах [8], влияния изменения климата на риск развития эрозии [9], карт оползней и эрозии [10], мониторинга окружающей среды [11], распределения нитратов в грунтовых водах [12] и в стоке из зон землепользования [13], урожайности кукурузы [14], пшеницы и др. [15].

Целью данной работы было составление долгосрочного прогноза процессов деградации черноземов обыкновенных на склоновых землях в севооборотах различных конструкций и при использовании различных агротехнологий с помощью автоматизированных нейронных сетей.

Объект и методы исследования

Исследования были проведены в многофакторном длительном опыте, который расположен на склоне балки Большой Лог Аксайского района Ростовской области в 1990–2022 гг. Площадка была заложена в 1986 г. в системе контурно-ландшафтной организации территории склона крутизной до 3,5–4°, с комплексом гидротехнических приемов и простейших сооружений. Опыт зарегистрирован в российской Географической сети длительных опытов с удобрениями (аттестат № 169).

Почвенный покров участка представлен черноземом обыкновенным карбонатным на лёссовидном суглинке (согласно международной классификации WRB – Calcic Chernozem (Loamic)) [16]. Среднегодовой сток – 20 мм (максимальный – 34,4 мм), среднегодовой смыв почвы – 18,5 т/га (максимальный – 42 т/га), почвенный покров при закладке опыта среднеэродирован.

Исследовали две системы основной обработки почвы: чизельная обработка и отвальная вспашка (контроль), в трех пятипольных севооборотах с разным соотношением чистого пара и многолетних трав. Севооборот А: 20 % чистого пара, 60 % колосовых, 20 % пропашных и 0 % многолетних трав. Севооборот Б: 0 % чистого пара, 60 % колосовых и зернобобовых, 20 % пропашных и 20 % многолетних трав. Севооборот В: 0 % чистого пара, 40 % колосовых, 20 % пропашных и 40 % многолетних трав. Определение смыва и размыва почвы проводили измерением объема водороев по методу В.Н. Дьякова [17].

Составление долгосрочного прогноза было осуществлено с помощью нейросетевых моделей с использованием программы Statistica 13.3 [18] – автоматизированных нейронных сетей (АНС). Тип сети при использовании АНС – многослойный персептрон (MLP). Количество входных нейронов равнялось длине ряда данных, используемых для составления прогноза. Размер подвыборок равнялся: обучающей – 70 %, контрольной – 30 %. Сложность нейронной сети определялась количеством нейронов на внутреннем слое. Число скрытых нейронов на внутреннем слое: минимальных – 2, максимальных – 8. Число обучаемых АНС составляло 50, а сохраняемых сетей АНС – 5 лучших сетей, созданных в процессе обучения. Используемый метод обучения нейронных сетей – алгоритм BFGS (Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno) с применением итерационного алгоритма, который предназначен для решения нелинейных задач с большим количеством неизвестных.

Из построенных 5 АНС были выбраны три сети, которые имели наибольшую обучающую и контрольную производительность и наименьшую ошибку. В качестве меры производительности программы был использован коэффициент корреляции между входными и выходными (предсказанными значениями сети) переменными. Вторым критерием оценки качества построенных нейронных сетей является распределение остатков сети (разность между фактическими и предсказанными значениями) на гистограмме, т.е. расположение блоков должно соответствовать нормальному распределению Гаусса. Еще одним критерием является диаграмма рассеяния фактически наблюдаемых и предсказанных значений, или насколько фактическая функция соответствует прогнозной. Чем лучше между ними соответствие, тем ближе точки ложатся на прямой линии в 45°, которая отображается на графике. В действительности этот график представляет не что иное, как визуализацию коэффициента корреляции, который играет ключевую роль в выборе сетей.

Результаты и обсуждение

Длительные опыты позволяют вести наблюдение в динамике за несколькими показателями одновременно. Проявление процессов эрозии было не каждый год, а только в 22 годах наблюдений из 32, что составило 71 % [19].

Для изучения эрозионной устойчивости склонов за контрольный вариант был взят полевой севооборот А, в структуру посевных площадей которого входило 20 % чистого пара. Эрозионная устойчивость других севооборотов была сопоставлена с севооборотом А. За период исследований наибольший сток зарегистрирован в севообороте А с 20 % чистого пара и без многолетних трав и составлял $22,7 \pm 1,7$ мм ($p < 0,05$). Самый низкий ($9,5 \pm 1,0$ мм; ($p < 0,05$)) – в севообороте В – без чистого пара и с 40 % многолетних трав в структуре посевов. В севообороте В с 40 % многолетних трав в структуре посевов отмечена наибольшая эрозионная устойчивость – сток был на

56,3 % ($p < 0,05$) меньше, чем в севообороте без многолетних трав. Севооборот Б с 20 % многолетних трав занимал промежуточное положение: в нём сток составлял $13,3 \pm 1,3$ мм, что на 33,9 % меньше, чем в севообороте с 20 % чистого пара, и больше на 25,6 %, чем в севообороте с 40 % многолетних трав в структуре посевов (рис. 1).

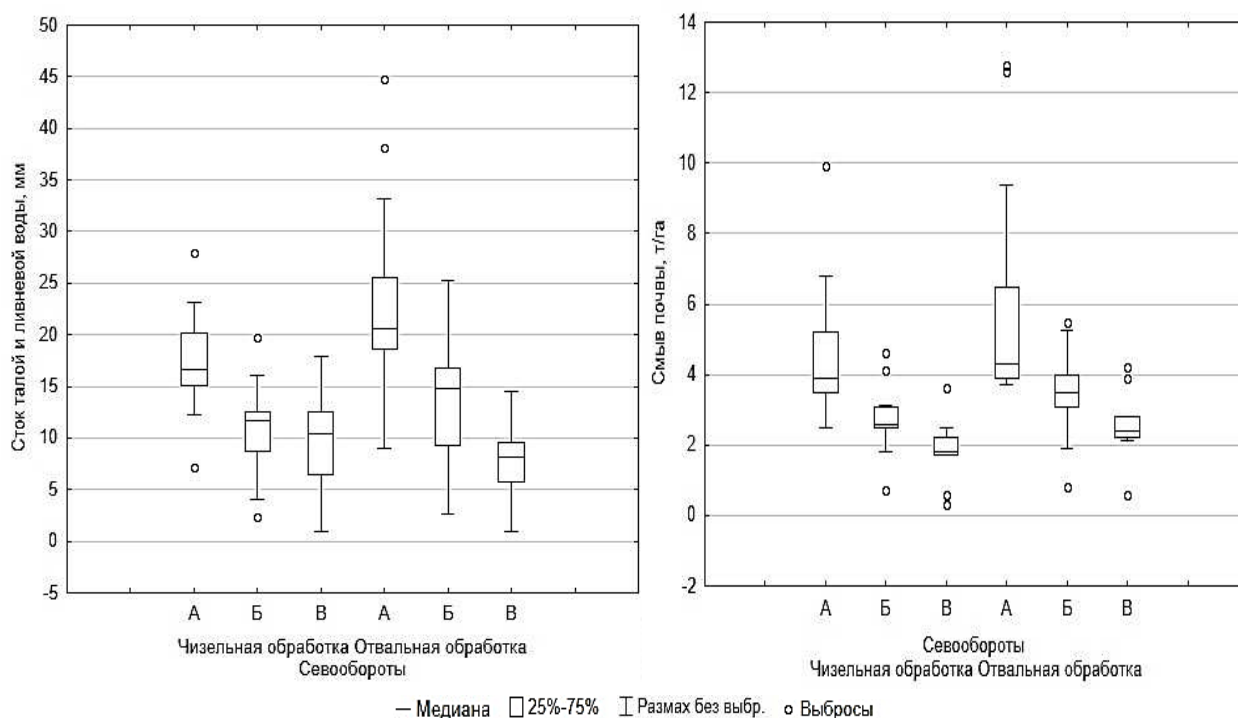


Рис. 1. Сток талой и ливневой воды и смыв почвы на эрозионно опасном склоне в зависимости от конструкции севооборота и агротехнологии возделывания сельскохозяйственных культур, т/га / Fig. 1. Runoff of melt and stormwater and soil flushing on an erosion-hazardous slope, depending on the design of crop rotation and agrotechnology of crop cultivation, t/ha

Способы обработки почвы по-разному влияют на проявление процессов эрозии, вызванных стоком талых и ливневых вод. Применение почвозащитной обработки почвы (чизельной) сокращало сток воды на 23,9 % ($p < 0,05$) по сравнению с контрольным вариантом – отвальной обработкой в севообороте А. Введение в севооборот многолетних трав от 20 до 40 % и применение чизельной обработки почвы сократило сток талых и ливневых вод на 21,0–21,5 %.

Одним из признаков деградации склоновых земель является смыв почвы, вызванный стоком талых и дождевых вод. Наибольшее количество смытой почвы было отмечено в севообороте с 20 % чистого пара и составляло в среднем 5,8 т/га. Севооборот с 20 % многолетних трав занимал промежуточное положение. Смыв почвы в среднем составлял 3,8 т/га, количество смытой почвы было меньше на 35,5 %, чем в севообороте Б. По мере увеличения доли многолетних трав до 40 % количество смытой почвы уменьшилось более чем в два раза – до 2,8 т/га, и соответственно, уменьшение смыва достигало 52,5 %.

Применение чизельной обработки почвы имело тенденцию к уменьшению смыва почвы: в севообороте А – с 5,8 до 5,0 т/га (13,0 %); в севообороте Б – с 3,8 до 2,9 т/га (22,2 %), а в севообороте В – с 2,8 до 2,1 т/га (22,7 %) по сравнению с отвальной обработкой почвы ($p > 0,05$).

Нами был составлен долгосрочный прогноз развития эрозионных процессов с использованием АНС. В результате проведения анализа показателей стока талых и ливневых вод в севооборотах различных конструкций с 1990 по 2022 г. были отобраны три АНС с наилучшими статистическими параметрами.

В табл. 1 представлены статистические параметры построенных нейронных сетей. Архитектура нейронной сети – многослойный перцептрон (MLP), имеющий 32 входных нейрона, от 2 до 6 нейронов на внутреннем слое и 1 нейрон на выходе. В дальнейшем все нейронные сети будут построены по этому принципу. Высокие коэффициенты корреляции производительности обучения (0,99) и низкие ошибки (0,01–0,08) подтверждают хорошее качество построенных нейронных сетей.

Таблица 1 / Table 1

Статистические параметры АНС, построенных для показателей стока талых и ливневых вод в севооборотах различной конструкции / Statistical parameters of the constructed automated neural networks for indicators of melt and stormwater runoff in crop rotations of various designs

Архитектура нейронной сети	Производительность обучения	Контрольная производительность	Ошибка обучения	Контрольная ошибка	Алгоритм обучения
Севооборот А					
MLP 32-3-1	0,99	0,46	0,40	18,82	BFGS 17
MLP 32-2-1	0,99	0,42	0,001	24,81	BFGS 0
MLP 32-6-1	0,99	0,42	0,001	27,05	BFGS 0
Севооборот Б					
MLP 32-2-1	0,99	0,61	0,01	4,11	BFGS 22
MLP 32-2-1	0,99	0,61	0,01	4,09	BFGS 23
MLP 32-2-1	0,99	0,60	0,08	3,87	BFGS 16
Севооборот В					
MLP 32-4-1	0,99	0,64	0,02	2,47	BFGS 9
MLP 32-5-1	0,99	0,66	0,05	2,06	BFGS 8
MLP 32-5-1	0,99	0,64	0,02	2,40	BFGS 5
Чизельная обработка					
MLP 48-8-1	0,98	0,75	0,20	1,41	BFGS 15
MLP 48-2-1	0,98	0,74	0,23	1,50	BFGS 10
MLP 48-5-1	0,98	0,74	0,21	1,52	BFGS 11
Отвальная обработка					
MLP 48-5-1	0,98	0,76	0,05	2,48	BFGS 32
MLP 48-5-1	0,98	0,76	0,03	2,49	BFGS 23
MLP 48-5-1	0,98	0,77	0,05	2,34	BFGS 22

Контрольная производительность показывает тесноту связи полученных и фактических значений. Чем меньше разница между производительностью обучения и контрольной производительностью, тем построенная сеть лучше работает, или точнее дает предсказания. Контрольная производительность, полученная для данных стока воды в севообороте А, несколько снижена (0,42–0,46) по сравнению с результатами, полученными для севооборотов Б и В (0,60–0,66), но в севообороте А и разброс исходных значений был достаточно велик (7,1–44,8 мм) (табл. 2).

Таблица 2 / Table 2

Фактические и предсказанные значения стока талых и ливневых вод в севооборотах различных конструкций, мм / Actual and predicted values of melt and stormwater runoff in crop rotations of various designs, mm

Показатель	Фактические значения	Предсказанные значения		
Севооборот А	7,1–44,8	1,5–27,5	1,2–28,5	0,2–30,5
Севооборот Б	2,3–25,3	2,7–19,0	1,5–18,9	0,5–18,6
Севооборот В	1,0–17,9	0,4–13,7	0,1–13,1	0,3–13,8
Чизельная обработка	1,0–28,0	0,28–16,4	0,73–17,3	0,42–17,8
Отвальная обработка	1,0–44,8	0,2–24,0	0,1–24,2	0,8–24,0

Полученные нейронные сети для различных обработок почвы имеют аналогичные характеристики. Построенные нейронные сети характеризуются высокой степенью производительности (0,74–0,98) и низкими ошибками (0,03–2,49). Небольшая разница между производительностью обучения (0,98) и контрольной производительностью (0,74–0,76), используемой для проверки качества работы сети, является подтверждением хорошего качества построенной АНС.

На рис. 2 представлен долгосрочный прогноз стока талых и ливневых вод на 100 лет.

Из проекции временного ряда видно, что наибольшая частота проявления стока талых и ливневых вод отмечена в севообороте А, имеющем в структуре посевных площадей 20 % чистого пара. С введением в севооборот многолетних трав с долей в структуре посевных площадей от 20 до 40 % частота проявления и интенсивность стока сокращается.

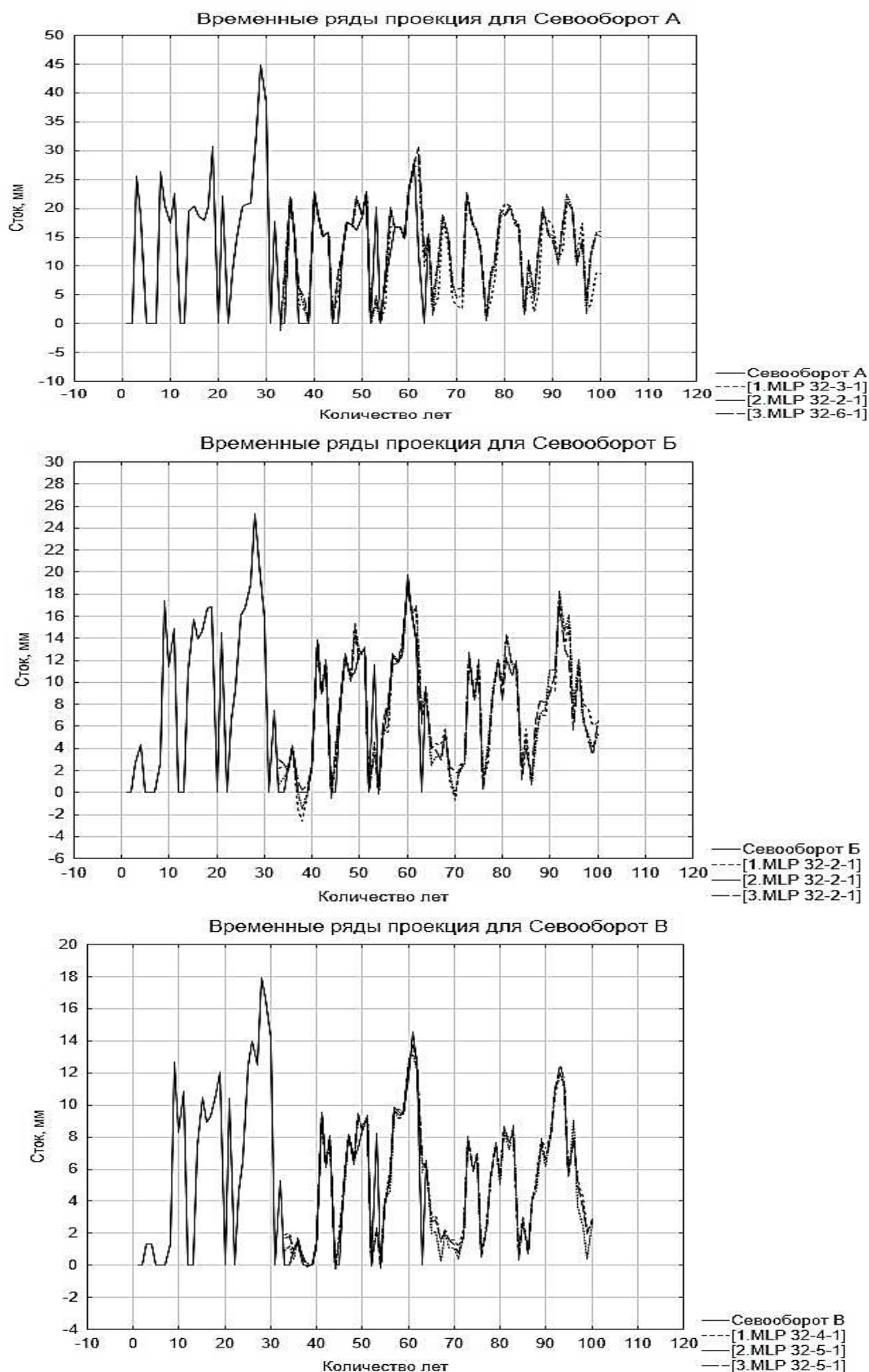


Рис. 2. Проекция временного ряда для стока талых и ливневых вод в севооборотах различных конструкций на 100 лет, мм / Fig. 2. Projection of a time series for a hundred years ahead for the flow of meltwater and stormwater in crop rotations of various designs, mm

Анализ предсказанных значений стока, полученный при помощи нейросетевого прогноза, подтвердил эту тенденцию. В севообороте А разброс фактических значений стока за весь период наблюдений колебался в пределах 7,1–44,8 мм. В результате проведенного анализа получены предсказанные значения стока (0,2–30,5 мм), что меньше на 31,9–83,3 % фактически полученных результатов. Можно предположить, что при существующих условиях сток талых и ливневых вод в севообороте А сократится на треть, а в севооборотах с 20 и 40 % многолетних трав в структуре посевных площадей – на 22,9–24,9 % (с 17,9–25,3 до 13,1–19,0 мм) (табл. 2).

Большое значение для сокращения процессов эрозии имеет выбор агротехнологии возделывания сельскохозяйственных культур. Нами были проанализированы две агротехнологии с использованием отвальной вспашки и почвозащитной (чизельной) обработки почвы. На основе фактических данных стока талых и ливневых вод были построены нейронные сети для двух обработок почвы.

Анализ временных рядов, построенных для стока талых и ливневых вод в зависимости от используемых агротехнологий, выявил общую тенденцию. Временной ряд полученных значений за продолжительный период имеет тенденцию к затуханию, но с различной степенью интенсивности (рис. 3).

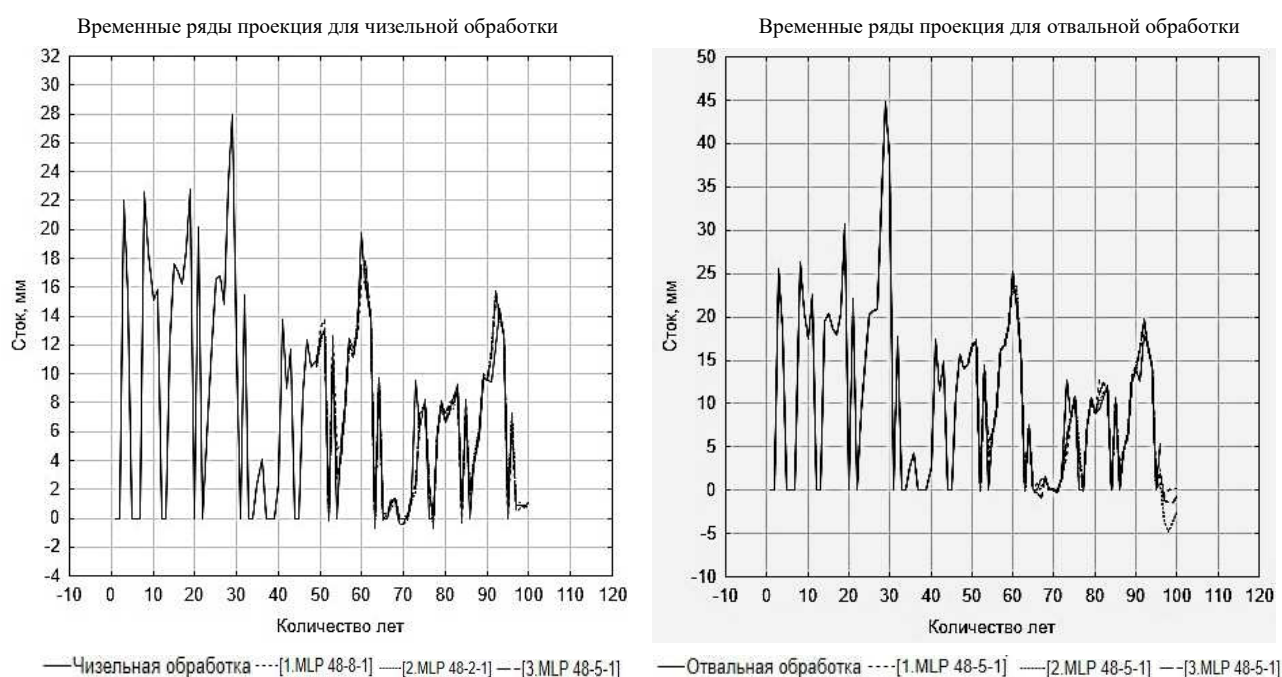


Рис. 3. Проекция временного ряда данных стока талых и ливневых вод при использовании различных агротехнологий на 100 лет, мм / Fig. 3. Projection of a time series for a hundred years ahead of melt and stormwater runoff data using various agricultural technologies, mm

Приведенные на рисунке тенденции подтверждают полученные предсказанные значения. Процессы эрозии, вызванные стоком талых и ливневых вод, стремятся к минимальным значениям (0,1–0,72 мм) с отдельными пиками максимальных значений (17,8–24,2 мм) с преимуществом по отвальной обработке почвы.

Применение почвозащитной обработки в течение длительного периода для снижения процессов эрозии позволит сократить сток с 28,0 до 0,28–17,8 мм (39,2–72,0 %). При использовании отвальной обработки почвы получены значительные фактические величины стока воды (44,8 мм), прогноз на 100 лет предсказывает сокращение процессов эрозии в два раза, а возможно, и полное прекращение процессов деградации (0,1–24,2 мм, или 90,0–45,9 %).

Для составления прогноза смыва почвы с эрозионно опасных склонов были также использованы АНС. Анализ статистических показателей нейронных сетей, построенных для составления прогноза в севооборотах различных конструкций, выявил их высокую достоверность. Производительность обучения нейронных сетей была в пределах 0,98–0,99, а ошибка составляла 0,001–0,008, контрольная производительность – 0,70–0,88, а ошибка – 0,10–1,72 (табл. 3).

Таблица 3 / Table 3

Статистические параметры АНС, построенных для показателей количества смытой почвы в севооборотах различной конструкции / Statistical parameters of the constructed automated neural networks for indicators of the amount of washed soil in crop rotations of various designs

Архитектура нейронной сети	Производительность обучения	Контрольная производительность	Ошибка обучения	Контрольная ошибка	Алгоритм обучения
Севооборот А					
MLP 32-4-1	0,98	0,85	0,033	1,33	BFGS 11
MLP 32-2-1	0,99	0,86	0,025	1,72	BFGS 9
MLP 32-2-1	0,99	0,88	0,001	1,27	BFGS 41
Севооборот Б					
MLP 32-7-1	0,99	0,80	0,006	0,21	BFGS 14
MLP 32-8-1	0,99	0,79	0,008	0,25	BFGS 12
MLP 32-8-1	0,99	0,80	0,005	0,21	BFGS 16
Севооборот В					
MLP 32-8-1	0,99	0,70	0,001	0,18	BFGS 11
MLP 32-6-1	0,99	0,71	0,002	0,20	BFGS 12
MLP 32-6-1	0,99	0,71	0,001	0,27	BFGS 22
Чизельная обработка					
MLP 48-2-1	0,96	0,85	0,023	0,039	BFGS 18
MLP 48-7-1	0,96	0,84	0,023	0,073	BFGS 19
MLP 48-5-1	0,96	0,85	0,019	0,060	BFGS 19
Отвальная обработка					
MLP 48-8-1	0,96	0,84	0,023	0,073	BFGS 19
MLP 48-8-1	0,96	0,84	0,021	0,069	BFGS 15
MLP 48-5-1	0,96	0,83	0,020	0,084	BFGS 14

Также статистические параметры построенных АНС для смыва почвы в зависимости от применяемых агротехнологий имеют значимые коэффициенты корреляции, что подтверждает высокую сходимость фактических и предсказанных результатов. Производительность обучения для полученных нейронных сетей была 0,96, а контрольная производительность, используемая для проверки полученных результатов, – 0,83–0,85 при минимальных ошибках 0,019–0,023.

В результате были получены предсказанные значения смыва почвы и построены временные ряды на 100 лет для севооборотов различной конструкции (рис. 4).

Из рис. 4 видно, что прогнозные значения смыва почвы временного ряда имеют тенденцию к затуханию во всех севооборотах, но в разной степени. В севообороте А, имеющем в структуре покровов поле чистого пара в доле 20 %, остается высокая частота проявления процессов эрозии в проекции на длительный период, хотя количество смытой почвы за продолжительный период уменьшается на 17,6 % (0,01–10,8 т/га) по сравнению с фактическими значениями (2,5–13,1 т/га) (табл. 4).

Аналогичная тенденция наблюдается и в севооборотах с различной долей многолетних трав. В севообороте Б с 20 % многолетних трав предсказанные значения (0,56–7,07 т/га) были меньше на 28,6 %, чем фактические (0,7–9,6 т/га). В севообороте В с 40 % многолетних трав смыв почвы сократится с 6,8 до 5,5 т/га, или на 26,4 %. Все три построенные сети имеют высокую точность и дают прогноз, незначительно отличающийся между собой. В севообороте А предсказанные значения смыва почвы составляют 9,8; 10,8 и 10,6 т/га при незначительной ошибке. Аналогичная тенденция отмечена при составлении прогноза в севооборотах Б и В (7,0; 6,9; 7,1 т/га и 5,0; 5,4; 5,5 т/га соответственно). Если тренд в изменении климатических условий в течение длительного периода лет меняться не будет и технологии возделывания сельскохозяйственных культур останутся неизменными, то можно предположить, что процессы деградации будут менее интенсивными.

На основании полученного прогноза смыва при использовании различных систем обработки почвы были построены временные ряды на 100 лет для чизельной и отвальной обработки почвы. На диаграммах видна общая тенденция снижения частоты и интенсивности смыва почвы, но в разной степени (рис. 5).

Фактический смыв почвы при использовании чизельной обработки почвы достигал 12,8 т/га. Значения, полученные с помощью АНС, были в два раза меньше фактических (6,9–7,5 т/га, или 41,5 %). Фактический смыв почвы по отвальной обработке достигал 13,1 т/га, а предсказанные максимальные значения – 9,3–9,4 т/га, или на 28,2 % смыв уменьшился за длительный срок (табл. 4).

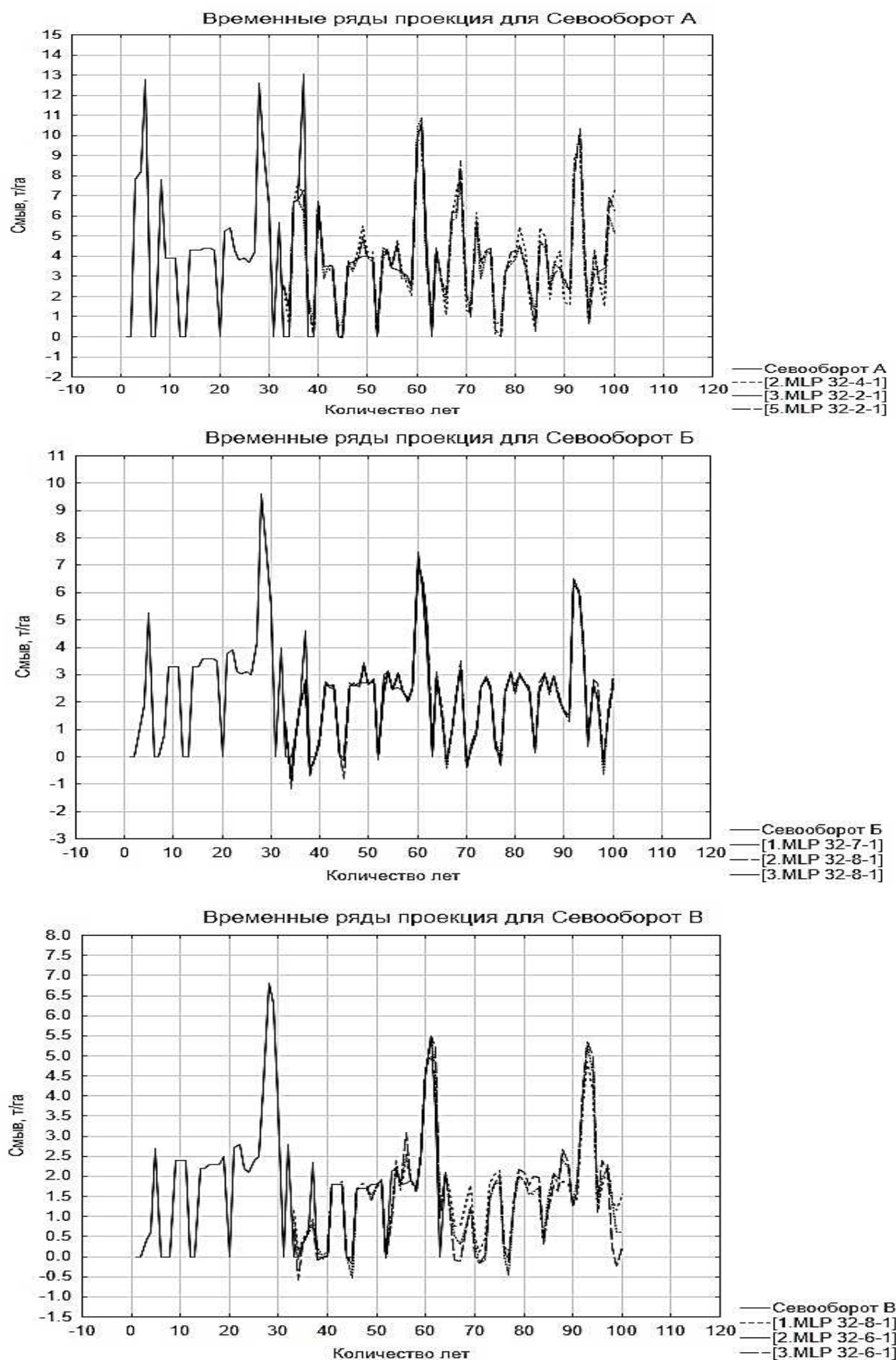


Рис. 4. Проекция временного ряда на 100 лет для смыва почвы в севооборотах различных конструкций, т/га / Fig. 4. Projection of a time series for a hundred years ahead for soil flushing in crop rotations of various designs, t/ha

Таблица 4 / Table 4

Фактические и предсказанные значения смыва почвы в севооборотах различных конструкций, т/га / Actual and predicted values of soil flushing in crop rotations of various designs, t/ha

Показатель	Фактические значения	Предсказанные значения		
		0,01–9,8	0,45–10,8	0,03–10,6
Севооборот А	2,5–13,1	0,01–9,8	0,45–10,8	0,03–10,6
Севооборот Б	0,7–9,6	0,57–7,0	1,16–6,9	0,98–7,1
Севооборот В	0,1–6,8	0,1–5,0	0,5–5,4	0,6–5,5
Чизельная обработка	0,1–12,8	0,03–6,9	0,01–7,2	0,03–7,5
Отвальная обработка	0,3–13,1	0,74–9,3	0,83–9,4	0,72–9,3

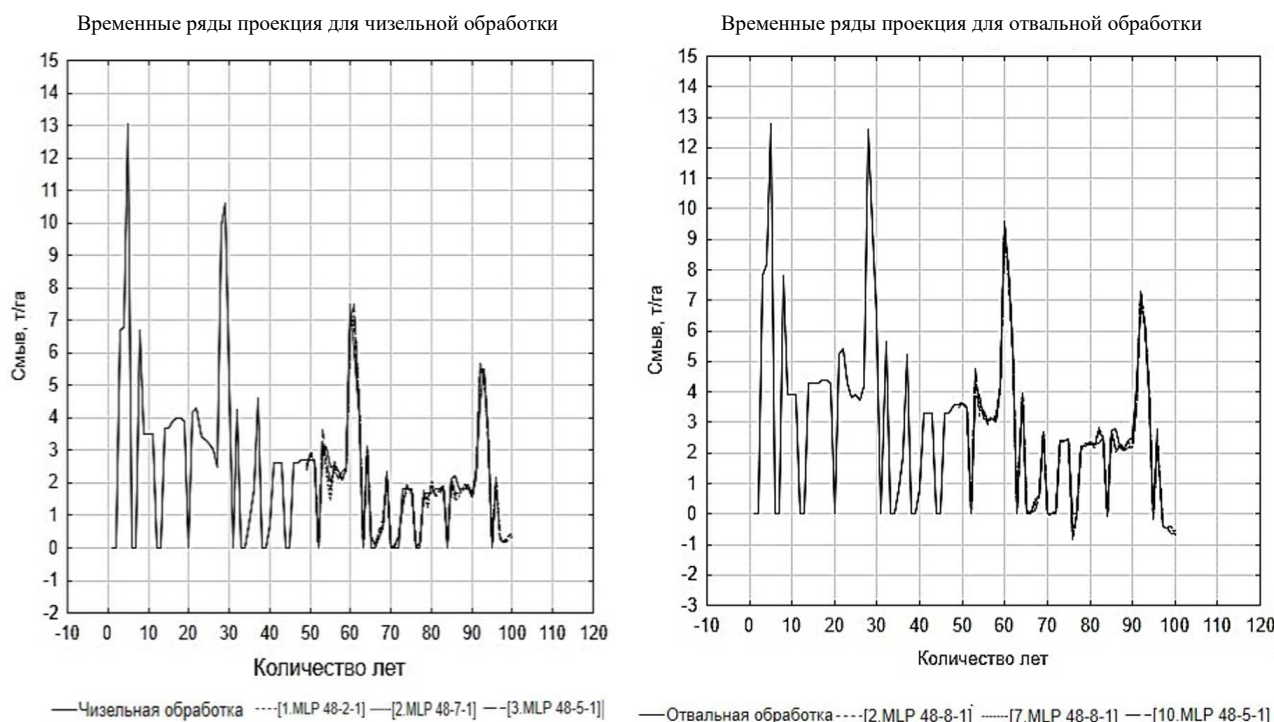


Рис. 5. Проекция временного ряда данных смыва почвы при использовании различных агротехнологий на 100 лет, т/га / Fig. 5. Projection of a time series for a hundred years ahead of soil flushing data using various agricultural technologies, t/ha

Заключение

Прогноз, составленный с использованием АНС, выявил общую тенденцию затухания процессов эрозии на склонах крутизной 3,5–4°, но с различной степенью интенсивности как в севооборотах различной конструкции, так и при использовании различных агротехнологий возделывания сельскохозяйственных культур. Возделывание культур в севооборотах с долей от 20 до 40 % многолетних трав в структуре посевных площадей сокращает сток талых и ливневых вод на 22,9–24,9 %, а смыв почвы – на 26,4–28,6 %, в отдельных случаях – полностью при существующих условиях. Применение почвозащитной обработки сократит сток талых и ливневых вод на 39,2–72,0 %, а смыв – на 41,5 %.

Список источников

1. Масютенко Н.П., Кузнецов А.В., Масютенко М.Н., Панкова Т.И., Припутнева М.А. Влияние агротехнологий на запасы и состав органического вещества чернозема типичного слабоэродированного // Достижения науки и техники АПК. 2021. Т. 35, № 10. С. 45–50.
2. Мальцев К.А., Ермолаев О.П. Потенциальные эрозионные потери почвы на пахотных землях европейской части России // Почвоведение. 2019. № 12. С. 1502–1512. <https://doi.org/10.1134/S0032180X19120104>
3. Фетюхин И.В., Черненко В.В. Факторы развития, моделирование и прогнозирование эрозии почвы // Междунар. с/х журн. 2018. № 1. С. 11–13. <https://doi.org/10.24411/2587-6740-2018-11003>

4. *Rodriguez-Delgado C., Bergillos R.J., Iglesias G.* An artificial neural network model of coastal erosion mitigation through wave farms // *Environmental Modelling and Software*. 2019. № 119. P. 390–399. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2019.07.010>
5. *Bui D.T., Shirzadi A., Chapi K., Shahabi H., Asl D.T., Omidavr E., Pham B.T., Khaledian H., Pradhan B., Panahi M., Bin Ahmad B., Rahmani H., Gróf G., Lee S.* A novel ensemble artificial intelligence approach for gully erosion mapping in a semi-arid watershed (Iran) // *Sensors*. 2019. Vol. 19, № 11. P. 2444. <https://doi.org/10.3390/s19112444>
6. *Wagena M. B., Goering D., Collick A. S., Bock E., Fuka D.R., Buda A., Easton Z.M.* Comparison of short-term streamflow forecasting using stochastic time series, neural networks, process-based, and Bayesian models // *Environmental Modelling and Software*. 2020. № 126. P. 104669. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2020.104669>
7. *Starkloff T., Stolte J., Hessel R., Ritsema C., Jetten V.* Integrated, spatial distributed modelling of surface runoff and soil erosion during winter and spring // *Catena*. 2018. Vol. 166. P. 147–157. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.04.001>
8. *May D.B., Sivakumar M.* Prediction of urban stormwater quality using artificial neural networks // *Environmental Modelling and Software*. 2009. № 24 (2). P. 296–302. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2008.07.004>
9. *Aslan Z., Erdemir G., Giorgi F., Feoli E., Okcu D.* Effects of climate change on soil erosion risk assessed by clustering and artificial neural network // *Pure and Applied Geophysics*. 2019. Vol. 176, № 2. P. 937–949. <https://doi.org/10.1007/s00024-018-2010-y>
10. *Bragagnolo L., Silva R.V., Grzybowski J.M.V.* Landslide susceptibility mapping with r. landslide: A free open-source GIS-integrated tool based on Artificial Neural Networks // *Environmental Modelling and Software*. 2020. № 123. P. 104565.
11. *Тунакова Ю.А., Новикова С.В., Валиев В.С., Байбакова Е.В.* Развитие методики расчёта нормативов допустимого сброса жидких производственных отходов с учётом региональных особенностей водных объектов // *Теорет. и прикл. экология*. 2023. № 4. С. 70–77. <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2023-4-070-077>
12. *Almasri M.N., Kaluarachchi J.J.* Modular neural networks to predict the nitrate distribution in ground water using the on-ground nitrogen loading and recharge data // *Environmental Modelling and Software*. № 20 (7). 2005. P. 851–871. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2004.05.001>
13. *Kim M., Gilley J.E.* Artificial Neural Network estimation of soil erosion and nutrient concentrations in runoff from land application areas // *Computers and Electronics in Agriculture*. 2008. № 64 (2). P. 268–275. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2008.05.021>
14. *Uno Y., Prasher S.O., Lacroix R., Goel P.K., Karimi Y., Viau A., Patel R.M.* Artificial neural networks to predict corn yield from Compact Airborne Spectrographic Imager data // *Computers and Electronics in Agriculture*. 2005. № 47 (2). P. 149–161. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2004.11.014>
15. *Zhang J., Tian H., Wang P., Tansey K., Zhang S., Li H.* Improving wheat yield estimates using data augmentation models and remotely sensed biophysical indices within deep neural networks in the Guanzhong Plain, PR China // *Computers and Electronics in Agriculture*. 2022. № 192. P. 106616. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2021.106616>
16. World Reference Base for Soil Resources 2014. International Soil Classification System for Naming Soils and Creating Legends for Soil Maps. World Soil Resources Reports. No. 106. Rome: FAO, 2014.
17. *Дьяков В.Н.* Совершенствование метода учета смыва почв по водороемам // *Почвоведение*. 1984. № 3. С. 146–148.
18. StatSoft, Inc. STATISTICA (Data Analysis Software System), Version 13. 2020. URL: <https://web.archive.org/web/20131213145004/http://statsoft.ru/> (дата обращения: 01.08.2023).
19. *Гаевая Э.А., Безуглова О.С., Нежинская Е.Н.* Агрофизические свойства чернозема обыкновенного слабоэродированного в длительном опыте в Ростовской области // *Почвоведение*. 2022. № 11. С. 1399–1414. <https://doi.org/10.31857/S0032180X22110053>

References

1. Masyutenko N.P., Kuznetsov A.V., Masyutenko M.N., Pankova T.I., Pripitneva M.A. The influence of agro-biotechnology on the reserves and composition of the organic matter of the black earth of the typical poorly eroded. *Dostizheniya nauki i tekhniki APK = Achievements of Science and Technology of AICis*. 2021;35(10):45–50. (In Russ.).
2. Maltsev K.A., Ermolaev O.P. Potential soil erosion losses on the arable land of the European part of Russia. *Pochvovedenie = Soil Science*. 2019;(12):1502–1512. <https://doi.org/10.1134/S0032180X19120104> (In Russ.).
3. Fetyukhin I.V., Chernenko V.V. Factors of development, modeling and forecasting of soil erosion. *Mezhunar. s/h zhurn. = International Agricultural Journal*. 2018;(1):11–13. <https://doi.org/10.24411/2587-6740-2018-11003> (In Russ.).

4. Rodriguez-Delgado C., Bergillos R.J., Iglesias G. An artificial neural network model of coastal erosion mitigation through wave farms. *Environmental Modelling and Software*. 2019;119:390-399. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2019.07.010>
5. Bui D.T., Shirzadi A., Chapi K., Shahabi H., Asl D.T., Omidavr E., Pham B.T., Khaledian H., Pradhan B., Panahi M., Bin Ahmad B., Rahmani H., Gróf G., Lee S. A novel ensemble artificial intelligence approach for gully erosion mapping in a semi-arid watershed (Iran). *Sensors*. 2019;19(11):2444. <https://doi.org/10.3390/s19112444>
6. Wagena M.B., Goering D., Collick A.S., Bock E., Fuka D.R., Buda A., Easton Z.M. Comparison of short-term streamflow forecasting using stochastic time series, neural networks, process-based, and Bayesian models. *Environmental Modelling and Software*. 2020;126:104669. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2020.104669>
7. Starkloff T., Stolte J., Hessel R., Ritsema C., Jetten V. Integrated, spatial distributed modelling of surface runoff and soil erosion during winter and spring. *Catena*. 2018;166:147-157. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.04.001>
8. May D. B., Sivakumar M. Prediction of urban stormwater quality using artificial neural networks. *Environmental Modelling and Software*. 2009;(24):296-302. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2008.07.004>
9. Aslan Z., Erdemir G., Giorgi F., Feoli E., Okcu D. Effects of climate change on soil erosion risk assessed by clustering and artificial neural network. *Pure and Applied Geophysics*. 2019;176(2):937-949. <https://doi.org/10.1007/s00024-018-2010-y>
10. Bragagnolo L., Silva R.V., Grzybowski J.M.V. Landslide susceptibility mapping with r. landslide: A free open-source GIS-integrated tool based on Artificial Neural Networks. *Environmental Modelling and Software*. 2020;(123):104565. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2019.104565>
11. Tunakova Yu.A., Novikova S.V., Valiev V.S., Baibakova E.V. Development of methods of calculation of norms of permissible discharge of liquid industrial waste taking into account regional features of water bodies. *Teoret. i prikl. ekologiya = Theoretical and Applied Ecology*. 2023;(4):70-77. <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2023-4-070-077> (In Russ.).
12. Almasri M.N., Kaluarachchi J.J. Modular neural networks to predict the nitrate distribution in ground water using the on-ground nitrogen loading and recharge data. *Environmental Modelling and Software*. 2005;(20):851-871. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2004.05.001>
13. Kim M., Gilley J.E. Artificial Neural Network estimation of soil erosion and nutrient concentrations in runoff from land application areas. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2008;(64):268-275. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2008.05.021>
14. Uno Y., Prasher S.O., Lacroix R., Goel P.K., Karimi Y., Viau A., Patel R.M. Artificial neural networks to predict corn yield from Compact Airborne Spectrographic Imager data. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2005;(47):149-161. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2004.11.014>
15. Zhang J., Tian H., Wang P., Tansey K., Zhang S., Li H. Improving wheat yield estimates using data augmentation models and remotely sensed biophysical indices within deep neural networks in the Guanzhong Plain, PR China. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2022;(192):106616. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2021.106616>
16. *World Reference Base for Soil Resources 2014*. International Soil Classification System for Naming Soils and Creating Legends for Soil Maps. World Soil Resources Reports No. 106. Rome: FAO; 2014.
17. Dyakov V.N. Improvement of the Method of Accounting for Soil Run-off on Water Springs. *Pochvovedenie = Soil Science*. 1984;(3):146-148. (In Russ.).
18. StatSoft, Inc. *STATISTICA (Data Analysis Software System), Version 13*. 2020. Available from: <https://web.archive.org/web/20131213145004/http://statsoft.ru/> [Accessed 1st August 2023].
19. Gaevaya E.A., Bezuglova O.S., Nezhinskaya E.N. Agrophysical properties of the Black Earth of the ordinary weakly eroded in the long experience in the Rostov region. *Pochvovedenie = Soil Science*. 2022;(11):1399-1414. <https://doi.org/10.31857/S0032180X22110053> (In Russ.).

