

ISSN 1026-2237

DOI 10.18522/1026-2237

ИЗВЕСТИЯ
ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

*Северо-Кавказский
регион*

ЕСТЕСТВЕННЫЕ

НАУКИ

2024

3

Журнал основан в 1972 г. Ю.А. Ждановым

Главная редакция:

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

Редакционная коллегия:

М.А. Боровская – главный редактор, чл.-корр. РАО, доктор эконом. наук, профессор, Южный федеральный университет, Россия
В.Е. Закруткин – председатель редколлегии, доктор геол.-мин. наук, профессор, Южный федеральный университет, Россия
Я.М. Ерусалимский – зам. председателя редколлегии, кандидат физ.-мат. наук, доктор техн. наук, профессор, Южный федеральный университет, Россия
В.А. Бабешко – академик РАН, доктор физ.-мат. наук, профессор, Кубанский государственный университет, Россия
Б.С. Карамурзов – доктор техн. наук, профессор, Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова, Россия
В.И. Колесников – академик РАН, доктор техн. наук, профессор, Ростовский государственный университет путей сообщения, Россия
А.Г. Кусраев – доктор физ.-мат. наук, профессор, Южный математический институт ВНИЦ РАН, Россия
Г.Г. Матишов – академик РАН, доктор геол.-мин. наук, профессор, Федеральный исследовательский центр Южный научный центр РАН, Россия
В.И. Минкин – академик РАН, доктор хим. наук, профессор, Южный федеральный университет, Россия
М.Х. Рабаданов – доктор физ.-мат. наук, профессор, Дагестанский государственный университет, Россия
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: 10.18522/1026-2237-2024-3

*Свидетельство о регистрации
ПИ № ФС 77 – 77252 от 25.11.2019,
выдано Федеральной службой по надзору
в сфере связи, информационных технологий
и массовых коммуникаций*

*Научный журнал
Издается с 1973 г.*

*Периодичность серии 4 номера в год
№ 3 (223) 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. 3 (223) 2024*

ЕСТЕСТВЕННЫЕ НАУКИ

NATURAL SCIENCE

СОДЕРЖАНИЕ

CONTENTS

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ

PHYSICAL AND MATHEMATICAL SCIENCES

- Костоглотов А.А.** Квазиоптимальный закон управления для лагранжевых систем с дефицитом управляющих воздействий 4
- Мусатова Н.К.** Математическая модель в задаче идентификации формы летательного аппарата по диаграмме рассеяния звукового поля 15
- Норкин М.В.** Струйный эффект при возникновении присоединенной каверны от системы импульсивных давлений 25
- Пожарский Д.А., Золотов Н.Б.** Контактная задача для трансверсально изотропного слоя с трением 34

- Kostoglotov A.A.** Quasi-Optimal Control Law for Lagrangian Systems with a Deficit of Control Influences 4
- Musatova N.K.** A Mathematical Model in the Problem of Aircraft Shape Identification Based on a Sound Field Scattered Diagram 15
- Norkin M.V.** Jet Effect When an Attached Cavity Arises from a System of Pulse Pressure..... 25
- Pozharskii D.A., Zolotov N.B.** Contact Problem for a Transversally Isotropic Layer with Friction..... 34

НАУКИ О ЗЕМЛЕ

SCIENCES OF EARTH

- Аджиев А.Х., Кондратьева Н.В., Куповых Г.В., Кортиев А.Л.** Кадастр лавинной опасности территории ВТРК «Мамисон» (Северная Осетия – Алания) 39
- Алита С.Л., Аппаева Ж.Ю.** Об экономической целесообразности применения мобильных пунктов воздействия в Краснодарской противорадовой службе .. 48
- Ергина Е.И., Артемова Е.А.** Климатические и палеоклиматические факторы почвообразования на территории Крымского полуострова 54
- Зорина С.О., Никашин К.И.** Геохимические и типологические особенности детритовых цирконов сосновской толщи палеогена (Русская плита) 63

- Adzhiev A.Kh., Kondratyeva N.V., Kupovykh G.V., Kortiev A.L.** Cadastre of Avalanche Hazard in the Territory of ASTRC “Mamison” (North Ossetia-Alania)..... 39
- Alita S.L., Appaeva Zh.Yu.** On the Economic Feasibility of Using Mobile Impact Points in the Krasnodar Anti-Hail Service 48
- Ergina E.I., Artemova E.A.** Climatic and Paleoclimatic Factors of Soil Formation in the Territory of the Crimean Peninsula..... 54
- Zorina S.O., Nikashin K.I.** Geochemical and Typological Peculiarities of Detrital Zircons from the Paleogene Sosnov Formation (Russian Platform)..... 63