Информация об авторах

Э.А. Гаевая – кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник.

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

Information about the authors

E.A. Gaevaya - Candidate of Science (Biology), Leading Researcher.

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

Статья поступила в редакцию 09.02.2024; одобрена после рецензирования 04.03.2024; принята к публикации 24.05.2024.
The article was submitted 09.02.2024; approved after reviewing 04.03.2024; accepted for publication 24.05.2024.

Научная статья
УДК 622.822.22+553.2
doi: 10.18522/1026-2237-2024-2-84-91

О КЛАССИФИКАЦИИ И ОБУСЛОВЛЕННОСТИ ФАКТОРОВ САМОНАГРЕВАНИЯ УГЛЕПОРОДНОГО ОТВАЛА ДОНБАССА

Олег Александрович Гузеев^{1✉}, **Наталья Петровна Корвякова**²

^{1,2} Институт физики горных процессов, Донецк, ДНР, Россия

¹oleg.coin@mail.ru✉

²nata_in2020@mail.ru

Аннотация. Предложены классификация факторов самонагревания углепородного отвала Донбасса и схематическая модель их взаимосвязей и связей применительно к анализу поисковых критериев и признаков пригодного для длительного извлечения теплоты техногенного образования угольного типа. Представленная классификация позволяет различать простые, сложные и особо сложные, пространственные, временные и пространственно-временные, внешние и внутренние, ускоряющие и замедляющие факторы самонагревания отвальных масс, а также систематизировать указанные факторы по уровням их влияния на тепловое состояние углепородного отвала. Она полезна при установлении одновременно действующих доминант-факторов самонагревания, присутствующих теплому, горячему и предельно горячему состояниям углепородного отвала. В ходе изучения установлено, что такие факторы самонагревания не только детерминированы горно-геологическими, горнотехническими и природно-климатическими условиями ведения горных работ, также нередко взаимообусловлены. Наибольшей степенью взаимообусловленности характеризуются факторы мезоуровня, в число которых входят жизнедеятельность тионовых бактерий, окислительные реакции и нерассеянная теплота отходов угледобычи. Представленная схематическая модель взаимосвязей и связей факторов самонагревания будет полезна для анализа теплового состояния отвала и прогнозирования динамики геолого-экологической обстановки в пределах участка размещения отвала, потенциально пригодного для длительного извлечения теплоты.

Ключевые слова: углепородный отвал, самонагревание, факторы, классификация, модель, взаимосвязь, теплота, термодеструкция пород

Для цитирования: Гузеев О.А., Корвякова Н.П. О классификации и обусловленности факторов самонагревания углепородного отвала Донбасса // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2024. № 2. С. 84–91.

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

Original article

ON CLASSIFICATION AND CONDITIONALITY OF SELF-HEATING FACTORS OF COAL ROCK DUMP OF DONBASS

Oleg A. Guzeev^{1✉}, **Natalya P. Korvyakova**²

^{1,2}Institute of Physics of Mining Processes, Donetsk, Donetsk People's Republic, Russia

¹oleg.coin@mail.ru✉

²nata_in2020@mail.ru

Abstract. A classification of self-heating factors of the Donbass coal dump and a schematic model of their interrelationships are proposed in relation to the analysis of search criteria and signs of a man-made coal-type

object suitable for long-term heat extraction. The presented classification makes it possible to distinguish between simple, complex and particularly complex, spatial, temporal and spatio-temporal, external and internal, accelerating and slowing factors of self-heating of dump masses, as well as to systematize the specified factors by the levels of their influence on the thermal state of coal rock dump. The classification is useful in establishing simultaneously acting dominant self-heating factors inherent in the warm, burning and extremely hot states of the coal dump. In the course of study, it was established that factors of self-heating are determined by the mining-geological, mining-technical and natural-climatic conditions of mining and also often mutually agreed. The greatest degree of mutual agreement is possessed by meso-level factors, which include the vital activity of thionic bacteria, oxidative reactions and unsolved heat of coal mining waste. The presented schematic model of the relationships and relationships of the self-heating factors will be useful for analyzing the thermal state of the dump and predicting the dynamics of the geological and ecological situation around the dump, potentially suitable for long-term heat extraction.

Keywords: coal rock dump, self-heating, factors, classification, model, interconnection, heat, thermal decomposition of rocks

For citation: Guzeev O.A., Korvyakova N.P. On Classification and Conditionality of Self-Heating Factors of Coal Rock Dump of Donbass. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2024;(2):84-91. (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

Уровень комплексного освоения угольных месторождений во многом определяет темпы промышленного развития Донбасса. Одним из перспективных направлений является извлечение и использование теплоты самонагревающихся углепородных отвалов.

В Донбассе размещены сотни отвалов, в которых сосредоточены миллионы тонн углесодержащих пород. Большинство отвалов сформировано в виде терриконов, высота которых составляет от 40 до 100 м. Каждый из терриконов размещен на участке, площадь которого может достигать от 2 до 10 га. Объем отходов в таком отвале в среднем составляет 1144 тыс. м³ [1]. В состав отвальных масс входят алевролиты, аргиллиты, сланцы, песчаники и угли.

В среднем по Донецкому бассейну потери угля в отвальной массе составляют около 1,5 % подземной его добычи, а содержание горючих веществ в отходах может превышать 15 % [2]. Суммарный объем твердого топлива, поступившего в каждый отвал за более чем четверть века его формирования и эксплуатации соответствующей шахтой, может быть соизмерим с ежегодным объемом добычи угля таким предприятием.

Среди множества углепородных отвалов региона особый интерес с позиции теплоэнергетического использования представляют отвалы теплые, горячие и предельно горячие. По сути, каждое такое скопление отходов угледобычи может рассматриваться не только как техногенное образование, но и как генератор и аккумулятор тепловой энергии. Тепловая мощность техногенного образования угольного типа может достигать $5-8 \times 10^{10}$ ккал на 100 тыс. м³ отвальной массы [3].

Следует отметить, что до настоящего времени каждый углепородный отвал изучался прежде всего как объект повышенной экологической опасности, как источник химического и теплового загрязнения атмосферы. Установлено, что горящий отвал способен ежегодно выделять в атмосферу до 25 т различных газообразных веществ. Горящий отвал является источником загрязнения воздуха оксидом углерода, диоксидом серы, сероводородом, оксидом азота и метаном. В составе газовых выделений отвала, в зависимости от его теплового состояния, могут присутствовать соединения кадмия, фосфора, мышьяка и других токсичных элементов [4].

Для снижения негативного воздействия горящих терриконов на окружающую среду разработаны способы профилактики и ликвидации горения отвальных масс. К таким способам относят нанесение на поверхность отвалов изолирующего материала, нагнетание воды или ингибиторов в отвальные массивы [5]. Однако эффективность указанных способов не всегда высока. Очаги горения внутри отвалов могут появляться даже после проведения соответствующих противопожарных мероприятий.

Постановка задачи

С целью комплексного освоения угольных месторождений и снижения негативного воздействия отходов угледобычи на экологию необходимо разработать технологию извлечения теплоты самонагревающегося углепородного отвала, включающую выбор отвала, склонного к длительной генерации тепловой энергии.

Задачей настоящей работы является классификация факторов самонагревания углепородного отвала и моделирование их взаимосвязей применительно к анализу поисковых критериев и признаков пригодного для длительного извлечения теплоты техногенного образования угольного типа.

Материалы и методы исследования

Метод классификации применяется для упорядочивания изучаемого массива явлений и процессов путем деления их на устойчивые группы, виды. Процедура построения классификации обычно включает анализ, обобщение и систематизацию исходных данных. Продуктом классификации является логически взаимосвязанный сложный, многокомпонентный конструкт [6].

Анализ и обобщение научно-технической информации о самовозгорании углепородных отвалов позволили выявить множество факторов, влияющих на самонагревание таких техногенных образований. Элементами данного множества, в частности, являются геометрия отвала и его генетическая структура, сезонные перепады температур, размещение отвала в геодинамической зоне, жизнедеятельность тионовых бактерий, окислительные реакции, нерассеянная теплота отходов угледобычи и их водно-воздушная эрозия [7–11].

Среди указанных факторов самонагревания следует прежде всего выделить простые, сложные и особо сложные факторы. К простым относятся сезонные перепады температур и размещение отвала в геодинамической зоне, к сложным – геометрия отвала (форма и размеры), жизнедеятельность тионовых бактерий, окислительные реакции, нерассеянная теплота отходов угледобычи и их водно-воздушная эрозия, а к особо сложным – генетическая структура отвала (минералогический, микроэлементный, фракционный состав отвальной массы, а также ее пористость, проницаемость и влажность).

Учитывая существующие представления о процессе термодеструкции отвальных масс, предлагается различать временные, пространственные и пространственно-временные факторы (табл. 1).

Таблица 1 / Table 1

Пространственные, временные и пространственно-временные факторы самонагревания углепородного отвала / Spatial, temporal and spatio-temporal factors of coal rock dump self-heating

Пространственные факторы	Временные факторы	Пространственно-временные факторы
Геометрия отвала	Сезонные перепады температур	Генетическая структура отвала
	Водно-воздушная эрозия отходов угледобычи	Жизнедеятельность тионовых бактерий
Размещение отвала в геодинамической зоне	Нерассеянная теплота отходов угледобычи	Окислительные реакции

Кроме того, существуют факторы внешней и внутренней среды (табл. 2).

Заметим, что группа внешних факторов самонагревания состоит из двух пространственных и двух временных факторов, а группа внутренних факторов – из трех пространственно-временных факторов и одного временного фактора. По сути, каждый внутренний фактор в той или иной степени является фактором времени, влияющим на последовательность становления (изменений) теплового поля внутри углепородного отвала.

Принимая во внимание особую сложность фактора генетической структуры отвала, уместно выделить еще две факторные группы. К первой группе «катализаторов самонагревания» следует отнести наличие в отвале пород, находящихся в самонапряженном состоянии, и включений фюзинитовых и флюидизированных углей, а ко второй группе «антагонистов самонагревания» – присутствие в отвальной массе галогенов (например, хлор, фтор и бром), снижающих реакционную способность отходов угледобычи к кислороду воздуха.

Таблица 2 / Table 2

**Внешние и внутренние факторы самонагрева углепородного отвала
/ External and internal factors of coal rock dump self-heating**

Внешние факторы	Внутренние факторы
Геометрия отвала	Генетическая структура отвала
Размещение отвала в геодинамической зоне	Жизнедеятельность тионовых бактерий
Сезонные перепады температур	Нерассеянная теплота отходов угледобычи
Водно-воздушная эрозия отходов угледобычи	Окислительные реакции

Отвальные породы, находящиеся в самонапряженном состоянии [12], могут выделять тепло в процессе образования в них структурных дефектов. Включения фюзинитовых углей [13], являясь «трещиноватыми коллекторами» воздуха, способствуют скорейшему окислению отвальной массы. Включения флюидизированных углей [14], способные высвободить избыточную энергию находящихся в них газов, могут увеличивать количество нерассеянной теплоты отходов угледобычи.

Факторы самонагрева целесообразно различать также по уровням их влияния на тепловое состояние отвала. К факторам макроуровня относятся геометрия и генетическая структура отвала, сезонные перепады температур и размещение отвала в геодинамической зоне, к факторам мезоуровня – жизнедеятельность тионовых бактерий, окислительные реакции и нерассеянная теплота угледобычи, к факторам микроуровня – наличие в отвале самонапряженных пород, фюзинитовых и флюидизированных углей, а также галогенов.

Учитывая произведенные различия факторов отвального самонагрева и их иерархию по уровням влияния на тепловое состояние углепородного отвала, результат предлагаемой факторной классификации представим в виде схемы (рис. 1).

Самонагревающийся углепородный отвал в ходе своего жизненного цикла может находиться в различных тепловых состояниях. Техногенное образование угольного типа может последовательно быть теплым, горячим и предельно горячим. Каждому тепловому состоянию отвала присуща определенная группа факторов, одновременно оказывающих наибольшее влияние на протекание процесса самонагрева углеотходов.

Например, для теплого отвала доминант-факторами разных уровней могут являться геометрия отвала, жизнедеятельность тионовых бактерий и наличие в отвале самонапряженных пород, для горячего отвала – водно-воздушная эрозия отходов угледобычи, окислительные реакции и наличие в отвале включений фюзинитовых углей, для предельно горячего отвала – размещение отвала в геодинамической зоне, нерассеянная теплота отходов угледобычи и наличие в отвале включений флюидизированных углей.

Учитывая диапазон и изменчивость теплоэнергетических состояний отвала, идентификация которых может быть выполнена по доминант-факторам самонагрева, извлечение отвальной теплоты целесообразно выполнять своевременно. С увеличением объема отвальных пород, прошедших термодеструкцию, снижается потенциал техногенного образования как генератора теплоты и одновременно возрастают валовые выбросы тепла и токсичных газов в атмосферу за весь период функционирования отвала.

Многочисленные факторы самонагрева углепородного отвала детерминированы горно-геологическими, горнотехническими и природно-климатическими условиями ведения горных работ. Горно-геологические условия определяются сложностью строения, мощностью и глубиной залегания обрабатываемых угольных пластов, скелетом и цементом вмещающих угленосный массив пород, а также их газоносностью, влажностью и температурой. Горнотехнические условия описываются технологиями проходки выработок и добычи угля, подбором месторасположения отвала, а также способами транспортирования и складирования отходов угледобычи. Природно-климатические условия определяются рельефом шахтного поля, движением воздушных масс, влажностью, дневными и ночными температурами воздуха.

Факторы самонагрева не только оказывают сочетанное влияние на процесс термодеструкции отвальных масс, но и нередко взаимообусловлены. К примеру, жизнедеятельность тионовых бактерий в углепородном отвале во многом определена его генетической структурой, прежде

всего наличием в складированных отходах пирита. Бактерии расчлениют и разрыхлят поверхность пирита, увеличивая его реакционную способность, а также окислят серу и двухвалентное железо. Иными словами, жизнедеятельность тионовых бактерий оказывает существенное влияние на становление (изменение) генетической структуры отвала. При этом в процессе биохимического выщелачивания 1 тона пирита выделяется от 998 до 1350 кДж [15].

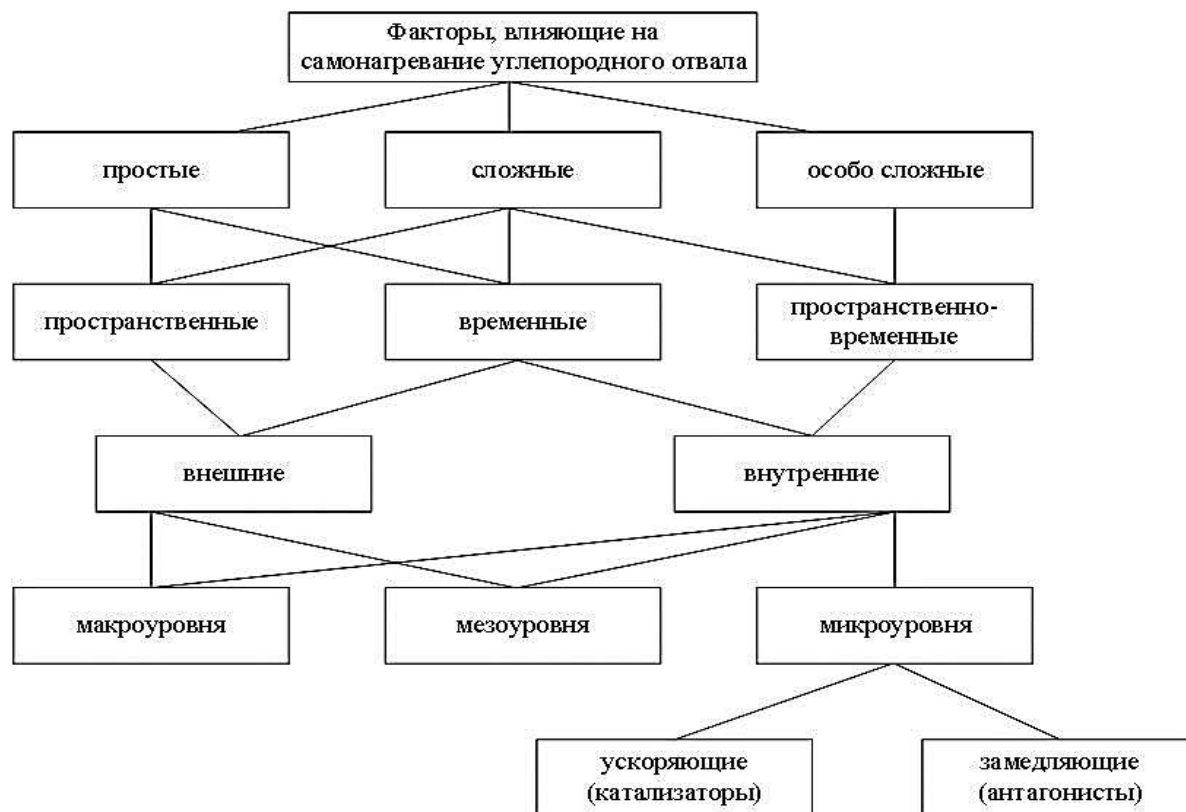


Рис. 1. Классификация факторов, влияющих на самонагревание углеродного отвала
/ Fig. 1. Classification of factors affecting coal rock dump self-heating

Схематическая модель взаимосвязей факторов самонагревания углеродного отвала представлена на рис. 2. Данная модель, отражая архитектуру и плотность факторных связей, позволяет наглядно показать различие факторов самонагревания отвала по степени взаимообусловленности. Модель будет полезна для анализа теплоэнергетического состояния отвала и прогнозирования динамики геолого-экологической обстановки в пределах участка размещения отвала, потенциально пригодного для длительного извлечения теплоты.

Заключение

Применительно к анализу поисковых критериев и признаков пригодного для длительного извлечения теплоты углеродного отвала Донбасса произведена классификация факторов самонагревания такого техногенного образования и предложена схематическая модель их связей.

Данная классификация позволяет различать факторы простые, сложные и особо сложные, пространственные, временные и пространственно-временные, внешние и внутренние, а также ускоряющие и замедляющие процесс самонагревания отвальных масс. Кроме того, предложенная систематизация факторов самонагревания дает возможность различать их по уровням влияния на тепловое состояние отвала.

Принимая во внимание современный уровень техники, наиболее безопасной и эффективной представляется технология извлечения теплоты углеродного отвала, находящегося в теплом, горячем и предельно горячем состояниях. Учитывая сказанное, целесообразно устанавливать доминант-факторы самонагревания, присущие именно таким состояниям.

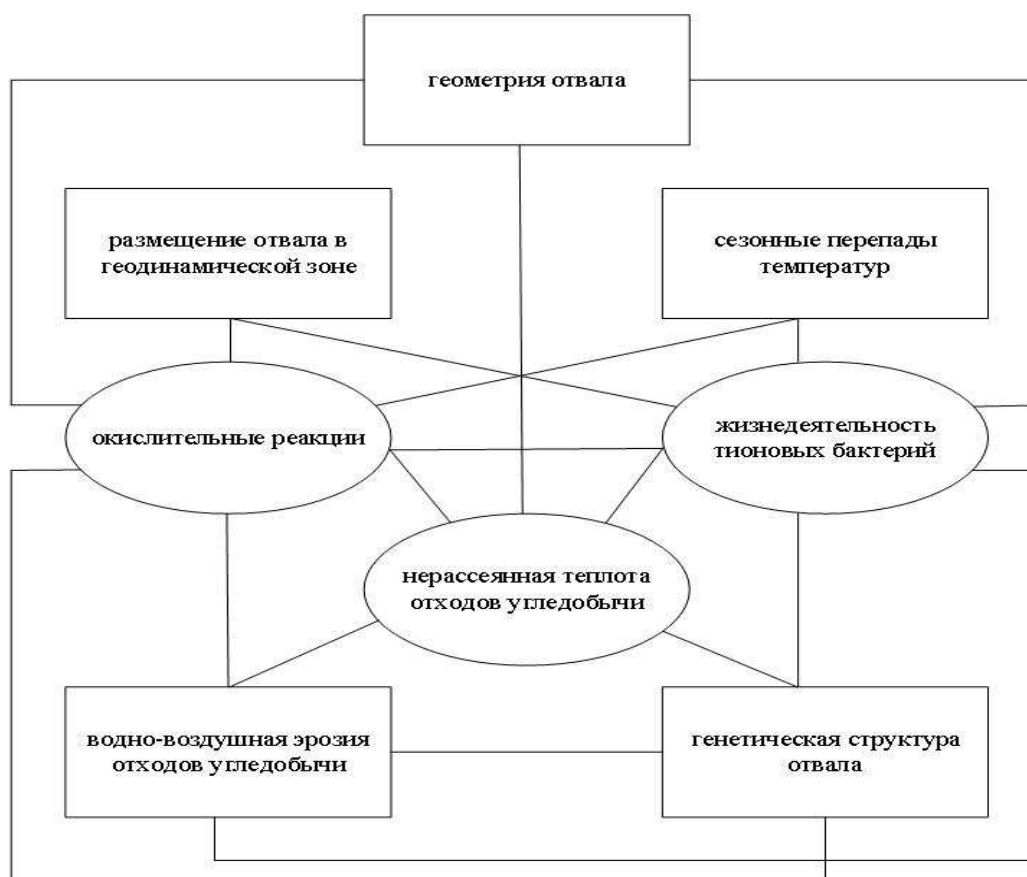


Рис. 2. Схематическая модель связей факторов самонагрева углеродного отвала
/ Fig. 2. Schematic model of links of coal rock dump self-heating factors

Факторы самонагрева углеродного отвала детерминированы горно-геологическими, горнотехническими и природно-климатическими условиями ведения горных работ. Вместе с тем данные факторы нередко взаимообусловлены. Наиболее взаимосвязанными являются факторы мезоуровня, в число которых входят жизнедеятельность тионовых бактерий, окислительные реакции и нерассеянная теплота отходов.

Для анализа поисковых критериев и признаков пригодного к извлечению теплоты углеродного отвала предлагается сформировать в ходе дальнейших исследований представления о благоприятной геолого-экологической обстановке, при которой техногенное образование угольного типа может изучаться и обрабатываться как техногенное месторождение самонагревающихся осадочных горных пород.

Список источников

1. Закруткин В.Е., Зубова Л.Г., Гибков Е.В., Зубов А.Р., Воробьев С.Г. Терриконы углепромышленных районов Донбасса как источник воздействия на окружающую среду // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2017. № 3-1. С. 69–75.
2. Зинченко И.Н., Пашковский О.П., Глушенко К.В. Численный метод решения задачи об очаговом самонагревании шахтной породы // Безопасность жизнедеятельности предприятий в промышленно развитых регионах : материалы XII Междунар. науч.-практ. конф. Кемерово, 2017. С. 137–150. URL: <https://science.kuzstu.ru/wp-content/Events/Conference/BGD/2017/bgd2017/pages/Articles/137.pdf> (дата обращения: 10.01.2024).
3. Ишихнели О.Г., Лиманский А.В., Воронков Г.Я. Снижение загрязнения окружающей среды при ликвидации углеродных отвалов // Уголь. 2013. № 10. С. 68–71.
4. Девятова А.Ю. Газофазные выбросы в атмосферу при горении угля // Изв. вузов. Горн. журн. 2013. № 5. С. 29–34.

5. Твердов А.А., Яновский А.Б., Никишичев С.Б., Апел Г. Профилактика и ликвидация породных отвалов // Уголь. 2010. № 2. С. 3–6.
6. Понкин И.В., Редькина А.И. Классификация как метод научного исследования, в частности в юридической науке // Вестн. Пермского ун-та. Юрид. науки. 2017. Вып. 37. С. 249–259. Doi: 10.17072/1995-4190-2017-37-249-259.
7. Панов Б.С., Проскурня Ю.А. Модель самовозгорания породных отвалов угольных шахт Донбасса // Геология угольных месторождений: межвуз. темат. науч. сб. Екатеринбург, 2002. С. 274–281.
8. Гамов М.И., Гордеев И.В. Основные факторы и экологические последствия самовозгорания отвалов угольных шахт Восточного Донбасса // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2017. № 2. С. 92–100.
9. Зборщик М.П., Осокин В.В. Природа самовозгорания и тушения отвальных пород угольных месторождений // Уголь Украины. 2015. № 3-4. С. 76–78.
10. Лапин А.А., Меркулова А.П., Посыльный В.Я. Причины самовозгорания породных отвалов в антрацитовых районах Восточного Донбасса // Тр. ШахтНИУИ. 1963. Т. III. С. 86–105.
11. Борисенко Э.В., Гузеев О.А., Корвякова Н.П., Подрухин А.А. Оценка геодинамических позиций и генетических структур самонагревающихся угленородных отвалов применительно к извлечению теплоты отвальных масс // Фундам. и прикл. вопросы горн. наук. 2023. Т. 2, № 2. С. 10–15. Doi: 10.15372/FPVGN202310020271.
12. Мороз А.И. К вопросу об использовании модели самонапряженного состояния II рода осадочной горной породы при оценке остаточных эффектов // Геодинамика и тектонофизика. 2013. Т. 4, № 4. С. 435–445.
13. Ли Хи Ун, Мащенко И.Д., Белавенцев Л.П., Шлапаков П.А. О петрографическом методе определения сорбционной способности углей // Вестн. Науч. центра по безопасности работ в угольной промышленности. 2012. № 1. С. 31–44.
14. Труфанов В.Н., Рыбин И.В., Труфанов А.В., Гамов М.И. Термобарогеохимия процессов углеводородной флюидизации ископаемых углей // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2013. № 2. С. 75–80.
15. Верех-Белоусова Е.И. Переработка отвалов угольных шахт Луганщины как техногенных месторождений металлов // Экол. химия. 2019. Т. 28, № 2. С. 107–113.

References

1. Zakrutkin V.E., Zubova L.G., Gibkov E.V., Zubov A.R., Vorobyov S.G. Terrikons of the coal-industrial regions of Donbass as a source of environmental impact. *Izv. vuzov. Sev.-Kavk. region. Estestv. nauki = Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science*. 2017;(3-1):69-75. (In Russ.).
2. Zinchenko I.N., Pashkovsky O.P., Glushenko K.V. Numerical method of solving the problem of focal self-heating of mine rock. *Life safety of enterprises in industrialized regions*. Materials of the XII International Scientific-Practical Conference. Kemerovo, 2017:137-150. Available from: <https://science.kuzstu.ru/wp-content/Events/Conference/BGD/2017/bgd2017/pages/Articles/137.pdf> [Accessed 10th January 2024]. (In Russ.).
3. Ishkhneli O.G., Limansky A.V., Voronkov G.Ya. Environmental pollution reduction during coal rock dumps elimination. *Ugol' = Coal*. 2013;(10):68-71. (In Russ.).
4. Devyatova A.Yu. Gas-phase air emissions at coal burning. *Izv. vuzov. Gorn. zhurn. = Minerals and Mining Engineering*. 2013;(5):29-34. (In Russ.).
5. Tverdov A.A., Yanovsky A.B., Nikishichev S.B., Apel G. Prevention and liquidation of rock dumps. *Ugol' = Coal*. 2010;(2):3-6. (In Russ.).
6. Ponkin I.V., Redkina A.I. Classification as a Method of Scientific Research, Particularly in Jurisprudence. *Vestn. Permskogo un-ta. Yurid. nauki = Perm University Herald. Juridical Sciences*. 2017;(37):249-259. Doi: 10.17072/1995-4190-2017-37-249-259. (In Russ.).
7. Panov B.S., Proskurnya Yu.A. Model of spontaneous combustion of rock dumps of coal mines in Donbass. *Geology of coal deposits*. Intercollegiate thematic scientific collection. Yekaterinburg, 2002:274-281. (In Russ.).
8. Gamov M.I., Gordeev I.V. The main factors and environmental consequences of spontaneous combustion of dumps of coal mines in Eastern Donbass. *Izv. vuzov. Sev.-Kavk. region. Estestv. nauki = Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science*. 2017;(2):92-100. Doi: 10.23683/0321-3005-2017-2-92-100. (In Russ.).
9. Zborshchik M.P., Osokin V.V. The nature of spontaneous combustion and extinguishing of dump rocks of coal deposits. *Ugol' Ukrainy = Coal of Ukraine*. 2015;(3-4):76-78. (In Russ.).
10. Lapin A.A., Merkulova A.P., Posylny V.Ya. Causes of spontaneous combustion of rock dumps in anthracite regions of Eastern Donbass. *Tr. ShakhtNIUI = Works of SakhtNIUI*. 1963;(3):86-105. (In Russ.).
11. Borisenko E.V., Guzeev O.A., Korvyakova N.P., Podrukhin A.A. Assessment of geodynamic positions and genetic structures of self-heating coal rock dumps applicably to heat extraction from dump masses. *Fundam. i*

prikl. voprosy gorn. nauk = Fundamental and Applied Issues of Mining. 2023;2(2):10-15. Doi: 10.15372/FPVGN202310020271. (In Russ.).

12. Moroz A.I. A model of the self-stress state of the sedimentary rock and its application to estimation of residual effects. *Geodinamika i tektonofizika = Geodynamics & Tectonophysics*. 2013;4(4):435-445. Doi: 10.5800/GT-2013-4-4-011171. (In Russ.).

13. Li Khi Un, Mashchenko I.D., Belaventsev L.P., Shlapakov P.A. On petrographic method of coal sorption properties definition. *Vestn. Nauch. tsentra po bezopasnosti rabot v ugol'noi promyshlennosti = Vestnik of Safety in Coal Mining Scientific Center*. 2012;(1):31-44. (In Russ.).

14. Trufanov V.N., Rubin I.V., Trufanov A.V., Gamov M.I. Thermal and barochemistry of hydrocarbon fluidization of fossil coals. *Izv. vuzov. Sev.-Kavk. region. Estestv. nauki = Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science*. 2013;(2):75-81. (In Russ.).

15. Verekh-Belousova E.I. Processing of dumps of coal mines of Luhansk region as technogenic deposits of metals. *Ekol. khimiya = Ecological chemistry*. 2019;28(2):107-113. (In Russ.).

Информация об авторах

О.А. Гузеев – научный сотрудник, отдел управления состоянием горного массива.

Н.П. Корвякова – младший научный сотрудник, отдел управления состоянием горного массива.

Information about the authors

O.A. Guzeev - Researcher, Massif State Management Department.

N.P. Korvyakova - Junior Researcher, Massif State Management Department.

Статья поступила в редакцию 19.01.2024; одобрена после рецензирования 14.02.2024; принята к публикации 24.05.2024.

The article was submitted 19.01.2024; approved after reviewing 14.02.2024; accepted for publication 24.05.2024.

Научная статья
УДК 913+796.5
doi: 10.18522/1026-2237-2024-2-92-99

ОСНОВНЫЕ МАРШРУТЫ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО ТУРИЗМА В ЧЕЧЕНСКОЙ РЕСПУБЛИКЕ

Аслан Арунович Даукаев^{1✉}, Хава Шахидовна Забураева²,
Арун Абалханович Даукаев³, Адам Азаматович Батукаев⁴

^{1, 2, 3} Комплексный научно-исследовательский институт им. Х.И. Ибрагимова РАН, Чеченская Республика, Грозный, Россия

^{1, 4} Академия наук Чеченской Республики, Грозный, Чеченская Республика, Россия

¹ daukaev_a_a@mail.ru✉

² xavaalieva@mail.ru

³ daykaev@mail.ru

⁴ eveggne@mail.ru

Аннотация. Исследованы различные подходы к определению экологического туризма как природоориентированной формы туризма. Описаны многообразные типы и виды экологического туризма и его преимущества в сравнении с другими видами рекреации. Раскрыта роль экологического туризма в достижении целей устойчивого развития региона. Показано, что динамика не может быть устойчивой в условиях истощения природных ресурсов и деградации природных систем. Проанализированы предпосылки для развития туристско-рекреационной деятельности на примере Чеченской Республики, для которой предложены и описаны несколько экологических маршрутов. Они преимущественно проложены от Чеченской равнины к горным районам, включая живописные ландшафты и множество уникальных геоморфологических, гидрологических, геологических и историко-культурных объектов. В контексте более устойчивого развития региона даны некоторые рекомендации для решения наиболее острых проблем туристско-рекреационной индустрии.

Ключевые слова: экотуризм, устойчивое развитие, горные ландшафты, рекреационный потенциал, туризм, рекреация

Для цитирования: Даукаев Ас.А., Забураева Х.Ш., Даукаев Ар.А., Батукаев А.А. Основные маршруты экологического туризма в Чеченской Республике // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2024. № 2. С. 92–99.

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

Original article

THE MAIN ROUTES OF ECOLOGICAL TOURISM IN THE CHECHEN REPUBLIC

Aslan A. Daukaev¹, Khava Sh. Zaburaeva², Arun A. Daukaev³, Adam A. Batukaev⁴

^{1, 2, 3} Kh. I. Ibragimov Complex Institute of the Russian Academy of Sciences, Grozny, Chechen Republic, Russia

^{1, 4} Academy of Sciences of the Chechen Republic, Grozny, Chechen Republic, Russia

¹ daukaev_a_a@mail.ru✉

² xavaalieva@mail.ru

³ daykaev@mail.ru

⁴ eveggne@mail.ru

© Даукаев Ас.А., Забураева Х.Ш., Даукаев Ар.А., Батукаев А.А., 2024

Abstract. Various approaches to defining ecological tourism as a nature-oriented form of tourism have been investigated. Describes the diverse types and types of ecological tourism and its advantages in comparison with other types of tourism and recreation. The role of ecological tourism in achieving the sustainable development goals of the region is revealed. It has been shown that development cannot be sustainable in conditions of depletion of natural resources and degradation of natural systems.

The prerequisites for the development of tourist and recreational activities are disclosed on the example of the Chechen Republic, for which several ecological tourism routes are proposed and described. These routes are mainly laid from the Chechen Plain to the mountainous regions, covering picturesque landscapes and many unique geomorphological, hydrological, geological and historical and cultural objects. In the context of more sustainable development of the region, some recommendations are given to solve the most acute problems of the tourist and recreational industry.

Keywords: ecotourism, sustainable development, mountain landscapes, recreational potential, tourism, recreation

For citation: Daukaev As.A., Zaburaeva Kh.Sh., Daukaev Ar.A., Batukaev A.A. The Main Routes of Ecological Tourism in the Chechen Republic. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2024;(2):92-99. (In Russ.).

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

Введение

В последние годы в литературе получили широкое распространение эпитеты близких по содержанию природоориентированных форм туризма («мягкий», «природный», «научный», «познавательный», «активный», «биотуризм» и др.), в том числе экологический туризм. Последний относится к наиболее перспективным видам туризма [1]. Термин «экотуризм» на Западе был введен в научный оборот мексиканским архитектором и экологом Э. Себальосом-Ласкурайном в первой половине 80-х гг. XX в. [2]. Он отражал идею гармонии между рекреацией и экологией и приобрел большую популярность. Особенностью экотуризма, в отличие от других видов туризма и рекреации, является то, что при этом осуществляется разумное использование природных ресурсов территорий с разработкой и соблюдением режима их рационального природопользования. Актуальность такой деятельности заключается в том, что экологический туризм призван обеспечить не только сохранение природного разнообразия рекреационных территорий, но и устойчивость самой туристской индустрии.

Результаты и обсуждение

Общие сведения об экотуризме. В связи с тем, что экотуризм представляет собой относительно новое направление в туристической индустрии России и зарубежья существует множество определений, предложенных Всемирным фондом дикой природы, Международным обществом экотуризма, Международным союзом охраны природы и др. [2, 3].

Имеется также ряд определений, данных отдельными исследователями. К примеру, по сведениям Т.А. Макаровой, в 1997 г. Г.С. Гужиным др. было сформулировано понятие об экотуризме следующего содержания: «В основе экотуризма лежит забота об окружающей среде. На первый план выходит организация поездок с ограниченным числом участников в природные зоны с возможным посещением мест, представляющих культурный интерес с целью реализации различных проектов охраны и рационального использования природных ресурсов» [4].

В целом экологический туризм определяется как деятельность, базирующаяся на следующих принципах: путешествие в природную зону с целью ее познания, ознакомления с традициями и обычаями местных жителей и формирования толерантного отношения к ним; минимизация негативного воздействия на природные комплексы путем соблюдения предельно допустимых рекреационных нагрузок, введения регулирующей системы пропусков, сборов и штрафов; повышение природоохранного, экологического и культурного сознания, создание

новых рабочих мест для местного населения; внесение вклада в экономику и устойчивое развитие региона.

Отличительной особенностью экотуризма является заинтересованность в сохранении природных ландшафтов и их отдельных компонентов. В перечисленных выше принципах просматриваются четыре основные функции экотуризма: рекреационная, природоохранная, просветительская и экономическая. Подробно их содержание раскрыто в работе [5].

В зависимости от территории, где осуществляется экотуризм, он делится на два класса: в пределах особо охраняемых природных территорий (ООПТ) и за пределами ООПТ, с охватом пространства антропогенных ландшафтов [2]. Экотуризм классифицируют также по цели путешествия и основному объекту. По первому признаку выделяются три вида экотуризма: познавательные, научные и рекреационные туры. Содержание перечисленных туров раскрыто в работах [4–6]. По второму признаку, определяющему содержание программы тура и форму его организации, различаются ботанические, зоологические, геологические, ландшафтные туры; эколого-культурные (эколого-этнографические, археологические и т.д.) и агротуры; спелеологические, водные, горные туры и т.п. [4].

Экологический туризм как фактор устойчивого развития. Традиционно существуют два подхода к выделению экологического сектора туризма. Первый подход предполагает определение дикой природы в качестве основного объекта экологического туризма. При этом, как справедливо отмечают многие исследователи, практически невозможно провести четкие границы между природными ландшафтами и элементами традиционной культуры, гармонично сочетающимися с ними, ввиду чего последние часто включаются в объекты экотуризма. Объектами становятся также территории, трансформированные в результате антропогенной деятельности. Данный вид туризма именуют экологическим, поскольку он способствует сохранению и восстановлению природных комплексов и их компонентов, сохранению культурных традиций и обеспечению экологической безопасности региона (страны). Например, одно из новейших социально-экономических явлений в практике развития сельских территорий – агротуризм (или сельский туризм) – предполагает ознакомление туристов с особенностями сельского образа жизни, сельской культурой и традициями, включая непосредственное их участие в трудовой деятельности коренных народов [7].

Согласно другому подходу, экологический туризм рассматривается в качестве устойчивого туризма, базирующегося на принципах признанной мировым сообществом концепции устойчивого развития, и трактуется как природоориентированный устойчивый туризм [8]. При данном подходе в туристскую индустрию вовлекаются объекты как природного, так и искусственного происхождения. Новый мощный импульс идея устойчивого развития получила в 1992 г., когда в Рио-де-Жанейро проходила конференция ООН по окружающей среде и развитию, известная также как Глобальный саммит. Именно в рамках этого мероприятия предприняты конкретные шаги по решению важнейших проблем окружающей среды и развития в глобальном масштабе [4]. Актуальность проблемы устойчивого развития горных регионов была подтверждена и в ходе Всемирного горного саммита в Бишкеке в 2002 г.

Зарождение экотуризма зачастую связывают с увеличением антропогенной нагрузки на природные и культурно-исторические туристско-рекреационные ресурсы, обусловленной развитием туристской индустрии, и осознанием необходимости их сохранения и воспроизводства. В большинстве случаев эта нагрузка прямо пропорциональна росту туристской индустрии и может привести как к обратимым, так и к необратимым процессам деградации естественных природных систем. В данном контексте концепция устойчивого развития выступает в качестве важнейшего инструмента достижения целей более сбалансированного развития, при котором удовлетворение потребностей в рекреации и туризме будет осуществляться без истощения природных и культурных ресурсов и экологического ущерба.

Существует множество подходов к трактовке понятия «устойчивое развитие», раскрывающие геополитические, геоэкологические, биологические, экономические, социальные и другие аспекты этой проблемы. При всем многообразии подходов и определений практически все исследователи отмечают, что развитие не может быть устойчивым в условиях истощения природных ресурсов, деградации природных систем и их компонентов, и признают необходимость сохранения ресурсов как для настоящих, так и будущих поколений [5, 6, 8].

Экологический туризм, в отличие от других направлений туризма, нацелен на предотвращение негативного воздействия на природные системы, сохранение их способности к самовосстановлению и саморегуляции, т.е. достижению более высокого уровня их устойчивости. Кроме того, устойчивое функционирование должно распространяться на все сегменты туристской индустрии.

Модель более устойчивого туризма предполагает удовлетворение рекреационных потребностей, обеспечивая рациональное использование природных ресурсов, сохранение биологического, ландшафтного разнообразия и уникальных природных и историко-культурных объектов (комплексов). Развитие экологического туризма в контексте устойчивого развития территории ведет к решению социальных (создание рабочих мест, улучшение сервиса и подготовка кадров в сфере рекреации и туризма и др.), экологических (сохранение природных ландшафтов, объектов историко-культурного наследия и др.) и экономических (развитие туристской инфраструктуры, привлечение инвестиций и др.) задач.

Туристические маршруты. К основным маршрутам экологического туризма можно отнести следующие направления:

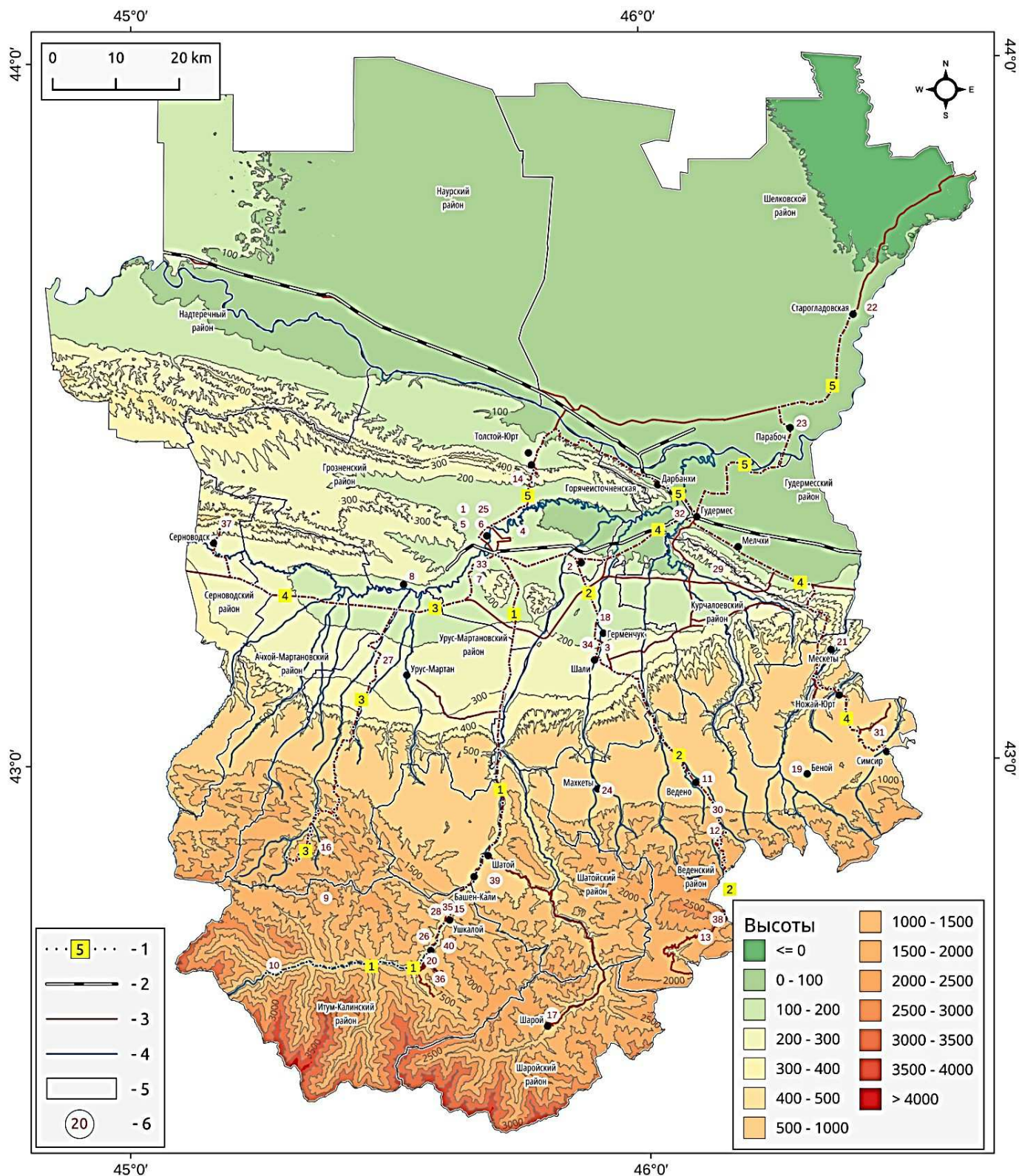
- 1) Грозный – Шатой – ущелье Малхиста;
- 2) Грозный – Ведено – озеро Кезеной-Ам;
- 3) Грозный – озеро Галанчо́ж;
- 4) Серноводск – Грозный – Мелчхи (Истису) – Симсир;
- 5) Грозный – Горячеводск – Дарбанхи – Старогладовская (рисунок).