Каранин А.В., Беликова М.Ю., Кочеева Н.А., Какорин В.А. Склоновая и высотная приуроченность молниевых разрядов и пожаров от гроз в горной местности (на примере территории Республики Алтай)	71	Karanin A.V., Belikova M.Yu., Kocheeva N.A., Kakin V.A. Slope and Altitude Dependency of Lightning Discharges and Fires from Thunderstorms in Mountainous Terrain (Case Study of the Altai Republic Territory). 71	71
Патрикеев Е.С., Полиенко Е.А., Безуглова О.С. Влияние биологических и гуминовых препаратов на динамику подвижных форм азота в черноземе обыкновенном при возделывании нута	81	Patrikeev E.S., Polienko E.A., Bezuglova O.S. Influence of Biological and Humic Preparations on the Dynamics of Mobile Forms of Nitrogen in Ordinary Chernozem During the Chickpeas Cultivation.....	81
Смирнов И.А. Агроклиматическая оценка периода перезимовки озимой пшеницы в Центрально-Черноземном экономическом районе.....	91	Smirnov I.A. Agroclimatic Assessment of the Overwintering Period of Winter Wheat in the Central Black Earth Economic Region.....	91
Тимофеева Я.О., Взорова Д.О., Тимошинов Р.В. Различные формы Sr в агротемногумусовых подбелах юга Приморского края.....	98	Timofeeva Ya.O., Vzorova D.O., Timoshinov R.V. Various Forms of Sr in Albic Stagnosols from the South of Primorskii Region.....	98
Тимошенко Д.В. Моделирование суточной вариации атмосферного электрического поля в турбулентном приземном слое	107	Timoshenko D.V. Modeling of the Atmospheric Electric Field Daily Variation in the Turbulent Surface Layer.....	107
Федоров Ю.А., Гарькуша Д.Н., Доценко И.В., Попов Ю.В., Доценко Н.В., Михайленко А.В. Метано- и сульфидогенез в озерах полуострова Абрау (Краснодарский край)	117	Fedorov Yu.A., Garkusha D.N., Dotsenko I.V., Popov Yu.V., Dotsenko N.V., Mikhailenko A.V. Methano- and Sulfidogenesis in the Lakes of the Abrau Peninsula (Krasnodar Territory).....	117
Шамарина М.А. Внутригодовая динамика химического состава воды в устье реки Баксан	132	Shamarina M.A. Intra-Annual Dynamics of the Chemical Composition of Water at the Mouth of the Baksan River ..	132

БИОЛОГИЧЕСКИЕ НАУКИ

BIOLOGICAL SCIENCES

Дудагова Э.Ш., Тайсумов М.А., Астамирова М.А.-М., Байбатырова Э.Р. Распределение видов растений по флористическим районам бассейна реки Аргун	141	Dudagova E.Sh., Taisumov M.A., Astamirova M.A.-M., Baibatyrova E.R. Distribution of Plant Species by Floristic Regions of the Argun River Basin.....	141
Науменко Ю.В., Назын Ч.Д., Кашкак Е.С., Ооржак У.С. Гидрохимическая и альгологическая характеристика минерального источника Устуу-Сенек (Республика Тыва, Россия).....	151	Naumenko Yu.V., Nazyn Ch.D., Kashkak E.S., Oorzhak U.S. Hydrochemical and Algological Characteristics of the Ustuu-Senek Mineral Spring (Tuva Republic, Russia)	151
Османов Р.М., Алиева З.М., Салихова М.В. Особенности естественного и клонального воспроизведения <i>Matthiola daghestanica</i> (Brassicaceae)	159	Osmanov R.M., Alieva Z.M., Salikhova M.V. Features of Natural and Clonal Reproduction of <i>Matthiola Daghestanica</i> (Brassicaceae).....	159

НАШИ ЮБИЛЯРЫ

OUR PERSONS

Минкин В.И. Юрий Иванович Рябухин (75 лет со дня рождения)	168	Minkin V.I. Yury Ivanovich Ryabukhin (to the 75 th Anniversary).....	168
---	-----	---	-----

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ

PHYSICAL AND MATHEMATICAL SCIENCES

Научная статья
УДК 517.977.1, 62-50
doi: 10.18522/1026-2237-2024-3-4-14

КВАЗИОПТИМАЛЬНЫЙ ЗАКОН УПРАВЛЕНИЯ ДЛЯ ЛАГРАНЖЕВЫХ СИСТЕМ С ДЕФИЦИТОМ УПРАВЛЯЮЩИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

Андрей Александрович Костоглотов

*Ростовский государственный университет путей сообщения, Ростов-на-Дону, Россия
kostoglotov@icloud.com*

Аннотация. Механические системы с дефицитом управляющих воздействий представляют собой существенно нелинейные динамические системы высокого порядка, для которых характерно наличие значительного динамического взаимовлияния между элементами. Поэтому задачу синтеза управления следует рассматривать в исходной нелинейной постановке, поскольку использование методов линейного синтеза может привести к потере устойчивости или существенно ухудшить качество процесса управления.