Практически все маршруты начинаются из г. Грозного, которому в прошлом году исполнилось 205 лет. Его становление и развитие связано в основном с промышленной нефтедобычей. Непосредственно в районе города находятся два крупных месторождения нефти – Старогрозненское и Октябрьское, с которыми связано более половины добытой нефти Чеченской Республики. Вышеперечисленные туристические маршруты проходят по живописным местам Чеченской равнины, предгорья, средне- и высокогорья.

По пути следования маршрутов имеются очень много интересных, порой уникальных, геоморфологических, гидрологических, геологических, историко-культурных и других объектов (таблица). Выезжая из г. Грозного по первому маршруту, сразу попадаем в Ханкальское ущелье, которое рассекает единую Октябрьскую геологическую складку на две части. Результаты исследований показали, что здесь когда-то проложила себе путь река Аргун, которая в настоящее время протекает недалеко от ущелья. Далее по пути следования можно наблюдать Чишкинскую котловину, образовавшуюся на месте распространения легкоразмываемых песчано-глинистых пород. Здесь расположены самые крупные месторождения известняков и цементных мергелей (Ярыш-Мардынское и Черногорское) и другие объекты. На склонах гор можно наблюдать множество старинных памятников архитектуры – склепы, боевые и жилые башни и др. Маршрут заканчивается в ущелье Малхиста, где находится мыс, занятый обширным склеповым поселком, так называемым городком мертвых Цой-Педе, представляющим собой уникальный историко-культурный памятник. Здесь располагаются более 40 склепов, разбросанных по склону горы.

Конечными пунктами второго и третьего маршрутов являются не менее уникальные высокогорные озера Кезеной-Ам и Галанчо́ж. По своим размерам озеро Кезеной-Ам превосходит известное озеро Рица и располагается почти на 1000 м выше его над уровнем моря. Его считают достопримечательностью всего Кавказа за необычайную красоту. Озеро Галанчо́ж располагается в живописной роще, состоящей из тополей и берез на склоне долины реки Осухи (правого притока р. Гехи). По маршруту к озеру Галанчо́ж есть природные (особенно карстовые) и историко-культурные достопримечательности.

На четвертом и пятом маршрутах можно увидеть уникальные термоминеральные источники подземных вод и нефти с целебными свойствами – Брагунские, Горячеводские, Истисуйские, Серноводские и Симсирский. Лечебные свойства некоторых из них были выявлены еще более 300 лет назад лейб-медиком Петра I Шобером, специально присланным сюда для их изучения. Конечным пунктом четвертого маршрута является Симсирский нефтяной источник, включенный в список памятников природы. Пятый маршрут, помимо источников термоминеральных вод, проходит по местам пребывания здесь великого русского писателя Л.Н. Толстого (Скала кунаков; с. Толстой-Юрт; ст. Старогладовская, где находится музей Л.Н. Толстого).



Карта расположения туристических объектов и маршрутов: 1 – туристические маршруты; 2 – железная дорога; 3 – шоссе; 4 – реки; 5 – населенные пункты; 6 – туристические объекты / Location of tourist sites and routes: 1 - tourist routes; 2 - railway; 3 - highway; 4 - rivers; 5 - settlements; 6 - tourist sites

Основные туристические объекты ЧР / Main tourist sites of the Chechen Republic

Название объекта	Номер на карте	Тип
Музей М.Ю. Лермонтова	23	Музейный
Национальный краеведческо-исторический музей	25	Музейный
Скала кунаков	14	Исторический
Курорт «Серноводск»	37	Рекреационный
Алхан-Калинское городище	8	Исторический
Мечеть «Сердце Чечни»	1	Религиозный
Спорткомплекс имени Ахмат-Хаджи Кадырова	4	Спортивный
Высотный комплекс «Грозный-Сити»	6	Архитектурный
Фонтан на Грозненском водохранилище	7	Архитектурный
Грозненский дельфинарий	33	Развлекательный
Аквалпарк в г. Гудермесе	32	Развлекательный
Церковь Архангела Михаила	5	Религиозный
Минеральные источники у с. Мелчхи	29	Гидрологический
Отель «Шали-Сити»	34	Рекреационный
База отдыха Twin Towers	35	Рекреационный
Город мертвых Цой-Педе. Малхистинское ущелье	10	Исторический
Шаройский историко-архитектурный комплекс	17	Исторический
Симсирский нефтяной источник	31	Природный
Музей Л.Н. Толстого	22	Музейный
Краеведческий музей им. Хусейна Исаева	20	Музейный
Средневековый замок Пхакоч	26	Музейный
Литературный музей им. А.А. Айдамирова	21	Музейный
Мечеть «Гордость мусульман»	3	Религиозный
Этнографическая деревня «Шира-Юрт»	18	Исторический
Этнографическая деревня «Шира Бена-Юрт»	19	Исторический
Музей-усадьба «Орлиное гнездо»	24	Музейный
Частный этнографический музей «Донди-Юрт»	27	Музейный
Мечеть «Сердце Матери» имени Аймани Кадыровой	2	Религиозный
Башенный комплекс Никарой	9	Исторический
Хайбах	16	Исторический
Крепость Ведено	11	Исторический
Селение стражников Хой	13	Исторический
Всесезонный горнолыжный курорт «Ведучи»	36	Спортивный
Спортивно-туристический комплекс «Казеной-Ам»	38	Спортивный
Спортивно-туристический комплекс в с. Нихалой	39	Спортивный
Центр экстремальных видов туризма «Итум-Кали рафтинг»	40	Рекреационный
Памятник абреку Зелимхану	12	Исторический
Родник «Девичья коса»	30	Гидрологический
Башинкалинский водопад	28	Гидрологический
Ушкалойские сторожевые башни-близнецы	15	Исторический

Заключение

Экологический туризм, как отмечалось выше, представляет собой прежде всего природоориентированный вид, призванный обеспечить баланс между удовлетворением рекреационных потребностей, развитием туристской индустрии, сохранением ландшафтного разнообразия рекреационных территорий, и может именоваться зеленым, научным, познавательным, сельским и т.д. Как правило, наибольшим спросом пользуются туры в наименее антропогенизированные природные зоны на всех континентах. Однако, как показывает зарубежный опыт, объектами экотуризма могут быть и территории, трансформированные в результате антропогенной деятельности. Цель такого подхода заключается как в удовлетворении рекреационных потребностей населения, так и в акцентировании внимания на геоэкологических проблемах. Это дает и некоторый мультипликативный эффект, выражающийся в повышении экологического образования и экологической культуры рекреантов.

К основным районам экотуризма можно отнести высокогорье (район Скалистого и Бокового хребтов и частично Пастбищного), имеющее значительные потенциальные возможности для развития различных видов экотуризма – обширные ландшафты, не охваченные процессами урбанизации, характеризующиеся пейзажным разнообразием, уникальностью, эстетической привлекательностью. Территория Чеченской Республики, особенно горная и предгорная части, характеризуется большим разнообразием природных ландшафтов, малоосвоенным потенциалом для развития различных видов туристско-рекреационной деятельности (курортно-санаторная, спортивно-оздоровительная, экологическая и др.) [1, 9, 10].

Основными предпосылками для развития рекреационной деятельности и различных видов туризма в высокогорной части являются эстетическая привлекательность живописных природных ландшафтов, этнокультурные объекты (башенные комплексы и т.д.) [11, 12].

Для дальнейшего развития туризма необходимо предусмотреть развитие соответствующей инфраструктуры – строительство дорог и коммуникаций, туристско-развлекательных центров, домов отдыха, компактных отелей, гестхаусов, агроферм и т.д. В числе приоритетных задач должны быть сохранение и рациональное использование природно-рекреационного потенциала уязвимых горных ландшафтов региона.

Список источников

1. Zaburaeva Kh.Sh., Zaburaev Ch.Sh., Sedieva M.B., Shaipova A.A., Alieva Kh.A.-V. Ecological Tourism in the Mountainous Regions of Russia: Essence and Development Prospects // Russ. J. of Earth Sci. 2023. Vol. 23, № 3. P. 1–10. Doi.org/10.2205/2023es000867.
2. Дроздов А.В. Основы экологического туризма. М.: Гардарики, 2005. 271 с.
3. Экологический туризм: история возникновения, понятие, принципы и отличительные характеристики. URL: https://bstudy.net/711683/turizm/ekologicheskij_turizm_istoriya_vozniknoveniya_ponyatie_printsipy_otlichitelnye_harakteristiki (дата обращения: 10.06.2023).
4. Макарова Т.А. Экологический туризм. Астрахань: Астраханский гос. техн. ун-т, 2008. 160 с.
5. Шестакова Е.С., Рудык А.Н., Бутова Т.Г. Функции экологического туризма // Сервис в России и за рубежом. 2006. Т. 10, № 2 (63). С. 239–252.
6. Gryshchenko O., Babenko V., Bilovodska O., Voronkova T., Ponomarenko I., Shatska Z. Green tourism business as marketing perspective in environmental management // Global J. Environmental Science and Management. 2022. Vol. 8. P. 117–132. Doi: 10.22034/gjesm.2022.01.09.
7. Зорков В.С. Агротуризм как одна из форм повышения привлекательности сельской территории // Теория и практика мировой науки. 2023. № 8. С. 39–42.
8. Baloch Q. B., Shah S. N., Iqbal N., Sheeraz M., Asadullah M., Mahar S., Khan A.U. Impact of tourism development upon environmental sustainability: a suggested framework for sustainable ecotourism // Environmental Science and Pollution Research. 2023. Vol. 30. P. 5917–5930. Doi: 10.1007/s11356-022-22496-w.
9. Рыжиков В.В., Самарский Г.Г., Анисимов П.С. Природа Чечено-Ингушской республики, ее охрана и рациональное использование. 2-е изд. перераб. и доп. Грозный: Книга, 1991. 160 с.
10. Gunya A. The political dimension of tourism development in the Caucasus // Tourism in Mountain Regions: Hopes, Fears and Realities. Sustainable Mountain Development Series. Geneva, Switzerland, 2014. P. 90–91.
11. Керимов И.А., Даукаев А.А., Гайрабеков У.Г., Галаева З.Ш., Гацаева Л.С. Эколого-географическая оценка туристско-рекреационного потенциала высокогорий Чеченской Республики // Материалы III Кавказского экол. форума. 12–15 октября 2017 г. Грозный: Изд-во ЧГУ, 2017. С. 165–170.
12. Даукаев А.А., Гацаева Л.С., Абумуслимов А.А., Даукаев А.В., Абумуслимова И.А. Природные условия и ресурсы развития рекреации и экотуризма в горной части Чеченской Республики // Устойчивое развитие горных территорий Кавказа : материалы Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием «Устойчивое развитие горных территорий: история и предпосылки оптимизации природопользования». М.: ИИЕТ РАН, 2019. Т. 2. С. 399–405.

References

1. Zaburaeva Kh.Sh., Zaburaev Ch.Sh., Sedieva M.B., Shaipova A.A., Alieva Kh.A.-V. Ecological Tourism in the Mountainous Regions of Russia: Essence and Development Prospects. *Russ. J. of Earth Sci.* 2023;23(3):1-10. Doi: 10.2205/2023es000867.
2. Drozdov A.V. *Fundamentals of ecological tourism*. Moscow: Gardariki Publ.; 2005. 271 p. (In Russ.).

3. *Eco-tourism: history, concept, principles and distinctive characteristics*. Available from: https://bstudy.net/711683/turizm/ekologicheskij_turizm_istoriya_vozniknoveniya_ponyatie_printsipy_otlichitelnye_harakteristiki [Accessed 10th June 2023]. (In Russ.).
4. Makarova T.A. *Ecological tourism*. Astrakhan: Astrakhan State Technical University Press; 2008. 160 p. (In Russ.).
5. Shestakova E.S., Rudyk A.N., Butova T.G. Functions of ecological tourism. *Servis v Rossii i za rubezhom = Service in Russia and Abroad*. 2006;10(2):239-252. (In Russ.).
6. Gryshchenko O., Babenko V., Bilovodska O., Voronkova T., Ponomarenko I., Shatska Z. Green tourism business as marketing perspective in environmental management. *Global J. Environmental Science and Management*. 2022;8:117-132. Doi: 10.22034/gjesm.2022.01.09.
7. Zorkov V.S. Agrotourism as one of the forms of increasing the attractiveness of rural areas. *Teoriya i praktika mirovoi nauki = Theory and Practice of World Science*. 2023;(8):39-42. (In Russ.).
8. Baloch Q. B., Shah S. N., Iqbal N., Sheeraz M., Asadullah M., Mahar S., Khan A.U. Impact of tourism development upon environmental sustainability: a suggested framework for sustainable ecotourism. *Environmental Science and Pollution Research*. 2023;30:5917-5930. Doi: 10.1007/s11356-022-22496-w.
9. Ryzhikov V.V., Samarsky G.G., Anisimov P.S. *Nature of the Chechen-Ingush Republic, its protection and rational use*. 2nd ed. rework. and add. Grozny: Kniga Publ.; 1991. 160 p. (In Russ.).
10. Gunya A. The political dimension of tourism development in the Caucasus. *Tourism in Mountain Regions: Hopes, Fears and Realities*. Sustainable Mountain Development Series. Geneva, Switzerland, 2014:90-91.
11. Kerimov I.A., Daukaev A.A., Gairabekov U.G., Galaeva Z.Sh., Gatsaeva L.S. Ecological and geographical assessment of the tourist and recreational potential of the highlands of the Chechen Republic. *Materials of the III Caucasian Ecological forum*. October 12-15, 2017. Grozny: Chechen State University Press; 2017:165-170. (In Russ.).
12. Daukaev A.A., Gatsaeva L.S., Abumuslimov A.A., Daukaev A.V., Abumuslimova I.A. Natural conditions and resources for the development of recreation and ecotourism in the mountainous part of the Chechen Republic. *Sustainable development of mountain territories of the Caucasus: materials of the All-Russian Scientific-Practical Conf. with international participation "Sustainable development of mountain areas: history and prerequisites for optimization of environmental management."* Moscow: S.I. Vavilov Institute for the History of Science and Technology of Russian Academy of Sciences Press; 2019;2:399-405. (In Russ.).

Информация об авторах

Ас.А. Даукаев – младший научный сотрудник, отдел ТЭК и рационального природопользования.

Х.Ш. Забураева – доктор географических наук, главный научный сотрудник, отдел ТЭК и рационального природопользования.

Ар.А. Даукаев – доктор геолого-минералогических наук, заведующий отделом ТЭК и рационального природопользования.

А.А. Батукаев – старший научный сотрудник, отдел экологии и природопользования, Институт природных ресурсов.

Information about the authors

As.A. Daukaev - Junior Researcher, Department of Fuel and Energy Complex and Rational Environmental Management.

Kh.Sh. Zaburaeva - Doctor of Sciences (Geography), Main Researcher, Department of Fuel and Energy Complex and Rational Environmental Management.

Ar.A. Daukaev - Doctor of Sciences (Geology and Mineralogy), Head of the Department of Fuel and Energy Complex and Rational Environmental Management.

A.A. Batukaev - Senior Researcher, Department of Ecology and Environmental Management, Institute of Natural Resources.

Статья поступила в редакцию 02.07.2023; одобрена после рецензирования 19.02.2024; принята к публикации 24.05.2024.
The article was submitted 02.07.2023; approved after reviewing 19.02.2024; accepted for publication 24.05.2024.

Научная статья

УДК 631.811.1:631.811.98

doi: 10.18522/1026-2237-2024-2-100-112

ВЛИЯНИЕ ГУМАТА КАЛИЯ И ГУМИНОВОГО ПРЕПАРАТА «БИО-ДОН» НА АЗОТНЫЙ РЕЖИМ ЧЕРНОЗЕМА ОБЫКНОВЕННОГО ПОД ГОРОХОМ

Семён Сергеевич Карташев¹, Ольга Степановна Безуглова²✉

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

¹semyonrus357@gmail.com

²lola314@mail.ru✉

Аннотация. Представлены результаты краткосрочного полевого опыта за 2021–2023 гг. Опыт заложен на стационаре агрохимии и защиты растений ФГБНУ «ФРАНЦ». Было изучено влияние гумата калия и гуминового препарата «БИО-Дон» на содержание подвижных форм азота в черноземе обыкновенном карбонатном при возделывании гороха сорта Альянс (*Pisum sativum* L.). В схему опыта входили варианты с применением минерального удобрения (азофоска 40:40:40) и без него. Гуминовые препараты использовались в фазу формирования бобов фолиарно, как совместно с инсектицидом, так и без него.

Установлено, что использование гумата калия способствует накоплению нитратного азота в чернозёме обыкновенном карбонатном. Применение гуминового препарата «БИО-Дон» в год с повышенным количеством осадков привело к снижению содержания N-NO₃, что может быть связано с миграцией этой формы азота вниз в подпахотный горизонт. На содержание доступных для растений форм аммонийного азота гуминовые стимуляторы практически не влияли.

Ключевые слова: чернозём обыкновенный карбонатный, гуминовые препараты, «БИО-Дон», гумат калия, горох, минеральное удобрение, нитратный азот, аммонийный азот

Для цитирования: Карташев С.С., Безуглова О.С. Влияние гумата калия и гуминового препарата «БИО-Дон» на азотный режим чернозема обыкновенного под горохом // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2024. № 2. С. 100–112.

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

Original article

THE EFFECT OF POTASSIUM HUMATE AND A HUMIC PREPARATION “BIO-DON” ON THE NITROGEN REGIME OF THE CALCIC CHERNOZEM UNDER THE PEAS

Semyon S. Kartashev¹, Olga S. Bezuglova²✉

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

¹semyonrus357@gmail.com

²lola314@mail.ru✉

Abstract. The article presents the results of short-term field experience for 2021–2023. Experience is laid down in the hospital of agricultural chemistry and plant protection FSBSI “FRARC”. The effect of the use of potassium humate and the humic preparation “Bio-Don” on the content of mobile nitrogen forms in the Calcic

*Chernozem in the cultivation of the pea Alliance (*Pisum sativum* L.) was studied. The experience scheme included options using mineral fertilizer (Azofoska 40:40:40) and without its use. Humic preparations were used in the phase of forming beans foliar, both together with insecticide and without it.*

It was established that the use of potassium humate shows a positive tendency to accumulate nitrate nitrogen in the Calcic Chernozem. The use of the "BIO-Don" humic preparation per year with an increased amount of precipitation has led to a decrease in the N-NO₃ content, which may be associated with the migration of this form of nitrogen down into the subsoil horizon. The use of humic stimulants affected by the forms of ammonium nitrogen, which is available to plants, practically did not affect.

Keywords: Calcic Chernozem, humic preparations, "BIO-Don", potassium humate, peas, mineral fertilizer, nitrate nitrogen, ammonium nitrogen

For citation: Kartashev S.S., Bezuglova O.S. The Effect of Potassium Humate and a Humic Preparation "Bio-Don" on the Nitrogen Regime of the Calcic Chernozem under the Peas. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2024;(2):100-112. (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

Проблемы экологической и продовольственной безопасности, являясь приоритетными направлениями стратегического развития страны, привлекают пристальное внимание ученых. Увеличение использования удобрений при производстве продукции имеет важное значение для удовлетворения растущего спроса на продовольствие, так как их применение в сельском хозяйстве существенно повышает урожайность возделываемых культур [1]. В то же время чрезмерно высокие дозы минеральных удобрений в севооборотах интенсивных технологий приводят к серьезным экологическим проблемам [2, 3].

Органические удобрения, используемые в качестве альтернативы минеральным удобрениям и в купе с ними, помогают решить эту проблему. Как показывают работы учёных из разных стран, их применение способствует улучшению основных микробиологических и физико-химических свойств, восстанавливает плодородие и экологическое состояние почв, что, в свою очередь, положительно влияет на усвоение элементов питания из минеральных удобрений [4–6]. Однако органические удобрения преимущественно относятся к местным удобрениям, и реалии таковы, что производство и применение органических удобрений во многих регионах страны недостаточны. Например, в Ростовской области максимальные объемы внесения органических удобрений не превышают 50 % от потребности для бездефицитного баланса гумуса [7]. А в целом по Российской Федерации средняя насыщенность 1 га пашни органическими удобрениями составляет менее 1 т/га при необходимой как минимум 5–6 т/га [8]. В такой ситуации применение физиологически активных гуминовых удобрений и препаратов способствует росту урожайности сельскохозяйственных культур, причем за счет не только активизации роста растений и усиления их адаптогенных возможностей, но и лучшей усвояемости элементов питания из почвы и минеральных удобрений [9].

Горох – однолетняя яровая культура. Однако есть зимующие формы, которые в южных районах высевают осенью. В нашей стране наибольшее значение имеет горох посевной (*Pisum sativum* L.), его выращивают как пищевую культуру. Горох полевой, или пелюшку, высевают для кормовых целей и в качестве зеленого удобрения. Горох является третьей по значимости сельскохозяйственной культурой в мире [10].

По данным Росстата за период 2018–2021 гг., посевная площадь гороха по России увеличивается с каждым годом, растет и валовый сбор гороха [11, 12]. Горох, вступая в симбиоз с клубеньковыми бактериями, обогащает почву доступными для растений формами азота, тем самым является хорошим предшественником.

В данной работе представлены результаты исследования влияния гуминового препарата «ВЮ-Дон» и гуминового удобрения «Гумат калия» на азотный режим почвы при внесении индивидуально и совместно с минеральным удобрением.

Методика. Объектами исследований являются горох сорта Альянс, оригинатор сорта ФГБНУ «Федеральный Ростовский аграрный научный центр» (ФРАНЦ), гуминовое удобрение «Гумат калия» производства группы компаний «Флексом» и гуминовый препарат ««БИО-Дон»», минеральное питание на черноземе обыкновенном карбонатном.

Проводился трёхлетний опыт с 2021 по 2023 г. на стационаре агрохимии и защиты растений ФРАНЦ на чернозёме обыкновенном карбонатном.

«БИО-Дон» – жидкий гуминовый препарат – получается путем щелочной экстракции из вермикомпоста – продукта переработки навоза (крупного рогатого скота, конского) компостными червями вида *Eisenia foetida*. Этот препарат не может быть рассмотрен аналогом удобрений в связи с рядом его характеристик: низкая концентрация питательных элементов, щелочная реакция среды (табл. 1).

Таблица 1 / Table 1

**Химический состав гуминового препарата «БИО-Дон»
/ The chemical composition of the humic preparation “BIO-Don”**

N-NO ₃	N-NH ₄	P ₂ O ₅	K ₂ O	C _{гк}	C _{фк}	C _{гк} + C _{фк}
мг/л				г/л		
70-85	190–220	500–550	350–400	1,70–1,86	0,4–0,5	2,1– 2,3

Главной его особенностью является присутствие в составе гуминовых кислот (ГК) и фульвокислот (ФК) в виде их натриевой соли. Благодаря наличию этих биологически активных веществ гуминовый препарат «БИО-Дон» является стимулятором роста и адаптогеном, увеличивая стрессоустойчивость сельскохозяйственных растений к применению гербицидов, инсектицидов и неблагоприятных погодных условий [13–16]. Препарат разбавляли до оптимальной концентрации в нем ГК+ФК – 0,001 % – и производили обработку растений фолиарно совместно с гербицидом и инсектицидом в фазу формирования бобов.

Гумат калия получают из экологически чистого сырья (торфа), это жидкое гуминовое удобрение с высокой степенью очистки и гомогенизации. Содержание ГК+ФК в нем значительно более высокое, помимо этого, в его состав входят микроэлементы (табл. 2), поэтому позиционируется он как гуминовое удобрение. Имеет щелочную среду (не менее 9 ед. рН). Данный препарат увеличивает скорость созревания семян и повышает качество сельхозпродукции, улучшает плодородие почвы, укрепляет иммунную систему возделываемой культуры.

Для гербицидных обработок использовали препарат «Гезагард», КС (500 г/л прометрина), относящийся к классу триазинов и являющийся гербицидом широкого действия против и двудольных, и однодольных сорняков. В связи с чем рекомендуется его использование для зернобобовых культур до появления всходов.

В качестве инсектицида применяли «Би-58 Новый», который очень токсичен, его действующее вещество – диметоат – может сильно угнетать вегетирующие растения. Совместное использование гуминового препарата с пестицидами снижает стрессовую нагрузку, при этом прибавка к урожайности бобовых культур увеличивается до 30 % [17].

Таблица 2 / Table 2

**Химический состав гуминового удобрения «Гумат калия» (группа компаний «Флексом»)
/ The chemical composition of the humic fertilizer “Potassium Humate” (group of companies “Flexom”)**

N (общ.)	P ₂ O ₅	K ₂ O	C _{общ.}	C _{гк}	C _{фк}
мг/л			г/л		
2,66	280	11,18	27,23	25,50	1,73
Микроэлементы, мг/л					
Zn	Co	Mn	Mo	Fe	B
0,61	0,04	2,80	0,023	189,4	0,225

Схема полевого опыта включала 12 вариантов: 6 – на участке без удобрений; 6 – на удобренном фоне. Полевой опыт закладывали в трёх повторностях (табл. 3), горох выступал одной из культур севооборота. В качестве фона вносили минеральное удобрение азофоска NPK – 40:40:40 (в действующем веществе).

Таблица 3 / Table 3

Схема опыта / Experience scheme

Варианты			
Контроль: без удобрений	1а. К	2а. «БИО-Дон»	3а. Гумат калия
	4а. ХСЗ	5а. ХСЗ + «БИО-Дон»	6а. ХСЗ + гумат калия
Фон: NPK 40:40:40	1б. К	2б. «БИО-Дон»	3б. Гумат калия
	4б. ХСЗ	5б. ХСЗ + «БИО-Дон»	6б. ХСЗ+ гумат калия

Примечание. К – контроль без применения пестицидов; ХСЗ – химическая система защиты растений.

Среднесуточная температура за апрель в 2021–2023 гг. была 9,7; 18,5; 16,3 °С соответственно; в мае – 17,7; 22,9; 23,3 °С; в июне – 21,67; 20,7; 19,8 °С. На рис. 1 представлено распределение осадков по декадам в период вегетации гороха за 2021–2023 гг. Как видно, 2022 г. характеризовался засушливостью: начиная с третьей декады мая и по первую декаду июля включительно осадков практически не было. Два других года – 2021-й и 2023-й – характеризовались более благоприятным распределением осадков в течение вегетационного сезона.

Определение нитратов проводилось ионометрическим методом (ГОСТ 26951-86) [18]. Нитраты извлекали из почвы раствором алюмокалиевых квасцов с массовой долей 1 % и определяли нитраты в вытяжке с помощью ионоселективного электрода, обменный аммоний – по методу ЦИНАО ГОСТ 26489-85 [19].

Результаты и обсуждение

Деятельность микроорганизмов, выраженная в их способности усваивать азот из воздуха и переводить его в форму, доступную для растений, является основным источником пополнения азота в почве. Клубеньковые бактерии рода *Rhizobium* относятся к таким микроорганизмам, причем для каждого бобового характерен свой штамм бактерий, получающий название по своему хозяину, соответственно для гороха – это *Rhizobium lehumicosarum* [20]. Положительный эффект работы клубеньковых бактерий, а именно количество азота, связываемого ими, увеличивается при внесении органических и минеральных удобрений и зависит от вида растений, агротехнических мероприятий, типа почвы, её освоенности и других факторов. Бобовые растения не нуждаются в азоте, так как способны сами, благодаря клубеньковым бактериям, живущим на их корнях, накапливать значительное его количество. Как следствие, использование гороха как предшественника благоприятно отражается на азотном режиме почвы. Поэтому после бобовых культур дозы азотных удобрений рекомендуют значительно уменьшать [21], и даже без внесения азотных удобрений можно получать урожайность зерна озимой пшеницы порядка 21–26,5 ц/га [22].

Применение гуминовых препаратов и удобрений оказывает положительный эффект практически во всех случаях. Внесение гуматов совместно с минеральными удобрениями лишь незначительно увеличивает эффект. Положительная тенденция при использовании гуматов особенно выражена для нитратного азота. Первый отбор проб проводился после внесения минерального удобрения (азофоска), второй отбор – после сбора урожая гороха.

На рис. 2 представлены результаты определения содержания нитратного азота в чернозёме обыкновенном карбонатном при возделывании гороха за трехлетний период опыта. Табл. 4 содержит результаты статистической обработки данных.

Содержание нитратного азота в 2021 г. до внесения гуминовых препаратов на делянках без применения минерального удобрения составляет 1,40–2,27 мг/кг, что можно оценить как очень низкое. Сказались низкие температуры апреля: нетипично холодный апрель тормозил развитие клубеньков, и даже при внесении минеральных удобрений количество N-NO₃ увеличивается до значений 6,17–6,70 мг/кг, т.е. остается в той же градации – очень низкое [23].

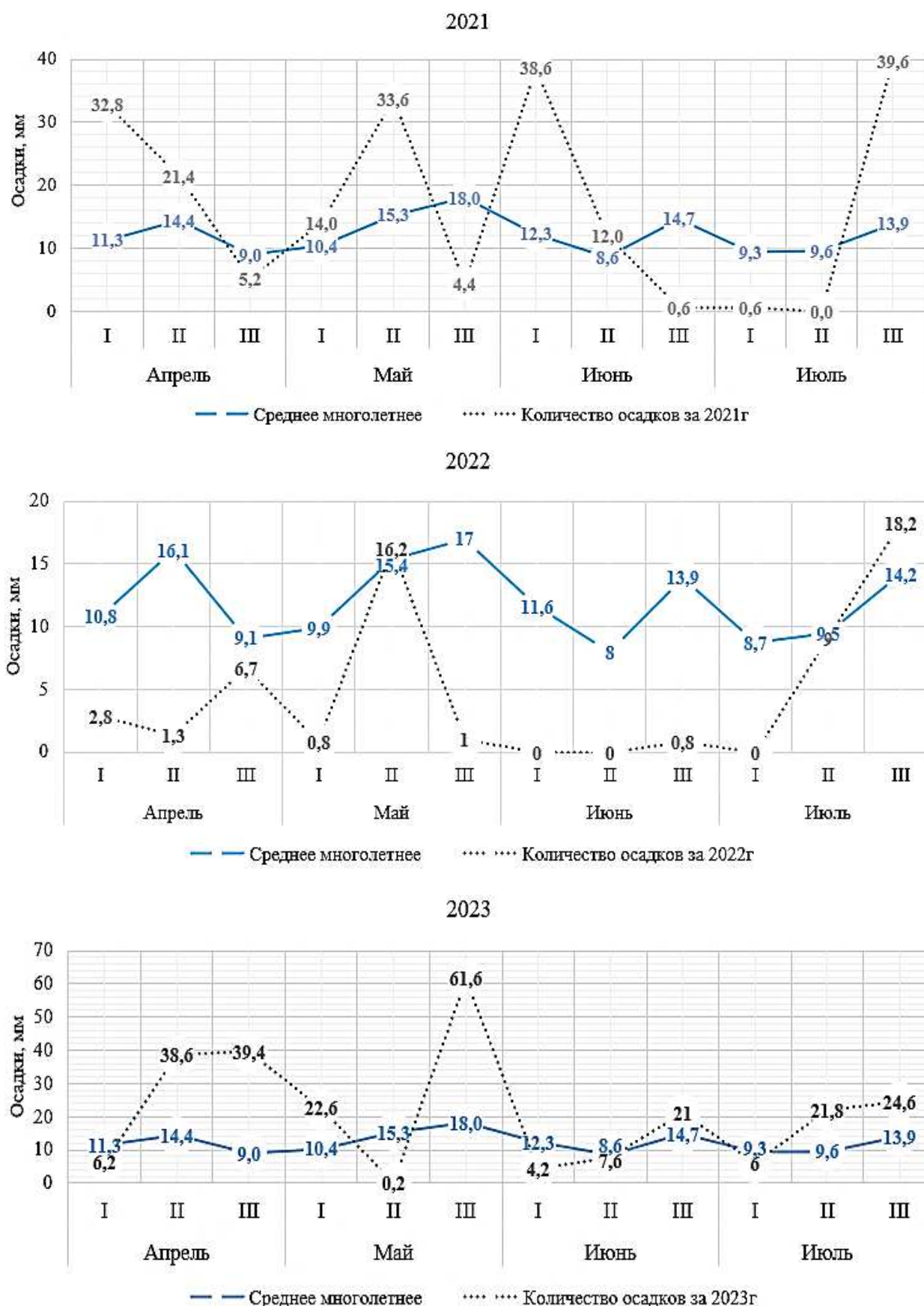


Рис. 1. Распределение осадков по декадам в период вегетации гороха, 2021–2023 гг.
 / Fig. 1. Distribution of precipitation by decades during the growing season of peas, 2021-2023

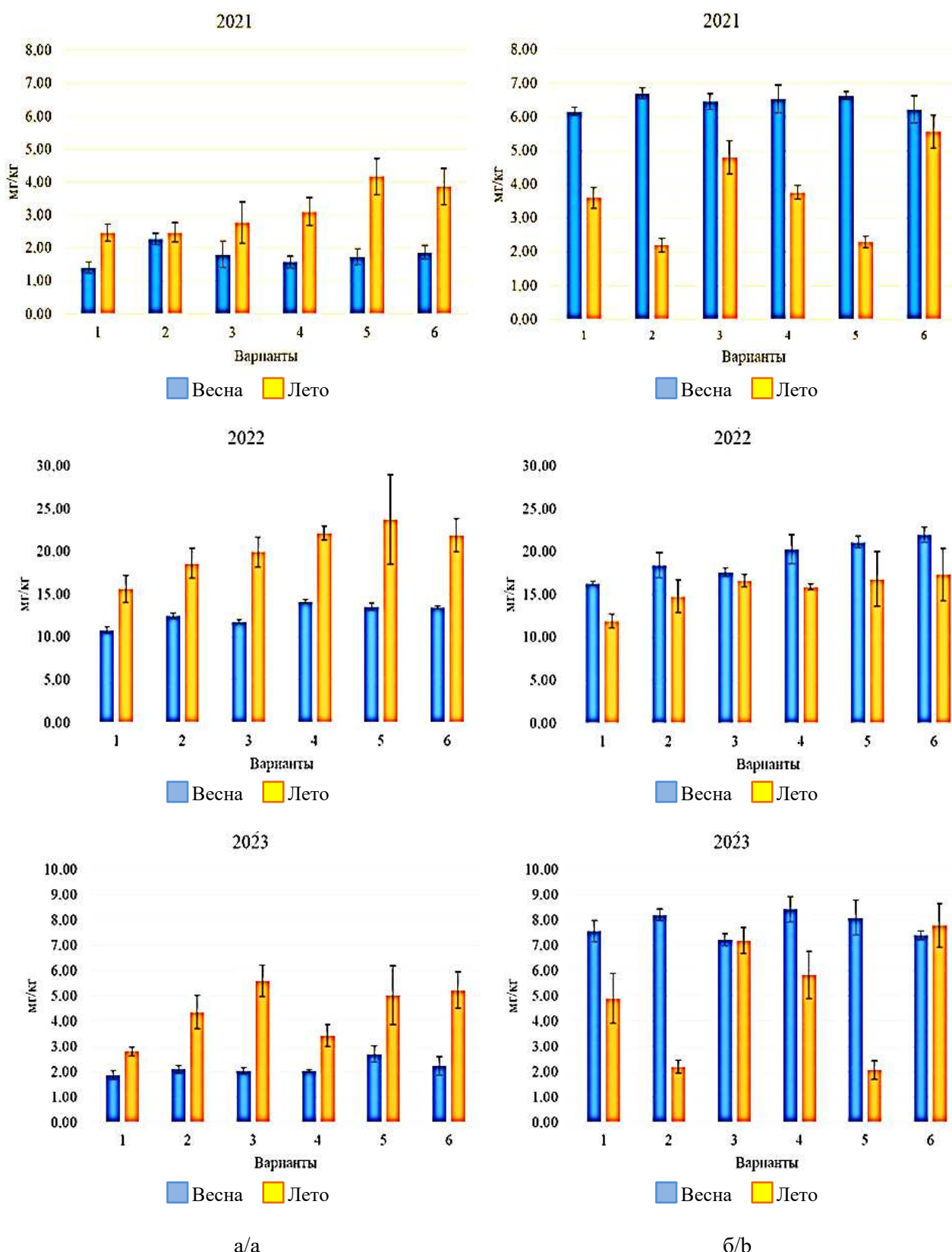


Рис. 2. Содержание нитратного азота в чернозёме обыкновенном карбонатном за 2021–2023 г.:
 а – без удобрения; б – на фоне минерального удобрения; 1 – контроль; 2 – контроль + «БИО-Дон»;
 3 – контроль + гумат калия; 4 – ХСЗ; 5 – ХСЗ + «БИО-Дон»; 6 – ХСЗ + гумат калия / Fig. 2. The content
 of nitrate nitrogen in a Calcic Chernozem Pachic for 2021-2023: a - without fertilizer; b - against the background
 of mineral fertilizer; 1 - control; 2 - control + “BIO-Don”; 3 – control + potassium humate;
 4 - CPS; 5 - CPS + “Bio-Don”; 6 - CPS + potassium humate

Таблица 4 / Table 4

**Достоверность разницы (критерий Стьюдента) в содержании азота нитратов в черноземе
обыкновенном карбонатном под горохом по вариантам опыта с гуматами
(при P=0,95 крит. значение t=2,06) / The reliability of the difference (the criterion of the Student)
in the nitrogen nitrate in the Calcic Chernozem under the peas according to the options
for experience with the humates (at p = 0.95 critic, the value t = 2.06)**

№	Вариант	2021 г.			2022 г.			2023 г.		
		С кон- тролем	С фоном	Вари- анты с ХСЗ между собой	С кон- тролем	С фоном	Вари- анты с ХСЗ между собой	С кон- тролем	С фоном	Вари- анты с ХСЗ между собой
Контроль: без удобрений										
1а	Контроль (К)	–	–	–	–	–	–	–	–	–
2а	К + «ВЮ-Дон»	0,00	–	–	1,25	–	–	2,25	–	–
3а	К + гумат калия	0,44	–	–	1,80	–	–	4,41	–	–
4а	ХСЗ	1,29	–	–	3,65	–	–	1,35	–	–
5а	ХСЗ + «ВЮ-Дон»	2,77	–	1,54	1,48	–	0,30	1,91	–	1,29
6а	ХСЗ + гумат калия	2,28	–	1,11	2,51	–	0,13	3,26	–	2,12
Фон: НРК 40:40:40										
1б	Фон (Ф)	2,82	–	–	2,07	–	–	2,10	–	–
2б	Ф + «ВЮ-Дон»	0,80	3,79	–	0,34	1,38	–	1,90	2,65	–
3б	Ф + гумат калия	4,18	2,07	–	0,57	4,25	–	8,12	2,07	–
4б	Ф+ ХСЗ	3,94	0,45	–	0,16	4,43	–	3,19	0,69	–
5б	Ф+ ХСЗ + «ВЮ-Дон»	0,53	3,70	5,50	0,33	1,47	0,28	1,81	2,70	3,75
6б	Ф + ХСЗ + гумат калия	5,58	3,40	3,39	0,49	1,71	0,47	5,63	2,20	1,54

Сумма выпавших осадков за май-июнь составляет 175 мм. Летние температуры в сочетании с благоприятным увлажнением способствовали развитию растений гороха, и активное потребление азота на формирование вегетативной массы привело к тому, что содержание азота нитратов на протяжении всего сезона оставалось очень низким. Однако в пределах такой низкой обеспеченности отмечено достоверное увеличение по сравнению с контролем на вариантах с гуматами при использовании ХСЗ (варианты 5 и 6) без удобрений. На удобренном фоне как без ХСЗ, так и с ними также отмечено достоверное увеличение содержания N-NO₃ при использовании гуматов по сравнению с фоном.

Второй отбор проб показывает (рис. 2) накопление нитратного азота на делянках без применения азотосодержащих средств до 2,47–4,17 мг/кг, что связано с процессом нитрификации аммонийного азота. В делянках без применения химических средств защиты разницу между контролем и участками с применением гуминовых препаратов нельзя назвать статистически достоверной. Максимальное значение 4,17 мг/кг обнаруживается на делянке с применением препарата «ВЮ-Дон» совместно с пестицидами.

На опыте с внесением азотосодержащего препарата N40P40K40 содержание нитратного азота варьирует от 2,20 до 5,57 мг/кг. Наблюдается достоверное снижение N-NO₃ на делянках с внесением «ВЮ-Дона». Это можно связать с характеристиками препарата, что в совокупности с обильными осадками активизировало процесс денитрификации, в ходе которого в анаэробных условиях нитратный азот восстановился до молекулярного. В свою очередь, применение биологического стимулятора гумата калия показывает достоверное увеличение N-NO₃ в почве на 2,33–3,10 мг/кг по сравнению с контрольным участком. Применение гумата калия в совокупности с минеральным удобрением показывает более выраженную тенденцию к накоплению нитратного азота (4,80 и 5,57 мг/кг).

Наиболее сильное накопление происходит на участке с внесением гумата калия совместно с инсектицидом (5,57 мг/кг).

В 2022 г. опыт был заложен на другом поле севооборота, содержание азота нитратов в почве изначально было выше – 12,71 мг/кг, но все равно характеризовалось как низкое. При внесении в почву минерального удобрения «Азофоска» содержание нитратного азота повышается до 19,29 мг/кг, обеспеченность оценивается как средняя. Сумма выпавших осадков за май-июнь составила 41 мм.

Отбор проб в летний период показал увеличение содержания нитратного азота на делянках с применением гуминовых препаратов до градации «высокая обеспеченность». На контрольных участках с внесением стимуляторов «БИО-Дон» и «Гумат калия» содержание N-NO₃ увеличивается на 2,97 и 4,30 мг/кг соответственно. На участках с применением химических средств наблюдается большой размах колебаний, в связи с чем достоверно подтвержденного увеличения азота нитратов не получено.

На фоновых участках с внесением гуминового препарата «БИО-Дон», по сравнению с результатами 2021 г., наоборот, наблюдается накопление нитратного азота. Это можно объяснить сохранением аэробного дыхания в пересушенном пахотном слое почвы, так как осадков не было практически полтора месяца, что, в свою очередь, уменьшает интенсивность денитрификации. Максимальное значение N-NO₃ наблюдается на участке с применением гумата калия совместно с пестицидом – 17,30 мг/кг, на сравнительном участке с внесением только азофоски – 11,90 мг/кг.

В 2023 г. горох опять был посеян на почве с очень низким содержанием нитратного азота – 2,16 мг/кг. При внесении в почву азофоски среднее значение повышается до 7,82 мг/кг. Сумма выпавших осадков за май-июнь составляет 203 мм.

Отбор проб после сбора урожая гороха на участках без внесения минерального удобрения показывает статистически достоверное увеличение содержания нитратного азота при внесении гумата калия, но общее содержание остается в пределах градации «очень низкое». При фолитарной обработке препаратом «БИО-Дон» наблюдается лишь незначительное увеличение содержания N-NO₃. На фоновом участке содержание нитратного азота составляет 2,80 мг/кг, что можно отнести к градации содержания нитратного азота по Гамзикову «очень низкое». После обработки гуматами содержание нитратного азота увеличивается, оставаясь в той же градации. Максимальное значение N-NO₃ наблюдается на участке с внесением гумата калия (вариант 3) – 5,60 мг/кг.