При решении задачи синтеза с дефицитом управляющих воздействий целесообразно провести анализ такой механической системы, как нестационарная, и использовать принцип декомпозиции в совокупности с условием максимума обобщенной мощности, что позволяет найти структуру универсальной двухуровневой системы управления. Полученное квазиоптимальное управление обеспечивает увеличение области устойчивости и улучшение качества переходного процесса по квадратичному показателю в сравнении с известными линейными алгоритмами.

Ключевые слова: квазиоптимальный закон управления, динамическая система с дефицитом управляющих воздействий, многомерная нестационарная нелинейная динамическая система, поверхность переключения, обратный маятник на тележке

Для цитирования: Костоглотов А.А. Квазиоптимальный закон управления для лагранжевых систем с дефицитом управляющих воздействий // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2024. № 3. С. 4–14.

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

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

Original article

QUASI-OPTIMAL CONTROL LAW FOR LAGRANGIAN SYSTEMS WITH A DEFICIT OF CONTROL INFLUENCES

Andrey A. Kostoglotov

*Rostov State Transport University, Rostov-on-Don, Russia
kostoglotov@icloud.com*

© Костоглотов А.А., 2024

Abstract. Mechanical systems with a deficit of control influences are essentially nonlinear dynamic systems of high order, which are characterized by the presence of significant dynamic interaction between the elements. Therefore, the task of control synthesis should be considered in the initial nonlinear formulation, since the use of linear synthesis methods can lead to a loss of stability or significantly worsen the quality of the control process.

When solving the problem of synthesis with a deficit of control influences, it is advisable to analyze such a mechanical system as a non-stationary one and use the principle of decomposition in conjunction with the maximum condition of generalized power, which makes it possible to find the structure of a universal two-level control system. The resulting quasi-optimal control provides an increase in the stability area and the quality of the transient process in terms of a quadratic criterion in comparison with known linear algorithms.

Keywords: quasi-optimal control law, dynamic system with a deficit of control influences, multidimensional non-stationary nonlinear dynamic system, switching surface, reverse pendulum on a trolley

For citation: Kostoglotov A.A. Quasi-Optimal Control Law for Lagrangian Systems with a Deficit of Control Influences. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2024;(3):4-14. (In Russ.).

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

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 алгоритмы управления механическими системами с дефицитом управляющих воздействий представляют высокий интерес. В качестве примера можно указать различные беспилотные транспортные средства, роботы-манипуляторы и т.п., у которых существуют режимы работы, когда система становится ограниченно подвижной, потому что у нее появляется еще одна степень свободы, и типовые алгоритмы управления работают неэффективно. Дефицит управляющих воздействий может быть связан также с поломкой подвижного элемента. Повышение эффективности управления за счет снабжения систем избыточными подвижными элементами требует дополнительных издержек, что определяет актуальность развития новых методов управления нелинейными механическими системами с дефицитом управляющих воздействий.

Как объект управления механические системы представляют собой существенно нелинейные динамические системы высокого порядка, уравнения движения которых не разрешены относительно старших производных. Для этих систем характерно наличие значительного динамического взаимовлияния (перекрестных связей) между элементами, например между звеньями автоматического манипулятора.

В задачах управления используются линейные законы управления с постоянными коэффициентами. Их основной известный недостаток состоит в том, что они предназначены для стабилизации только одного режима движения, поэтому они неэффективны при дефиците управления [1].

В силу указанных причин задачу синтеза управления следует рассматривать в исходной нелинейной постановке без перехода к упрощенному линеаризованному описанию, так как при изменении цели управления в системах, построенных на основе линейных моделей, изменяются как структура управляющего устройства, так и его параметры. Это связано с тем, что коэффициенты системы линейного приближения определяются невозмущенным движением, на котором достигается цель управления, и следовательно, коэффициенты модели будут изменяться при изменении этой цели. При этом область допустимых возмущений в системах управления, построенных с использованием линейных моделей, не охватывает возмущений, встречающихся в реальных эксплуатационных режимах, что может привести к потере устойчивости или существенно ухудшить качество процесса управления.

Одним из возможных подходов к решению нелокальных задач управления механическими системами без привлечения линейного приближения является принцип декомпозиции – с помощью допустимого управления полностью устранить динамическое взаимовлияние между элементами и осуществить координацию движений элементов для достижения цели управления [1–4].

При решении задачи синтеза с дефицитом управляющих воздействий целесообразно использовать принцип декомпозиции [3, 4] в совокупности с условием максимума обобщенной мощности, поскольку оказывается возможным найти структуру универсальной двухуровневой системы управления и анализа такой механической системы, как нестационарная. Редукция оптимизационной задачи Лагранжа к изопериметрической определяет условие максимума обобщенной мощности [5–9], которое позволяет получить квазиоптимальное решение задачи синтеза с применением прикладных способов учета ограничений на класс допустимых управлений [10, 11] для широкого класса динамических систем, удовлетворяющих принципу Гамильтона – Остроградского и представленных уравнениями Лагранжа второго рода.

Научная задача данного исследования – разработка метода синтеза квазиоптимального управления нелинейными динамическими системами с дефицитом управляющих воздействий с использованием условия максимума функции обобщенной мощности и принципа декомпозиции.

Цель работы – повышение качества управления и расширение области устойчивости нелинейной динамической системы на основе разработанного метода в сравнении с управлением, полученным на основе линеаризации модели объекта управления.

Постановка задачи управления

Рассмотрим класс управляемых систем, движение которых в независимых обобщенных координатах $q = \|q_s\|_{s=1}^n$ может быть описано дифференциальными уравнениями Лагранжа второго рода [12]

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} - \frac{\partial T}{\partial q_i} = Q_i(q, \dot{q}, t) + \sum_{k=1}^m b_{ik}(q) u_k(t), \quad i = \overline{1, n}, \quad (1)$$

где T – кинетическая энергия:

$$T = \frac{1}{2} \sum_{i,k=1}^n a_{ik}(q) \dot{q}_i \dot{q}_k, \quad a_{ik}(q) = a_{ik}(q). \quad (2)$$

Предполагается, что коэффициенты $a_{ik}(q), b_{ik}(q)$ ограничены при всех q вместе с частными производными первого порядка. Матрица коэффициентов $A(q) = \|a_{ik}(q)\|_{i,k=1}^n$ в выражении кинетической энергии механических систем при всех q является матрицей положительно определенной квадратичной формы.

Через $Q_i(q, \dot{q}, t)$ обозначены обобщенные силы, обусловленные наличием различного рода внешних воздействий.

Допустимые управления выбираются из множества суммируемых на любом конечном интервале функций $u(t) = \|u_s(t)\|_{s=1}^m$, принимающих значения в ограниченной замкнутой выпуклой области U :

$$u(t) \in U = \{u_s(t) : |u_s(t)| \leq h_s, s = \overline{1, m}\} \quad (3)$$

При этом выполняется условие $m < n$. Это означает, что (1) является системой с дефицитом управляющих воздействий.

Задача оптимального управления заключается в переводе системы (1) из начального состояния $t = t_0, q(t_0), \dot{q}(t_0)$ в конечное $t = t_1, q(t_1), \dot{q}(t_1)$ при условии минимума целевого функционала:

$$J(q) = \int_{t_0}^{t_1} F(q) dt \rightarrow \min, \quad (4)$$

где $F(q)$ – положительно определенная выпуклая функция обобщенных координат, например

$$F(q) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n k_i q_i^2 = q^T K q,$$

K – положительно определенная диагональная матрица; k_i – заданные весовые коэффициенты.

Рассмотрим задачу построения нелинейного управления системой (1), (2) по критерию (4) при условии (3) на множестве квазиоптимальных законов управления, полученных на основе редукции задачи Лагранжа к изопериметрической [7, 9].

Применение принципа декомпозиции

Для решения поставленной задачи проведем анализ механических систем с дефицитом управляющих воздействий, для которых условие полной управляемости не выполнено в соответствии со схемой [13]. Если наложить ограничение на параметры движения по степеням свободы, не содержащим управляющих воздействий, то рассматриваемый случай можно свести к случаю нестационарных объектов.

Система (1) может быть отнесена к классу нестационарных механических систем, кинетическая энергия которых представляется в виде суммы однородных форм $T_2 + T_1 + T_0$ [14], где

$$T_2 = \frac{1}{2} \sum_{i,k=1}^n a_{ik}(q,t) \dot{q}_i \dot{q}_k, \quad T_1 = \sum_{i=1}^n a_i(q,t) \dot{q}_i, \quad T_0 = T_0(q,t).$$

Уравнение Лагранжа нестационарной механической системы можно записать в виде

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial T_2}{\partial \dot{q}_i} - \frac{\partial T_2}{\partial q_i} = Q_i(q, \dot{q}, t) - \left[\frac{d}{dt} \frac{\partial T_1}{\partial \dot{q}_i} - \frac{\partial T_1}{\partial q_i} \right] + \frac{\partial T_0}{\partial q_i} + \sum_{k=1}^m b_{ik}(q,t) u_k(t), \quad i = \overline{1, n}, \quad (5)$$

где члены, связанные с составляющими T_1 и T_0 кинетической энергии, перенесены в правую часть и могут рассматриваться как дополнительные обобщенные силы. Введем обозначения:

$$Q_i^*(q, \dot{q}, t) = Q_i(q, \dot{q}, t) - \left[\frac{d}{dt} \frac{\partial T_1}{\partial \dot{q}_i} - \frac{\partial T_1}{\partial q_i} \right] + \frac{\partial T_0}{\partial q_i}, \quad i = \overline{1, n},$$

$$u_i^*(t) = \sum_{k=1}^m b_{ik}(q,t) u_k(t).$$

Запишем систему (5) в виде

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial T_2}{\partial \dot{q}_i} - \frac{\partial T_2}{\partial q_i} = Q_i^*(q, \dot{q}, t) + u_i^*(t), \quad i = \overline{1, n}, \quad (6)$$