На участках с внесением азофоски N40P40K40 наблюдается такая же тенденция, как и на аналогичных участках в 2021 г. При применении гуминового препарата в совокупности с минеральным удобрением проявляется негативное влияние на накопление нитратного азота. На делянках без применения химической системы защиты содержание N-NO₃ снижается с 4,90 до 2,20 мг/кг. На участках с внесением «БИО-Дон» совместно с пестицидами снижается на 2,83 мг/кг по сравнению с фоновой делянкой с химической системой защиты.

Аммонийный азот почвы, благодаря процессам нитрификации, окисляется до нитратов и успешно усваивается растениями, поэтому очень важно изучать и его содержание.

На рис. 3 и в табл. 5 представлены результаты определения содержания аммонийного азота в чернозёме обыкновенном карбонатном при возделывании гороха за трехлетний период опыта и расчет достоверности разницы между вариантами. Как видно из рис. 3, в 2021 г. содержание N-NH₄ в весенний период (колеблется от 24,73 до 29,07 мг/кг) сразу после внесения минерального удобрения увеличивается практически в 2 раза и его максимальное значение составляет 59,00 мг/кг.

В летний период на участках без применения минеральных удобрений при внесении гуминовых препаратов («БИО-Дон» и гумат калия) содержание аммонийного азота изменяется незначительно. Его значения колеблются от 17,50 на делянке с химическим средством защиты до 20,83 мг/кг на контрольном опыте с внесением гуминового препарата «БИО-Дон».

В этот же период на опыте с внесением минерального удобрения происходит статистически подтвержденное накопление аммонийного азота практически на всех делянках опыта по сравнению с контрольными, а суммарное содержание азота нитратов и аммонийного азота оценивается как высокое. Можно заметить, что на фоновых площадках применение препарата «БИО-Дон» совместно с пестицидами несколько негативно повлияло на накопление N-NH₄ (19,50 мг/кг) по сравнению с фоновой площадкой без использования инсектицида (25,07 мг/кг). На делянках с применением гумата калия максимальное содержание N-NH₄ зафиксировано именно на участке в варианте использования совместно с пестицидами и составляет 24,80 мг/кг против 17,07 мг/кг без ХСЗ.

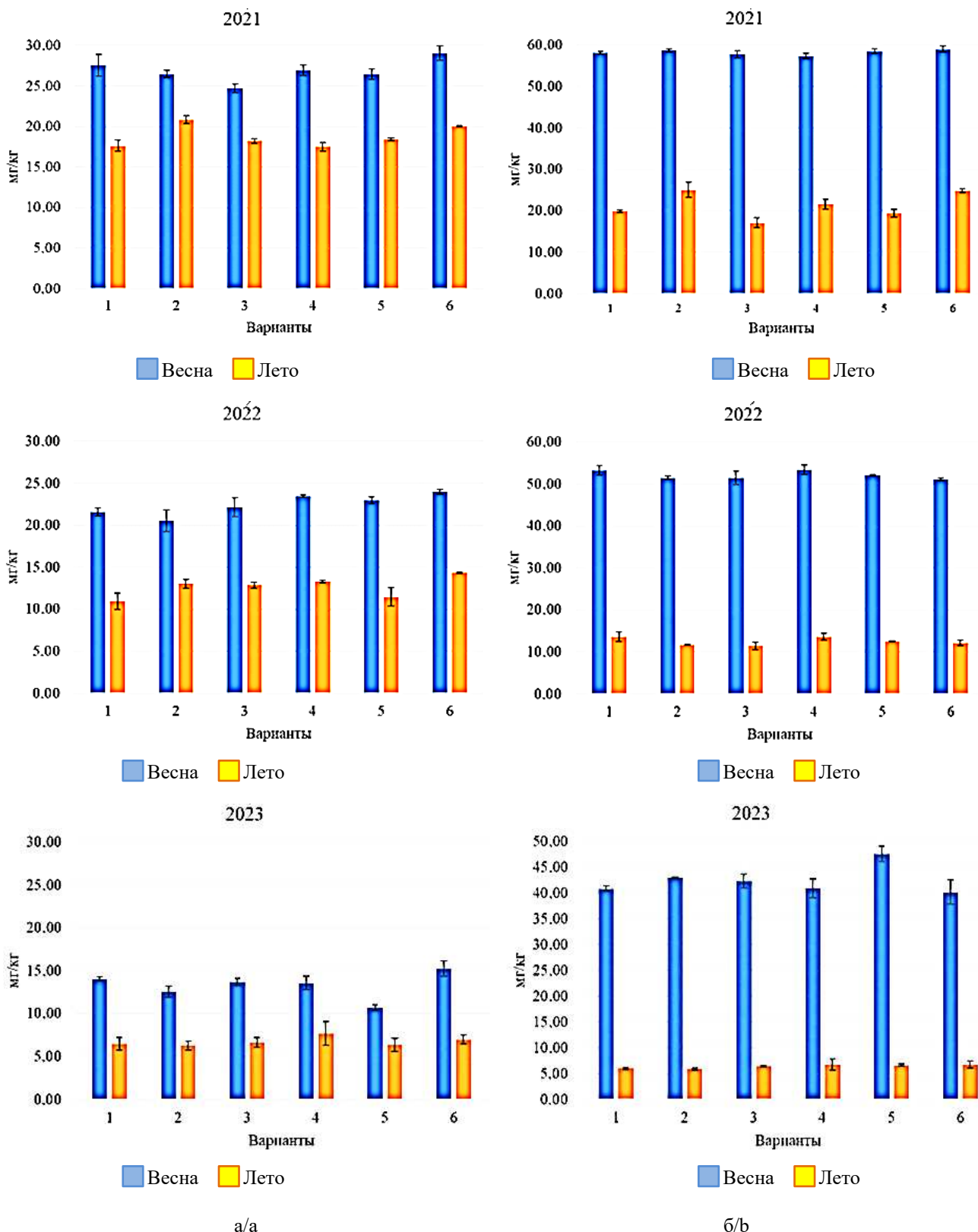


Рис. 3. Содержание аммонийного азота в чернозёме обыкновенном карбонатном за 2021–2023 гг.:
 а – без удобрения; б – на фоне минерального удобрения; 1 – контроль; 2 – контроль + «БИО-Дон»;
 3 – контроль + гумат калия; 4 – ХСЗ; 5 – ХСЗ + «БИО-Дон»; 6 – ХСЗ + гумат калия / Fig. 3. The content
 of ammonium nitrogen in a Calcic Chernozem Pachic for 2021-2023: a - without fertilizer; b - against
 the background of mineral fertilizer; 1 - control; 2 - control + “BIO-Don”; 3 - control + potassium humate;
 4 - CPS; 5 - CPS + “BIO-Don”; 6 - CPS + potassium humate

Таблица 5 / Table 5

Достоверность разницы (критерий Стьюдента) в содержании азота аммонийного в черноземе обыкновенном карбонатном под горохом по вариантам опыта с гуматами (при $P=0,95$ критическое значение $t=2,06$) / The reliability of the difference (the criterion of the Student) in the content of the ammonium nitrogen in the Calcic Chernozem under the peas by the options of experience with the humans (at $p = 0.95$ critical value $t = 2.06$)

№	Вариант	2021 г.			2022 г.			2023 г.		
		С контролем	С фоном	Варианты с ХСЗ между собой	С контролем	С фоном	Варианты с ХСЗ между собой	С контролем	С фоном	Варианты с ХСЗ между собой
Контроль: без удобрений										
1а	Контроль (К)	–	–	–	–	–	–	–	–	–
2а	К + «ВЮ-Дон»	3,85	–	–	1,92	–	–	0,22	–	–
3а	К + гумат калия	0,81	–	–	1,86	–	–	0,18	–	–
4а	ХСЗ	0,16	–	–	2,41	–	–	0,76	–	–
5а	ХСЗ + «ВЮ-Дон»	1,11	–	1,68	0,35	–	1,67	0,13	–	0,84
6а	ХСЗ + гумат калия	3,52	–	4,87	3,52	–	5,32	0,57	–	0,47
Фон: NPK 40:40:40										
1б	Фон (Ф)	2,92	–	–	1,72	–	–	0,65	–	–
2б	Ф + «ВЮ-Дон»	3,84	2,79	–	0,77	1,59	–	0,85	0,41	–
3б	Ф + гумат калия	0,41	2,27	–	0,36	1,47	–	0,00	1,73	–
4б	Ф + ХСЗ	2,96	1,40	–	2,11	0,02	–	0,17	0,63	–
5б	Ф+ ХСЗ + «ВЮ-Дон»	1,59	0,39	1,40	1,63	0,88	1,31	0,18	1,90	0,09
6б	Ф + ХСЗ + гумат калия	8,75	8,20	2,57	1,03	1,04	1,36	0,20	0,99	0,03

Содержание аммонийного азота в опыте 2022 г., как и в предыдущий год после внесения минерального удобрения, который и является основным его источником, возрастает в разы. Среднее его содержание на контрольных делянках составляет 22,45 мг/кг, на фоновых же – 52,13 мг/кг.

Содержание аммонийного азота в пробах, отобранных в летний период на делянках без внесения азофоски, колеблется в интервале от 10,97 до 14,33 мг/кг. Наблюдается статистически достоверное накопление аммонийного азота в варианте с обработкой растений пестицидом и гуматом калия по сравнению с вариантом пестициды + «ВЮ-Дон».

Обработка гуматами совместно с пестицидом на делянки с минеральным удобрением в большинстве своем не повлияла на накопление аммонийного азота. Среднее его содержание составило 12,50 мг/кг.

В опыте 2023 г. на делянках без обработок гуматами среднее содержание N-NH₄ составляет 13,31 мг/кг, с внесением азофоски – 42,51 мг/кг.

Второй отбор проб не дает достоверной информации по накоплению или потере аммонийного азота и с внесением органических стимуляторов без пестицидов, и при их совместном использовании.

Содержание аммонийного азота на контрольных делянках без минерального удобрения колеблется от 6,30 до 7,70 мг/кг при среднем содержании 6,76 мг/кг. N-NH₄ на фоновых делянках изменяется от 5,87 до 6,73 мг/кг. Статистически подтвержденных различий в содержании аммонийного азота в почве между делянками с разными гуматами не наблюдалось.

Заключение

Проведённые полевые испытания в период с 2021 по 2023 г. показали, что при возделывании посевного гороха (*Pisum sativum* L.) гуматы при их совместном применении с пестицидами на чернозёме обыкновенном карбонатном в Приазовской степи Ростовской области дают положительный эффект. Наблюдается достоверно подтверждённая тенденция к увеличению накопления нитратного азота при фолиарных обработках посевов гороха гуминовым удобрением «Гумат калия». При использовании гуминового препарата «БИО-Дон» наблюдается обратная тенденция. Содержание нитратного азота заметно снижается в 2021 и 2023 гг., что может быть связано с достаточно высоким количеством осадков, в силу чего нитраты могли уйти в нижележащие горизонты. Фолиарное использование гуминовых стимуляторов практически не влияет на изменение содержания доступных форм аммонийного азота. Положительную тенденцию наблюдали только в 2021 г. В 2022 и 2023 гг. каких-либо закономерностей отмечено не было, что может быть связано с особенностью поведения азотфиксирующих бактерий при возделывании гороха.

Список источников

1. Yao Z., Zheng X., Wang R., Liu C., Lin S., Butterbach-Bahl K. Benefits of integrated nutrient management on N₂O and NO mitigations in water-saving ground cover rice production systems // *Sci Total Environ*. 2019. Vol. 646. P. 1155–1163.
2. Huang J., Duan Y.H., Xu M.G., Zhai L.M., Zhang X.B., Wang B.R., Zhang Y.Z., Gao S.D., Sun N. Nitrogen mobility, ammonia volatilization, and estimated leaching loss from long-term manure incorporation in red soil // *J. Integr Agr*. 2017. Vol. 16. P. 2082–2092.
3. Hou Q., Ni Y., Huang Sh., Zuo T., Wang J., Ni W. Effects of substituting chemical fertilizers with manure on rice yield and soil labile nitrogen in paddy fields of China: A meta-analysis // *Pedosphere*. 2022. Vol. 33(1). P. 172–184.
4. Ahanger M.A., Qi M., Huang Z., Xu X., Begum N., Qin C., Zhang Ch., Ahmad N., Mustafa N.S., Ashraf M., Zhang L. Improving growth and photosynthetic performance of drought stressed tomato by application of nano-organic fertilizer involves up-regulation of nitrogen, antioxidant and osmolyte metabolism // *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2021. Vol. 216. P. 112195.
5. Chen L., Li X., Peng Y., Xiang P., Zhou Y., Yao B., Zhou Y., Sun Ch. Co-application of biochar and organic fertilizer promotes the yield and quality of red pitaya (*Hylocereus polyrhizus*) by improving soil properties // *Chemosphere*. 2022. Vol. 294. P. 133619.
6. Kang Y.G., Lee J.-H., Chun J.-H., Yun Y.-U., Hatamleh A.A., Al-Dosary M.A., Al-Wasel Y.A., Lee K.-S., Oh T.-K. Influence of individual and co-application of organic and inorganic fertilizer on NH₃ volatilization and soil quality // *J. of King Saud University-Science*. 2022. Vol. 34, № 5. P. 102068.
7. Денисов В.В., Васильев А.М. Анализ применения органических и минеральных удобрений на землях сельскохозяйственного назначения Ростовской области // *Науч. журн. Рос. НИИ проблем мелиорации*. 2013. № 1(09). С. 182–192.
8. Бондаренко А.М., Качанова Л.С. Ресурсосберегающая технология производства и применения жидких концентрированных органических удобрений в Ростовской области // *Агроинженерия*. 2016. № 2 (72). С. 19–28.
9. Безуголова О.С., Полиенко Е.А., Горовцов А.В., Лыхман В.А. Влияние гуминовых препаратов на почвы и растения. Ростов н/Д.; Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2019. 154 с.
10. Poblaciones M.J., Rengel Z. Soil and foliar zinc biofortification in field pea (*Pisum sativum* L.): Grain accumulation and bioavailability in raw and cooked grains // *Food Chemistry*. 2016. Vol. 212. P. 427–433.
11. Единая межведомственная информационно-статистическая система. URL: <https://fedstat.ru/indicator/30950> (дата обращения: 12.10.2023).
12. Единая межведомственная информационно-статистическая система URL: <https://fedstat.ru/indicator/31328> (дата обращения: 12.10.2023).
13. Вахабов А., Тиркашев Л.Я., Мухаммаджонов М.М. Роль биогумуса в ускорении всхода семян сельскохозяйственных культур // *Теоретические и прикладные аспекты современной науки*. 2015. № 8-2. С. 18–20.

14. Шаповал О.А., Можарова И.П., Кориунов А.А. Регуляторы роста растений в агротехнологиях // Защита и карантин растений. 2014. № 6. С. 16–20.
15. Якименко О.С. Применение гуминовых продуктов в РФ: результаты полевых опытов (обзор литературы) // Живые и биокосные системы. 2016. № 18. С. 1–12.
16. Ilieva A., Vasileva V. Effect of liquid organic humate fertilizer Humustim on chemical composition of spring forage pea // Banat's J. of Biotechnology. 2013. Vol. 4, № 7. P. 74–79.
17. Полиенко Е.А., Безуглова О.С., Патрикеев Е.С., Горовцов А.В., Лыхман В.А., Наими О.И., Дубинина М.Н., Поволоцкая Ю.С. Влияние гуминовых веществ на динамику элементов питания при сочетании с системами защиты нута // Агрехим. вестн. 2020. № 5. С. 52–57. Doi: 10.24411/1029-2551-2020-10069.
18. ГОСТ 26951-86. Почвы. Определение нитратов ионометрическим методом. М., 1986. 7 с.
19. ГОСТ 26489-85. Почвы. Определение обменного аммония по методу ЦИНАО. М., 1985. 5 с.
20. Клещев Н.Ф. Агробиотехнология: биологическая фиксация молекулярного азота. Харьков: ХПИ, 2014. 168 с.
21. Гургель А., Шименц К. Роль бобовых в азотном балансе почвы. URL: <https://www.german-seed-alliance.de/ru/news/news-detail/cktk6/u/163/> (дата обращения: 05.01.2024).
22. Завалин А.А., Накаряков А.М. Эффективность применения биомодифицированных азотных удобрений под озимую пшеницу // Агрехим. вестн. 2021. № 1. С. 33–37. Doi: 10.24412/1029-2551-2021-1-006.
23. Гамзиков Г.П. Почвенная диагностика азотного питания растений и применение азотных удобрений в севооборотах // Плодородие. 2018. № 1. С. 8–14.

References

1. Yao Z., Zheng X., Wang R., Liu C., Lin S., Butterbach-Bahl K. Benefits of integrated nutrient management on N₂O and NO mitigations in water-saving ground cover rice production systems. *Sci. Total Environ.* 2019;646:1155-1163.
2. Huang J., Duan Y.H., Xu M.G., Zhai L.M., Zhang X.B., Wang B.R., Zhang Y.Z., Gao S.D., Sun N. Nitrogen mobility, ammonia volatilization, and estimated leaching loss from long-term manure incorporation in red soil. *J. Integr. Agr.* 2017;16:2082-2092.
3. Hou Q., Ni Y., Huang Sh., Zuo T., Wang J., Ni W. Effects of substituting chemical fertilizers with manure on rice yield and soil labile nitrogen in paddy fields of China: A meta-analysis. *Pedosphere.* 2022;33(1):172-184.
4. Ahanger M.A., Qi M., Huang Z., Xu X., Begum N., Qin C., Zhang Ch., Ahmad N., Mustafa N.S., Ashraf M., Zhang L. Improving growth and photosynthetic performance of drought stressed tomato by application of nano-organic fertilizer involves up-regulation of nitrogen, antioxidant and osmolyte metabolism. *Ecotoxicology and Environmental Safety.* 2021;216:112195.
5. Chen L., Li X., Peng Y., Xiang P., Zhou Y., Yao B., Zhou Y., Sun Ch. Co-application of biochar and organic fertilizer promotes the yield and quality of red pitaya (*Hylocereus polyrhizus*) by improving soil properties. *Chemosphere.* 2022;294:133619.
6. Kang Y.G., Lee J.-H., Chun J.-H., Yun Y.-U., Hatamleh A.A., Al-Dosary M.A., Al-Wasel Y.A., Lee K.-S., Oh T.-K. Influence of individual and co-application of organic and inorganic fertilizer on NH₃ volatilization and soil quality. *J. of King Saud University-Science.* 2022;34(5):102068.
7. Denisov V.V., Vasiliev A.M. Analysis of the use of organic and mineral fertilizers on agricultural lands in the Rostov region. *Nauch. zhurn. Ros. NII problem melioratsii = Scientific Journal of the Russian Research Institute for Land Reclamation Problems.* 2013;(1):182-192. (In Russ.).
8. Bondarenko A.M., Kachanova L.S. Resource-saving technology for the production and use of liquid concentrated organic fertilizers in the Rostov region. *Agroinzheneriya = Agroengineering.* 2016;(2):19-28. (In Russ.).
9. Bezuglova O.S., Polienko E.A., Gorovtsov A.V., Lykhman V.A. *The influence of humic preparations on soils and plants.* Rostov-on-Don; Taganrog: Southern Federal University Press; 2019. 154 p. (In Russ.).
10. Poblaciones M. J., Rengel Z. Soil and foliar zinc biofortification in field pea (*Pisum sativum* L.): Grain accumulation and bioavailability in raw and cooked grains. *Food Chemistry.* 2016;212:427-433.
11. *Unified interdepartmental information and statistical system.* Available from: <https://fedstat.ru/indicator/30950> [Accessed 12th October 2023]. (In Russ.).
12. *Unified interdepartmental information and statistical system.* Available from: <https://fedstat.ru/indicator/31328> [Accessed 12th October 2023]. (In Russ.).
13. Vakhobov A., Tirkashev L. Ya., Mukhammadzhonov M. M. The role of vermicompost in accelerating the germination of agricultural crop seeds. *Teoreticheskie i prikladnye aspekty sovremennoi nauki = Theoretical and Applied Aspects of Modern Science.* 2015;(8-2):18-20. (In Russ.).
14. Shapoval O. A., Mozharova I. P., Korshunov A. A. Plant growth regulators in agricultural technologies. *Zashchita i karantin rastenii = Plant Protection and Quarantine.* 2014;(6):16-20. (In Russ.).
15. Yakimenko O. S. Application of humic products in the Russian Federation: results of field experiments (literature review). *Zhivye i biokosnye sistemy = Living and Bio-Inert Systems.* 2016;(18):1-12. (In Russ.).

16. Ilieva A., Vasileva V. Effect of liquid organic humate fertilizer Humustim on chemical composition of spring forage pea. *Banat's Journal of Biotechnology*. 2013;4(7):74-79.

17. Polienko E.A., Bezuglova O.S., Patrikeev E.S., Gorovtsov A.V., Lykhman V.A., Naimi O.I., Dubinina M.N., Povolotskaya Yu.S. The influence of humic substances on the dynamics of nutrients when combined with chickpea protection systems. *Agrokhim. vestn. = Agrochemical Bulletin*. 2020;(5):52-57. Doi: 10.24411/1029-2551-2020-10069. (In Russ.).

18. GOST 26951-86. Soils. Determination of nitrates by ionometric method. Moscow, 1986. 7 p. (In Russ.).

19. GOST 26489-85. Soils. Determination of exchangeable ammonium by CINAO method. Moscow, 1985. 5 p. (In Russ.).

20. Kleshchev N.F. *Agricultural biotechnology: biological fixation of molecular nitrogen*. Kharkov: Kharkov Polytechnic Institute Press, 2014. 168 p. (In Russ.).

21. Gurgel A., Schimenz K. *The role of legumes in the nitrogen balance of the soil*. Available from: <https://www.german-seed-alliance.de/ru/news/news-detail/cktk6/u/163/> [Accessed 5th January 2024]. (In Russ.).

22. Zavalin A.A., Nakaryakov A.M. Efficiency of using biomodified nitrogen fertilizers for winter wheat. *Agrokhim. vestn. = Agrochemical Bulletin*. 2021;(1):33-37. Doi: 10.24412/1029-2551-2021-1-006. (In Russ.).

23. Gamzikov G.P. Soil diagnostics of nitrogen nutrition of plants and the use of nitrogen fertilizers in crop rotations. *Plodorodie = Fertility*. 2018;(1):8-14. (In Russ.).

Информация об авторах

С.С. Карташев – аспирант, кафедра почвоведения и оценки земельных ресурсов, Академия биологии и биотехнологии им. Д.И. Ивановского.

О.С. Безуглова – доктор биологических наук, профессор, кафедра почвоведения и оценки земельных ресурсов, Академия биологии и биотехнологии им. Д.И. Ивановского.

Information about the authors

S.S. Kartashev - Postgraduate Student, Department of Soil Science and Assessment of Land Resources, Academy of Biology and Biotechnologies.

O.S. Bezuglova - Doctor of Science (Biology), Professor, Department of Soil Science and Assessment of Land Resources, Academy of Biology and Biotechnologies.

*Статья поступила в редакцию 12.01.2024; одобрена после рецензирования 07.02.2024; принята к публикации 24.05.2024.
The article was submitted 12.01.2024; approved after reviewing 07.02.2024; accepted for publication 24.05.2024.*

Научная статья

УДК 556; 551.521

doi: 10.18522/1026-2237-2024-2-113-122

ИЗУЧЕНИЕ РАДИОАКТИВНОСТИ ВОД ГОРНЫХ РЕК КАБАРДИНО-БАЛКАРСКОЙ РЕСПУБЛИКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДЕТЕКТОРА NaI В НИЗКОФОНОВОЙ ЗАЩИТЕ

**Сергей Иванович Шагин¹, Адам Музарифович Пшуков², Анета Ахмедовна Кокоева^{3✉},
Оксана Зауровна Блиева⁴**

^{1, 2, 3, 4} Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова, Нальчик, КБР, Россия

¹uniid-sergey@yandex.ru

²pshukov1959@mail.ru

³al-aneta@mail.ru✉

⁴roksy_85@mail.ru

Аннотация. Приводятся результаты исследований радиоактивности вод горных рек Кабардино-Балкарской Республики с помощью детектора NaI в низкофоновой защите. Представлен метод низкофоновой γ -спектрометрии обнаружения радиоактивности в питьевой воде, который является эффективным методом и обладает высокой чувствительностью к радиоактивному излучению, что позволяет точно определять уровень радиоактивности. Для измерения радиации в образцах в условиях низкого фона была использована спектрометрическая установка МКС-01А «МУЛЬТИРАД». Идентификацию и расчет объемной активности радионуклидов проводили с помощью специального программного обеспечения «Прогресс». Изучены уровни концентраций и распределение удельной активности естественных радионуклидов ^{137}Cs , ^{232}Th , ^{40}K , ^{226}Ra и ^{222}Rn . Образцы вод взяты из рек Баксанского, Черекского ущелий и реки Малка. Исследования показали, что уровни радиации оказались в пределах нормы, установленной для питьевой воды.

Ключевые слова природная вода, радиоактивность, γ -спектрометрия, детектор NaI, низкофоновая защита, ^{137}Cs , ^{232}Th , ^{40}K , ^{226}Ra , ^{222}Rn

Для цитирования: Шагин С.И., Пшуков А.М., Кокоева А.А., Блиева О.З. Изучение радиоактивности вод горных рек Кабардино-Балкарской Республики с использованием детектора NaI в низкофоновой защите // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2024. № 2. С. 113–122.

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

Original article

STUDY OF RADIOACTIVITY OF MOUNTAIN RIVERS WATERS OF THE KABARDINO-BALKARIAN REPUBLIC USING THE NaI DETECTOR IN LOW-BACKGROUND PROTECTION

Sergey I. Shagin¹, Adam M. Pshukov², Aneta A. Kokoeva^{3✉}, Oksana Z. Blieva⁴

^{1, 2, 3, 4} Berbekov Kabardino-Balkarian State University, Nalchik, Kabardino-Balkarian Republic, Russia

¹uniid-sergey@yandex.ru

²pshukov1959@mail.ru

³al-aneta@mail.ru✉

⁴roksy_85@mail.ru

© Шагин С.И., Пшуков А.М., Кокоева А.А., Блиева О.З., 2024

Abstract. The results of studies of the radioactivity of the waters of the mountain rivers of the Kabardino-Balkarian Republic using the NaI detector in low-background protection are presented. The paper presents a method of low-background gamma-ray spectrometry for detecting radioactivity in drinking water, which is an effective method, has high sensitivity to radioactive radiation and allows you to accurately determine the level of radioactivity. The MULTIRAD MKS-01A spectrometric installation was used to measure radiation in samples under low background conditions. The identification and calculation of the volumetric activity of radionuclides was carried out using special software "Progress". Concentration levels and specific activity distribution of natural radionuclides ^{137}Cs , ^{232}Th , ^{40}K , ^{226}Ra and ^{222}Rn were studied. Water samples were taken from the rivers of the Baksan, Cherek gorges and the Malka River of the Kabardino-Balkarian Republic. Studies have shown that radiation levels were within the norm set for drinking water.

Keywords: natural water, radioactivity, gamma-ray spectrometry, NaI detector, low-background protection, ^{137}Cs , ^{232}Th , ^{40}K , ^{226}Ra , ^{222}Rn

For citation: Shagin S.I., Pshukov A.M., Kokoeva A.A., Blieva O.Z. Study of Radioactivity of Mountain Rivers Waters of the Kabardino-Balkarian Republic Using the NaI Detector in Low-Background Protection. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2024;(2):113-122. (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

Измерение радиоактивности – важная задача, решение которой позволит контролировать содержание радиоактивных элементов в окружающей среде и принимать меры по защите населения от радиационного воздействия. Особенно актуально измерение радиоактивности в природных водоемах, таких как горные реки, где могут накапливаться радиоактивные элементы из различных источников. Повышенное их содержание в воде может быть связано и с природными источниками, и с антропогенным загрязнением, поэтому такие измерения необходимы для раннего выявления проблем и принятия мер по их устранению.

Принятие национальных и международных нормативов по ограничению содержания радиоактивных веществ в потребляемых человеком водах, включая минеральные бутилированные, послужило причиной многочисленных исследований по этой тематике.

Радионуклиды природного происхождения обычно содержатся в питьевой воде в различных количествах, попадая в водоносный горизонт вместе с другими катионами и анионами в результате процессов эрозии и растворения [1]. Самыми важными являются уран-238 (^{238}U), уран-234 (^{234}U), радий-226 (^{226}Ra) и радон-222 (^{222}Rn). ^{238}U (примерно 3 мг/кг) и его дочерний продукт ^{234}U часто встречаются в воде. Необходимо учитывать, что основное содержание ^{222}Rn связано с его эманацией из почвы. Несмотря на то что активность ^{222}Rn в свежей воде может быть значительно выше, чем у других радионуклидов, она может легко снижаться из-за десорбции и физического распада.

Еще одно значимое радиоактивное семейство – тория-232 (^{232}Th). Количество тория в земной коре превышает количество урана в 3–4 раза, однако из-за плохой растворимости он редко встречается в водах. Радий-228 (^{228}Ra) может быть важным загрязняющим веществом, что связано с его высокой радиотоксичностью. Калий-40 (^{40}K) является распространенным радионуклидом, являющимся бета-гамма-излучателем естественного происхождения и излучающим стабильный калий в фиксированном соотношении (31,3 Бк/г).

Изотоп цезия-137 (^{137}Cs) считается одним из наиболее опасных техногенных радионуклидов. К его основным источникам относятся ядерные аварии, например аварии на Чернобыльской АЭС (1986 г.), Фукусимской АЭС (2011 г.). В результате значительное количество ^{137}Cs было выброшено в окружающую среду, что привело к загрязнению всех её компонентов.

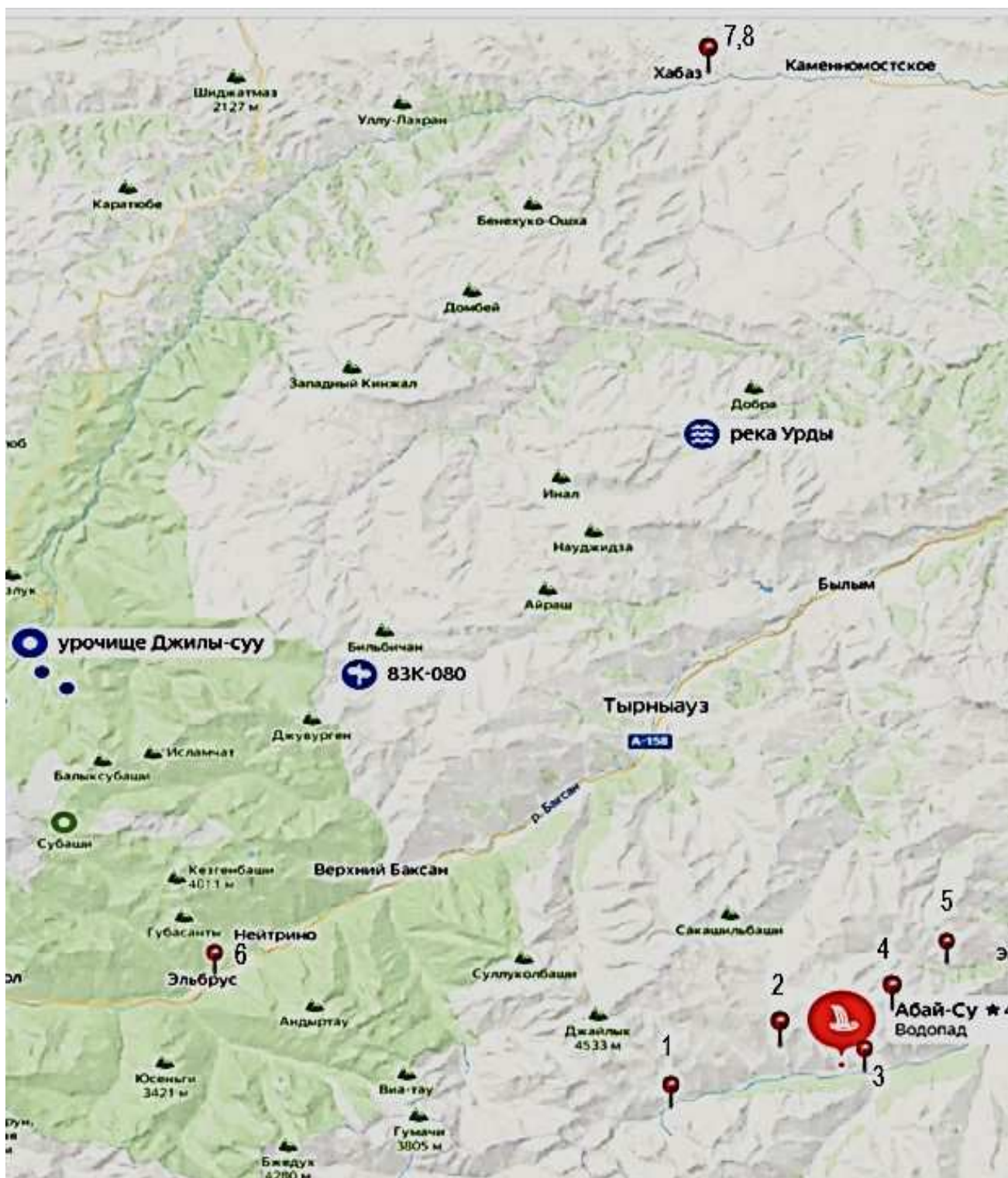
^{137}Cs имеет долгий период полураспада (около 30 лет), это означает, что он остается активным в окружающей среде на протяжении длительного времени.

С начала 80-х гг. XX в. в США проводятся мониторинги радиоактивности питьевой воды [2–4]. В основном проводились измерения изотопов урана, ^{226}Ra , ^{228}Ra и ^{222}Rn , исследования подземных вод [1, 5–25].

В данной работе представлены исследования содержания радиоактивности в водах природных рек из различных месторождений на территории Кабардино-Балкарской Республики (КБР).

Материалы и методы исследования

Работа посвящена определению содержания радиоактивных веществ и изучению распределения удельной активности широкого спектра радионуклидов в водах горных ущелий Баксанского и Черекского, а также реки Малка КБР. Отбор проб осуществлялся в 8 разных местах (рис. 1).



1 – р. Урдоз-Су; 2 – р. Сырынсу; 3 – р. Абай-Су; 4 – р. Баула-Су; 5 – р. Джылгысу;
6 – р. Баксан; 7 – р. Малка, 8 – нарзановый источник с. Хабаз

Рис. 1. Места отбора образцов воды / Fig. 1. Water sampling sites

Для определения уровня радиации использовали специализированный детектор NaI диаметром 63 мм и высотой 63 мм в низкофоновой защите. Измерения радиации в образцах в условиях низкого фона осуществлялись с помощью спектрометрической установки МКС-01А «МУЛЬТИ-РАД», включающей в себя сцинтилляционные блоки детектирования, свинцовые защиты от внешнего гамма-облучения, вспомогательные устройства (рис. 2).



Рис. 2. Установка МКС-01А «МУЛЬТИРАД» / Fig. 2. The installation of the ISS-01A “MULTIRAD”

Детектор расположен в подвальном помещении трехэтажного здания КБГУ, в лаборатории Центра новых детекторных технологий и регистраций нейтрино, что является дополнительной защитой от внешней радиации – ядерной компоненты космических лучей.

Идентификацию и расчет объемной активности радионуклидов проводили с помощью специального программного обеспечения «Прогресс», который позволяет идентифицировать радионуклиды в пробе, определять активность соответствующих нуклидов, рассчитывать неопределенность измерения активности и протоколировать результаты.

Исследование образцов проводили в классическом сосуде Маринелли емкостью 1 л с крышкой. Это специальная пластиковая емкость особой цилиндрической формы, предназначенная для размещения в ней порций (проб) анализируемых объектов, в первую очередь – продуктов питания (в сыпучем или жидком виде), и для последующего измерения спектрометром активности радиационного излучения, исходящего от этих проб.

Измерение фонового спектра проводилось с закрытой крышкой со свинцовой защитой. От его продолжительности зависит точность, с которой в дальнейшем определялась удельная активность. Этот процесс длился не менее 2 ч для достижения характеристик точности.

На детектор устанавливали входящий в состав спектрометрического тракта контрольный источник и запускали его в режиме энергетической калибровки. Детектор калибруется источником ^{137}Cs и ^{40}K . Характеристический калибровочный спектр установки представлен на рис. 3. Основные параметры результатов калибровок в течение года приведены в табл. 1.

По истечении предустановленного времени (как правило, 150 с) набор спектра останавливается и на экране отображаются результаты его обработки.

Программа обработки данных строит зависимость энергии от номера канала анализатора и предоставляет следующие контрольные характеристики:

- позиции (в каналах) пиков 662 кэВ ^{137}Cs и 1460 кэВ ^{40}K (см. третий столбец табл. 1);
- энергетическое разрешение для пиков 662 кэВ ^{137}Cs и 1460 кэВ ^{40}K (см. 4-й и 6-й столбцы табл. 1);
- для контроля стабильности счетной характеристики установки на экран выводится значение контрольной скорости счета от источника, имп/с. Результаты счета показаны во втором столбце табл. 1.

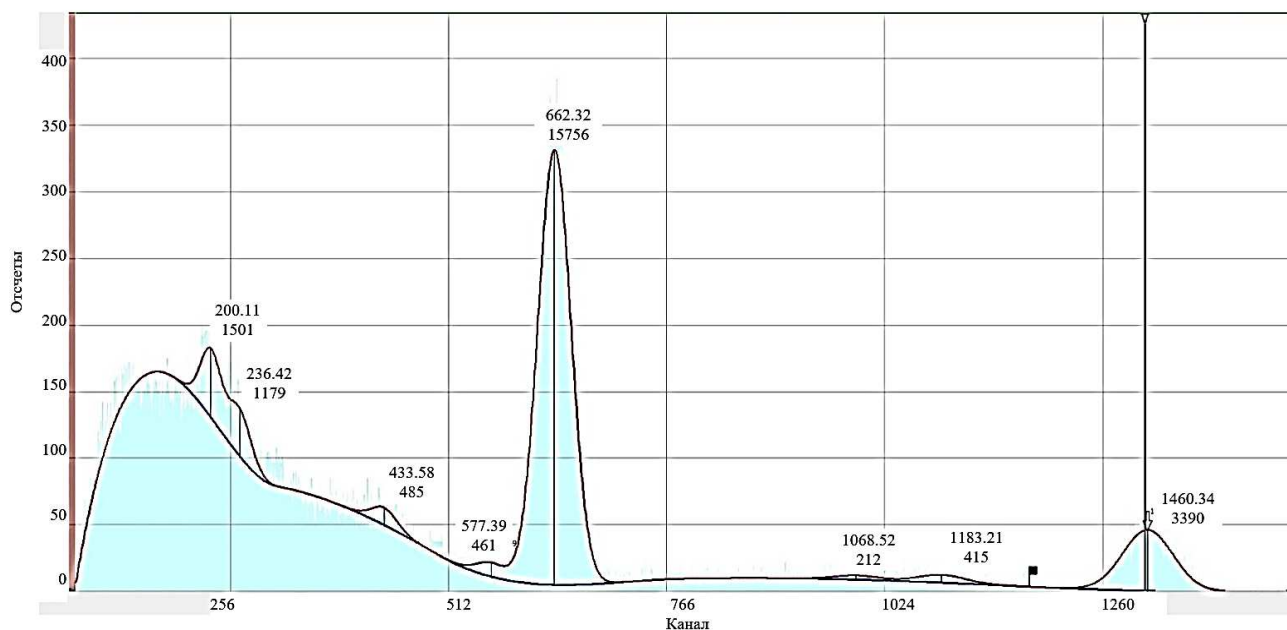


Рис. 3. Калибровочный спектр / Fig. 3. Calibration spectrum

Таблица 1 / Table 1

Результаты калибровок / Calibration results

Дата измерения, время	Контрольная скорость счета, 1/с	Линия 662 кэВ		Линия 1461 кэВ	
		Позиция, кан.	Разрешение, кэВ	Позиция, кан.	Разрешение, кэВ
03.03.2023, 13:04	111	636	52	1334	81
14.03.2023, 08:47	111	636	52	1334	85
04.04.2023, 11:05	110	637	52	1336	83
04.05.2023, 09:25	111	631	51	1324	81
14.06.2023, 09:19	111	630	52	1320	87
05.07.2023, 12:01	109	628	53	1320	84
29.11.2023, 11:08	110	628	52	1320	80
20.12.2023, 15:39	110	634	51	1332	86
09.01.2024, 16:01	110	636	52	1337	87

Из табл. 1 видно, что в результате многодневных наблюдений в течение года позиции контрольных точек менялись незначительно, не более чем на 1 %. Периодичность проведения энергетической калибровки определялась в зависимости от длительности измерения.

С целью получения более точных результатов измерения образцов воды с низким содержанием радиоактивности время измерения фона было увеличено и достигало суток (табл. 2).

Текущий фоновый спектр установки формировался согласно следующему алгоритму:

- спектр, полученный после первого измерения фона, сохраняется без изменений как фоновый;
- спектр любого последующего измерения усредняется с сохраненным ранее фоновым спектром установки. Результат усреднения записывается как новый фоновый спектр установки.

Таблица 2 / Table 2

**Результаты измерения фона в образцах в течение года
/ The results of measuring the background in the samples during the year**

Интервал, кэВ	Фон, им.с.								
	300–600	4,8	4,75	4,75	4,75	4,9	4,85	4,8	4,85
600–900	2,71	2,7	2,7	2,7	2,75	2,74	2,76	2,73	2,74
900–1300	2,06	2,06	2,06	2,05	2,12	2,13	2,11	2,12	2,12
1300–1700	1,41	1,41	1,41	1,40	1,44	1,46	1,45	1,45	1,45
1700–2000	0,20	0,20	0,20	0,2	0,20	0,21	0,20	0,20	0,20
2000–2400	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19
2400–2800	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12
2800–4000	0,05	0,05	0,05	0,05	0,47	0,047	0,046	0,047	0,048
Время изм.	1,39 d	2,8 d	1	2,78	1,07	12,95	4,17	5,15	2,55
Дата	03.02.2023	13.03.2023	04.04.2023	04.05.2023	06.07.2023	04.09.2023	29.11.2023	06.12.2023	18.01.2024

Отличие скоростей счета на каком-либо из интервалов чаще чем в 5 % измерений является индикатором того, что вариации фоновой скорости счета обусловлены не статистическими причинами и, скорее всего, связаны с электрическими шумами или наводками.

Незначительное изменение скорости счета фона связано с переносом детектора в июле на другое место локации в этом же подвальном помещении.

Результаты и их обсуждение

Известно, что естественный процесс попадания в водоем радиоактивных элементов связан с контактом дождевых стоков или подземных вод с минералами, содержащими долгоживущие изотопы. Обычно количество этих радиоактивных примесей невелико и не представляет угрозы. Радиоактивность напрямую также зависит от химического и минерального состава дренируемых ими горных пород, в которых располагаются водосборы рек. К другому важному фактору, влияющему на степень радиоактивности вод открытых водоемов, относится климат, от которого зависит степень химического выветривания горных пород, являющихся основным поставщиком природных радионуклидов. Учитывая все эти факторы, представляет интерес изучение содержания радионуклидов в различных местах на территории КБР. Удельная активность радионуклидов ^{226}Ra , ^{232}Th и ^{40}K в образцах воды приведены в табл. 3.

Согласно рекомендациям ВОЗ по качеству питьевой воды [1], нормативные уровни удельной активности радионуклидов ^{226}Ra , ^{232}Th и ^{40}K для населения составляют 1; 1 и 10 Бк/л соответственно. Таким образом, средние значения удельной активности радионуклидов ^{226}Ra , ^{232}Th и ^{40}K оказались на стандартном рекомендуемом уровне для всех проб. В сравнении с другими регионами мира удельная активность ^{226}Ra в пробах воды горных рек КБР была ниже, чем в Саудовской Аравии (Джидда – 0,21–2,25) [24], Турции (0,517–1,22) [25] и Иране (Ширван – 2,09) [26]. Удельная активность ^{232}Th в пробах воды была меньше, чем у Нигерии (0,35–60,6) [27], но больше, чем в Турции (0,676–0,232). Удельная активность ^{40}K в пробах воды была ниже, чем у Саудовской Аравии (0,24–33,74) и Нигерии (0,35–29,01). С другой стороны, значение было выше, чем у Турции (1,54–2,57) и Пакистана (0,216–0,092) [28]. Радионуклида техногенного происхождения ^{137}Cs на каком-либо значимом уровне не обнаружено. Сравнение с другими странами показывает, что полученные значения находятся в пределах мировых показателей.