предположим, что выполнены условия

$$\sup |Q_i^*(q, \dot{q}, t)| < h_i, \quad i = \overline{1, n}. \quad (7)$$

Рассмотрим один из вариантов анализа системы (6) для поиска возможности выполнения условия (7). Если через $q = \|q_v\|_{v=1}^{m_1}$ обозначить те обобщенные координаты, уравнения Лагранжа которых содержат управляющие воздействия, а через $x = \|q_j\|_{j=m+1}^n$ – обобщенные координаты, в уравнениях движения которых они отсутствуют, то движение объекта будет описываться дифференциальными уравнениями Лагранжа

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_v} - \frac{\partial T}{\partial q_v} &= Q_v(q, \dot{q}, x, \dot{x}, t) + u_v(t), \quad v = \overline{1, m}, \\ \frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{x}_j} - \frac{\partial T}{\partial x_j} &= \bar{Q}_j(q, \dot{q}, x, \dot{x}, t), \quad j = \overline{m+1, n}, \end{aligned} \quad (8)$$

где $T = T(q, \dot{q}, x, \dot{x})$ – кинетическая энергия.

Предполагается, что для некоторых классов движений системы (8) при $u(t) \in U$ переменные $x_j(t)$ изменяются так, что выполняются неравенства

$$|x_j| \leq c_0, \quad |\dot{x}_j| \leq c_1, \quad j = \overline{m+1, n}. \quad (9)$$

Таким образом, для обеспечения выполнения условия (7) необходимо выполнение условий (9). Оценки (9) находятся из экспериментальных исследований либо из результатов теоретического анализа. При наличии (9) можно исключить из рассмотрения переменные $x_j(t)$ и от (8) перейти к анализу упрощенной системы (с числом степеней свободы m), с кинетической энергией

$$\overline{T}(q, \dot{q}, t) = \overline{T}_2(q, \dot{q}, x(t), \dot{x}(t)) + \overline{T}_1(q, \dot{q}, x(t), \dot{x}(t)) + \overline{T}_0(q, x(t), \dot{x}(t)), \quad (10)$$

где \overline{T}_2 , \overline{T}_1 и \overline{T}_0 – однородные формы соответствующих степеней относительно \dot{q}_v . Выражение (10) задает кинетическую энергию не одной, а совокупности систем, так как $x(t)$ можно произвольно выбирать из множества функций, удовлетворяющих условиям (9).

Таким образом, для решения задачи синтеза управления механической системой (6), для которой выполняются неравенства (7), можно использовать принцип декомпозиции, применяя его к системе с кинетической энергией (10) и обобщенными силами $Q_v(q, \dot{q}, x(t), \dot{x}(t), t)$, зависящими от произвольных функций $x(t)$, удовлетворяющих (9). При этом необходимо ввести соответствующий аналог условий полной управляемости (7), причем эти условия должны выполняться равномерно по функциям $x(t)$ из класса удовлетворяющих неравенствам (9) [13].

Результаты остаются справедливыми [13] и для случая, если управляющие воздействия входят в уравнения (6) в виде $\sum_{k=1}^n b_{ik}^*(q, t) u_k^*(t)$, где $u_i^*(t) = \sum_{k=1}^m b_{ik}(q, t) u_k(t)$. Эти преобразования определяются уравнениями Лагранжа вида (1) и зависят от выбора обобщенных координат, при этом не выводят систему из класса уравнений Лагранжа и дают возможность выбора вида формального представления управляющих воздействий.

Метод синтеза закона управления на основе условия максимума функции обобщенной мощности

Выводы, полученные выше, не дают конкретных рекомендаций анализа условий (7) и (9) для гарантий полной управляемости, что является предметом дополнительных исследований, но позволяют использовать теоремы принципа декомпозиции [13] для построения структуры управляемой системы вида (6) и более общей структуры управляемой системы вида (1).

Управление для каждой степени свободы в режиме декомпозиции с использованием метода синтеза квазиоптимального управления на основе условия максимума функции обобщенной мощности [7] и прикладных способов учета ограничений на класс допустимых управлений имеет следующую структуру [9]:

$$u_s(q(t), \dot{q}(t)) = h_s \text{sat}(\Psi_s(q(t), \dot{q}(t))) = h_s \begin{cases} 1, & \Psi_s > h_s, \\ \Psi_s / h_s, & |\Psi_s| \leq h_s, \\ -1, & \Psi_s < -h_s, \end{cases} \quad s = \overline{1, n}, \quad (11)$$

где функция

$$\Psi_s(q_s, \dot{q}_s) = \left[\alpha_{1s} \frac{\partial F}{\partial q_s} + \alpha_{2s} \frac{|\dot{q}_s| \dot{q}_s}{|q_s| + \alpha_{3s}} \right], \quad s = \overline{1, n}, \quad (12)$$

определяет поверхность переключения; α_{is} , $i = \overline{1, 3}$, – параметры закона управления для каждой степени свободы.

С учетом (11), (12) на основе утверждения теоремы 2 [13] получим структуру управляемой по критерию (4) системы

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} - \frac{\partial T}{\partial q_i} = Q_i^*(q, \dot{q}, t) - \sum_{k=1}^n b_{ik}^*(q) h_s \text{sat} \left[\sum_{s=1}^m b_{sk}(q) u_s(q_s, \dot{q}_s) \right], \quad i = \overline{1, n}, \quad s = \overline{1, m}. \quad (13)$$

Зависимость управления в (13) от коэффициентов $b_{ik}(q)$ является существенной [3], поскольку в противном случае изменение знака $b_{ik}(q)$ во время движения может привести к дестабилизирующему действию управляющих воздействий.

Поскольку определена структура управления, но не установлены условия полной управляемости, для анализа эффективности полученного решения задачи синтеза проведем численное моделирование.

Анализ эффективности предложенного метода при управлении перевернутым маятником на основе численного моделирования

Одним из наиболее популярных лабораторных экспериментов, используемых для иллюстрации техники нелинейного управления, служит перевернутый маятник. Эта система важна для широкого класса прикладных задач – от управления БПЛА до оценки сейсмической устойчивости конструкций.

Точка опоры качающегося маятника в виде шеста закреплена на тележке, т.е. на подвижной платформе. Маятник может свободно раскачиваться вокруг своей точки опоры, и у него нет подвижного элемента для непосредственного управления. Тележка может двигаться горизонтально, перпендикулярно к оси вращения маятника, ее движение вызвано действием силы, приложенной к ней в одном и том же направлении. Поскольку угловым ускорением шеста непосредственно управлять нельзя, перевернутый маятник представляет собой механическую систему с дефицитом управляющих воздействий. Цель управления – передвигая тележку по горизонтальной плоскости, сделать так, чтобы шест занял верхнее неустойчивое положение равновесия.

Классический пример синтеза управления, построенного на основе линеаризованной системы, приводится в [15]. Рассмотренные в большинстве случаев линеаризованные модели существенно ограничивают динамические свойства соответствующих систем управления положением маятника и тележки [16].

Рассмотрим нелинейную модель обратного маятника на тележке в обобщенных координатах $q = [s, \phi]^T$. Уравнения Лагранжа 2-го рода, с учетом трения, предположения о малой массе маятника в сравнении с массой тележки $m_p \ll M$ и тем, что можно пренебречь горизонтальной силой реакции оси маятника, имеют вид [15, 16]

$$\begin{cases} \ddot{s} = \frac{\mu - k_s \dot{s}}{M}, \\ \ddot{\phi} = \frac{g}{L'} \sin \phi - \ddot{s} \frac{1}{L'} \cos \phi, \end{cases} \quad (14)$$

где s – перемещение тележки вдоль горизонтальной оси; ϕ – угол отклонения обратного маятника от нормали; g – ускорение свободного падения; L' – эффективная длина маятника

$$L' = \frac{I + m_p l^2}{m_p l}; \quad m_p, M \text{ – масса маятника и тележки соответственно; } l \text{ – расстояние между}$$

осью маятника и центром тяжести; I – момент инерции относительно центра тяжести; μ – сила ограниченной интенсивности, действующая на тележку; k_s – коэффициент трения.

Ставится задача синтеза управления системой (14). В соответствии с целью управления необходимо обеспечить минимум критерия эффективности, который определяется функционалом

$$J = \int_0^T F(q) dt = \int_0^T \frac{1}{2} (s^2 + \phi^2) dt \rightarrow \min. \quad (15)$$

Проведем преобразования, необходимые для процедуры синтеза управления в соответствии с разработанным методом.

Запишем систему (14) в виде

$$\begin{cases} \ddot{s} = u, \\ \ddot{\phi} = \frac{g}{L'} \sin \phi - \frac{1}{L'} \cos \phi \cdot u, \end{cases} \quad (16)$$

где $u = \frac{\mu - k_s \dot{s}}{M}$, ограничение силы воздействия на тележку определяется следующим образом:

$$|u| \leq h.$$

Данные тривиальные преобразования позволяют формально привести систему (16) к виду (13), что дает возможность воспользоваться принципом декомпозиции в совокупности с методом синтеза квазиоптимального управления на основе условия максимума функции обобщенной мощности [7] и прикладных способов учета ограничений на класс допустимых управлений

$$\begin{cases} \ddot{s} = b_s u_s, \\ \ddot{\phi} = Q_\phi(\phi) - b_\phi u_\phi, \end{cases}$$

где

$$b_s = 1, \quad b_\phi = \frac{1}{L'} \cos \phi,$$

$$Q_\phi(\phi) = \frac{g}{L'} \sin \phi,$$

$$u_s(s, \dot{s}) = \text{hsat} \left[\alpha_{s1} s + \alpha_{s2} \frac{|\dot{s}| \dot{s}}{|s| + \alpha_{s3}} \right],$$

$$u_\phi(\phi, \dot{\phi}) = \text{hsat} \left[\alpha_{\phi1} \phi + \alpha_{\phi2} \frac{|\dot{\phi}| \dot{\phi}}{|\phi| + \alpha_{\phi3}} \right],$$

где $\alpha_{si}, \alpha_{\phi i}, i = \overline{1,3}$, – параметры управления.