Таблица 3 / Table 3

**Удельная активность радионуклидов ^{226}Ra , ^{232}Th и ^{40}K
 / Specific activity of radionuclides ^{226}Ra , ^{232}Th and ^{40}K**

Образцы вод из Чегемского ущелья					
Величина, ед. изм.	Место отбора проб				
	Абай-Су	Баула-Су	Урдоз-Су	Джылгысу	Сырынсу
^{137}Cs , Бк/л	<0,38	<0,32	< 0,92	< 0,53	< 0,26
^{226}Ra , Бк/л	<0,53	< 0,33	< 0,62	< 0,53	< 0,36
^{232}Th , Бк/л	< 0,56	< 0,61	< 0,89	< 1,19	< 0,71
^{40}K , Бк/л	< 7,7	< 6,3	<12,2	< 10,8	< 3,8
Дата	04.2023	02.2023	05.2023	03.2023	03.2023
Время, с	100560	328530	7200	100000	260000
Геометрия	Маринелли				
Объем, мл	1000				
Образцы вод из Зольского района и КБГУ					
	Место отбора проб				
	Река Малка	Родник Хабаз	Нарзан Хабаз	Вода из-под крана в КБГУ	
^{137}Cs , Бк/л	< 0,3	< 0,3	< 0,41	< 0,45	
^{226}Ra , Бк/л	< 0,69	< 0,42	< 0,56	< 0,62	
^{232}Th , Бк/л	< 0,44	< 0,44	< 0,59	< 0,69	
^{40}K , Бк/л	< 4,5	< 4,5	< 6,1	< 11,4	
Дата	09.2023	10.2023	11.2023	12.2023	
Время, с	172800	172800	86400	7200	
Геометрия	Маринелли				
Объем, мл	1000				

Измерение содержания радона в бытовой воде п. Эльбрус Баксанского ущелья

В природе радон встречается в двух основных формах: ^{222}Rn и ^{220}Rn , который не может сохраняться в воде в свободном виде из-за своего времени жизни 56 с, поэтому в дальнейшем будет рассматриваться ^{222}Rn . При распаде он не излучает гамма-квантов напрямую, однако короткоживущие дочерние продукты радона излучают большое количество гамма-квантов, с чем связана большая часть облучения. Концентрация радона определяется с использованием следующих дочерних радионуклидов и соответствующих гамма-линий: Рв-214 гамма-линия 351 кэВ, Вi-214 гамма-линия 609 кэВ. Результаты измерений представлены в табл. 4.

Таблица 4 / Table 4

Результаты измерений содержания радона / Radon content measurement results

Показатель	Артезианская скважина	Питьевая вода	Река Баксан	Образец воды после кипячения
Скорость счета, имп./день	1863	583	223	91
ФОН, имп./день	6,7	6,7	6,7	6,7
Активность, распад в день /л	1180000	393000	147000	57000
Среднее содержание радона	13,65 Бк/л	4,54 Бк/л	1,7 Бк/л	< 0,66 Бк/л

Наибольшее содержание радона было обнаружено в образце воды из артезианской скважины. Активность радона в этом образце составила 13,65 Бк/л, в то время как вода из р. Баксан содержала почти на порядок меньше радона – 1,7 Бк/л. Кипячение воды практически устраняло содержание радона во всех образцах до уровня, который не удавалось зарегистрировать чувствительной установкой, – менее 0,66 Бк/л.

Литературные данные о содержании радона в реках Баксанского ущелья отсутствуют, такие исследования проведены впервые. Однако существуют данные Научного комитета по действию

атомной радиации ООН, проводящего измерения по всему миру. Согласно этим данным, концентрация радона в обычно используемой воде чрезвычайно низкая, но вода из некоторых источников, особенно из глубоких колодцев или артезианских скважин, содержит высокие концентрации радона. Наибольшая зарегистрированная удельная радиоактивность воды в системах водоснабжения составляет 10^4 – 10^5 Бк/л, в то время как наименьшая близка к нулю. По тем же данным, меньше 10 % населения мира пьют воду с концентрацией радона, превышающей 7,4 Бк/л.

Заключение

Таким образом, исследование содержания радиоактивности в воде показало, что образцы из различных месторождений КБР имели относительно низкий уровень радиации, в пределах нормы, установленной для питьевой воды. Использование гамма-спектрометрического метода для измерения содержания радиоактивных элементов позволило проводить быстрый и точный анализ, что является критическим в контексте экологического мониторинга и геологических исследований. Эти работы позволяют сделать вывод о необходимости контроля уровня радиации в природных водах на территории КБР для обеспечения безопасности питьевой воды и здоровья населения. Полученные данные могут быть полезны при мониторинге радиоактивного загрязнения воды в окружающей среде. Это исследование предоставляет дополнительную информацию для оценки влияния радиационного воздействия окружающей среды на здоровье человека. Установлено, что концентрации активности ^{40}K во всех образцах выше по сравнению с концентрациями активности ^{232}Th и ^{226}Ra . Тем не менее значения находятся в пределах рекомендуемых безопасных уровней. Показатели опасности радионуклидов оказались ниже мировых средних значений, предложенных Научным комитетом по действию атомной радиации Организации Объединенных Наций. Конечно, исходные данные этого исследования будут иметь важное значение для оценки уровня облучения населения радиоактивностью. Планируется более детальное изучение естественной радиации и совершенствование методов контроля с целью определения источников радиации и разработки мер по их устранению.

Список источников

1. World Health Organization. Guidelines for drinking-water quality. 4th ed. Geneva: WHO, 2011. 541 p.
2. Cothorn C.R., Lappenbush W.L. Occurrence of uranium in drinking water in the US // Health Phys. 1983. Vol. 45. P. 89–99. <http://dx.doi.org/10.1097/00004032-198307000-00009>
3. Cothorn C.R., Lappenbush W.L. Compliance data for the occurrence of radium and gross alpha particle activity in drinking water supplies in the US // Health Phys. 1984. Vol. 46. P. 503–510. <http://dx.doi.org/10.1097/00004032-198403000-00001>
4. Cothorn C.R., Lappenbush W.L. Dinking water contribution to natural background radiation // Health Phys. 1986. Vol. 50. P. 33–47.
5. Ivanovich M., Harmon R.S. Uranium-series disequilibrium. 2nd ed. Oxford: Clarendon Press, 1992. 910 p.
6. Hess C.T., Michel J., Horton T.R., Prichard H.M., Coniglio W.A. The occurrence of radioactivity in public water supplies in the United States // Health Phys. 1985. Vol. 48. P. 553–586. <http://dx.doi.org/10.1097/00004032-198505000-00002>
7. Salonen L. Natural radionuclides in ground water in Finland // Radiat Prot Dosimetry. 1988. Vol. 24. P. 163–166.
8. Baeza A., Del Rio L.M., Jimenez A., Miro C., Paniagua J.M. Factors determining the radioactivity levels of waters in the in the province of Caceres (Spain) // Appl. Radiat Isot. 1995. Vol. 46. P. 1053–1059. [http://dx.doi.org/10.1016/0969-8043\(95\)00215-Y](http://dx.doi.org/10.1016/0969-8043(95)00215-Y)
9. Pietrzak-Fils Z., Kaminsk I., Chrzanowski E. Uranium isotopes in public drinking water and dose assessment for man in Poland // Radiat Prot Dosimetry. 2004. Vol. 113. P. 34–39. <http://dx.doi.org/10.1093/rpd/nch425>
10. Abas E., Sitotaw B., Mengistu E. Evaluation of radionuclides specific activity of groundwater resources. A case of Dire Dawa City, Ethiopia // Romanian J. Biophys. 2021. Vol. 31(1). P. 1–11.
11. El-Mageed A.I., El-Kamel A.E.H., Abbady A.E.B., Harb S., Saleh E.E. Natural radioactivity of ground and hot spring water in some areas in Yemen // Desalination. 2013. Vol. 321. P. 28–31.
12. Al-Ghamdi A.H. Radioactivity measurements and radiation dose assessments in ground water of Al-Baha region, Saudi Arabia // J. of Geoscience and Environment Protection. 2019. Vol. 7(10). P. 112–119. <https://doi.org/10.4236/gep.2019.710009>
13. Ayalew D., Sitotaw B., Mengistu E. Assessment of natural radioactivity levels in the soil of Dire Dawa city, Ethiopia // Romanian J. Biophys. 2019. Vol. 29(4). P. 113–122.

14. El-Gamal H., Sefelnasr A., Salahedin G. Determination of natural radionuclides for water resources on the West Bank of the Nile River, Assiut Governorate, Egypt // *Water*. 2019. Vol. 11. P. 311–344.
15. Shivakumara B.C., Chandrashekar M.S., Kavitha E., Paramesh L. Studies on 226Ra and 222Rn concentration in drinking water of Mandya Region, Karnataka State, India // *J. of Radiation Research and Applied Sciences*. 2014. Vol. 7(4). P. 491–498.
16. Sivapan C.H. The relationship between the total dissolved solids and the conductivity value of drinking water, surface water, and wastewater // *Int. Academic Research Conf. Amsterdam*, 2019. P. 11–16.
17. World Health Organization (WHO). *Management of Radioactivity in Drinking-water*. Geneva, Switzerland: World Health Organization, 2018. 104 p.
18. World Health Organization (WHO). *Management of Radioactivity in Drinking-water*. Geneva, Switzerland: World Health Organization, 2017. P. 203–218.
19. Федоров Ю.А., Ярославцев В.М., Доценко И.В. Естественные и техногенные радионуклиды в донных отложениях (по примеру р. Дон, ст. Манычская) // *Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки*. 2017. № 3-1. С. 108–113.
20. Федоров Ю.А., Кузнецов А.Н., Давыдов М.Г., Трофимов М.Е., Ленец Е.Н. Цезий-137 в воде и донных отложениях (по результатам экспедиции «Азовское море – 2006») // *Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки*. 2007. Спецвыпуск. С. 26–30.
21. Vesterbacka P., Makelainen I., Arvela H. Natural radioactivity in drinking water in private wells in Finland // *Radiat Prot Dosimetry*. 2005. Vol. 113(2). P. 223–232. <http://dx.doi.org/10.1093/rpd/nch446>
22. Institut de Radioprotection et de Surete Nucleaire. *Analyse de la radioactivite des eaux*. Paris: IRSN, 2008. Rapport DEI/STEME/LTE. № 2008/05.
23. Beyermann M., Bunger T., Schmidt K., Obrikat D. Occurrence of Radioactivity in public water supplies in Germany // *Radiat Prot Dosimetry* 2010. Vol. 141. P. 72–81. [Url: http://dx.doi.org/10.1093/rpd/ncq139](http://dx.doi.org/10.1093/rpd/ncq139).
24. Al-Ghamdi A.H. Activity Concentrations in Bottled Drinking Water in Saudi Arabia and Consequent Dose Estimates // *Life Sci J*. 2014. Vol. 11(9). P. 771–777.
25. Kabadayi O., Gumus H. Natural Activity Concentrations in Bottled Drinking Water and Consequent Doses // *Radiat Prot Dosim*. 2012. Vol. 150(4). P. 532–535.
26. Binesh A., Mowlavi A.A., Arabshahi H. Radon and Radium Measurement in Drinkables Water Supplies of Shirvan Region in Iran by Prassi System // *Arch. Appl. Sci Res*. 2010. Vol. 2(1). P. 23–27.
27. Ajayi O.S., Owolabi T.P. Determination of Natural Radioactivity in Drinking Water in Private Dug Wells in Akure, Southwestern // *Radiat Prot Dosim*. 2008. Vol. 128(4). P. 477–484.
28. Fatima I., Zaidi J.H., Arif M., Tahir S.N.A. Measurement of natural radioactivity in bottled drinking water in Pakistan and consequent dose estimates // *Radiat Prot. Dosim*. 2006. Vol. 123(2). P. 234–240.

References

1. *World Health Organization. Guidelines for drinking-water quality*. 4th ed. Geneva: WHO Press; 2011. 541 p.
2. Cothorn C.R., Lappenbush W.L. Occurrence of uranium in drinking water in the US. *Health Phys*. 1983;45:89-99. <http://dx.doi.org/10.1097/00004032-198307000-00009>
3. Cothorn C.R., Lappenbush W.L. Compliance data for the occurrence of radium and gross alpha particle activity in drinking water supplies in the US. *Health Phys*. 1984;46:503-510. <http://dx.doi.org/10.1097/00004032-198403000-00001>
4. Cothorn C.R., Lappenbush W.L. Dinking water contribution to natural background radiation. *Health Phys*. 1986;50:33-47.
5. Ivanovich M., Harmon R.S. *Uranium-series disequilibrium*. 2nd ed. Oxford: Clarendon Press; 1992. 910 p.
6. Hess C.T., Michel J, Horton T.R., Prichard H.M., Coniglio W.A. The occurrence of radioactivity in public water supplies in the United States. *Health Phys*. 1985;48:553-586. <http://dx.doi.org/10.1097/00004032-198505000-00002>
7. Salonen L. Natural radionuclides in ground water in Finland. *Radiat Prot Dosimetry*. 1988;24:163-166.
8. Baeza A., Del Rio L.M., Jimenez A., Miro C., Paniagua J.M. Factors determining the radioactivity levels of waters in the in the province of Caceres (Spain). *Appl. Radiat Isot*. 1995;46:1053-1059. [http://dx.doi.org/10.1016/0969-8043\(95\)00215-Y](http://dx.doi.org/10.1016/0969-8043(95)00215-Y)
9. Pietrzak-Fils Z., Kaminsk I., Chrzanowski E. Uranium isotopes in public drinking water and dose assessment for man in Poland. *Radiat Prot Dosimetry*. 2004;113:34-39. <http://dx.doi.org/10.1093/rpd/nch425>
10. Abas E., Sitotaw B., Mengistu E. Evaluation of radionuclides specific activity of groundwater resources. A case of Dire Dawa City, Ethiopia. *Romanian J. Biophys*. 2021;31(1):1-11.
11. El-Mageed A.I., El-Kamel A.E.H., Abbady A.E.B., Harb S., Saleh E.E. Natural radioactivity of ground and hot spring water in some areas in Yemen. *Desalination*. 2013;321:28-31.

12. Al-Ghamdi A.H. Radioactivity measurements and radiation dose assessments in ground water of Al-Baha region, Saudi Arabia. *Journal of Geoscience and Environment Protection*. 2019;7(10):112-119, <https://doi.org/10.4236/gep.2019.710009>
13. Ayalew D., Sitotaw B., Mengistu E. Assessment of natural radioactivity levels in the soil of Dire Dawa city, Ethiopia. *Romanian J. Biophys.* 2019;29(4):113-122.
14. El-Gamal H., Sefelnasr A., Salahedin G. Determination of natural radionuclides for water resources on the West Bank of the Nile River, Assiut Governorate, Egypt. *Water*. 2019;11:311-344.
15. Shivakumara B.C., Chandrashekara M.S., Kavitha E., Paramesh L. Studies on ²²⁶Ra and ²²²Rn concentration in drinking water of Mandya Region, Karnataka State, India. *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*. 2014;7(4):491-498.
16. Sivapan C.H. The relationship between the total dissolved solids and the conductivity value of drinking water, surface water, and wastewater. *Int. Academic Research Conf.* Amsterdam, 2019:11-16.
17. *World Health Organization (WHO). Management of Radioactivity in Drinking-water*. Geneva, Switzerland: World Health Organization Press; 2018. 104 p.
18. *World Health Organization (WHO). Management of Radioactivity in Drinking-water*. Geneva, Switzerland: World Health Organization Press; 2017:203-218.
19. Fedorov Yu.A., Yaroslavtsev V.M., Dotsenko I.V. Natural and technogenic radionuclides in the bottom sediments (on the example of r. Don, Manychskaya village). *Izv. vuzov. Sev.-Kavk. region. Estestv. nauki = Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science*. 2017;(3-1):108-113. (In Russ.).
20. Fedorov Yu.A., Kuznetsov A.N., Davydov M.G., Trofimov M.E., Lenets E.N. Cesium-137 in water and sediments (according to the results of the expedition "Azov Sea - 2006"). *Izv. vuzov. Sev.-Kavk. region. Estestv. nauki = Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science*. Special edition. 2007:26-30. (In Russ.).
21. Vesterbacka P., Makelainen I., Arvela H. Natural radioactivity in drinking water in private wells in Finland. *Radiat Prot Dosimetry*. 2005;113(2):223-232. <http://dx.doi.org/10.1093/rpd/nch446>
22. Institute of Radiation Protection and Nuclear Safety. *Analysis of water radioactivity*. Report DEI/STEME/LTE, n. 2008/05. Paris: IRSN Press; 2008. (In French).
23. Beyermann M., Bunger T., Schmidt K., Obrikat D. Occurrence of Radioactivity in public water supplies in Germany. *Radiat Prot Dosimetry*. 2010;141:72-81. <http://dx.doi.org/10.1093/rpd/ncq139>
24. Al-Ghamdi A.H. Activity Concentrations in Bottled Drinking Water in Saudi Arabia and Consequent Dose Estimates. *Life Sci J*. 2014;11(9):771-777.
25. Kabadayi O., Gumus H. Natural Activity Concentrations in Bottled Drinking Water and Consequent Doses. *Radiat Prot Dosim*. 2012;150(4):532-535.
26. Binesh A., Mowlavi A.A., Arabshahi H. Radon and Radium Measurement in Drinkables Water Supplies of Shirvan Region in Iran by Prassi System. *Arch. Appl. Sci Res*. 2010;2(1):23-27.
27. Ajayi O.S., Owolabi T.P. Determination of Natural Radioactivity in Drinking Water in Private Dug Wells in Akure, Southwestern. *Radiat Prot Dosim*. 2008;128(4):477-484.
28. Fatima I., Zaidi J.H., Arif M., Tahir S.N.A. Measurement of natural radioactivity in bottled drinking water in Pakistan and consequent dose estimates. *Radiat Prot. Dosim*. 2006;123(2):234-240.

Информация об авторах

С.И. Шагин – доктор географических наук, профессор.

А.М. Пиуков – кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник.

А.А. Кокоева – кандидат химических наук, доцент.

О.З. Блиева – аспирант, ведущий инженер.

Information about the authors

S.I. Shagin - Doctor of Science (Geography), Professor.

A.M. Pshukov - Candidate of Science (Physics and Mathematics), Leading Researcher.

A.A. Kokoeva - Candidate of Science (Chemistry), Associate Professor.

O.Z. Blieva - Postgraduate Student, Leading Engineer.

Статья поступила в редакцию 05.02.2024; одобрена после рецензирования 22.03.2024; принята к публикации 24.05.2024.
The article was submitted 05.02.2024; approved after reviewing 22.03.2024; accepted for publication 24.05.2024.

Научная статья

УДК 581.132

doi: 10.18522/1026-2237-2024-2-123-130

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ СТАРОВОЗРАСТНЫХ ЕЛЬНИКОВ НА УГЛЕРОДНЫЙ БАЛАНС ТАЕЖНЫХ ЛЕСОВ ВАЛДАЯ

Ахмед Кадималиевич Юзбеков^{1✉}, Антон Сергеевич Куманяев²

¹Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

²Центр по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН, Москва, Россия

¹uak2003@mail.ru✉

²anton.kumanyayev@mail.ru

Аннотация. Актуальность мониторинга параметров фотосинтеза и дыхания старовозрастных лесов Валдая связана с необходимостью определения в условиях глобального изменения климата всех составляющих углеродного баланса. Представлены результаты исследований сезонной динамики углекислотного газообмена и фотосинтетической продуктивности ели европейской (*Picea abies* L.) в полуденные часы в мае – октябре 2018–2020 гг. Установлено, что основными факторами, обуславливающими скорость ассимиляции CO₂ ели, являются температура воздуха и освещенность (фотосинтетически активная радиация). Среднее значение интенсивности фотосинтеза за год превышало уровень светового дыхания более чем в 2 раза. Выявлено существенное изменение величины фотосинтетической продуктивности ели в течение сезонов: максимальная наблюдалась в июне-июле, минимальная – в октябре. Межгодовое изменение продуктивности зависело от погодных условий и состояния древостоя на экспериментальном полигоне. Суммарное поглощение углекислого газа хвоей в 2018–2020 гг. составило 3,3; 2,13 и 1,15 т CO₂·га⁻¹·год⁻¹ соответственно. Средняя величина чистой первичной продукции (0,37 т C·га⁻¹·год⁻¹) и положительный углекислотный газообмен ели европейской свидетельствуют о существенном влиянии старовозрастных ельников на углеродный баланс лесных сообществ Валдая.

Ключевые слова: ель европейская, фотосинтез, дыхание, углекислый газ, температура, освещенность, продуктивность, углеродный баланс

Для цитирования: Юзбеков А.К., Куманяев А.С. Оценка влияния старовозрастных ельников на углеродный баланс таежных лесов Валдая // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2024. № 2. С. 123–130.

Благодарности: работа выполнена в рамках темы 3.3 «Развитие методов и технологий расчетного мониторинга антропогенных выбросов и абсорбции поглотителями парниковых газов и короткоживущих климатически активных веществ» (ЕГИСУ НИОКТР — АААА-А20-120021090098-8), а также при поддержке Междисциплинарной научно-образовательной школы Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова «Будущее планеты и глобальные изменения окружающей среды».

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

Original article

IMPACT OF OLD-AGED SPRUCE FORESTS ON THE CARBON BALANCE OF THE CONYFEROUS FOREST STAND OF THE VALDAY REGION

Ahmed K. Yuzbekov^{1✉}, Anton S. Kumanyayev²

¹Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

²Center for Ecology and Forest Productivity of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

¹uak2003@mail.ru✉

²anton.kumanyayev@mail.ru

© Юзбеков А.К., Куманяев А.С., 2024

Abstract. Monitoring the photosynthesis- and respiration-related characteristics of the old-aged forests of the Valday Region is of paramount importance since it is imperative that the role of all factors contributing to their carbon balance should be evaluated. This work presents data on seasonal dynamics of midday carbon dioxide exchange and photosynthetic productivity of the Norway spruce (*Picea abies* L.) in May - October 2018-2020. It was established that the main factors determining the CO₂ assimilation rate of the spruce are the air temperature and illumination. The average annual photosynthesis intensity level was more than two times higher than the light-dependent respiration level. Significant interseasonal changes in spruce photosynthetic productivity were revealed: the maximum and minimum photosynthetic productivity was detected in June-July and October, respectively. The interannual changes were related to the weather conditions and to the state of the forest stand in the tested area. The total carbon dioxide uptake by spruce needles in 2018, 2019, and 2020 was 3.3, 2.13, and 1.15 ton of CO₂·ha⁻¹·year⁻¹. The average value of net primary production (0.37 ton of C·ha⁻¹·year⁻¹) and the positive carbon dioxide balance of the Norway spruce testify to a considerable influence of old-aged spruce forests on the carbon balance of the forest cenoses of the Valday Region.

Keywords: Norway spruce, photosynthesis, respiration, carbon dioxide, temperature, illumination, productivity, carbon balance

For citation: Yuzbekov A.K., Kumanyaev A.S. Impact of Old-Aged Spruce Forests on the Carbon Balance of the Coniferous Forest Stand of the Valday Region. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2024;(2):123-130. (In Russ.).

Acknowledgments: the work was carried out within the framework of topic 3.3 “Development of methods and technologies for computational monitoring of anthropogenic emissions and absorption by sinks of greenhouse gases and short-lived climate-active substances” (EGISU R&D - AAAA-A20-120021090098-8), as well as with the support of the Interdisciplinary Scientific and Educational School of Lomonosov Moscow State University “The future of the planet and global environmental changes.”

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 десятилетия в связи с повышением концентрации углекислого газа в атмосфере огромное значение имеют леса, благодаря их способности поглощать и депонировать углерод в течение длительного времени. Особая роль принадлежит лесам бореальной зоны, которые оказывают существенное воздействие на глобальный климат, влияя на радиационный баланс и углеродный цикл [1]. Бореальные леса занимают около 33 % площади лесов планеты [2] и содержат почти треть мирового растительного и почвенного углерода [3]. Около половины бореальных лесов мира – это старовозрастные леса, которые являются хранилищами большого количества запасенного углерода [4]. Углеродный баланс в них, как правило, положительный [5].

На территории национального парка «Валдайский» бореальные леса занимают 133 тыс. га (84 % всей площади). Преобладающими породами являются ель и сосна (54 %), береза (30 %). Суммарное поглощение углерода на покрытых лесами землях составляет 185,6 тыс. т С·год⁻¹. Около 13 % площади национального парка приходится на старовозрастные леса [6].

Цель предлагаемой статьи – оценить вклад фотосинтетического поглощения углерода старовозрастными ельниками в углеродный баланс таежных лесов Валдая.

Для её достижения нами были поставлены следующие задачи: исследование сезонной динамики углекислотного газообмена хвои ели европейской (*Picea abies* L.) в полуденные часы в течение 2018–2020 гг.; анализ сезонных и межгодовых изменений фотосинтетической продуктивности ели; оценка вклада поглощения углерода хвоей ели европейской в углеродный баланс таежных лесов Валдая.

Объекты и методы

Исследования выполняли на экспериментальном полигоне «Таёжный лог» Валдайского филиала Государственного гидрологического института. Полигон расположен на территории национального парка «Валдайский» Новгородской области (57°58′ с.ш., 33°20′ в.д.). По своему ботанико-географическому положению район полевых работ находится на границе зон южной тайги и хвойно-широколиственных лесов. Измерения проводили на постоянной пробной площади (ПП1) 0,1 га, заложенной в ельнике мелкотравно-зеленомошном. На ПП1 преобладает одновозрастной

древостой ели европейской возрастом 120 лет с небольшой примесью сосны (породный состав насаждения – 9Е1С, средняя высота ели – 31 м, средний диаметр стволов на высоте 1,3 м – 41 см, полнота – 0,4). Доминирующую позицию в подлеске занимает рябина, встречаются осина, ель и береза. В травяном покрове преобладают кислица обыкновенная и зеленчук желтый [7].

В исследовании использовали три модельных дерева ели европейской. Наблюдение за поглощением и выделением углекислого газа хвоей проводили на неотделенных интактных побегах, расположенных в нижней части кроны (уровень нижних ветвей елей – около 2 м от поверхности земли), с южной стороны деревьев. При изучении углекислотного газообмена хвои опирались на методические работы других авторов, согласно которым интактный охвоенный побег служит моделью фотосинтезирующей кроны и отражает физиологическое состояние дерева [8, 9]. Углекислотный газообмен хвои регистрировали с мая по октябрь 2018–2020 гг., в течение трех дней третьей декады каждого месяца, в полуденные часы (наиболее благоприятные для процесса фотосинтеза условия освещения и температуры), в трехкратной повторности, с интервалом 10 мин.

Интенсивность фотосинтеза и светового дыхания хвои (выделение CO_2 на свету в результате двух различных типов дыхания – фотодыхания и темнового) определяли газометрическим методом (метод закрытых камер). В полевых работах использовали портативный полевой анализатор, сконструированный на биологическом факультете МГУ имени М.В. Ломоносова [10]. Измерения и обработка полевых материалов выполнялись согласно методике авторов [11]. Показатели интенсивности фотосинтеза и светового дыхания хвои рассчитывали в $\text{мг CO}_2 \cdot \text{г}^{-1}$ сухой массы $\cdot \text{ч}^{-1}$.

Дополнительно проводили наблюдение за факторами внешней среды – температурой воздуха и общей облачностью.

Фотосинтетически активную радиацию (ФАР) рассчитывали как функцию потенциальной суммарной солнечной радиации (при ясном небе) и облачности в соответствии с методическими рекомендациями [12].

Дневную фотосинтетическую продуктивность хвои определяли исходя из данных об изменении интенсивности фотосинтеза в полуденные часы. Величину абсолютно сухой массы хвои модельного дерева рассчитывали согласно аллометрическому уравнению [13]. Дневная фотосинтетическая продуктивность являлась основой для определения годовой продуктивности фотосинтеза.

Для оценки вклада поглощения углерода хвоей ели европейской в углеродный баланс таежных лесов Валдая использовали величину чистой первичной продукции, определяемую по данным фотосинтетической продуктивности и дыхания хвои [6].

Результаты и обсуждение

На основании проведенного анализа выявлены сезонные изменения величины ассимиляции CO_2 у ели европейской в полуденные часы в 2018–2020 гг. по отношению к температуре воздуха (рис. 1).

График изменения интенсивности фотосинтеза в 2018 г. имеет форму одновершинной кривой: максимальному значению температуры в июле (24,5 °С) соответствовал максимум интенсивности ассимиляции CO_2 (4,2 $\text{мг CO}_2 \cdot \text{г}^{-1}$ сухой массы $\cdot \text{ч}^{-1}$). В связи с теплыми погодными условиями измерения фотосинтеза ели продолжались до ноября: в октябре при температуре 1,9 °С зарегистрировано минимальное значение показателя (0,3 $\text{мг CO}_2 \cdot \text{г}^{-1}$ сухой массы $\cdot \text{ч}^{-1}$). Данные о продлении периода поглощения CO_2 хвойными деревьями осенью получены другими авторами [14].

Величина интенсивности фотосинтеза в мае, несмотря на достаточно высокую температуру воздуха (21,7 °С), меньше показателя в июне при температуре 16,2 °С, что можно объяснить неблагоприятными для процесса фотосинтеза погодными условиями в мае: в полуденные часы зарегистрирована относительная влажность воздуха 27–34 %. Известно, что в условиях низкой влажности воздуха чрезмерная потеря воды листом вызывает закрывание устьиц и, как следствие, снижается интенсивность фотосинтеза.

На графике, отражающем динамику интенсивности фотосинтеза в 2019 г., максимум отмечен в июле (3,7 $\text{мг CO}_2 \cdot \text{г}^{-1}$ сухой массы $\cdot \text{ч}^{-1}$), что соответствовало максимальной температуре воздуха в течение периода наблюдений (20,2 °С). В июне, в связи с холодной и дождливой погодой, при температуре воздуха 12,5 °С и относительной влажности 90 % (количество осадков

в дни наблюдений – до 28 мм в сут) наблюдалось снижение интенсивности фотосинтеза относительно показателя в мае до $1,8 \text{ мг CO}_2 \cdot \text{г}^{-1}$ сухой массы $\cdot \text{ч}^{-1}$.

Следует отметить, что в октябре при повышении температуры по сравнению с сентябрем на $4,0 \text{ }^\circ\text{C}$ интенсивность фотосинтеза продолжала снижаться ($0,7 \text{ мг CO}_2 \cdot \text{г}^{-1}$ сухой массы $\cdot \text{ч}^{-1}$). Наблюдаемое уменьшение фотосинтетической активности можно объяснить структурно-функциональными изменениями в хвое в условиях перехода растений к состоянию покоя [15].

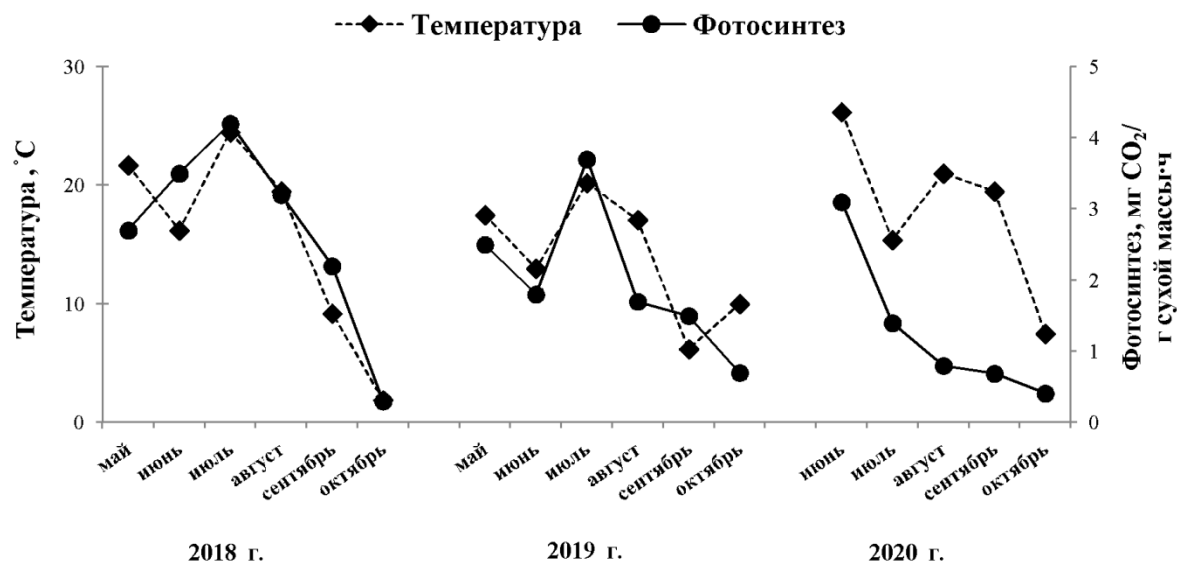


Рис. 1. Сезонная динамика интенсивности фотосинтеза ели и температуры воздуха
/ Fig. 1. Seasonal dynamics of photosynthesis rate in spruce and air temperature

Сезонный ход интенсивности фотосинтеза в 2020 г. представлен одновершинной кривой, плавно снижающейся от максимального значения показателя в июне ($3,1 \text{ мг CO}_2 \cdot \text{г}^{-1}$ сухой массы $\cdot \text{ч}^{-1}$) до минимального в октябре ($0,41 \text{ мг CO}_2 \cdot \text{г}^{-1}$ сухой массы $\cdot \text{ч}^{-1}$). В эти же месяцы зарегистрированы максимальная и минимальная температуры воздуха ($26,2$ и $7,5 \text{ }^\circ\text{C}$). Снижение интенсивности фотосинтеза в июле более чем в 2 раза по сравнению с показателем июня обусловлено низкой для полуденных часов температурой воздуха ($15,4 \text{ }^\circ\text{C}$) и продолжительными осадками в последнюю декаду месяца.

Анализ связи интенсивности фотосинтеза с факторами внешней среды, выполненный по средним значениям показателей за день, выявил, что в 2018–2020 гг. интенсивность фотосинтеза хвои находилась в линейной зависимости от температуры воздуха (коэффициент детерминации равен, соответственно, $R^2=0,768$ ($N=18$; $P<0,001$); $R^2=0,593$ ($N=18$; $P<0,001$); $R^2=0,482$ ($N=15$; $P<0,005$)). Линейный характер зависимости между показателями для еловых лесов Севера получен ранее другими авторами [16].

При анализе влияния интенсивности света на процесс фотосинтеза использовали значения ФАР. Изменения интенсивности фотосинтеза и ФАР в 2018–2020 гг. приведены на рис. 2.

В 2018 г. максимальное значение ФАР, равное $720 \text{ мкЭ} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$, отмечено в июле; снижение уровня освещенности в июне по сравнению с маем обусловлено увеличением облачности в последнюю декаду месяца до 10 баллов. В мае-июне не наблюдалась закономерность зависимости интенсивности фотосинтеза от ФАР, что обусловлено, как показано выше, влиянием на фотосинтез в мае низкой относительной влажности воздуха.

Для 2019 г. максимумы освещенности ($710 \text{ мкЭ} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$) и интенсивности фотосинтеза зарегистрированы в июле. Следует отметить, что уменьшение скорости фотосинтеза в июне по отношению к маю при равных значениях ФАР обусловлено доминирующим влиянием на процесс фотосинтеза температуры воздуха, которая снизилась на $5,0 \text{ }^\circ\text{C}$.

Исследование процесса фотосинтеза и освещенности в 2020 г. показало, что максимальному значению ФАР в июне при ясном небе ($930 \text{ мкЭ} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$) соответствовало максимальное значение интенсивности фотосинтеза. Снижение ФАР в июле по сравнению с июнем более чем в 1,5 раза связано как с уменьшением потенциальной суммарной солнечной радиации, так и с увеличением общей облачности до 10 баллов.

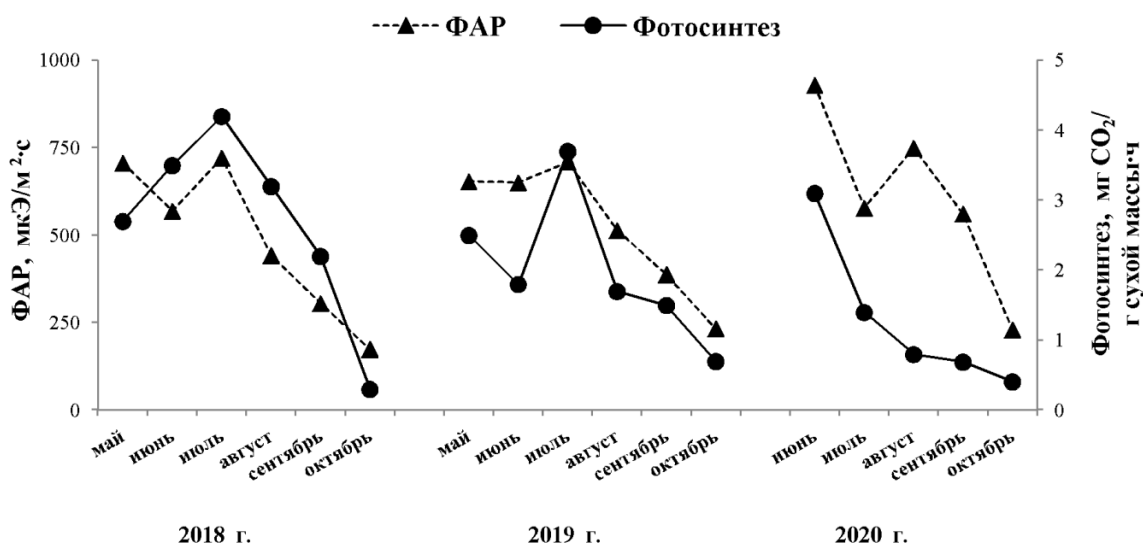


Рис. 2. Сезонная динамика интенсивности фотосинтеза ели и освещенности (ФАР)
 / Fig. 2. Seasonal dynamics of photosynthesis rate in spruce and illumination (PAR)

Минимальные для 2018–2020 гг. значения ФАР (в интервале 170–230 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) в соответствии с сезонным ходом потенциальной суммарной солнечной радиации и общей облачностью 9–10 баллов наблюдались в октябре. В этот же месяц зафиксированы минимальные значения интенсивности фотосинтеза.

Материалы исследований позволили установить, что в 2018 г. изменение интенсивности фотосинтеза хвои в зависимости от ФАР имело форму логарифмической кривой (коэффициент детерминации $R^2=0,736$ ($N=18$; $P<0,001$)), в 2019–2020 гг. между показателями существовала линейная зависимость ($R^2=0,729$ ($N=18$; $P<0,001$) и $R^2=0,604$ ($N=15$; $P<0,001$)).

Параллельно с исследованием интенсивности фотосинтеза хвои в полуденные часы регистрировали интенсивность светового дыхания. Полученные данные показали, что сезонный ход светового дыхания соответствовал изменению интенсивности фотосинтеза: максимальная и минимальная величины дыхания отмечены в 2018–2019 гг. – в июле и октябре, в 2020 г. – в июне и октябре (рис. 3).

Как показали расчеты, отношение средних за год значений интенсивности фотосинтеза и дыхания составило в 2018–2020 гг. 2,9; 2,4 и 2,6 соответственно, что указывает на положительный углекислотный газообмен хвои ели в полуденные часы. Аналогичные результаты получены и другими авторами [17].

Влияние фотосинтеза на процесс, обеспечивающий сток углерода в глобальном масштабе, осуществляется через продуктивность фотосинтеза – поглощение углерода в течение определенного периода времени. В работе была рассчитана фотосинтетическая продуктивность хвои ели: дневная, за месяц, годовая. При расчете дневной продуктивности ограничились ее значениями в полуденные часы (условия оптимального освещения и температуры). Абсолютно сухую массу хвои модельного дерева определяли в зависимости от его линейных размеров. Фотосинтетическую продуктивность за месяц рассчитывали на основе дневной продуктивности с учетом количества дней в каждом месяце, количества и категории состояния деревьев на площади 1 га. Годовую продуктивность фотосинтеза определяли как сумму продуктивности за все месяцы наблюдений.

Результаты расчета продуктивности фотосинтеза хвои представлены в таблице.

Анализ изменений фотосинтетической продуктивности хвои в 2018–2020 гг. показал значительное варьирование данного показателя. Максимально высокая продуктивность фотосинтеза наблюдалась в июле 2018–2019 гг. (1,00 и 0,67 $\text{t CO}_2\cdot\text{га}^{-1}\cdot\text{мес.}^{-1}$) и июне 2020 г. (0,55 $\text{t CO}_2\cdot\text{га}^{-1}\cdot\text{мес.}^{-1}$). В октябре для каждого года отмечено снижение продуктивности до минимальных значений (0,06–0,13 $\text{t CO}_2\cdot\text{га}^{-1}\cdot\text{мес.}^{-1}$). Суммарное поглощение углекислого газа хвоей в 2018–2020 гг. составило 3,3; 2,13 и 1,15 $\text{t CO}_2\cdot\text{га}^{-1}\cdot\text{год}^{-1}$ соответственно. Максимальное значение продуктивности фотосинтеза в 2018 г. достигалось за счет высоких показателей интен-

сивности процесса в полуденные часы в условиях оптимальной температуры воздуха и относительной влажности. Более низкие значения фотосинтетической продуктивности в 2019–2020 гг. были обусловлены неблагоприятными факторами среды (большое количество осадков, низкая влажность воздуха, 10-балльная облачность), которые привели к снижению показаний интенсивности фотосинтеза в течение периода наблюдений.

Как известно, валовая первичная продукция (GPP) определяется способностью фитоценозов поглощать CO₂ в процессе фотосинтеза, что количественно реализуется через фотосинтетическую продуктивность. Разность между GPP и Ra (дыхание автотрофов) называется чистой первичной продукцией (NPP) и характеризует количество органического вещества, которое пополняет запасы углерода в фитомассе древесных растений. NPP хвой ели европейской в полуденные часы была определена на основе годовых показателей фотосинтетической продуктивности и светового дыхания хвой. Величина NPP хвой ели в 2018 г. составила 0,59 т С·га⁻¹·год⁻¹, в 2019–2020 гг. снизилась в 1,7 и 3,1 раза. Согласно [6], средняя величина NPP лесной экосистемы на территории полигона «Таежный лог» равна 3,44 т С·га⁻¹·год⁻¹. Доля средней величины NPP хвой ели по отношению к NPP ельника составила 10,8 %. Полученное соотношение, несмотря на его заниженную величину (NPP ели определена с учетом поглощения углерода только в полуденные часы), объективно отражает влияние старовозрастных еловых насаждений на годовой баланс углерода в таежных лесах Валдая.

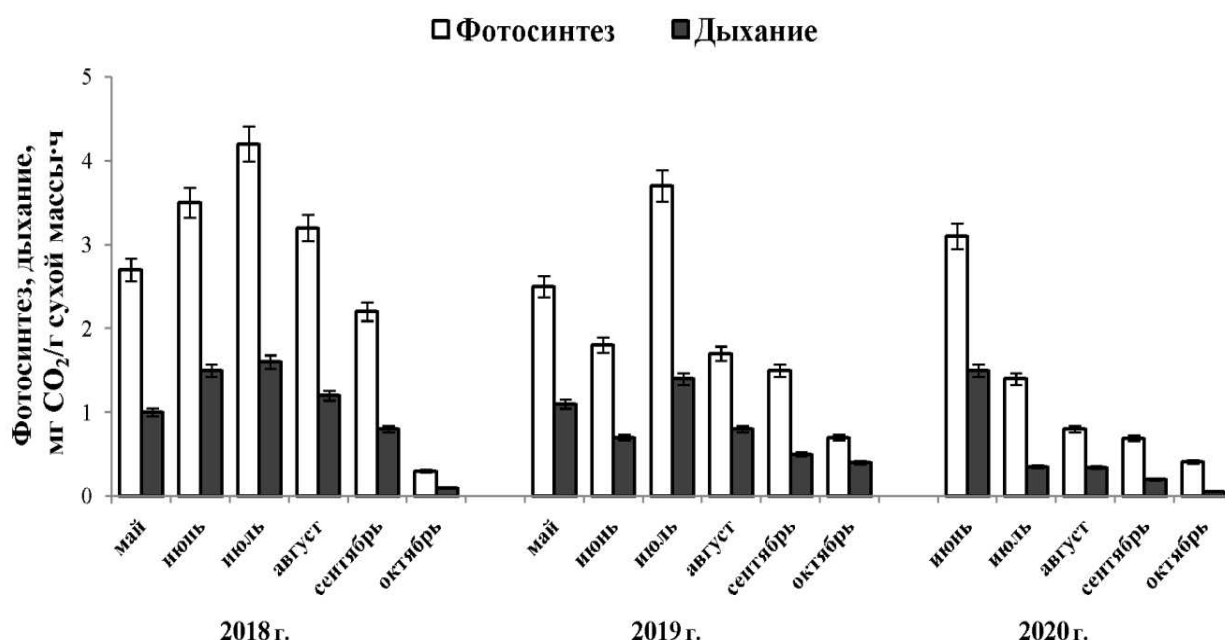


Рис. 3. Показатели фотосинтеза и дыхания хвой ели европейской (приведены средние величины и их относительные ошибки) / Fig. 3. Parameters of photosynthesis and respiration in Norway spruce needles (average values and their relative errors are given)

**Потенциальная продуктивность фотосинтеза ели европейской
 / Potential photosynthesis productivity of Norway spruce**

Год наблюдения	Продуктивность фотосинтеза, т CO ₂ ·га ⁻¹ ·мес. ⁻¹					
	Месяц					
	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь
2018	0,52	0,65	1,00	0,62	0,41	0,06
2019	0,45	0,31	0,67	0,31	0,26	0,13
2020		0,55	0,26	0,15	0,12	0,07

Заключение

Изучены особенности поглощения углерода хвоей ели европейской (*Picea abies* L.) старовозрастного древостоя Валдая в мае – октябре 2018–2020 гг. Количественно поглощение углекислого газа в полуденные часы в зависимости от погодных условий составило от 1,2 до 3,3 т С·га⁻¹·год⁻¹. Средняя величина NPP хвои ели, равная 0,37 т С·га⁻¹·год⁻¹, сопоставима с оценкой данного показателя для ельника на территории полигона «Таежный лог»: доля NPP хвои в NPP ельника составила 10,8 %. Выполненное исследование показало, что старовозрастные ели, несмотря на их возраст, вносят значимый вклад в углеродный баланс лесных сообществ Валдая.