Тогда структура системы управления в соответствии с предложенным методом имеет вид

$$\begin{cases} \ddot{s} = -\text{hsat}(b_s u_s + b_\phi u_\phi), \\ \ddot{\phi} = \frac{g}{L'} \sin \phi + \frac{1}{L'} \cos \phi [\text{hsat}(b_s u_s + b_\phi u_\phi)]. \end{cases} \quad (17)$$

Численное моделирование проведем с использованием параметров [15]: $h = 10 \text{ м} \cdot \text{с}^{-2}$; $L' = 0,842 \text{ м}$; $m_p = 0,1 \text{ кг}$; $M = 1 \text{ кг}$; $I = 0,013 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$; $k_s = 1 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$. Процесс стабилизации маятника будем считать завершенным при достижении области $|\phi| \leq 0,01 \text{ рад}$; $|\dot{\phi}| \leq 0,01 \text{ рад} \cdot \text{с}^{-1}$.

Проведено моделирование при начальных условиях $s_0 = 0 \text{ м}$; $\dot{s}_0 = 0 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ и различных вариантах отклонения маятника: 1) $\phi_0 = 0,03 \text{ рад}$; $\dot{\phi}_0 = 0,5 \text{ рад} \cdot \text{с}^{-1}$; 2) $\phi_0 = 0,24 \text{ рад}$; $\dot{\phi}_0 = 1,5 \text{ рад} \cdot \text{с}^{-1}$ с параметрами управления $\alpha_{s1} = 2$; $\alpha_{s2} = 50$; $\alpha_{s3} = 0,2$; $\alpha_{\phi1} = 120$; $\alpha_{\phi2} = 100$; $\alpha_{\phi3} = 0,5$. Для анализа эффективности разработанного нелинейного закона управления проведем сравнение результатов моделирования с управлением, полученным на основе линеаризованной модели [15]:

$$u_{lin} = -\text{hsat}(\alpha_{s1} s + \alpha_{s2} \dot{s} + \alpha_{\phi1} \phi + \alpha_{\phi2} \dot{\phi}), \quad (18)$$

где $\alpha_{s1} = 6,95$; $\alpha_{s2} = 10,27$; $\alpha_{\phi1} = 61,13$; $\alpha_{\phi2} = 17,9$.

Установлено, что в режиме 1 качество управления, которое обеспечивает линейное управление (18), превосходит качество переходного процесса для управления (17) по квадратичному показателю (15). При увеличении начального отклонения угла маятника квадратичный показатель отклонения для управления (17) становится лучше, чем (18). В режиме 2 происходит потеря устойчивости системы под управлением (18), а разработанное управление (17) обеспечивает нормальное функционирование. Результаты численного моделирования представлены на рис. 1–4.