Список источников

1. Pan Y., Birdsey R.A., Fang J., Houghton R., Kauppi P.E., Kurz W.A., Phillips O.L., Shvidenko A., Lewis S.L., Canadell J.G., Ciais Ph., Jackson R.B., Pacala St.W., McGuire A.D., Piao Sh., Rautiainen A., Sitch S., Hayes D. A large and persistent carbon sink in the world's forests // *Science*. 2011. Vol. 333, № 6045. P. 988–993.
2. Dixon R.K., Solomon A.M., Brown S., Houghton R.A., Trexler M.C., Wisniewski J. Carbon pools and flux of global forest ecosystems // *Science*. 1994. Vol. 263, № 5144. P. 185–190.
3. Goodale C.L., Apps M.J., Birdsey R.A., Field C.B., Heath L.S., Houghton R.A., Jenkins J.C., Kohlmaier G.H., Kurz W., Liu S., Nabuurs G.-J., Nilsson S., Shvidenko A.Z. Forests carbon sinks in the Northern Hemisphere // *Ecological Applications*. 2002. Vol. 12, № 3. P. 891–899.
4. Field C.B., Kaduk J. The carbon balance of an old growth forest: building across approaches // *Ecosystems*. 2004. Vol. 7, № 5. P. 525–533.
5. Luysaert S., Schulze E.-D., Börner A., Knohl A., Hessenmöller D., Law B.E., Ciais P., Grace J. Old-growth forests as global carbon sinks // *Nature*. 2008. Vol. 455, № 7210. P. 213–215.
6. Мониторинг потоков парниковых газов в природных экосистемах / под ред. Д.Г. Замолотчикова, Д.В. Карелина, М.Л. Гитарского, В.Г. Блинова. Саратов: Амирит, 2017. 279 с.
7. Коротков В.Н., Гитарский М.Л. Продуктивность лесов и усыхание еловых древостоев национального парка «Валдайский» // Изучение и охрана природного и исторического наследия Валдайской возвышенности и сопредельных регионов : материалы Межрегион. науч.-практ. конф., посвященной 25-летию национального парка «Валдайский». Вышний Волочёк: Ирида-прос, 2015. С. 88–93.
8. Михайлова Т.А., Бережная Н.С., Русакова Л.В., Янькова Л.С. Показатели состояния пигментного комплекса сосны обыкновенной, угнетенной аэропромвыбросами // *Сиб. экол. журн.* 2000. № 6. С. 213–224.
9. Суворова Г.Г. Фотосинтез хвойных деревьев в условиях Сибири. Новосибирск: Гео, 2009. 192 с.
10. Юзбеков А.К. Сезонная динамика фотосинтетической продуктивности ели европейской в лесных сообществах Валдая // *Экол. мониторинг и моделирование экосистем*. 2022. Т. XXXIII, № 3–4. С. 37–51.
11. Юзбеков А.К., Замолотчиков Д.Г., Иващенко А.И. Фотосинтез ели европейской в лесных экосистемах экспериментального полигона «Лог Таежный» // *Вестн. Московского ун-та. Серия 16: Биология*. 2014. № 4. С. 32–35.
12. Карелин Д.В., Замолотчиков Д.Г., Зукерт Н.В., Честных О.В., Почикалов А.В., Краев Г.Н. Межгодовые изменения ФАР и влажности почвы в теплый сезон могут быть важнее для направления годового углеродного баланса в тундрах, чем колебания температуры // *Журн. общей биологии*. 2013. Т. 74, № 1. С. 3–22.
13. Уткин А.И., Замолотчиков Д.Г., Гульбе Т.А., Гульбе Я.И. Аллометрические уравнения для фитомассы по данным деревьев сосны, ели, березы и осины в европейской части России // *Лесоведение*. 1996. № 6. С. 36–45.
14. Stinziano J.R., Hüner N.P.A., Way D.A. Warming delays autumn declines in photosynthetic capacity in a boreal conifer, Norway spruce (*Picea abies*) // *Tree Physiology*. 2015. Vol. 35, № 12. P. 1303–1313.
15. Головки Т.К., Дымова О.В., Яцко Я.Н. Сезонные изменения пигментного комплекса вечнозеленых растений бореальной зоны // *Вестн. Ин-та биологии Коми НЦ УрО РАН*. 2011. № 1–2. С. 22–27.
16. Бобкова К.С., Тужилкина В.В. Углеродный цикл в еловых экосистемах // *Коренные еловые леса севера: биоразнообразие, структура, функции* / отв. ред.: К.С. Бобкова, Э.П. Галенко. СПб.: Наука, 2006. С. 265–288.
17. Пулы и потоки углерода в наземных экосистемах России / под ред. Г.А. Заварзина. М.: Наука, 2007. 312 с.

References

1. Pan Y., Birdsey R.A., Fang J., Houghton R., Kauppi P.E., Kurz W.A., Phillips O.L., Shvidenko A., Lewis S.L., Canadell J.G., Ciais Ph., Jackson R.B., Pacala St.W., McGuire A.D., Piao Sh., Rautiainen A., Sitch S., Hayes D. A large and persistent carbon sink in the world's forests. *Science*. 2011;333(6045):988-993.
2. Dixon R.K., Solomon A.M., Brown S., Houghton R.A., Trexier M.C., Wisniewski J. Carbon pools and flux of global forest ecosystems. *Science*. 1994;263(5144):185-190.
3. Goodale C.L., Apps M.J., Birdsey R.A., Field C.B., Heath L.S., Houghton R.A., Jenkins J.C., Kohlmaier G.H., Kurz W., Liu S., Nabuurs G.-J., Nilsson S., Shvidenko A.Z. Forests carbon sinks in the Northern Hemisphere. *Ecological Applications*. 2002;12(3):891-899.
4. Field C.B., Kaduk J. The carbon balance of an old growth forest: building across approaches. *Ecosystems*. 2004;7(5):525-533.
5. Luyssaert S., Schulze E.-D., Börner A., Knohl A., Hessenmöller D., Law B.E., Ciais P., Grace J. Old-growth forests as global carbon sinks. *Nature*. 2008;455(7210):213-215.
6. Zamolodchikov D.G., Karelin D.V., Guitarsky M.L., Blinov V.G., eds. *Monitoring of greenhouse gas fluxes in natural ecosystems*. Saratov: Amirit Publ.; 2017. 279 p. (In Russ.).
7. Korotkov V.N., Guitarsky M.L. Forest productivity and drying of spruce stands of the Valdai National Park. *Studying and protecting the natural and historical heritage of the Valdai upland and adjacent regions: Interregional Scientific and Practical Conference dedicated to the 25th anniversary of the Valdai National Park*. Vysny Volochek: Irida-pros Publ.; 2015:88-93. (In Russ.).
8. Mikhailova T.A., Berezhnaya N.S., Rusakova L.V., Yankova L.S. Indicators of the state of the pigment complex of Scots pine, oppressed by aeroprom emissions. *Sib. ekol. zhurn. = Siberian Ecological Journal*. 2000;(6):213-224. (In Russ.).
9. Suvorova G.G. *Photosynthesis of coniferous trees in Siberia*. Novosibirsk: Geo Publ.; 2009. 192 p. (In Russ.).
10. Yuzbekov A.K. Seasonal dynamics of the photosynthetic productivity of the Norway spruce in the forest cenoses of Valdai. *Ekologicheskii monitoring i modelirovanie ekosistem = Environmental Monitoring and Ecosystem Modelling*. 2022;33(3-4):37-51. (In Russ.).
11. Yuzbekov A.K., Zamolodchikov D.G., Ivaschenko A.I. Spruce fir photosynthesis in the forest ecosystems of the test area "Log Tayezhnyi". *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 16: Biologiya = Herald of Moscow University. Series 16. Biology*. 2014;(4):32-35. (In Russ.).
12. Karelin D.V., Zamolodchikov D.G., Zukert N.V., Chestnykh O.V., Pochikalov A.V., Kraev G.N. Inter-annual changes in PAR and soil moisture in the warm season may be more important for the direction of the annual carbon balance in the tundra than temperature fluctuations. *Zhurn. obshchei biologii = Journal of General Biology*. 2013;74(1):3-22. (In Russ.).
13. Utkin A.I., Zamolodchikov D.G., Gulbe T.A., Gulbe Ya.I. Allometric equations for phytomass according to pine, spruce, birch, and aspen trees in the European part of Russia. *Lesovedenie = Forest Science*. 1996;(6):36-45. (In Russ.).
14. Stinziano J.R., Hüner N.P.A., Way D.A. Warming delays autumn declines in photosynthetic capacity in a boreal conifer, Norway spruce (*Picea abies*). *Tree Physiology*. 2015;35(12):1303-1313.
15. Golovko T.K., Dymova O.V., Yatsko Ya.N. Seasonal changes in the pigment complex of evergreen plants of the boreal zone. *Vestn. In-ta biologii Komi NTs UrO RAN = Bulletin of the Institute of Biology of the Komi National Research Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences*. 2011;(1-2):22-27. (In Russ.).
16. Bobkova K.S., Tuzhilkina V.V. Carbon cycle in spruce ecosystems. *Virgin spruce forest on North: biodiversity, structure, functions*. K.S. Bobkova, E.P. Galenko, eds. St. Petersburg: Nauka Publ.; 2006:265-288. (In Russ.).
17. Zavarzin G.A., ed. *Pools and carbon fluxes in terrestrial ecosystems of Russia*. Moscow: Nauka Publ.; 2007. 312 p. (In Russ.).

Информация об авторах

А.К. Юзбеков – доктор биологических наук, профессор, кафедра экологии и географии растений, биологический факультет.

А.С. Куманяев – младший научный сотрудник, лаборатория структурно-функциональной организации и устойчивости лесных экосистем.

Information about the authors

A.K. Yuzbekov - Doctor of Science (Biology), Professor, Department of Ecology and Plant Geography, Faculty of Biology.

A.S. Kumanyayev - Junior Researcher, Laboratory of Structural and Functional Organization and Sustain.

Статья поступила в редакцию 22.11.2023; одобрена после рецензирования 20.03.2024; принята к публикации 24.05.2024.
The article was submitted 22.11.2023; approved after reviewing 20.03.2024; accepted for publication 24.05.2024.

БИОЛОГИЧЕСКИЕ НАУКИ

BIOLOGICAL SCIENCES

Научная статья

УДК 631.46; 57.044

doi: 10.18522/1026-2237-2024-2-131-137

ИЗМЕНЕНИЕ АКТИВНОСТИ ОКСИДОРЕДУКТАЗ ЧЕРНОЗЕМА
ОБЫКНОВЕННОГО ПРИ ЗАГРЯЗНЕНИИ ПЛАТИНОЙ

А.Н. Тимошенко¹, С.И. Колесников², Н.А. Евстегнеева³, В.С. Кабакова⁴,
Т.В. Минникова⁵, К.Ш. Казеев⁶, Т.В. Денисова⁷✉

^{1,2,3,4,5,6,7} Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, Россия

¹ aly9215@mail.ru

² kolesnikov@sfnu.ru

³ natalja.evstegneewa@yandex.ru

⁴ murugina97@mail.ru

⁵ tminnikova@sfnu.ru

⁶ kamil_kazeev@mail.ru

⁷ denisova777@inbox.ru✉

Аннотация. Автомобильная промышленность является основным источником загрязнения окружающей среды металлами платиновой группы, в связи с чем возрастает концентрация платины в дорожной пыли, почве, растениях. Это может привести к достижению токсичных уровней данного металла в окружающей среде, а следовательно, к нарушению баланса экосистемы, сокращению микробной популяции, снижению плодородия почвы. Изучено влияние платины на активность оксидоредуктаз чернозема обыкновенного: каталазы и дегидрогеназ. Платину вносили в почву в форме хлорида. Исследовали концентрации платины 0,01; 0,1; 1; 10 и 100 мг/кг. Изменение показателей чернозема обыкновенного оценивали через 10, 30 и 90 сут после загрязнения. Установлено отсутствие стимулирующего действия хлорида платины на активность каталазы, эффект гормезиса на активность дегидрогеназ чернозема обыкновенного. Показана зависимость степени снижения показателей от концентрации загрязняющего вещества в почве и срока загрязнения. Показано отрицательное влияние даже небольшой концентрации (0,1 мг/кг) хлорида платины на ферментативную активность почвы. Ранняя диагностика степени загрязнения почв соединениями платины может успешно применяться для оперативной оценки их влияния на состояние почвы и предотвращения возможных негативных последствий.

Ключевые слова: экотоксичность, биотестирование, чернозем обыкновенный, устойчивость, чувствительность, тяжелые металлы, платина, токсичность

Для цитирования: Тимошенко А.Н., Колесников С.И., Евстегнеева Н.А., Кабакова В.С., Минникова Т.В., Казеев К.Ш., Денисова Т.В. Изменение активности оксидоредуктаз чернозема обыкновенного при загрязнении платиной // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2024. № 2. С. 131–137.

Благодарности: исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-74-00080 в Южном федеральном университете, <https://rscf.ru/project/22-74-00080>.

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

© Тимошенко А.Н., Колесников С.И., Евстегнеева Н.А., Кабакова В.С.,
Минникова Т.В., Казеев К.Ш., Денисова Т.В., 2024

Original article

CHANGES IN THE ACTIVITY OF OXIDOREDUCTASES OF ORDINARY CHERNOZEM DURING PLATINUM CONTAMINATION

A.N. Timoshenko¹, S.I. Kolesnikov², N.A. Evstegneeva³, V.S. Kabakova⁴,
T.V. Minnikova⁵, K.Sh. Kazeev⁶, T.V. Denisova⁷✉

^{1,2,3,4,5,6,7} Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia

¹ aly9215@mail.ru

² kolesnikov@sfedu.ru

³ natalja.evstegneewa@yandex.ru

⁴ murugina97@mail.ru

⁵ tminnikova@sfedu.ru

⁶ kamil_kazeev@mail.ru

⁷ denisova777@inbox.ru✉

Abstract. The automotive industry is the main source of environmental pollution with platinum group metals, which increases the concentration of platinum in road dust, soil, and plants. This can lead to the achievement of toxic levels of this metal in the environment, and consequently, an imbalance of the ecosystem, a reduction in the microbial population, and a decrease in soil fertility. The effects of platinum on the activity of oxidoreductases of ordinary chernozem have been studied: the activity of catalase and dehydrogenase. Platinum was introduced into the soil in the form of chloride. Platinum concentrations were studied – 0.01; 0.1; 1; 10 and 100 mg/kg. The change in the indicators of ordinary chernozem was assessed 10, 30 and 90 days after contamination. The absence of a stimulating effect of platinum chloride on catalase activity, the effect of hormesis on the activity of dehydrogenases of ordinary chernozem has been established. The dependence of the degree of decrease in indicators on the concentration of the pollutant in the soil and the time from the moment of contamination is shown. The study shows the negative effect of even a small concentration (0.1 mg/kg) of platinum chloride on the enzymatic activity of the soil. Early diagnosis of the degree of soil contamination with platinum compounds can be successfully used to promptly assess their impact on soil condition and prevent possible negative consequences.

Keywords: ecotoxicity, biotesting, ordinary chernozem, resistance, sensitivity, heavy metals, platinum, toxicity

For citation: Timoshenko A.N., Kolesnikov S.I., Evstegneeva N.A., Kabakova V.S., Minnikova T.V., Kazeev K.Sh., Denisova T.V. Changes in the Activity of Oxidoreductases of Ordinary Chernozem During Platinum Contamination. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2024;(2):131-137. (In Russ.).

Acknowledgements: the research was carried out at the expense of a grant from the Russian Science Foundation No. 22-74-00080 at the Southern Federal University, <https://rscf.ru/project/22-74-00080>.

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

Введение

Влияние загрязнения платиной (Pt) слабо изучено, несмотря на потенциально высокий риск для окружающей среды. Основным источником выбросов Pt в окружающую среду является автомобильная промышленность, в которой в качестве активных компонентов катализаторов применяются Pd, Pt и Rh [1]. Использование каталитических нейтрализаторов чрезвычайно полезно для окружающей среды. Однако они представляют собой новый источник загрязнения. Истирание и износ каталитических нейтрализаторов в результате химического и физического воздействия приводят к выбросу в окружающую среду частиц, содержащих Pt. Источниками поступления Pt в окружающую среду могут быть другие отрасли, в которых широко применяется Pt: медицина [2, 3], химическая [4, 5], электротехническая и стекольная промышленности [6].

Установлено, что Pt накапливается как в нанометровых, так и в микрометровых частицах на поверхности дорожной пыли, в придорожных почвах и растениях, о чем свидетельствует анализ атмосферных частиц [7].

Несмотря на то что существуют исследования поведения Pt и ее химических соединений в различных типах почв [8, 9], влияние Pt на ключевые почвенные процессы изучено недостаточно.

Цель работы – изучить влияние Pt на активность оксидоредуктаз чернозема обыкновенного.

Объекты и методы исследования

В качестве объекта исследования выбран чернозем обыкновенный южноевропейской фации (Россия, г. Ростов-на-Дону, Ботанический сад ЮФУ) – *Naptic Chernozems Loamic* [10]. Отбор проб осуществляли с верхнего горизонта 0–10 см, так как тяжелые металлы чаще всего задерживаются в верхнем пахотном слое почвы. Чернозем обыкновенный южноевропейской фации характеризуется тяжелосуглинистым гранулометрическим составом, нейтральной реакцией среды (рН=7,8), содержанием гумуса (3,7 %).

Анализ литературных данных показал, что Pt чаще всего попадает в почву в форме оксида, хлорида и наночастиц. Эти формы соединений характерны для большинства тяжелых металлов, загрязняющих почву [11]. В настоящей работе исследовали влияние хлорида платины ($PtCl_2$) как наиболее токсичной формы. Концентрации Pt в почве составляли 0,01; 0,1; 1; 10 и 100 мг/кг. Определение биологических свойств чернозема обыкновенного проводили через 10, 30 и 90 сут после загрязнения.

Лабораторно-аналитические работы выполняли с использованием общепринятых методов в биологии, почвоведении и экологии [12]. Исследовали показатели ферментативной активности почв: активность каталазы и дегидрогеназ. Ранее было установлено, что именно эти ферменты наиболее чувствительны к загрязнению [13].

Результаты и обсуждение

Анализ полученных результатов показал, что внесение $PtCl_2$ вызывает снижение активности каталазы на 6 % от контроля уже через 10 сут после загрязнения и в минимально используемой концентрации (0,01 мг/кг) (рис. 1).

Через 30 сут после загрязнения снижение активности каталазы составляло 12 % от контроля. Через 90 сут отмечается тенденция к восстановлению: значения активности каталазы практически достигают контрольных. Наибольшая степень токсичности Pt на 30-е сут отмечается и при внесении платины в концентрации 0,1 и 1 мг/кг. Снижение составляет 18 и 21 % соответственно. Если при внесении Pt в концентрации 0,1 мг/кг через 90 сут после загрязнения активность каталазы полностью восстанавливается, то при внесении 1 мг/кг значения показателя немного ниже контроля – 94 %. Внесение Pt в концентрации 10 мг/кг оказывает наиболее ингибирующий эффект через 10 сут после загрязнения. На 30-е сут наблюдается тенденция к восстановлению. Однако снижение на 10-е сут было столь сильным (32 % от контроля), что процесс восстановления шел медленнее, чем на более низких концентрациях, и даже на 90-е сут после загрязнения значения показателя были далеки от контрольных и составляли 80 % от контроля. Наибольшую токсичность на активность каталазы Pt оказала в концентрации 100 мг/кг. И если при внесении меньших концентраций отмечалась тенденция к восстановлению спустя время, то столь высокая концентрация оказывала длительное негативное воздействие. Увеличение срока инкубирования приводит к большему снижению показателя, более чем в 1,5 раза от контроля.

Таким образом, можно отметить прямую зависимость степени ингибирования активности каталазы от повышения содержания Pt в почве. Чем выше концентрация, тем сильнее снижение показателя, а восстановление происходит медленнее. Наибольшее ингибирование активности каталазы при внесении в почву малых концентраций Pt (0,01; 0,1 и 1 мг/кг) наблюдается на 30-е сут после загрязнения, при внесении 10 мг/кг – на 10-е сут, 100 мг/кг – на 90-е сут.

Активность дегидрогеназ менее чувствительна к загрязнению $PtCl_2$, чем активность каталазы (рис. 2).

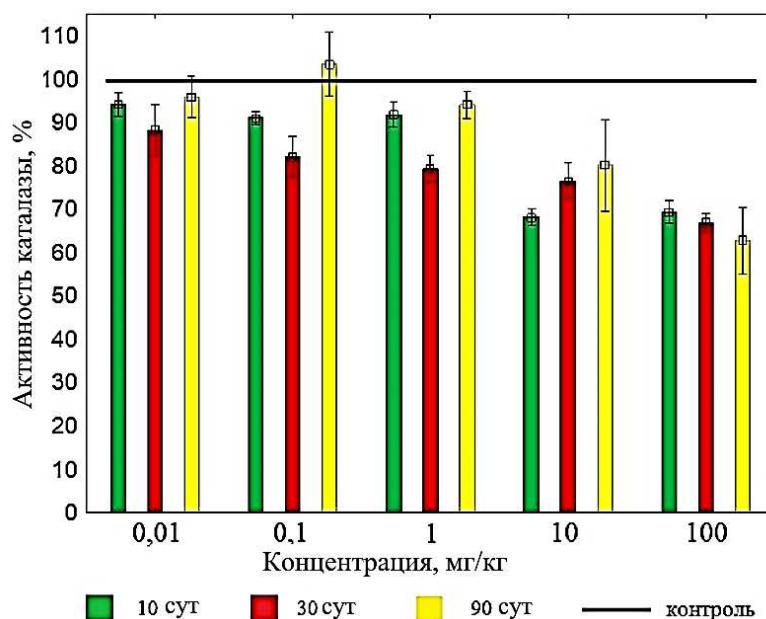


Рис. 1. Изменение активности каталазы чернозема обыкновенного после загрязнения платиной / Fig. 1. Change in catalase activity of ordinary chernozem after platinum contamination

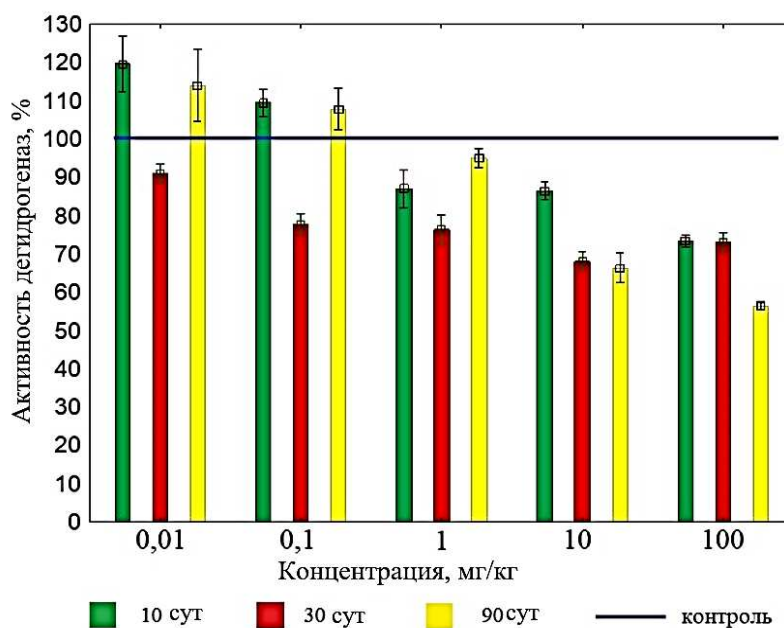


Рис. 2. Изменение активности дегидрогеназ чернозема обыкновенного после загрязнения Pt / Fig. 2. Change in the activity of ordinary chernozem dehydrogenases after platinum contamination

При внесении в почву 0,01 и 0,1 мг/кг Pt наблюдается одинаковая закономерность: через 10 сут после загрязнения отмечается стимулирование показателя на 19 и 9 % от контроля; более длительное воздействие (30 сут) приводит к снижению активности дегидрогеназ в разной степени в зависимости от концентрации. При внесении 0,01 мг/кг Pt в почву активность дегидрогеназ снижается на 9 % от контроля, 0,1 мг/кг – на 23 %. В обоих случаях через 90 сут после загрязнения отмечается полное восстановление активности дегидрогеназ и даже небольшое стимулирование данного показателя. Для концентрации 1 мг/кг прослеживается следующая закономерность: наибольшее снижение отмечается на 30-е сут после загрязнения, на 90-е – тенденция к восстановлению, однако показатель на 5 % ниже контроля, что говорит о том, что для полного восстановления нужен еще определенный срок. Несмотря на то что значения активности дегидрогеназ были примерно равными через 30 сут после загрязнения для концентраций 0,01 и 0,1 мг/кг, восстановление показателя на 90-е сут при более высокой концентрации Pt в почве

происходит хуже. Для концентраций 10 и 100 мг/кг характерно снижение показателя уже на 10-е сут после загрязнения на 14 и 26 % от контроля соответственно и отсутствие тенденции к восстановлению на 90-е сут. При этом, если при внесении в почву 10 мг/кг Pt значения показателя на 30-е и 90-е сут не отличаются, то при 100 мг/кг Pt на 90-е сут после загрязнения активность дегидрогеназ ингибирована в значительно большей степени, чем на 30-е сут.

Таким образом, ингибирование активности дегидрогеназ при внесении в почву 0,01 и 0,1 мг/кг Pt наблюдается только через 30 сут после загрязнения, при этом на 90-е сут активность дегидрогеназ полностью восстанавливается. При внесении 1 мг/кг снижение показателя начинается уже через 10 сут с момента загрязнения, наибольшее ингибирование фермента происходит спустя 30 сут, а через 90 сут отмечается тенденция к восстановлению. Наибольший токсический эффект хлорида платины на активность дегидрогеназ отмечается при содержании платины в почве 10 и 100 мг/кг – снижение наблюдается уже через 10 сут после загрязнения. С увеличением срока инкубации изменения либо отсутствуют, либо происходит еще большее ингибирование фермента в сравнении с предыдущими сроками.

По результатам исследования установлено, что активность каталазы через 10 сут после загрязнения была более чувствительна к загрязнению PtCl₂, чем активность дегидрогеназ. Спустя 30 и 90 сут после инкубации ферменты были чувствительны к загрязнению в примерно равной степени. Однако, если в случае с активностью каталазы тенденция к восстановлению наблюдается на 90-е сут после загрязнения для всех концентраций, за исключением 100 мг/кг, то значения активности дегидрогеназ через 90 сут после загрязнения Pt ниже значений 30 сут при внесении в почву меньших концентраций – 10 и 100 мг/кг. Ранее была установлена высокая чувствительность ферментов класса оксидоредуктаз для других загрязняющих веществ [14–16]. Полученные в данном исследовании результаты согласуются с проведенными ранее другими исследованиями, в которых установлено, что низкие концентрации Pt могут оказывать как стимулирующий, так и токсический эффект на ферментативную активность почв. Это зависит от исследуемого фермента [17].

Заключение

Загрязнение чернозема обыкновенного PtCl₂ в большинстве случаев приводит к ингибированию ферментов класса оксидоредуктаз: каталазы и дегидрогеназ. Наблюдается прямая зависимость степени ингибирования активности ферментов от повышения содержания платины в почве: чем выше концентрация, тем сильнее снижение показателя, а восстановление происходит медленнее. Наибольший токсический эффект хлорида платины на активность ферментов отмечается при содержании платины в почве 10 и 100 мг/кг.

Наибольшее ингибирование активности каталазы при внесении в почву малых концентраций платины (0,01; 0,1 и 1 мг/кг) наблюдается на 30-е сут после загрязнения, при внесении 10 мг/кг – на 10-е сут, при внесении 100 мг/кг – на 90-е сут. Ингибирование активности дегидрогеназ при внесении в почву 0,01 и 0,1 мг/кг платины начинается через 30 сут после загрязнения, при внесении 1, 10 и 100 мг/кг – через 10 сут с момента загрязнения.

Активность каталазы через 10 сут после загрязнения более чувствительна к загрязнению PtCl₂, чем активность дегидрогеназ. Спустя 30 и 90 сут после инкубации ферменты были чувствительны к загрязнению в примерно равной степени.

Установлено отсутствие стимулирующего действия хлорида платины на активность каталазы и эффект гормезиса на активность дегидрогеназ чернозема обыкновенного.

Список источников

1. Ma Z., Cano Z., Yu A., Chen Z., Jiang G., Fu X., Yang L., Wu T., Bai Z., Lu J. Enhancing Oxygen Reduction Activity of Pt-based Electrocatalysts: From Theoretical Mechanisms to Practical Methods // *Angewandte Chemie* (Int. ed. in English). 2020. Vol. 59, № 42. P. 18334–18348. <https://doi.org/10.1002/anie.202003654>
2. Rajendran S., Prabha S., Rathish J., Singh G., Al-Hashem A. Chapter 12 - Antibacterial activity of platinum nanoparticles // *Nanotoxicity. Prevention and Antibacterial Applications of Nanomaterials “Micro and Nano Technologies”*. Elsevier, 2020. P. 275–281. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819943-5.00012-9>
3. Bloch K., Pardesi K., Satriano C., Ghosh S. Bacteriogenic Platinum Nanoparticles for Application in Nanomedicine // *Frontiers in Chemistry*. 2021. Vol. 9. P. 624344. <https://doi.org/10.3389/fchem.2021.624344>

4. Ávila M.I.A., Toledo-Carrillo E., Dutta J. Improved chlorate production with platinum nanoparticles deposited on fluorinated activated carbon cloth electrodes // *Cleaner Engineering and Technology*. 2020. Vol. 1. P. 100016. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2020.100016>
5. Lévy K., Kárpáti T., Hegedűs L. Selective hydrogenation of benzonitrile and its homologues to primary amines over platinum // *J. of Industrial and Engineering Chemistry*. 2021. Vol. 101. P. 279–292. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2021.06.002>
6. Jung T.K., Joh D.W., Lee S.Y., Choi M.S., Hyun S.K., Lee H.S. Mechanical alloying of platinum with 5 % ZrO₂ nanoparticles for glass making tools // *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2014. Vol. 24, № 1. P. 99–105. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(14\)63294-5](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(14)63294-5)
7. Cicchella D., Fedele L., De Vivo B., Albanese S., Lima A. Platinum group element distribution in the soils from urban areas of the Campania region (Italy) // *Geochemistry Exploration Environment Analysis*. 2008. Vol. 8. P. 31–40. <https://doi.org/10.1144/1467-7873/07-149>
8. Кубракова И.В., Тютюнник О.А., Кощеева И.Я., Садагов А.Ю., Набиуллина С.Н. Миграционное поведение платиновых металлов в природно-техногенных системах // *Геохимия*. 2017. № 1. С. 68–85. Doi: 10.7868/S0016752516120050.
9. Reith F., Cornelis G. Effect of soil properties on gold - and platinum nanoparticle mobility // *Chemical Geology*. 2017. Vol. 466. P. 446–453. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2017.06.033>
10. World Reference Base for Soil Resources 2014. Update 2015. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. 3rd ed. Rome: FAO, 2015.
11. Kabata-Pendias A. Trace Elements in Soils and Plants. 4th ed. Boca Raton, FL: CRC Press, 2010. P. 548.
12. Даденко Е.В., Казеев К.Ш., Колесников С.И. Методы определения ферментативной активности почв. Ростов н/Д.: Изд-во ЮФУ, 2021. 112 с.
13. Kolesnikov S.I., Kazeev K.Sh., Val'kov V.F., Ponomareva S.V. Ranking of Chemical Elements According to Their Ecological Hazard for Soil // *Russian Agricultural Sciences*. 2010. Vol. 36, № 1. P. 32.
14. Kolesnikov S., Minnikova T., Minkina T., Rajput V.D., Tsepina N., Kazeev K., Zhadobin A., Nevedomaya E., Ter-Misakants T., Akimenko Y., Mandzhieva S., Sushkova S., Ranjan A., Asylbaev I., Popova V., Timoshenko A. Toxic Effects of Thallium on Biological Indicators of Haplic Chernozem Health: A Case Study // *Environments*. 2021. Vol. 8. P. 119. <https://doi.org/10.3390/environments8110119>
15. Тимошенко А. Н., Колесников С. И., Кабакова В. С., Евстегнеева Н. А., Минникова Т. В., Казеев К. Ш., Минкина Т. М. Оценка устойчивости почв к загрязнению наночастицами платины методами биодиагностики // *Почвоведение*. 2023. № 8. С. 997–1006. <https://doi.org/10.31857/S0032180X23600221>
16. Евстегнеева Н. А., Колесников С. И., Минникова Т. В., Тимошенко А. Н. Оценка экотоксичности тяжелых металлов, металлоидов и неметаллов, содержащихся в отходах предприятий горной промышленности // *Горный информ.-аналит. бюл.* 2023. № 5-1. С. 73–85.
17. Shara S., Shahsavaria E., Reith F., Alghamdib O.A., Yamanib H.A., AlJudaibib A., Donnere E., Vasileiadis S., Ball A.S. Dose-related changes in respiration and enzymatic activities in soils amended with mobile platinum and gold // *Applied Soil Ecology*. 2021. Vol. 157. P. 103727. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2020.103727>

References

1. Ma Z., Cano Z., Yu A., Chen Z., Jiang G., Fu X., Yang L., Wu T., Bai Z., Lu J. Enhancing Oxygen Reduction Activity of Pt-based Electrocatalysts: From Theoretical Mechanisms to Practical Methods. *Angewandte Chemie (Int. ed. in English)*. 2020;59(42):18334-18348. <https://doi.org/10.1002/anie.202003654>
2. Rajendran S., Prabha S., Rathish J., Singh G., Al-Hashem A. Chapter 12 - Antibacterial activity of platinum nanoparticles. *Nanotoxicity. Prevention and Antibacterial Applications of Nanomaterials "Micro and Nano Technologies"*. Elsevier, 2020:275-281. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819943-5.00012-9>
3. Bloch K., Pardesi K., Satriano C., Ghosh S. Bacteriogenic Platinum Nanoparticles for Application in Nanomedicine. *Frontiers in Chemistry*. 2021;9:624344. <https://doi.org/10.3389/fchem.2021.624344>
4. Ávila M.I.A., Toledo-Carrillo E., Dutta J. Improved chlorate production with platinum nanoparticles deposited on fluorinated activated carbon cloth electrodes. *Cleaner Engineering and Technology*. 2020;1:100016. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2020.100016>
5. Lévy K., Kárpáti T., Hegedűs L. Selective hydrogenation of benzonitrile and its homologues to primary amines over platinum. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*. 2021;101:279-292. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2021.06.002>
6. Jung T.K., Joh D.W., Lee S.Y., Choi M.S., Hyun S.K., Lee H.S. Mechanical alloying of platinum with 5 % ZrO₂ nanoparticles for glass making tools. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2014;24(1):99-105. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(14\)63294-5](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(14)63294-5)

7. Cicchella D., Fedele L., De Vivo B., Albanese S., Lima A. Platinum group element distribution in the soils from urban areas of the Campania region (Italy). *Geochemistry Exploration Environment Analysis*. 2008;8:31-40. <https://doi.org/10.1144/1467-7873/07-149>
8. Kubrakova I.V., Tyutyunnik O.A., Kosheeva I.Ya., Sudakov A.Yu., Nabiullina S.N. Migration behavior of platinum metals in natural and man-made systems. *Geokhimiya = Geochemistry*. 2017;(1):68-85. Doi: 10.7868/S0016752516120050. (In Russ.).
9. Reith F., Cornelis G. Effect of soil properties on gold and platinum nanoparticle mobility. *Chemical Geology*. 2017;466:446-453. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2017.06.033>
10. *World Reference Base for Soil Resources 2014. Update 2015. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps*. 3rd ed. Rome: FAO Press; 2015.
11. Kabata-Pendias A. *Trace Elements in Soils and Plants*. 4th ed. Boca Raton, FL: CRC Press; 2010. P. 548.
12. Dadenko E.V., Kazeev K.Sh., Kolesnikov S.I. *Methods for determining the enzymatic activity of soils*. Rostov-on-Don: Southern Federal University Press; 2021. 112 p. (In Russ.).
13. Kolesnikov S. I., Kazeev K. Sh., Val'kov V. F., Ponomareva S. V. Ranking of Chemical Elements According to Their Ecological Hazard for Soil. *Russian Agricultural Sciences*. 2010;36(1):32.
14. Kolesnikov S., Minnikova T., Minkina T., Rajput V.D., Tsepina N., Kazeev K., Zhadobin A., Nevedomaya E., Ter-Misakyants T., Akimenko Y., Mandzhieva S., Sushkova S., Ranjan A., Asylbaev I., Popova V., Timoshenko A. Toxic Effects of Thallium on Biological Indicators of Haplic Chernozem Health: A Case Study. *Environments*. 2021;8:119. <https://doi.org/10.3390/environments8110119>
15. Timoshenko A.N., Kolesnikov S.I., Kabakova V.S., Evstegneeva N.A., Minnikova T.V., Kazeev K.S., Minkina T.M. Assessment of Soil Tolerance towards Contamination with Platinum Nanoparticles by Biodiagnostic Methods. *Eurasian Soil Science*. 2023;(8):1152-1160.
16. Evstegneeva N.A., Kolesnikov S.I., Minnikova T.V., Timoshenko A.N. Toxicity estimate of heavy metals, metalloids and nonmetals contained in mineral mining waste *Gornyi inform.-analit. byul. = Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2023;(5-1):73-85. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_51_0_73 (In Russ.).
17. Shara S., Shahsavaria E., Reith F., Alghamdi O.A., Yamanib H.A., AlJudaibib A., Donnere E., Vasileiadis S., Ball A.S. Dose-related changes in respiration and enzymatic activities in soils amended with mobile platinum and gold. *Applied Soil Ecology*. 2021;157:103727. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2020.103727>

Информация об авторах

Алена Николаевна Тимошенко – кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник, Академия биологии и биотехнологии им. Д.И. Ивановского.

Сергей Ильич Колесников – доктор сельскохозяйственных наук, профессор, заведующий кафедрой экологии и природопользования, Академия биологии и биотехнологии им. Д.И. Ивановского.

Наталья Андреевна Евстегнеева – аспирант, Академия биологии и биотехнологии им. Д.И. Ивановского.

Виктория Сергеевна Кабакова – аспирант, Академия биологии и биотехнологии им. Д.И. Ивановского.

Татьяна Владимировна Минникова – кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник, Академия биологии и биотехнологии им. Д.И. Ивановского.

Камиль Шагидуллович Казеев – доктор географических наук, профессор, директор Академии биологии и биотехнологии им. Д.И. Ивановского.

Татьяна Викторовна Денисова – доктор биологических наук, доцент, профессор кафедры экологии и природопользования, Академия биологии и биотехнологии им. Д.И. Ивановского.

Information about the authors

Alena N. Timoshenko - Candidate of Science (Biology), Leading Researcher, Academy of Biology and Biotechnology.

Sergey I. Kolesnikov - Doctor of Science (Agriculture), Professor, Head of Department of Ecology and Nature Management, Academy of Biology and Biotechnology.

Natalia A. Evstegneeva - Postgraduate Student, Academy of Biology and Biotechnology.

Victoria S. Kabakova - Postgraduate Student, Academy of Biology and Biotechnology.

Tatiana V. Minnikova - Candidate of Science (Biology), Leading Researcher, Academy of Biology and Biotechnology.

Kamil Sh. Kazeev - Doctor of Science (Geography), Professor, Director of the Academy of Biology and Biotechnology.

Tatyana V. Denisova - Doctor of Science (Biology), Associate Professor, Professor at the Department of Ecology and Nature Management, Academy of Biology and Biotechnology.

Статья поступила в редакцию 28.01.2024; одобрена после рецензирования 29.02.2024; принята к публикации 24.05.2024.
The article was submitted 28.01.2024; approved after reviewing 29.02.2024; accepted for publication 24.05.2024.

Научная статья

УДК 57.044; 631.46

doi: 10.18522/1026-2237-2024-2-138-143

ОЦЕНКА ФИТОТОКСИЧНОСТИ НАНОЧАСТИЦ СЕРЕБРА В ЧЕРНОЗЕМЕ ОБЫКНОВЕННОМ

Н.И. Цепина^{1✉}, С.И. Колесников², Т.В. Минникова³, А.С. Русева⁴, Д.А. Труфанов⁵

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

¹cepinanatalia@yandex.ru ✉

²kolesnikov@sfedu.ru

³tminnikova@sfedu.ru

⁴ruseva.ann@yandex.ru

⁵dtrufanov@sfedu.ru

Аннотация. Проведена оценка влияния наночастиц серебра (AgNPs) в концентрациях 0,1; 0,5; 1; 5; 10; 50 и 100 мг/кг на показатели всхожести и длины корней редиса в черноземе обыкновенном через 30 сут после загрязнения. Установлено, что степень экотоксического влияния AgNPs на всхожесть и длину корней редиса находится в прямой зависимости от их дозы в почве. Содержание AgNPs 1, 5, 10, 50, 100 мг/кг в черноземе обыкновенном вызвало снижение всхожести редиса на 11, 13, 15, 18 и 38 % по сравнению со значениями в незагрязненной почве. Дозы AgNPs 0,5; 1; 5; 10; 50 и 100 мг/кг снижали длину корней редиса на 19, 20, 25, 30, 37 и 43 % по сравнению со значениями, полученными в незагрязненной почве. Показатель длины корней редиса проявил наибольшую чувствительность к загрязнению почвы AgNPs по сравнению с показателем всхожести. Полученные результаты по оценке фитотоксичности почв, загрязненных AgNPs, возможно использовать для диагностики и в качестве индикатора экологического состояния почв.

Ключевые слова: загрязнение почв, чернозем обыкновенный, серебро, экотоксичность, наночастицы, биодиагностика, всхожесть редиса, длина корней редиса

Для цитирования: Цепина Н.И., Колесников С.И., Минникова Т.В., Русева А.С., Труфанов Д.А. Оценка фитотоксичности наночастиц серебра в черноземе обыкновенном // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2024. № 2. С. 138–143.

Благодарности: исследование выполнено при государственной поддержке гранта Российского научного фонда № 22-74-00054, <https://rscf.ru/project/22-74-00054/>, в Южном федеральном университете.

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

Original article

ASSESSMENT OF PHYTOTOXICITY OF SILVER NANOPARTICLES IN ORDINARY CHERNOZEM

N.I. Tsepina^{1✉}, S.I. Kolesnikov², T.V. Minnikova³, A.S. Ruseva⁴, D.A. Trufanov⁵

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

¹cepinanatalia@yandex.ru ✉

²kolesnikov@sfedu.ru

³tminnikova@sfedu.ru

⁴ruseva.ann@yandex.ru

⁵dtrufanov@sfedu.ru

© Цепина Н.И., Колесников С.И., Минникова Т.В., Русева А.С., Труфанов Д.А., 2024

Abstract. The effect of silver nanoparticles (AgNPs) in concentrations was evaluated 0.1; 0.5; 1; 5; 10; 50 and 100 mg/kg for the germination and root length of ordinary black earth radish 30 days after contamination. It was found that the degree of ecotoxic effect of AgNPs on the germination and length of radish roots is directly dependent on their dose in the soil. The content of AgNPs 1, 5, 10, 50, 100 mg/kg in ordinary chernozem caused a decrease in the germination of radish by 11, 13, 15, 18 and 38 % compared with the values in uncontaminated soil. Doses of AgNPs 0.5, 1, 5, 10, 50 and 100 mg/kg inhibited the length of radish roots by 19, 20, 25, 30, 37 and 43 % compared with the values obtained in uncontaminated soil. The radish root length index showed the greatest sensitivity to soil contamination by AgNPs compared to the germination index. The obtained results on the assessment of phytotoxicity of soils contaminated with AgNPs can be used for diagnostics and as an indicator of the ecological state of soils.

Keywords: soil pollution, ordinary chernozem, silver, ecotoxicity, nanoparticles, biodiagnostics, radish germination, radish root length

For citation: Tsepina N.I., Kolesnikov S.I., Minnikova T.V., Ruseva A.S., Trufanov D.A. Assessment of Phytotoxicity of Silver Nanoparticles in Ordinary Chernozem. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2024;(2):138-143. (In Russ.).

Acknowledgements: the study was carried out with the state support of the Russian Science Foundation grant No. 22-74-00054, <https://rscf.ru/project/22-74-00054/>, at the Southern Federal University.

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

Широкое применение наночастиц серебра (AgNPs) в различных отраслях промышленности приводит к увеличению производства AgNPs и, как следствие, росту рисков загрязнения окружающей среды и почвенных экосистем. В исследованиях показано, что фитотоксичность серебра проявляется в уменьшении длины корней и побегов растений [1, 2]. Диагностируемые пределы обнаружения серебра в загрязненных почвах – 8–126 мг/кг [3]. Растения на этих загрязненных почвах способны накапливать в корневой системе и побегах высокие концентрации серебра [3]. Наночастицы серебра часто применяются в сельском хозяйстве, поскольку входят в состав удобрений и нанопестицидов [4]. Так как сельскохозяйственные культуры получают микроэлементы из почвы, то прямой контакт AgNPs с корнями растений может привести к их поглощению и транспортировке к наземным органам растения: побегам, стеблям и листьям [5].

Как известно, существует несколько путей поступления AgNPs из почвы в органы растений. Первый – это диффузия в семена, затем в корень и наземные органы растений. Второй – поглощение корнями растений, а затем миграция в другие органы. Третий основан на прямой миграции в органы растений и локализации в клетках эпидермиса или ксилемы [5]. Все способы поступления из почвы в растительные клетки зависят от размера, концентрации и физико-химических характеристик AgNPs, а также от природы сельскохозяйственных культур и свойств почвы. В связи с этим актуальным представляется проведение оценки экотоксичности наночастиц серебра в черноземе обыкновенном по всхожести и длине корней редиса.

Цель работы – дать оценку фитотоксичности наночастиц серебра в черноземе обыкновенном.

Материалы и методы

В качестве объекта исследования были выбраны черноземы обыкновенные – *Humic Chernozems* [6]. Они играют огромную роль в производстве сельскохозяйственной продукции, и снижение их плодородия в результате загрязнения химическими веществами крайне нежелательно. Образцы почвы для модельных лабораторных работ были отобраны из верхнего слоя (Апах – 0–20 см) почвы на пашне опытного участка Ботанического сада Южного федерального университета, (г. Ростов-на-Дону, Россия, 47°14'17.54" с.ш., 39°38'33.22" в.д.). Используемая почва имеет тяжелосуглинистый гранулометрический состав, содержание гумуса, равное 4,4 %, и слабощелочную реакцию среды (рН = 7,8). В данном исследовании рН определяли в водной вытяжке.

Были использованы наночастицы металлического серебра (CAS 7440-22-4) сферической формы размером 10 нм в виде порошка производства Alfa Aesar by Thermo Fisher Scientific (Германия). Химическая чистота AgNPs, по данным производителя, составляет около 99,99 %. Для подготовки к модельному эксперименту почву просеивали через сито с диаметром отверстий от 3 до 5 мм.

Наночастицы серебра сначала растирали с небольшим количеством почвы, а затем тщательно перемешивали с основной массой образца. В пластиковые контейнеры объемом 500 мл в 3-кратной повторности вносили по 300 г почвы. В подготовленные образцы почвы вносили AgNPs размером 10 нм в концентрациях 0,1; 0,5; 1; 5; 10; 50 и 100 мг/кг. Согласно литературным данным, серебро достаточно часто поступает в окружающую среду именно в форме AgNPs, а размер наночастиц, содержащихся в образцах окружающей среды и потребительских товарах, составляет от 10 до 100 нм. Однако чаще всего встречаются частицы размером 10–20 нм [7], при этом содержание серебра в почвах составляет от 0,01 до 126 мг/кг [3]. Исследованные концентрации серебра и даже большие концентрации в почвах уже встречаются [3]. Ранее было установлено, что наибольшее фитотоксическое воздействие на редис, пшеницу и горох оказывали именно наночастицы размера 10 нм [1]. Образцы чернозема были отобраны вдали от источников загрязнения серебром. Фоновое содержание серебра в черноземе обыкновенном – 0,10 мг/кг (определено методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ИСП-МС)).

Длительность инкубации сосудов с почвой, загрязненной AgNPs, в климатической камере KBW Binder составляла 30 дней. В камере были созданы благоприятные условия для почвенной биоты: влажность 25–30 %, температура 24–25 °С, смена освещения (днем и ночью). Для серебра именно на этом сроке показана самая высокая токсичность [8]. С увеличением срока экспозиции наблюдается постепенное восстановление биологических свойств, которые были характерны для почвы до внесения поллютантов.

В качестве тест-объекта для оценки фитотоксичности был выбран редис (*Raphanus sativus* L. var. *radicula*), сорт «18 дней». Семена редиса обладают достаточно низким запасом питательных веществ, что способствует быстрому реагированию на загрязнение тяжелыми металлами [9]. Из каждого сосуда с черноземом обыкновенным, загрязненным различными концентрациями AgNPs, отбирали по 40 г почвы в трехкратной повторности. Каждую полученную навеску помещали в чашки Петри, увлажняли до 60 % полной влагоемкости и тщательно перемешивали до однородной консистенции. После чего высаживали в каждую чашку Петри по 20 семян редиса. Каждый полученный образец с высаженными семенами помещали в климатическую камеру KBW 240 (Binder) на 7 сут. Фитотестирование основывалось на сравнении показателей всхожести (шт.) и длины корней (мм) в контрольном и опытных вариантах [10].

Для проверки полученных данных на достоверность был проведен дисперсионный анализ с последующим определением наименьшей существенной разности (НСР).

Результаты и их обсуждение

В данном исследовании проведена оценка экотоксичности AgNPs размером 10 нм по всхожести (рис. 1) и длине корней редиса (рис. 2).

С увеличением в почве AgNPs усиливалось снижение всхожести и длины корней редиса. Содержание AgNPs 1 мг/кг в черноземе обыкновенном вызвало уменьшение всхожести редиса на 11 % по сравнению со значениями в незагрязненной почве; 5 мг/кг – на 13 %; 10 мг/кг – на 15 %; 50 мг/кг – на 18 %; 100 мг/кг – на 38 %.

Доза AgNPs 0,5 мг/кг ингибировала длину корней редиса, выращенного на черноземе обыкновенном, на 19 % по сравнению со значениями в незагрязненной почве, 1 мг/кг – на 20 %; 5 мг/кг – на 25 %; 10 мг/кг – на 30 %; 50 мг/кг – на 37 %; 100 мг/кг – на 43 %. Показатель длины корней редиса проявил наибольшую чувствительность к загрязнению почвы AgNPs по сравнению с показателем всхожести. Ранее было отмечено, что степень экотоксического влияния Ag на прорастание семян риса и их последующие рост и развитие зависела от дозы Ag в почве [11].

Наночастицы многих металлов (Ag, Au, CeO₂, CuO, Fe₂O₃, Fe₃O₄, TiO₂, ZnO и др.) негативно действуют на фотосинтетический аппарат растений, что влечет изменение морфометрических показателей [12]. На течение хлороза влияет период загрязнения наночастицами: именно через 14 дней установлено увеличение хлороза у растений и уменьшение количества пораженных растений, подвергшихся воздействию AgNPs, по сравнению с 7 сут. Наночастицы Ag индуцируют окислительный стресс в клетках, что приводит к ингибированию ферментативной активности как механизму самозащиты. Оценена фотохимическая эффективность фотосистемы листьев фасоли бобовой (*Vicia faba*) при воздействии AgNPs диаметром 20, 51 и 73 нм [13].

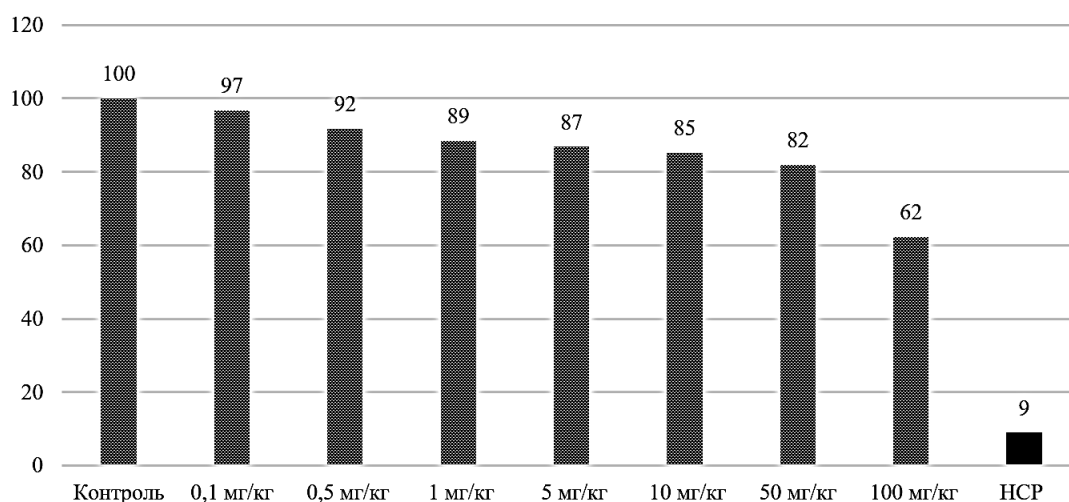


Рис. 1. Всхожесть редиса при загрязнении чернозема обыкновенного AgNPs, % от контроля / Fig. 1. Germination of radish when ordinary chernozem is contaminated with AgNPs, % of control

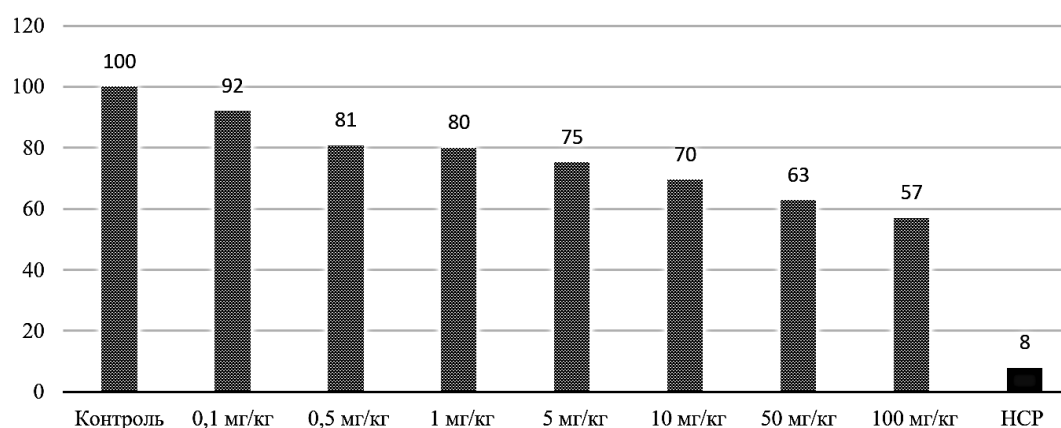


Рис. 2. Длина корней редиса при загрязнении чернозема обыкновенного AgNPs, % от контроля / Fig. 2. Length of radish roots when ordinary chernozem is contaminated with AgNPs, % of control

В исследовании [14] показано, что AgNPs способствовали уменьшению свежей и сухой массы корней пшеницы (*Triticum aestivum* L.). Помимо отрицательных эффектов влияния серебра на растения, существуют и положительные. Дозы наночастиц серебра 0,088; 0,176; и 0,44 мг/кг стимулируют высоту растения, биомассу, урожайность, вес корней и количество побегов томата (*Solanum lycopersicum*) [15]. Однако в нашем исследовании положительных эффектов влияния на всхожесть и длину корней редиса не установлено.

Заключение

Загрязнение чернозема обыкновенного в течение 30 сут AgNPs привело к изменению состояния фитотоксических показателей (всхожесть и длина корней редиса). Это исследование показало, что степень экотоксического влияния AgNPs на всхожесть и длину корней редиса находится в прямой зависимости от их дозы в почве. Содержание AgNPs 1, 5, 10, 50, 100 мг/кг в черноземе обыкновенном вызвало снижение всхожести редиса на 11, 13, 15, 18 и 38 % по сравнению со значениями в незагрязненной почве. Дозы AgNPs 0,5; 1; 5; 10; 50 и 100 мг/кг снижали длину корней редиса на 19, 20, 25, 30, 37 и 43 % по сравнению со значениями в незагрязненной почве. Показатель длины корней редиса проявил наибольшую чувствительность к загрязнению почвы AgNPs по сравнению с показателем всхожести. Полученные результаты по оценке фитотоксичности почв, загрязненных AgNPs, можно использовать для диагностики и в качестве индикатора экологического состояния почв.

Список источников

1. Цетина Н. И., Колесников С. И., Минникова Т. В., Русева А. С. Сравнительная оценка фитотоксичности наночастиц серебра разного размера // *Агрохим. вестн.* 2023. № 3. С. 80–85. Doi: 10.24412/1029-2551-2023-3-017.
2. Cvjetko P., Milošić A., Domijan A-M., Vinković Vrček I., Tolić S., Peharec Štefanić P., Letofsky-Papst I., Tkalec M., Balen B. Toxicity of silver ions and differently coated silver nanoparticles in *Allium cepa* roots // *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2017. Vol. 137. P. 8–28. Doi: 10.1016/J.Ecoenv.2016.11.009.
3. Yildirim D., Sasmaz A. Phytoremediation of As, Ag, and Pb in contaminated soils using terrestrial plants grown on Gumuskoy mining area (Kutahya Turkey) // *J. of Geochemical Exploration*. 2017. Vol. 182. P. 228–234. Doi: 10.1016/j.gexplo.2016.11.005.
4. Júnior J.A. H.S., Oliveira M.P.V., Oliveira C.R.S., Júnior F.W. Reichert Impacts of metallic nanoparticles application on the agricultural soils microbiota // *J. of Hazardous Materials Advances*. 2022. Vol. 7. P. 100103. Doi: 10.1016/j.hazadv.2022.100103.
5. Ahmadov I.S., Ramazanov M.A., Gasimov E.K., Rzayev F.H., Veliyeva S.B. The migration study of nanoparticles from soil to the leaves of plants // *Biointerface Res. Appl. Chem.* 2020. Vol. 10. P. 6101–6111. Doi: 10.33263/BRIAC105.61016111.
6. World Reference Base for Soil Resources 2022. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. 4th ed. Vienna, Austria: International Union of Soil Sciences (IUSS), 2022.
7. Aznar R., Barahona F., Geiss O., Ponti J., Luis T. J., Barrero-Moreno J. Quantification and size characterisation of silver nanoparticles in environmental aqueous samples and consumer products by single particle-ICPMS // *Talanta*. 2017. Vol. 175. P. 200–208. Doi: 10.1016/j.talanta.2017.07.048.
8. Kolesnikov S.I., Tsepina N.I., Sudina L.V., Minnikova T.V., Kazeev K.Sh., Akimenko Yu.V. Silver ecotoxicity estimation by the soils state biological indicators // *Applied and Environmental Soil Science*. 2020. Vol. 2020. P. 1–9. Doi: 10.1155/2020/1207210.
9. Дикарев А.В., Дикарев В.Г., Дикарева Н.С. Исследование фитотоксичности свинца для растений редиса и салата при выращивании на разных типах почв // *Агрохимия*. 2019. № 6. С. 72–80. Doi: 10.1134/S0002188119030050.
10. Казеев К.Ш., Колесников С.И., Акименко Ю.В., Даденко Е.В. Методы биодиагностики наземных экосистем. Ростов н/Д.: Изд-во ЮФУ, 2016. 356 с.
11. Ottoni C.A., Lima Neto M.C., Leo P., Ortolan B.D., Barbieri E., De Souza A.O. Environmental impact of biogenic silver nanoparticles in soil and aquatic organisms // *Chemosphere*. 2020. Vol. 239. P. 124698. Doi: 10.1016/j.chemosphere.2019.124698.
12. Венжик Ю. В., Мошков И. Е., Дыкман Л. А. Влияние наночастиц металлов и их оксидов на фотосинтетический аппарат растений // *Изв. РАН. Серия биол.* 2021. № 2. С. 137–152. Doi: 10.31857/S0002332921020144.
13. Falco W.F., Scherer M.D., Oliveira S.L., Wender H., Colbeck I., Lawson T., Caires A.R.L. Phytotoxicity of silver nanoparticles on *Vicia faba*: Evaluation of particle size effects on photosynthetic performance and leaf gas exchange // *Sci Total Environ*. 2020. Vol. 701. P. 134816. Doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.134816.
14. Rastogi A., Zivcak M., Tripathi D.K., Yadav S., Kalaji H.M., Brestic M. Phytotoxic effect of silver nanoparticles in *Triticum aestivum*: improper regulation of photosystem I activity as the reason for oxidative damage in the chloroplast // *Photosynthetica*. 2019. Vol. 57. P. 209–216. Doi: 10.32615/ps.2019.019.
15. Noshad A., Hetherington C., Iqbal M. Impact of AgNPs on seed germination and seedling growth: A focus study on its antibacterial potential against *Clavibacter michiganensis* subsp. *michiganensis* infection in *Solanum lycopersicum* // *J. Nanomater.* 2019. Vol. 2019. Article 6316094. Doi: 10.1155/2019/6316094.

References

1. Zepina N. I., Kolesnikov S. I., Minnikova T. V., Ruseva A. S. Comparative evaluation of phytotoxicity of silver nanoparticles of different size. *Agrokhim. vestn. = Agrochemical Herald*. 2023;(3):80-85. Doi: 10.24412/1029-2551-2023-3-017. (In Russ.).
2. Cvjetko P., Milošić A., Domijan A-M., Vinković Vrček I., Tolić S., Peharec Štefanić P., Letofsky-Papst I., Tkalec M., Balen B. Toxicity of silver ions and differently coated silver nanoparticles in *Allium cepa* roots. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2017;137:8-28. Doi: 10.1016/J.Ecoenv.2016.11.009.
3. Yildirim D., Sasmaz A. Phytoremediation of As, Ag, and Pb in contaminated soils using terrestrial plants grown on Gumuskoy mining area (Kutahya Turkey). *Journal of Geochemical Exploration*. 2017;182:228-234. Doi: 10.1016/j.gexplo.2016.11.005.
4. Júnior J.A. H.S., Oliveira M.P.V., Oliveira C.R.S., Júnior F.W. Reichert Impacts of metallic nanoparticles application on the agricultural soils microbiota. *Journal of Hazardous Materials Advances*. 2022;7:100103. Doi: 10.1016/J.Hazadv.2022.100103.

5. Ahmadov I.S., Ramazanov M.A., Gasimov E.K., Rzayev F.H., Veliyeva S.B. The migration study of nanoparticles from soil to the leaves of plants. *Biointerface Res. Appl. Chem.* 2020;10:6101-6111. Doi: 10.33263/BRIAC105.61016111.
6. *World Reference Base for Soil Resources 2022. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps.* 4th ed. Vienna, Austria: International Union of Soil Sciences (IUSS) Press; 2022.
7. Aznar R., Barahona F., Geiss O., Ponti J., Luis T. J., Barrero-Moreno J. Quantification and size characterisation of silver nanoparticles in environmental aqueous samples and consumer products by single particle-ICPMS. *Talanta.* 2017;175:200-208. Doi: 10.1016/J.Talanta.2017.07.048.
8. Kolesnikov S.I., Tsepina N.I., Sudina L.V., Minnikova T.V., Kazeev K.Sh., Akimenko Yu.V. Silver ecotoxicity estimation by the soils state biological indicators. *Applied and Environmental Soil Science.* 2020;2020:1-9. Doi: 10.1155/2020/1207210.
9. Dikarev A.V., Dikarev V.G., Dikareva N.S. Investigation of phytotoxicity of lead for radish and lettuce plants when grown on different types of soils. *Agrokimiya = Agrochemistry.* 2019;(6):72-80. Doi: 10.1134/S0002188119030050. (In Russ.).
10. Kazeev K.Sh., Kolesnikov S.I., Akimenko Yu.V., Dadenko E.V. *Methods of biodiagnostics of terrestrial ecosystems.* Rostov-on-Don: Southern Federal University Press; 2016. 356 p. (In Russ.).
11. Ottoni C.A., Lima Neto M.C., Leo P., Ortolan B.D., Barbieri E., De Souza A.O. Environmental impact of biogenic silver nanoparticles in soil and aquatic organisms. *Chemosphere.* 2020;239:124698. Doi: 10.1016/j.chemosphere.2019.124698.
12. Venjik Yu. V., Moshkov I. E., Dykman L. A. The effect of metal nanoparticles and their oxides on the photosynthetic apparatus of plants. *Izv. RAN. Seriya biol. = Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Biological Series.* 2021;(2):137-152. Doi: 10.31857/S0002332921020144. (In Russ.).
13. Falco W.F., Scherer M.D., Oliveira S.L., Wender H., Colbeck I., Lawson T., Caires A.R.L. Phytotoxicity of silver nanoparticles on *Vicia faba*: Evaluation of particle size effects on photosynthetic performance and leaf gas exchange. *Sci Total Environ.* 2020;701:34816. Doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.134816.
14. Rastogi A., Zivcak M., Tripathi D.K., Yadav S., Kalaji H.M., Brestic M. Phytotoxic effect of silver nanoparticles in *Triticum aestivum*: improper regulation of photosystem I activity as the reason for oxidative damage in the chloroplast. *Photosynthetica.* 2019;57:209-216. Doi: 10.32615/ps.2019.019.
15. Noshad A., Hetherington C., Iqbal M. Impact of AgNPs on seed germination and seedling growth: A focus study on its antibacterial potential against *Clavibacter michiganensis* subsp. *michiganensis* infection in *Solanum lycopersicum*. *J. Nanomater.* 2019;2019:6316094. Doi: 10.1155/2019/6316094.

Информация об авторах

Наталья Игоревна Цепина – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, Академия биологии и биотехнологии им. Д.И. Ивановского.

Сергей Ильич Колесников – доктор сельскохозяйственных наук, профессор, заведующий кафедрой экологии и природопользования, Академия биологии и биотехнологии им. Д.И. Ивановского.

Татьяна Владимировна Минникова – кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник, Академия биологии и биотехнологии им. Д.И. Ивановского.

Анна Степановна Русева – аспирант кафедры экологии и природопользования, Академия биологии и биотехнологии им. Д.И. Ивановского.

Дмитрий Александрович Труфанов – аспирант кафедры экологии и природопользования, Академия биологии и биотехнологии им. Д.И. Ивановского.

Information about the authors

Natalia I. Tsepina - Candidate of Science (Biology), Senior Researcher, Academy of Biology and Biotechnology.

Sergey I. Kolesnikov - Doctor of Science (Agriculture), Professor, Head of Department of Ecology and Nature Management, Academy of Biology and Biotechnology.

Tatiana V. Minnikova - Candidate of Science (Biology), Leading Researcher, Academy of Biology and Biotechnology.

Anna S. Ruseva - Postgraduate Student of the Department of Ecology and Nature Management, Academy of Biology and Biotechnology.

Dmitry A. Trufanov - Postgraduate Student of the Department of Ecology and Nature Management, Academy of Biology and Biotechnology.

Статья поступила в редакцию 28.01.2024; одобрена после рецензирования 29.02.2024; принята к публикации 24.05.2024.
The article was submitted 28.01.2024; approved after reviewing 29.02.2024; accepted for publication 24.05.2024.

Научная статья

УДК 57.017.67

doi: 10.18522/1026-2237-2024-2-144-155

СТАРЕНИЕ И НАДЕЖНОСТЬ: КАК ВАРИАЦИИ ВО ВРЕМЕНИ ИНТЕНСИВНОСТИ ОТКАЗОВ ВЛИЯЮТ НА ФОРМУ КРИВЫХ ДОЖИТИЯ СТАРЕЮЩИХ ОРГАНИЗМОВ

Владимир Анатольевич Чистяков¹, Юрий Викторович Денисенко², Евгения Валерьевна Празднова³, Сергей Александрович Емельянцеv⁴

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

¹vladimirchi@sfedu.ru

²denik@list.ru

³prazdnova@sfedu.ru

⁴emelyancev@sfedu.ru

Аннотация. Рассматриваются закономерности теории надежности, определяющие постоянство формы кривых дожития большинства организмов. Предположение о том, что вероятность естественной смерти определяется вероятностью случайного отказа части множества однородных элементов (клеток), позволяет аналитически и с помощью численных экспериментов получать кривые выживаемости, сходные в целом с наблюдаемыми в природе. Использование методов компьютерного моделирования способствует выявлению параметров кривой дожития, определяемых динамикой вероятности отказа отдельного элемента. Их анализ дает возможность сделать вывод, что у долгоживущих видов в целом и у людей в частности механизмом, способствующим старению, является прогрессирующее ухудшение надежности – обветшание элементов (клеток), ответственных за старение. Предложенные модели позволяют представить возможную схему реализации концепции фенотоза живых организмов.

Ключевые слова: программа старения, обветшание, фенотоз, компьютерное моделирование, точка перегиба, резервирование

Для цитирования: Чистяков В.А., Денисенко Ю.В., Празднова Е.В., Емельянцеv С.А. Старение и надежность: как вариации во времени интенсивности отказов влияют на форму кривых дожития стареющих организмов // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2024. № 2. С. 144–155.

Благодарности: исследование выполнено в рамках программы стратегического академического лидерства «Приоритет 2030» № СП-12-23-04.

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

Original article

AGING AND RELIABILITY: HOW DO VARIATIONS IN THE FAILURE RATE AFFECT THE SHAPE OF THE SURVIVAL CURVES OF AGING ORGANISMS

Vladimir A. Chistyakov¹, Yury V. Denisenko², Evgenia V. Prazdnova³, Sergey A. Emelyantsev⁴

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

¹vladimirchi@sfedu.ru

²denik@list.ru

³prazdnova@sfedu.ru

⁴emelyancev@sfedu.ru

© Чистяков В.А., Денисенко Ю.В., Празднова Е.В., Емельянцеv С.А., 2024

Abstract. The article considers the regularities of the theory of reliability, which determine the constancy of the shape of the curves of organisms' survival. The assumption that the probability of natural death is determined by the probability of accidental failure of a part of a series of homogeneous elements (cells) allows to obtain, analytically and through numerical experiments, survival curves similar to those observed in nature. The use of computer modelling methods makes it possible to identify the survival curve parameters determined by the dynamics of the probability of failure of an individual element. The value of one of these parameters, namely the coordinates of the inflection point of human survival curves, indicates that, apparently, both in long-lived species in general and in humans specifically, the ageing promoting mechanism is the progressive deterioration of reliability - the dilapidation of the elements (cells) crucial for ageing.

Keywords: ageing program, dilapidation, phenoptosis, computer simulation, inflection point, redundancy

For citation: Chistyakov V.A., Denisenko Yu.V., Prazdnova E.V., Emelyantsev S.A. Aging and Reliability: How Do Variations in the Failure Rate Affect the Shape of the Survival Curves of Aging Organisms. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2024;(2):144-155. (In Russ.).

Acknowledgements: the research was financially supported by the Strategic Academic Leadership Program of the Southern Federal University ("Priority 2030", SP-12-23-04).

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

Введение

В целом формы кривых дожития самых различных организмов [1] близки между собой и похожи на кривые дожития человека, пионером анализа которых был Б. Гомперц. В 1825 г. на основании анализа таблиц дожития он эмпирически установил связь между коэффициентом смертности (относительное количество смертей за единицу времени) и продолжительностью жизни [2].

Коэффициент смертности определяется соотношением [3]

$$\lambda(t) = \frac{-dP}{P(t)dt}, \quad (1)$$

где t – возраст; $\lambda(t)$ – коэффициент смертности; $P(t)$ – вероятность дожития до возраста t ; dP – величина уменьшения вероятности дожития.

Гомперц, анализируя доступные ему данные дожития, аппроксимировал коэффициент смертности выражением (современная нотация)

$$\lambda(t) = \lambda(25) \cdot e^{\frac{(t-25)}{t_1}}, \quad (2)$$

где t – возраст, $t > 25$ лет; t_1 , $\lambda(25)$ – рассчитанные им коэффициенты. Величина их варьируется. В качестве характерных значений можно указать $\lambda(25) \cong 3 \cdot 10^{-4}$, $t_1 \cong 10$ лет.

Ограничение возраста 25 годами сделано с целью исключения из рассмотрения детской смертности.

Подставив полученное Гомперцем выражение (2) в (1), получим взаимосвязь между вероятностью дожития и возрастом (в рамках предложенной Гомперцем модели) $P(t) = e^{-\lambda(25) \cdot e^{\frac{(t-25)}{t_1}}}$.

Таким образом, вероятность дожития с возрастом уменьшается по двойной экспоненте. Это существенно быстрее, чем в случае простого экспоненциального закона, которому подчиняется, например, радиоактивный распад. Именно поэтому расчетная вероятность дожития человека до 350 лет исчезающе мала [4].

График функции $y = e^{-e^x}$ с точностью до постоянных коэффициентов напоминает графики динамики смертности различных живых существ, в том числе и человека.

Для полноты картины отметим, что существует целый ряд модификаций формулы Гомперца [3, 5, 6]; впрочем, это естественная судьба моделей, особенно если данные, на основе которых модели построены, накапливаются.

Уравнение Гомперца, как и более поздние его многочисленные модификации, получено эмпирическим путем и поэтому является «моделью данных», а не «моделью систем» [7]. Входящие в его состав коэффициенты получены на основе анализа статистических данных.

Такие параметры (в физике их принято называть подгоночными) не могут быть поняты в рамках работ Гомперца или его последователей – статистиков и экспериментаторов. Их объяснение

требует новой методологии, связанной с применением совершенно другого математического аппарата. Для иллюстрации этого положения можно вспомнить, что подгоночные параметры термодинамики потребовали для их объяснения привлечения квантовой теории, математический аппарат и основополагающие идеи которой принципиально отличаются от таковых для термодинамики [8].

Шаги в части раскрытия «действительного физического смысла» динамики смертности предприняты в работах, опирающихся на теорию надежности. Однако произошло это через 150 лет после появления работы Гомперца. Ключевой в этом подходе является концепция износа.

Собственно, термин «износ» применительно к проблеме старения используется уже в знаменитой работе Гомперца [2]. Рассуждая о причинах смертности, он разделяет их на случайные, не зависящие от возраста, и на прогрессирующие со временем, которые он образно назвал «семейными недомоганиями». Впрочем, в свои расчеты не зависящие от возраста причины Гомперц не включил. Это сделал спустя 35 лет Мейкем [5].

Применение теории надежности в биологии старения и теории надежности систем с многократным резервированием получило развитие в работах [9–12].

В связи с этим отметим, что одним из самых ярких событий в развитии науки о старении в XX в. было появление разработанной В.П. Скулачевым и его учениками концепции старения как медленного фенотоза, являющегося завершающим этапом онтогенеза большинства многоклеточных организмов [13–15]. Верификация либо опровержение этой концепции привлекает интерес многих групп исследователей, а для решения соответствующего комплекса задач используется самая разная методология. Цель нашей работы – рассмотрение вопроса о влиянии динамики интенсивности отказов на форму кривых дожития стареющих организмов и применимости анализа кривых дожития для выявления феноменов, которые могут быть связаны с работой фенотозных программ.

Материалы и методы

Необходимо отметить, что в теории надежности износ понимается в смысле, совершенно отличном от бытовых представлений об этом явлении. Теория надежности с многократным резервированием рассматривает закономерности отказа систем, работа которых обеспечивается стабильностью нескольких элементов, которые подвержены случайным отказам. Вероятность отказа элемента может не расти со временем, т. е. в «бытовом смысле» элементы, обеспечивающие стабильность работы системы, не изнашиваются. При этом отказ всей системы наступает после снижения числа работающих элементов до заданного критического значения (возможно, до нуля), а износ определяется снижением числа элементов. Для иллюстрации реальности таких систем иногда используют пример с гирляндой N параллельно включенных ламп. При этом работающей считается гирлянда, в которой горит хотя бы одна лампочка. Очевидно, случайное событие, заключающееся в полном отказе схемы, будет складываться из N случайных событий отказа каждой лампочки по отдельности. Если вероятности отказа лампочек $Q_n(t)$ независимы друг от друга, то вероятность отказа схемы $Q_c(t)$ будет иметь вид [16] $Q_c(t) = Q_1(t) \cdot Q_2(t) \cdot \dots \cdot Q_N(t)$.

Как будет показано ниже, такое поведение зарезервированных систем описывается S -образными кривыми.

Законы роста (убывания) основных характеристик систем (биологические, технические, экономические и т.д.) зачастую описываются S -образными кривыми, имеющими у разных систем свои особенности, но и обладающими характерными общими чертами [17]. Целью нашей работы было получение и анализ S -образного закона убывания популяции, вытекающего из биологически (физически) ясных предположений о наличии резервирования элементов стареющих систем, причем эти элементы обладают ограниченной надежностью и, возможно, ветшают со временем. Характер обветшания зависит от природы резервируемых элементов. Интуитивно кажется, что обветшание не убывает со временем, хотя это предположение избыточно.

На первом этапе, традиционно для широкого круга задач, можно предположить линейный или экспоненциальный закон изменения износа или вовсе считать его не зависящим от времени. В любом случае некий специальный характер закона изменения износа-обветшания порождает вопрос о причинах такого его поведения и требует выходящего за рамки данной работы обсуждения.

Получение аналитических моделей более информативно, однако во многих (большинство) случаях это не представляется возможным, поэтому мы использовали численные эксперименты.

Интегрирование, дифференцирование, решение уравнений, оформление иллюстраций были проведены с использованием среды разработки R, версия 4.0.2+. Использованы штатные средства среды, а также пакет Deriv.

Символьные вычисления проводились вручную или с помощью сервиса Wolfram|AlphaPro (мобильная версия).

Для проведения численного эксперимента формировался программный агент, состоящий из набора одинаковых невосстанавливаемых элементов, дублирующих (резервирующих) друг друга. Количество элементов варьировалось от 1 (отсутствие резервирования) до 100. При этом каждый элемент подчинялся уравнению отказов невосстанавливаемого изделия [18].

Обратимся к определению интенсивности отказов (1).

В данном случае $P(t)$ означает вероятность безотказной работы ко времени t .

Проинтегрируем обе части от 0 до некоторого времени t , в которое мы хотим узнать значение вероятности безотказной работы $P(t)$: $\int_0^t \frac{dP}{P(t)} = - \int_0^t \lambda(t) dt$.

Учитывая, что $P(0)=1$ – это вероятность безотказной работы в начальный момент времени, получим

$$\ln P(t) = - \int_0^t \lambda(t) dt, P(t) = e^{- \int_0^t \lambda(t) dt}, \quad (3)$$

где t – время; $P(t)$ – вероятность безотказной работы; $\lambda(t)$ – интенсивность отказов.

В литературе по теории надежности это уравнение встречается под названием «основное уравнение надежности невосстанавливаемых изделий» [16].

В терминах теории надежности $P(t)$ – вероятность безотказной работы; $\lambda(t)$ – интенсивность отказов. Сравнивая уравнения (3) и (1), можно заметить, что в терминах теории старения это – вероятность дожития и коэффициент смертности соответственно. В общем случае интенсивность отказов представляет собой произвольную функцию. Частным случаем является равенство λ постоянной величине, что соответствует экспоненциальному закону вероятности безотказной работы отдельного элемента. Этот случай позволяет получить аналитическое решение. Ниже мы подробнее рассмотрим возникающие при этом возможности.

Далее мы рассчитывали вероятность безотказной работы программного агента как сложного механизма с набором однородных резервированных элементов. В процессе эксперимента резервированные элементы постепенно выходят из строя в соответствии с заранее заданной интенсивностью отказов. После полного исчерпания возможностей резервирования программный агент гибнет.

В общем виде вероятность безотказной работы системы из m элементов с резервированием при условии, что все элементы имеют одинаковую надежность $P(t)$, описывается уравнением [12]

$$P_{\Sigma}(t) = 1 - (1 - P(t))^m, \quad (4)$$

где t – время; $P_{\Sigma}(t)$ – вероятность безотказной работы системы; $P(t)$ – вероятность безотказной работы каждого элемента в системе; m – количество элементов в системе (степень резервирования).

Подставив (3) в (4), получим выражение

$$P_{\Sigma}(t) = 1 - \left(1 - e^{- \int_0^t \lambda(t) dt}\right)^m. \quad (5)$$

Используя (5), можно провести ряд расчетов:

1. Выбираем $\lambda(t)$.
2. Выбираем время $t_{\text{тек}}$, для которого рассчитываем показатели.
3. Вычисляем $\int_0^t \lambda(t) dt$. В некоторых случаях возможно получение решения аналитически, в общем случае – численно.
4. Вычисляем $P(t)$ – вероятность безотказной работы в момент времени $t_{\text{тек}}$, или, возвращаясь к терминологии теории старения, вероятность дожития программного агента до возраста $t_{\text{тек}}$.
5. Увеличиваем время $t_{\text{тек}}$ на заранее выбранную величину и повторяем расчет, пока не достигнем заданного значения времени t_k .

Возможен также расчет эффективного значения коэффициента смертности.

Расчеты проводились на временном отрезке от 0 до 10. В целях унификации результатов зависимости интенсивности отказов от времени нормировались так, чтобы

$$\int_0^{10} \lambda(t) dt = 10. \quad (6)$$

Результаты и обсуждение

Были проведены расчеты для разных форм зависимости интенсивности отказов отдельного элемента от времени.

1. Постоянная интенсивность отказов [12].
2. Растущая линейно интенсивность отказов (линейное обветшание элементов).
3. Растущая экспоненциально интенсивность отказов (экспоненциальное обветшание) с учетом нормировки (6): $\lambda(t) = 0,276 \cdot e^{0,219t}$.

В каждом случае проводились расчеты для случая отсутствия резервирования (один элемент в программном агенте), 10-, 20-, 30-, 40-, 50-, 60-, 70-, 80-, 90- и стократное резервирование. Результат представлен на рис. 1.

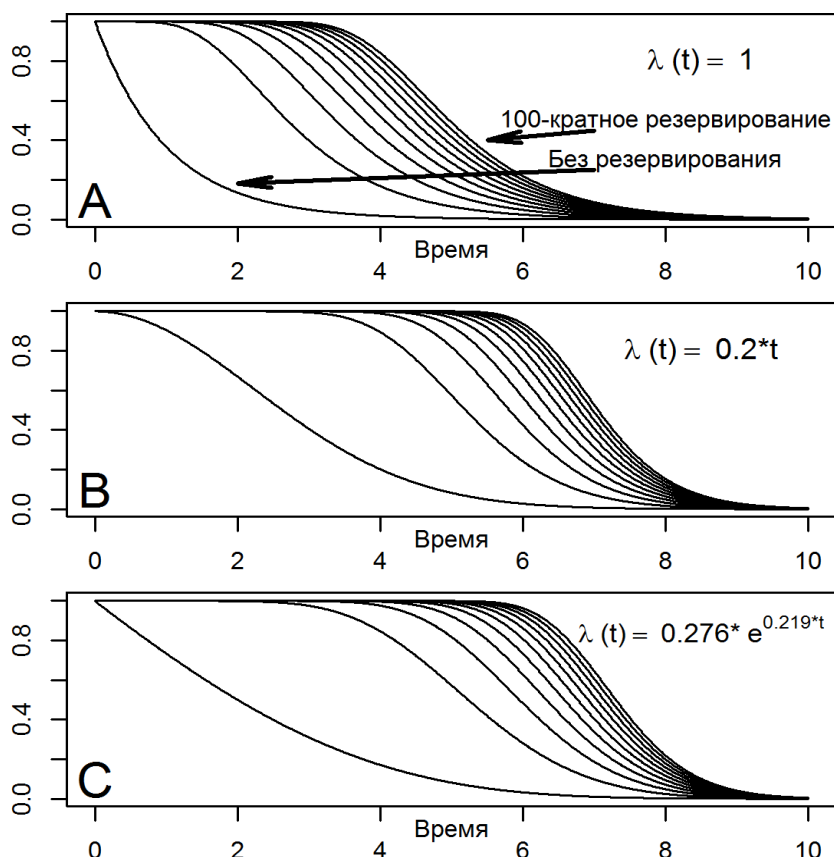


Рис. 1. Расчетные кривые выживаемости в модели с набором однородных резервируемых элементов.

В каждом случае степень резервирования составляет 1, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 и 100.

А – частота отказов постоянна; В – линейно увеличивается со временем; С – экспоненциально увеличивается со временем / Fig. 1. Calculated survival curves in a model with a set of homogeneous redundant elements. In each case, the degree of redundancy is 1, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 and 100.

A - the failure rate is constant; B - increases linearly with time; C - increases exponentially with time

На рис. 1 кривые дожития имеют S-образную форму независимо от закона изменения интенсивности отказов. Упорядоченный вид кривых дожития формируется как результат резервирования системы, при этом характер поведения отдельного резервирующего элемента может быть константным или упорядоченным по какому-либо закону (например, линейному или экспоненциальному). При этом даже при небольшой степени резервирования начинает формироваться кривая, сходная по форме с реальными кривыми дожития. Само резервирование монотонно увеличивает среднюю продолжительность жизни, оставляя разброс в достижимых возрастах практически неизменным.

Отметим, что качество аппроксимации (5) не уступает аппроксимации двойной экспонентой. Например, на рис. 2 приведены аппроксимации данных по смертности английских мужчин за

2010–2012 гг. двойной экспонентой и выражением (5). Кривые совпадают до степени неразличимости. Впрочем, можно предположить, что аналитические выражения аппроксимации таблиц старения сегодня не представляют интереса для практических расчетов, как это было во времена Гомперца.

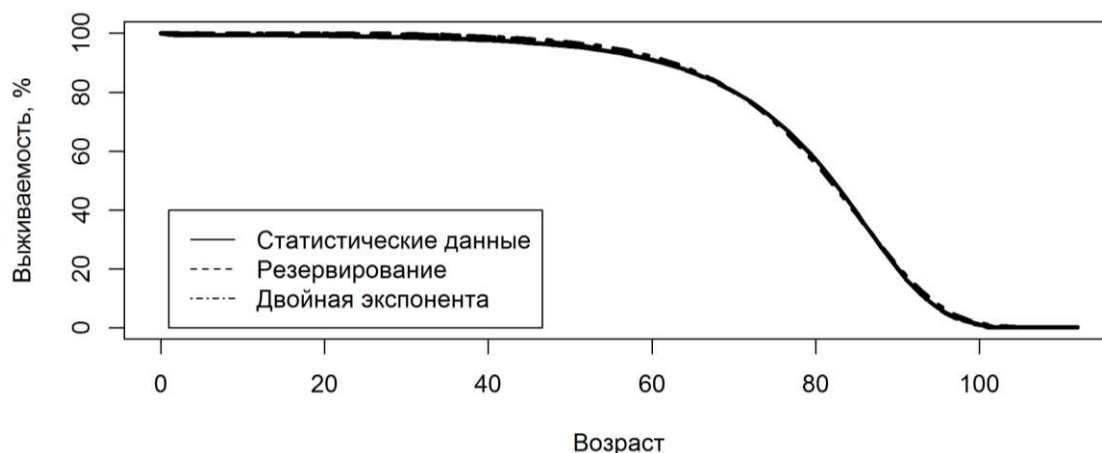


Рис. 2. Аппроксимации уровня смертности англичан за 2010–2012 гг. [19] посредством двойной экспоненты и по формуле (5) / Fig. 2. Approximations of the British mortality rate for 2010-2012 [19] using the double exponential and formula (5)

Численные эксперименты показали, что введение в систему фактора обветшания элементов не изменяет характерную форму кривой выживаемости. Однако один из его параметров, точка перегиба, позволяет нам делать существенные предположения о механизме старения.

Точка перегиба соответствует экстремуму первой производной функции зависимости вероятности выживания от времени, которая отражает смертность, и поскольку кривизна меняет знак с «-» на «+», она является максимальной (возраст с максимальной смертностью (рис. 3)).

В случае постоянной интенсивности отказов ($\lambda = \text{const}$) вероятность дожития имеет вид

$$P(t) = 1 - (1 - e^{-\lambda t})^m, \quad (7)$$

где t – время; m – степень резервирования; λ – интенсивность отказов (постоянная); $P(t)$ – вероятность дожития.

Можно найти аналитическим путем координаты точки перегиба. В этой точке вторая производная функции вероятности дожития равна 0:

$$\frac{d^2(P(t))}{dt^2} = \frac{\lambda^2 m (1 - e^{-\lambda t})^m (e^{\lambda t} - m)}{(e^{\lambda t} - 1)^2} = 0.$$

Отсюда следует, что координата точки перегиба имеет вид

$$t_0 = \frac{\ln(m)}{\lambda}. \quad (8)$$

Подставив выражение (8) для t_0 в (7), получим значение вероятности дожития в точке перегиба. Для степени резервирования m она описывается уравнением

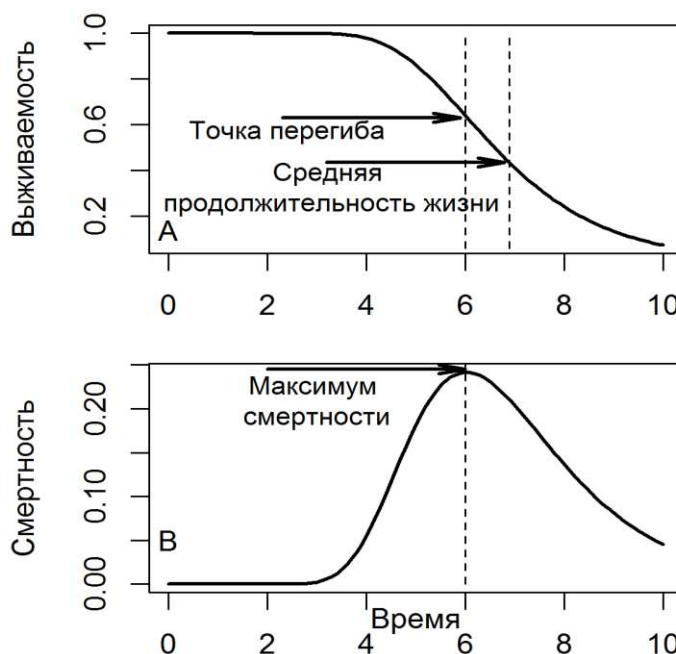


Рис. 3. Взаимосвязь между расположением точки перегиба кривой дожития, максимальным уровнем смертности и средней ожидаемой продолжительностью жизни популяции / Fig. 3. The relationship between the location of the inflection point of the survival curve, the maximum mortality rate and the average life expectancy of the population

$$P(m) = 1 - \left(1 - \frac{1}{m}\right)^m, m \geq 1, m \in N, P(2) = 0,75,$$

$$\lim_{m \rightarrow \infty} P(m) = \lim_{m \rightarrow \infty} \left(1 - \left(1 - \frac{1}{m}\right)^m\right) = \frac{e-1}{e} \approx 0,632,$$

где m – степень резервирования (от 2 до ∞); $P(m)$ – координата по оси Y точки перегиба кривой дожития для системы с m -кратным резервированием.

Поскольку $P(m)$ монотонно убывает при росте m , при любой допустимой степени резервирования точка перегиба кривой дожития будет располагаться между 0,75 и 0,632 (рис. 4).

Подчеркнем, что приведенные рассуждения о локализации точек перегиба на кривых дожития справедливы, если обветшание резервированных элементов во входящих в популяцию организмах постоянно по времени.

Анализ кривых дожития, построенных на основании данных по смертности населения в Англии и Уэльсе за периоды 2000–2002 и 2010–2012 гг., показывает, что их точки перегиба (и, соответственно, точки максимальной смертности) лежат гораздо ниже приведенных значений – в диапазоне значений выживаемости 0,311–0,356, что характерно для вариантов с обветшанием резервированных элементов, например, по экспоненциальному закону [19, 20] $\lambda(t) = A \cdot e^{Bt} + D$.

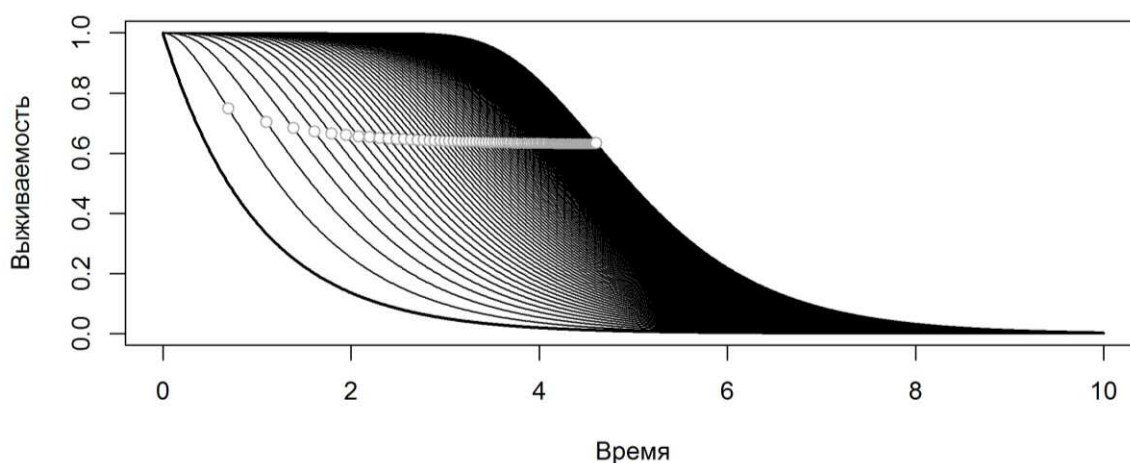


Рис. 4. Расположение точек перегиба (окружность) кривых дожития в зависимости от степени избыточности (от 2 до 100) при постоянной частоте отказов. Выживаемость в точке перегиба снижается с 0,75 до 0,632 / Fig. 4. The location of inflection points (circle) of survival curves depending on the degree of redundancy (from 2 to 100) with a constant failure rate. Survival at the inflection point decreases from 0.75 to 0.632

Таким образом, параметры кривых дожития, описывающих популяции современных людей, смерть которых зависит в основном от возрастных патологий, указывают на то, что износ, понимаемый как обветшание, т.е. ухудшение качества элементов-клеток, играет важную роль в старении человека.

Можно показать с помощью разработанной нами ранее модели [21], что кривые дожития дрозофилы, полученные в расчетах, не предполагающих износа-обветшания мотонейронов, практически полностью совпадают с экспериментальными. Анализ кривых дожития дрозофил [22] показывает, что вероятности дожития в соответствующих точках перегиба находятся в пределах 0,5–0,6. По-видимому, за малый срок жизни дрозофилы критичные для старения мотонейроны не успевают обветшать, а убыль их идет за счет стохастических апоптозных сигналов.

Если предположение об отсутствии обветшания у короткоживущих организмов верно, появляется возможность сделать для них несколько любопытных выводов, позволяющих экспериментально связать такие характеристики, как степень резервирования и коэффициент смертности (интенсивность отказа отдельного элемента).

Найдем среднее время дожития организма без обветшания с m -кратным резервированием [18]:

$$\bar{t}_m = \int_0^{\infty} P(t) dt = \int_0^{\infty} [1 - (1 - e^{-\lambda t})^m] dt. \quad (9)$$

Обозначим $1 - e^{-\lambda t} = x$. Выразим t через x : $t = \frac{1}{\lambda} \ln \frac{1}{1-x}$, $dt = \frac{dx}{\lambda(1-x)}$

Подставив новую переменную в исходное выражение, получим

$$\bar{t}_m = \frac{1}{\lambda} \int_0^1 \frac{1-x^m}{1-x} dx = \frac{1}{\lambda} \int_0^1 (\sum_{n=1}^m x^{n-1}) dx. \quad (10)$$

Поскольку $\int_0^1 x^{n-1} dx = \frac{x^n}{n} \Big|_0^1 = \frac{1}{n}$ и в силу [23]

$$\bar{t}_m = \frac{1}{\lambda} \sum_{n=1}^m \frac{1}{n} \approx \frac{1}{\lambda} (\ln(m) + \gamma + 1/2m), \quad (11)$$

где \bar{t}_m – среднее время дожития организма с m -кратным резервированием; λ – интенсивность отказов отдельного элемента; m – степень резервирования; γ – постоянная Эйлера – Маскерони, $\gamma \approx 0,577$ [24].

Из этого следует, что продолжительность жизни растет логарифмически при росте степени резервирования.

Например, у дрозофил 80 мотонейронов [21, 25]. Иными словами, $m=80$.

При этом средняя продолжительность жизни мух составляет 47 или 65 дней в зависимости от генотипа (HS1/+:+/+ или HS1/+;Gal4/+).

Следовательно, согласно формуле (11), среднее время жизни мотонейрона у дрозофил составляет 9,4 и 13 дней соответственно для разных генотипов.

При степени резервирования порядка десятков или сотен элементов можно записать упрощенное выражение, связывающее среднее время жизни организма, степень резервирования и среднее время жизни отдельного элемента:

$$\bar{t}_m \approx \bar{t}_\lambda \ln(e^\gamma m) \approx \bar{t}_\lambda \ln(1,78m), \quad (12)$$

где \bar{t}_m – среднее время дожития организма с m -кратным резервированием; \bar{t}_λ – среднее время дожития отдельного элемента, величина, обратная интенсивности отказов отдельного элемента ($1/\lambda$); m – степень резервирования.

Таким образом, анализ кривых дожития позволяет производить оценку характеристик тканей организма. Отметим, что для выявления клеточных характеристик не требуется каких-либо тонких экспериментов. Выше такая оценка была проведена для продолжительности жизни мотонейронов. Схожим образом можно попытаться определить количество резервирующих элементов. Напомним, что рассуждения справедливы для организмов, где такие элементы не подвергаются обветшанию, т.е. для короткоживущих организмов.

Действительно, разница между средним возрастом дожития и временем возникновения точки перегиба при $\lambda = \text{const}$ составляет $\Delta \bar{t}_m$:

$$\Delta \bar{t}_m \approx \frac{1}{\lambda} \ln(m) + \frac{\gamma}{\lambda} + \frac{1}{2m\lambda} - \frac{1}{\lambda} \ln(m) = \frac{\gamma}{\lambda} + \frac{1}{2m\lambda}. \quad (13)$$

Среднее время дожития всегда больше, нежели время возникновения перегиба. Интуитивно кажется, что степень резервирования m – величина по крайней мере порядка нескольких десятков, если не сотен (у дрозофил $m=80$).

При этом можно отбросить второе слагаемое и с учетом (12) записать:

$$\Delta \bar{t}_m \approx \frac{\gamma \bar{t}_m}{\ln(1,78m)}. \quad (14)$$

Абсцисса точки перегиба совпадает с временем максимальной смертности. Получается, что возраст максимальной смертности в популяции без обветшания со стократным резервированием достигается раньше среднего возраста организма и отличается от него на $\approx 10\%$. Эта разница сокращается при увеличении степени резервирования (рис. 3).

Очевидно, среднее время дожития \bar{t}_m – величина, измерение которой возможно в прямом эксперименте по культивированию, например, популяции дрозофил. Время максимальной смертности (абсцисса точки перегиба) t_0 также доступно простой экспериментальной оценке. Следовательно, для популяции без обветшания получаем систему двух уравнений с двумя неизвестными:

$$\begin{cases} \bar{t}_m = \frac{1}{\lambda} (\ln(m) + \gamma + 1/2m) \\ t_0 = \frac{\ln(m)}{\lambda} \end{cases}, \quad (15)$$

откуда следует, что степень резервирования m можно оценить экспериментально, разрешив относительно m уравнение

$$m = \frac{1}{2 \left((\bar{t}_m - t_0) \frac{\ln(m)}{t_0} - \gamma \right)}. \quad (16)$$

Таким образом, уравнения (13) и (16) позволяют определять частоту отказов и степень избыточности отдельных элементов (например, двигательных нейронов у дрозофилы) [25], просто анализируя форму кривой выживания организма.

Приведенные расчеты (9)–(16) справедливы при постоянной интенсивности отказов отдельных зарезервированных элементов. В то же время, как показано выше, у долгоживущих организмов присутствует обветшание отдельных зарезервированных элементов. Модель позволяет предположить, что износ-обветшание отдельных элементов увеличивается с возрастом. При этом наличие резервирования делает возможным в качестве функции обветшания брать не какую-либо гладкую функцию типа экспоненты или полинома. Достаточно ступенчатой функции (типа функции Хевисайда с точностью до постоянных) (рис. 5). Очевидно, ступенчатое поведение функции обветшания может быть опосредовано наличием у организма программы, воспроизводящей такую ступеньку, и обращает нас к концепции фенотипа [13, 14]. Естественно, ступенька может быть не одна, и необязательно переход между различными интенсивностями отказов происходит мгновенно.

Подчеркнем, что такое дискретное поведение характеристик объектов произвольной структуры зачастую и указывает на их «запрограммированную» природу, когда характер функционирования определяется достижением какого-либо значения тех или иных параметров, активацией/деактивацией управляющих элементов, переключением на альтернативную ветвь алгоритма. В то же время кривые дожития в большинстве случаев имеют непрерывный, аналоговый характер. Предложенная модель позволяет предположить наличие программы, определяющей дискретное изменение параметров обветшания отдельных элементов (клеток), при этом интегральные статистические характеристики будут носить выраженный «аналоговый» характер, что и наблюдается на практике. При этом соответствие реальной картины предложенной модели является достаточным условием формирования характерных кривых дожития, т.е. анализ их статистических параметров не позволит осуществить верификацию модели. Требуется, как это часто бывает в биологии, раскрытие молекулярных механизмов в духе редукционистского подхода.

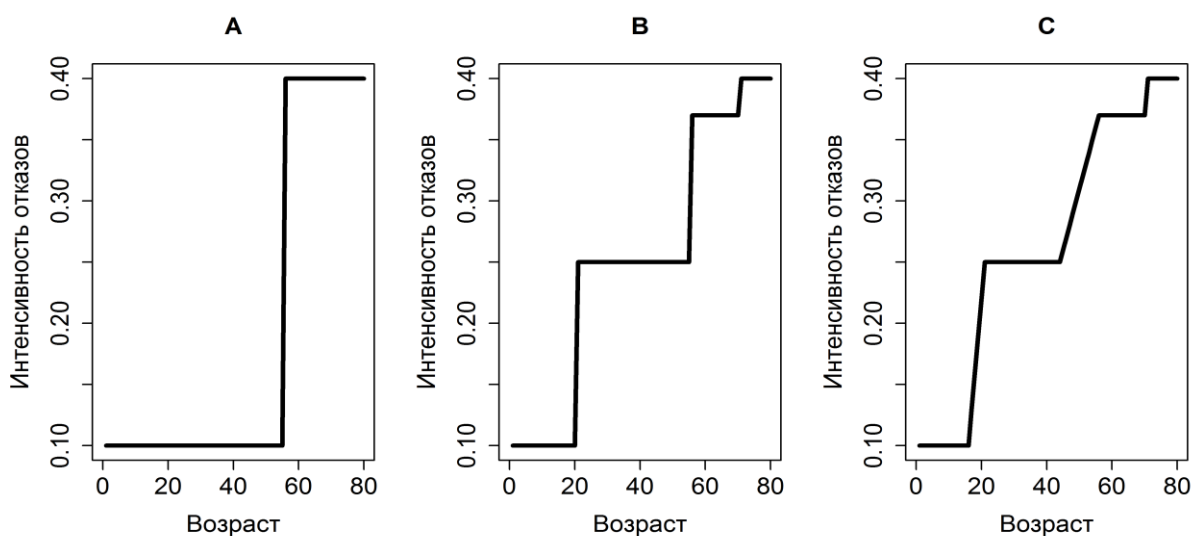


Рис. 5. Функция обветшания: А – одноступенчатая; В – многоступенчатая; С – многоступенчатая с плавными переходами / Fig. 5. Dilapidation function: A - single-stage; B - multi-stage; C - multi-stage with smooth transitions

Подводя итог, можно заключить, что применение теории надежности позволяет получить адекватное описание динамики смертности живых организмов, предположив, что процессы старения являются отражением наличия в живых системах резервирования их элементов.

В рамках модели качественная картина динамики смертности слабо зависит от предположений относительно динамики интенсивности отказов отдельных компонентов системы. Не имеет значения, растёт ли интенсивность, убывает или вовсе представляет из себя «белый шум».

Именно это и определяет широкое распространение процессов, описываемых S-образными кривыми (например, кривой Гомперца) не только в биологии, но и в технике, экономике и других областях человеческой деятельности. В то же время «сезонные» колебания интенсивности отказов позволяют объяснить некоторые данные, не укладывающиеся в стандартную картину. Их анализ является одним из направлений развития данной работы.

Анализ характера реальных кривых выживаемости биологических объектов позволяет сделать вывод, что для долгоживущих объектов (в том числе людей) частота отказов компонентов, входящих в систему, не является постоянной во времени. Форма кривых, в частности расположение точек перегиба, показывает, что качество клеток, определяющих динамику старения, снижается с возрастом. Разрушение клеток может управляться последовательным изменением активности генов, контролируемым определенной генетической программой.

Для короткоживущих объектов, например для дрозофилы, старение может быть описано без учета износа-обветшания клеток.

Хотя все рассуждения представлены в терминах «организм» – «избыточные элементы (клетки)», они могут быть перенесены на другой уровень организации без потери общности. Например, «хромосомы» – «субтеломеры» [26]. Систему «клетка» – «митохондрии» можно рассматривать в том же контексте.

Очевидно также, что несколько систем могут существовать одновременно. Например, можно представить себе несколько групп клеток, которые контролируют различные жизненно важные функции. Каждая группа будет вести себя в соответствии с установленными законами, и отказ (гибель организма) будет определяться на конкурентной основе надежностью групп.

Список источников

1. Jones O.R., Scheuerlein A., Salguero-Gómez R. Diversity of ageing across the tree of life // *Nature*. 2014. Vol. 505, № 7482. P. 169–173.
2. Gompertz B. XXIV. On the nature of the function expressive of the law of human mortality, and on a new mode of determining the value of life contingencies // *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*. 1825. Vol. 115. P. 513–583.
3. Гаврилов Н.А., Гаврилова Н.С. Биология продолжительности жизни / отв. ред. В.П. Скулачев. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Наука, 1991. 280 с.
4. Shklovskii B. A simple derivation of the Gompertz law for human mortality // *Theory in Biosciences*. 2005. Vol. 123. P. 431–433.
5. Makeham W.M. On the law of mortality and the construction of annuity tables // *J. of the Institute of Actuaries*. 1860. Vol. 8, № 6. P. 301–310.
6. Халявкин А.В., Яшин А.В. Старение: роль управляющих сигналов // *Геронтология in silico: становление новой дисциплины: математические модели, анализ данных и вычислительные эксперименты: сб. науч. тр. / под ред. Г.И. Марчука и др. М.: БИНОМ, Лаборатория знаний, 2007. С. 114–147.*
7. Новосельцев В. Математические модели в биологии и феномен старения // *Геронтология in Silico: становление новой дисциплины: математические модели, анализ данных и вычислительные эксперименты: сб. науч. тр. / под ред. Г.И. Марчука и др. М.: БИНОМ, Лаборатория знаний, 2007. С. 80–113.*
8. Иванов М. Как понимать квантовую механику. М.; Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2012. С. 6–11.
9. Гаврилов Л., Гаврилова Н., Ягужинский Л. Основные закономерности старения и гибели животных с точки зрения теории надежности // *Журн. общ. биологии*. 1978. Т. 39. С. 734–742.
10. Gavrilov L.A., Gavrilova N.S. The Reliability Theory of Aging and Longevity // *J. of Theoretical Biology*. 2001. Vol. 213, № 4. P. 527–545.
11. Gavrilov L.A., Gavrilova N.S. Models of systems failure in aging // *Handbook of models for human aging*. San Diego, 2006. P. 45–68.
12. Gavrilov L.A., Gavrilova N.S. Reliability Theory of Aging and Longevity // *Handbook of the Biology of Aging*. 2nd LEPAS Workshop on the Economics of Aging. Chicago, 2011. P. 3–42.
13. Скулачев В.П. Что такое «феноптоз» и как с ним бороться? Обзор // *Биохимия*. 2012. Т. 77, № 7. С. 827–846.
14. Chistyakov V.A., Denisenko Y.V. Phenoptosis and Supra-individual Selection // *Encyclopedia of Gerontology and Population Aging*. Springer, 2022. P. 3803–3811.
15. Skulachev V.P., Lyamzaev K.G. Aging as Phenoptotic Phenomenon // *Encyclopedia of Gerontology and Population Aging*. Springer, 2021. P. 253–256.

16. Кокушин Н.Н., Тихонов А.А., Петров С.Г., Головки В.Е., Ключикин И.В. Основы теории надежности. СПб.: Санкт-Петербургский гос. технол. ун-т раст. полимеров, 2011. 77 с.
17. Альтиуллер Г.С. Творчество как точная наука. Теория решения изобретательских задач. М.: Сов. радио, 1979. 105 с.
18. Гнеденко Б.В., Беляев Ю.К., Соловьев А.Д. Математические методы в теории надежности. М.: Наука, 1965. Т. 524.
19. English Life Tables № 16. Office for National Statistics. URL: <https://webarchive.nationalarchives.gov.uk/20160106044021/https://ons.gov.uk/ons/rel/lifetables/decennial-life-tables/no-16-2000-2002-/gpd-meth-elt16.pdf> (дата обращения: 11.01.2024).
20. English Life Tables № 17. Office for National Statistics. URL: <https://www.ons.gov.uk/peoplepopulationandcommunity/birthsdeathsandmarriages/lifeexpectancies/bulletins/englishlifetablesno17/2015-09-01> (дата обращения: 11.01.2024).
21. Чистяков В.А., Денисенко Ю.В. Имитационное моделирование старения дрозофилы *in silico* // Успехи геронтологии. 2010. Т. 23, № 4. С. 557–563.
22. Anisimov V.N., Bakeeva L.E., Egormin P.A. Mitochondria-targeted plastoquinone derivatives as tools to interrupt execution of the aging program. 5. SkQ1 prolongs lifespan and prevents development of traits of senescence // *Biochemistry (Moscow)*. 2008. Vol. 73, № 12. P. 1329–1342.
23. Кнут Д., Грэхем Р., Паташник О. Конкретная математика. Основание информатики: пер. с англ. М.: Мир, 1998. 703 с.
24. Sandifer C.E. The early mathematics of Leonhard Euler. Washington: MAA, 2007. Vol. 1. 391 p.
25. Landgraf M., Thor S. Development of Drosophila motoneurons: specification and morphology // *Seminars in cell & developmental biology*. Elsevier, 2006. Vol. 17. P. 3–11.
26. Libertini G., Corbi G., Nicola F. Importance and Meaning of TERRA Sequences for Aging Mechanisms // *Biochemistry*. 2020. Vol. 85, № 12. P. 1505–1517.

References

1. Jones O.R., Scheuerlein A., Salguero-Gómez R. Diversity of ageing across the tree of life. *Nature*. 2014;505(7482):169-173.
2. Gompertz B. On the nature of the function expressive of the law of human mortality, and on a new mode of determining the value of life contingencies. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*. 1825;115:513-583.
3. Gavrilov N.A., Gavrilova N.S. *Biology of lifespan*. Moscow: Nauka Publ.; 1991. 280 p. (In Russ.).
4. Shklovskii B. A simple derivation of the Gompertz law for human mortality. *Theory in Biosciences*. 2005;123:431-433.
5. Makeham W.M. On the law of mortality and the construction of annuity tables. *J. of the Institute of Actuaries*. 1860;8(6):301-310.
6. Khalyavkin A.V., Yashin A.V. Aging: the role of control signals. *Gerontology in silico: the formation of a new discipline: mathematical models, data analysis and computational experiments*. Moscow: BINOM, Knowledge Laboratory Publ.; 2007:114-147. (In Russ.).
7. Novoseltsev V. Mathematical models in biology and the phenomenon of aging. *Gerontology in silico: the formation of a new discipline: mathematical models, data analysis and computational experiments*. Moscow: BINOM, Knowledge Laboratory Publ.; 2007:80-113. (In Russ.).
8. Ivanov M. *How to understand quantum mechanics*. Moscow, Izhevsk: Scientific Research Center “Regular and Chaotic Dynamics” Press; 2012:6-11. (In Russ.).
9. Gavrilov L., Gavrilova N., Yaguzhinsky L. Basic patterns of aging and death of animals from the point of view of reliability theory. *Zhurn. obshch. biologii = J. of General Biology*. 1978;39:734-742. (In Russ.).
10. Gavrilov L.A., Gavrilova N.S. The Reliability Theory of Aging and Longevity. *J. of Theoretical Biology*. 2001;213(4):527-545.
11. Gavrilov L.A., Gavrilova N.S. Models of systems failure in aging. *Handbook of models for human aging*. San Diego, 2006:45-68.
12. Gavrilov L.A., Gavrilova N.S. Reliability Theory of Aging and Longevity. *Handbook of the Biology of Aging*. 2nd LEPAS Workshop on the Economics of Aging. Chicago, 2011:3-42.
13. Skulachev V.P. What is “phenoptosis” and how to fight it? *Biochemistry (Moscow)*. 2012;77(7):689-706.
14. Chistyakov V.A., Denisenko Y.V. Phenoptosis and Supra-individual Selection. *Encyclopedia of Gerontology and Population Aging*. Springer, 2022:3803-3811.
15. Skulachev V.P., Lyamzaev K.G. Aging as Phenoptotic Phenomenon. *Encyclopedia of Gerontology and Population Aging*. Springer, 2021:253-256.
16. Kokushin N.N., Tikhonov A.A., Petrov S.G., Golovko V.E., Klyushkin I.V. *Basics of reliability theory*. St. Petersburg: St. Petersburg State Technological University of Plant Polymers Press; 2011. 77 p. (In Russ.).

17. Altshuller G.S. *Creativity as an exact science. Theory of solving inventive problems*. Moscow: Sov. Radio Publ.; 1979. 105 p. (In Russ.).
18. Gnedenko B.V., Belyaev Yu.K., Solovyov A.D. *Mathematical methods in reliability theory*. Moscow: Nauka Publ.; 1965. Vol. 524. (In Russ.).
19. *English Life Tables No. 16. Office for National Statistics*. Available from: <https://webarchive.nationalarchives.gov.uk/20160106044021/https://ons.gov.uk/ons/rel/lifetables/decennial-life-tables/no-16--2000-2002-rpd-meth-elt16.pdf> [Accessed 11th January 2024].
20. *English Life Tables No. 17. Office for National Statistics*. Available from: <https://www.ons.gov.uk/people-populationandcommunity/birthsdeathsandmarriages/lifeexpectancies/bulletins/englishlifetablesno17/2015-09-01> [Accessed 11th January 2024].
21. Chistyakov V. A., Denisenko Y. V. Simulation of drosophila aging in silico. *Advances in Gerontology*. 2011;1:229-234.
22. Anisimov V.N., Bakeeva L.E., Egormin P.A. Mitochondria-targeted plastoquinone derivatives as tools to interrupt execution of the aging program. 5. SkQ1 prolongs lifespan and prevents development of traits of senescence. *Biochemistry (Moscow)*. 2008;73(12):1329-1342.
23. Knut D., Graham R., Patashnik O. *Concrete mathematics. Basis of computer science*. Moscow: Mir Publ.; 1998. 703 p. (In Russ.).
24. Sandifer C.E. *The early mathematics of Leonhard Euler*. Washington: MAA Press; 2007. Vol. 1. 391 p.
25. Landgraf M., Thor S. Development of Drosophila motoneurons: specification and morphology. *Seminars in cell & developmental biology*. Elsevier, 2006;17:3-11.
26. Libertini G., Corbi G., Nicola F. Importance and Meaning of TERRA Sequences for Aging Mechanisms. *Biochemistry*. 2020;85(12):1505-1517.

Информация об авторах

В.А. Чистяков – доктор биологических наук, заведующий лабораторией новых биопрепаратов, Академия биологии и биотехнологии им. Д.И. Ивановского.
Ю.В. Денисенко – младший научный сотрудник, лаборатория экспериментального мутагенеза, Академия биологии и биотехнологии им. Д.И. Ивановского.
Е.В. Празднова – доктор биологических наук, заведующая лабораторией экспериментального мутагенеза, Академия биологии и биотехнологии им. Д.И. Ивановского.
С.А. Емельянцеv – младший научный сотрудник, лаборатория экспериментального мутагенеза, Академия биологии и биотехнологии им. Д.И. Ивановского.

Information about the authors

V.A. Chistyakov - Doctor of Science (Biology), Head of the Laboratory of New Biopreparations, Academy of Biology and Biotechnology.
Yu.V. Denisenko - Junior Researcher, Laboratory of Experimental Mutagenesis, Academy of Biology and Biotechnology.
E.V. Prazdnova - Doctor of Science (Biology), Head of the Laboratory of Experimental Mutagenesis, Academy of Biology and Biotechnology.
S.A. Emelyantsev - Junior Researcher, Laboratory of Experimental Mutagenesis, Academy of Biology and Biotechnology.

Статья поступила в редакцию 24.01.2024; одобрена после рецензирования 20.02.2024; принята к публикации 24.05.2024.
The article was submitted 24.01.2024; approved after reviewing 20.02.2024; accepted for publication 24.05.2024.

НАУЧНАЯ ЖИЗНЬ

SCIENTIFIC LIFE

Материалы конференции

doi: 10.18522/1026-2237-2024-2-156-160

ФЕСТИВАЛЬ ПРИРОДНОГО БОГАТСТВА И КРАСОТЫ ДОНСКОЙ СТЕПИ

Виктор Аркадьевич Миноранский^{1✉}, Юлия Валерьевна Тимофеевко²

¹ Ассоциация «Живая природа степи», Ростов-на-Дону, Россия

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

¹priroda.rostov@yandex.ru[✉]

²ymal@sfedu.ru

Для цитирования: Миноранский В.А., Тимофеевко Ю.В. Фестиваль природного богатства и красоты донской степи // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2024. № 2. С. 156–160.

Conference materials

FESTIVAL OF NATURAL WEALTH AND BEAUTY OF THE DON STEPPE

Victor A. Minoransky^{1✉}, Yulia V. Timofeenko²

¹ Association “Wild Nature of the Steppe”, Rostov-on-Don, Russia

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

¹priroda.rostov@yandex.ru[✉]

²ymal@sfedu.ru

For citation: Minoransky V.A., Timofeenko Yu.V. Festival of Natural Wealth and Beauty of the Don Steppe. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2024;(2):156-160. (In Russ.).

Ассоциация «Живая природа степи» (далее – Ассоциация) была организована на рубеже столетий с целью объединения и координации деятельности разных государственных, коммерческих и общественных структур в области охраны природы, включая биоразнообразие, сохранение редких и ценных животных. Важным разделом её работы является экопросвещение и экотуризм на основе интеграции природного, культурного и патриотического наследия Донской земли. Одним из таких мероприятий стал фестиваль экологического туризма «Воспетая степь». Первый фестиваль был организован Ассоциацией 10–11.10.2013 г. на базе её Центра редких и ценных животных европейских степей (центр) в хут. Кундрюченском Орловского р-на. Здесь в вольерах содержались особи эму, африканского страуса, дрофы, журавлей, сайгака, кулана, других животных. На фестивале присутствовали представители администрации РО, Ростоблкомприроды, Минобразования, турфирм. Приняли участие заповедник «Ростовский», администрация и художественная самодеятельность Орловского р-на, ООО «Газпром межрегионгаз Ростов-на-Дону», ЮФУ. Фестиваль собрал около 300 участников, преимущественно школьников, учителей, студентов, любителей природы, жителей Орловского и Пролетарского р-нов, Ростова-на-Дону и городов РО, которые выступили с предложением ежегодного проведения фестиваля в весеннее время.

С тех пор проведено 12 фестивалей. С годами они совершенствовались, увеличивалось количество гостей. Первые 3 фестиваля были организованы Ассоциацией на территории её полевого стационара и центра при участии заповедника. В дальнейшем его площадками стали степи охранной зоны заповедника, стационар Ассоциации. Если на I, II и III фестивалях было 300, 500 и 630 участников, то на IV – 3500, V – более 7 тыс. В 2017 г., объявленном президентом и Правительством РФ Годом экологии и ООПТ, VI фестиваль приобрел федеральный статус и собрал 15 тыс. экотуристов. В дальнейшем, в целях сохранения биоразнообразия степи, количество зарегистрированных посетителей стали ограничивать 3–7 тыс. человек. Всего на фестивалях официально побывало 48 тыс. гостей и участников. Примерно столько же гостей из соседних районов и Калмыкии приезжали смотреть цветение степи в охранной зоне и на второй площадке фестиваля. В нём приняли участие многие члены правительства, парламента и Законодательного собрания РФ и РО, ведущие ученые, предприниматели, общественные деятели, журналисты. Фестивали в период цветения тюльпанов, ирисов и иных степных растений начали проводиться в Калмыкии, Саратовской области и др.

Весна 2024 г. на Дону была ранняя, теплая, поэтому XII фестиваль состоялся 13–14 апреля. С богатством и красотой природы Донской земли его гости и участники знакомились еще в пути и на остановках. В лесополосах и балках цвели терн, алыча, красивый узор создавали цветы одуванчика, птицемлечника, чистяка весеннего и многих других растений. В садах и парках станиц огромные букеты образовали цветущие деревья вишни, яблони, абрикоса. Зацвели первые конские каштаны, кусты сирени, черемухи, жасмина, барбариса. К этому времени с мест зимовок прилетели практически все птицы. Отмечены стрижи, появляющиеся одними из последних. Различные пернатые встречались на водоемах, в степи, древесной растительности. У некоторых появились гнезда с яйцами.

Основная площадка фестиваля располагалась в открытой естественной степи, напротив визит-центра заповедника «Ростовский», где находились 4 большие палатки для стендов заповедника, Ассоциации, Ростовского зоопарка, ЮНЦ РАН, Ростовской АЭС, других организаций. Рядом – многочисленные площадки мастеров народного творчества, в отдалении протянулся длинный ряд палаток с огромным разнообразием местных сельских продуктов питания и изделий ручного творчества. Имелись автостоянка и медпункт, фестиваль сопровождали инспектора ГАИ, координаторы и модераторы, а порядок обеспечивали конные и пешие казаки, молодежные добровольческие организации. Праздничное настроение создавали теплая погода, свежая зелень, красочные баннеры, плакаты, фотозоны, знамена, яркая одежда молодежных объединений («Эколята», «Защитники Отечества», «Точки роста», «Первые» и т.д.), песни и танцы казаков, многое другое.

На площадке заповедника «Ростовский» посетители познакомились со степными обитателями: ушастым ежом, корсаком и степной гадюкой. Привлекала внимание туристов выставка пауков «Могут и покусать», где в качестве экспонатов были использованы работы победителей заповедного конкурса «Вот такие пауки». Посетителям предоставлялась возможность угадать названия отдельных растений и животных, определить их роль в природе, познакомиться с проблемами охраны природы, получить ответы на интересующие их вопросы по ботанике, зоологии и экологии. Впервые в работе фестиваля приняла участие астроботаническая экспедиция «Тюльпан-24» из Астрахани. Руководитель клуба Е.С. Вереин продемонстрировал гостям коллекцию метеоритов и кусочки других планет.





На площадке Ассоциации «Живая природа степи» была презентована уникальная интерактивная образовательная платформа «Степи» (степиевразии.рф), созданная специально для школьников 5–11-х классов. Посетители познакомились с работой Ассоциации по сохранению донской природы, с успехами в экопросветительской работе и разведении сайгака, лошади Пржевальского и других ценных и краснокнижных животных, с выпущенной ею научной и популяр-

ной литературой. Сотрудники ЮФУ представили материалы по биоразнообразию оз. Маныч-Гудило и его окрестностей, мониторингу некоторых его представителей, характеристике питомника Ассоциации и др.

Ученые и специалисты ЮНЦ РАН на своём стенде демонстрировали свою деятельность по изучению природы Дона, Манычской долины, Азовского моря, Цимлянского водохранилища. Их многочисленные экспедиции позволяют не только изучать и мониторить различные природные компоненты юга страны, включая биоразнообразие, выяснять происходящие в них изменения, но и рекомендовать мероприятия по сохранению и разумному использованию природных ресурсов. Большое внимание посетителей привлекли живые осетровые и рассказы ихтиологов о разведении их в искусственных условиях. Ими ЮНЦ РАН занимается много лет, получены интересные результаты, которые используются на практике.

Наша степь богата историей многих народов разных эпох и времен. Её изучением занимаются специалисты ЮФУ, ЮНЦ РАН, Азовского краеведческого музея, ДГТУ. Собраны многочисленные археологические и исторические экспонаты, часть из которых была показана на фестивале.

Под Ростовом-на-Дону во время Великой Отечественной войны проходили важные события, и неудивительно, что на фестивале была отдельная экспозиция поисковых отрядов с различным оружием, обмундированием, медалями, другими экспонатами Второй мировой войны.

Производственные организации (например, «Атоммаш») демонстрировали в своей деятельности использование инновационных подходов, методов, разработок по сохранению природы,

её ресурсов и биоразнообразия. Экотуристы познакомились с роботами, дронами, работами по искусственному интеллекту, иными современными направлениями.

Интересной для посетителей стала площадка Ростовского зоопарка, лауреата 2024 г. всероссийской премии «Зоопарки России» в номинации «Зоопарки года». Квалифицированные специалисты во главе с директором знакомили посетителей с различными живот-



ными, их биологическими особенностями, ролью зоопарков в сохранении исчезающих видов. Здесь проводились мастер-классы по узнаванию животных, демонстрировались коллекции яиц и перьев птиц, фотографии. Охотничье хозяйство «Аргамак-Р» показало на фестивале коллекцию живых утят, фазанов и других животных, а также оленьих рогов.

Хорошо были представлены структуры народного промысла, творчества, сувенирной продукции. Большую экспозицию подготовила семикаракорская ТОО «Аксинья» с замечательными изделиями из художественного фаянса и мастер-классом.

Фестиваль собрал экологов из Ростова и области, Москвы, Санкт-Петербурга, Воронежа, других регионов. Многие приезжают сюда каждый год группами, классами, семьями. Посетили фестиваль члены правительства и Законодательного собрания во главе с губернатором В.Ю. Голубевым. Они обошли все площадки и познакомились с выставленными экспонатами. Губернатор активно общался с участниками фестиваля. Многие интере-



совались вопросами сохранения на Донской земле чистого воздуха, воды и почвы, рыбных и охотничьих ресурсов и биоразнообразия, функционирования имеющихся и создания новых особо охраняемых природных территорий, формированием и ролью Красных книг, значением этих мероприятий в устойчивом развитии области. Юные активисты-экологи обратились к губернатору с идеей создания детской Красной книги растений и животных области, и он поддержал это предложение, обещая провести встречу с ними по данному вопросу в июне.

Важную часть составляли экскурсии в разные степные экосистемы, сопровождаемые специалистами заповедника и Ассоциации. Туристы познакомились с соленым озером Маныч-Гудило, узнали о его истории, роли в жизни населения, проводящихся здесь исследованиях и перспективах. Небольшие группы побывали в питомнике Ассоциации, где получили интересную информацию о сайгаках, лошадях Пржевальского, двугорбых верблюдах, ламах, антилопах каннах, страусах, дрофах и других животных,



многие из которых занесены в Красные книги РО и РФ. Участники, побывавшие на о. Водный, запомнят мустангов – одичавших лошадей, самостоятельно обитающих в степи уже 70 лет. Интересны экскурсии в районы оз. Лопуховатое и Грузское. Здесь участники увидели зеленые ковры природного травостоя с массой разноцветных тюльпанов, ирисов и др. Повсеместно встречались различные пауки, пря-



мокрылые, жуки, мухи, пчелы, бабочки и другие насекомые, нередко были ужи и четырехполосые полозы, наблюдались норки полевок, хомячков и других млекопитающих. Воздух звенел от песен жаворонков, криков пролетающих стай чаек, лебедей, гусей, журавлей. В степи были встречены степная гадюка, иксодовые клещи,

различные пауки и другие животные, способные представлять опасность для человека. Специалисты предупредили об аккуратном обращении с ними.

Фестиваль «Воспетая степь» выполняет большую роль в экологическом просвещении населения, обогащении его биологических знаний, в оценке деятельности разных структур в сохранении природы, включая её биоресурсы. Впечатления и информация, полученные здесь, запоминаются людьми надолго, формируют уважение и любовь к донской природе, активизируют их природоохранную деятельность. Поездки на фестиваль положительно влияют на знания, эмоции, настроение, здоровье людей. Это все входит в национальные программы «Экология», «Здоровье» и др.

Информация об авторах

В.А. Миноранский – президент ассоциации «Живая природа степи»; доктор сельскохозяйственных наук, профессор кафедры зоологии, ЮФУ.

Ю.В. Тимофеевко – ассистент кафедры зоологии.

Information about the authors

V.A. Minoransky - President of the Association "Wild Nature of the Steppe"; Doctor of Science (Agriculture), Professor of the Department of Zoology, Southern Federal University.

Yu.V. Timofeenko - Assistant of the Department of Zoology.

Над номером работали: Т.А. Ватульян, Л.С. Ворович, Е.М. Колосова, О.В. Назаренко, М.С. Шипитко

Подписано в печать 24.06.2024. Выход в свет 27.06.2024. Формат 60×84 1/8. Бумага офсетная.
Шрифт Times. Усл. печ. л. 18,6. Уч.-изд. л. 21,05. Тираж 250 экз. Заказ № 9551.

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

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

Отпечатано в отделе полиграфической, корпоративной и сувенирной продукции
Издательско-полиграфического комплекса КИБИ МЕДИА ЦЕНТРА ЮФУ,
344090, г. Ростов-на-Дону, пр. Стачки, 200/1, корп. 1, к 104, тел. +7 (863) 243-41-66

Magazine released: T.A. Vatulyan, L.S. Vorovich, E.M. Kolosova, O.V. Nazarenko, M.S. Shipitko

Signed print June 24, 2024. The publication June 27, 2024. Format 60×84 1/8. Offset paper. Font Times.
Conv. print. sheets 18.6. Publ. sign. 21.05. Edition 250 copies. Order number 9551.

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

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

Printed in the printing department, and corporate souvenirs,
Publishing and printing complex KIBI MEDIA CENTER, SFU,
344090, Rostov-on-Don, Stachki Ave, 200/1, build. 1, room 104, phone (863) 243-41-66

**НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
«ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ.
СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ РЕГИОН. ЕСТЕСТВЕННЫЕ НАУКИ»**

Рецензируемый журнал «Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки» продолжает приём работ. Он имеет статус центрального издания и включён в перечень ВАК по следующим отраслям:

- физико-математические науки (математика, механика);
- науки о Земле.

Принимаются работы и по другим отраслям науки. Также печатаются материалы в разделах «Заметки о книгах», «Научная жизнь», «Штрихи к портрету».

Журнал издается с периодичностью 4 номера в год. С электронной версией можно ознакомиться на сайте Научной электронной библиотеки http://elibrary.ru/title_about.asp?id=7362. Опубликованные статьи индексируются в российских и международных электронных библиотеках и наукометрических базах данных: РИНЦ (RSCI), РУКОНТ, «Киберленинка», ЭБС «Университетская библиотека онлайн», ИВИС, Ulrich, EBSCO, Chemical Abstracts. Журнал включен в Russian Science Citation Index на платформе Web of Science.

Авторы, сохраняя за собой авторские права на работу и передавая журналу «Известия вузов. Северо-Кавказский регион» право первой публикации, автоматически принимают на себя обязательство не печатать её ни полностью, ни частично в каком-либо издании без указания ссылки на оригинальную публикацию в этом журнале.

Издательские услуги оплачиваются организацией или автором после утверждения статьи на редколлегии.

Оформление работ осуществляется согласно правилам:

1. Представляется статья в электронном виде. Перед заголовком указать индекс УДК.
2. Статья оформляется в формате .doc или .docx (MS Word) через 1,5 интервала, шрифтом Times New Roman размером 14 пт, страницы пронумерованы.
3. Сведения об авторах с указанием автора, ответственного за переписку, на русском и английском языках. Экспертное заключение.
4. Полное название организации на русском и английском языках.
5. Название статьи и фамилии авторов на русском и английском языках.
6. Аннотация на русском и английском языках (1000–1500 знаков / 150–200 слов).
7. Ключевые слова на русском и английском языках (8–10 слов).

Журнал распространяется по подписке через объединённый каталог «Пресса России», интернет-каталог «Пресса по подписке». Подписной индекс – 70415 (подписка на полугодие).

Адрес для переписки: 344006, г. Ростов-на-Дону, ул. Б. Садовая, 105/42, ЮФУ, редакция журнала «Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки».

Тел./факс главной редакции (863) 218-40-00, добавочный 11-093, 11-094.

E-mail: izvestiya@sfedu.ru

Адрес в Интернете: www.izvestiya.sfedu.ru