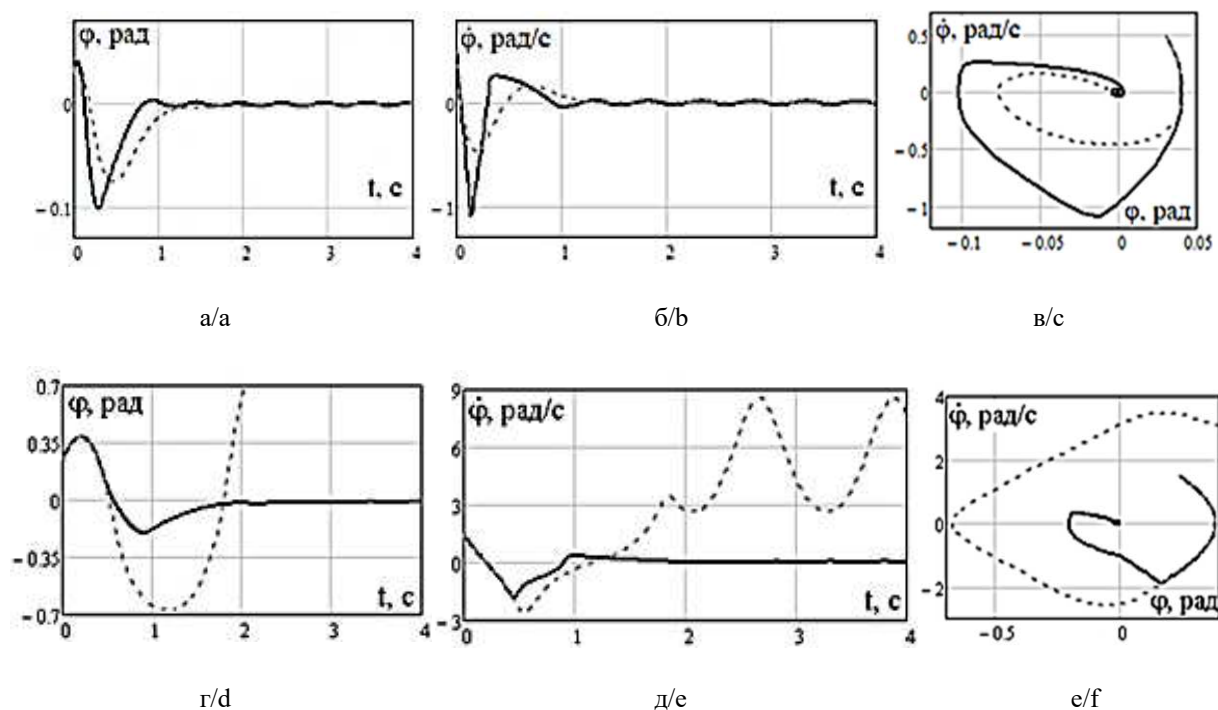


Рис. 1. Переходные процессы маятника (а, б (режим 1); г, д (режим 2)) и фазовая траектория управляемой системы (в (режим 1); е (режим 2)): сплошная линия – закон (17), пунктирная – закон (18) / Fig. 1. Transient processes of the pendulum (a, b (mode 1); d, e (mode 2)) and the phase trajectory of the controlled system (c (mode 1), f (mode 2)): solid line - law (17), dotted line - law (18)

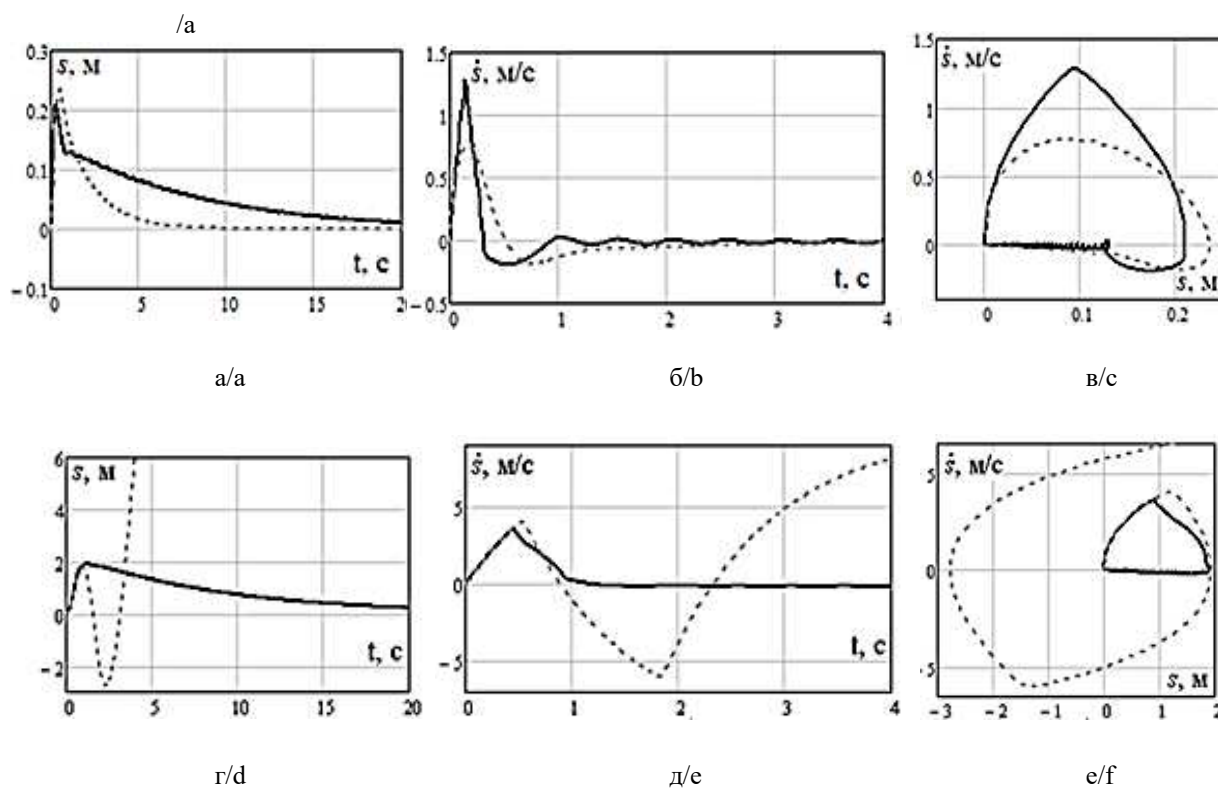


Рис. 2. Переходные процессы тележки (а, б (режим 1); г, д (режим 2)) и фазовая траектория управляемой системы (в (режим 1), е (режим 2)): сплошная линия – закон (17), пунктирная – закон (18) / Fig. 2. Transient processes of the trolley (a, b (mode 1), d, e (mode 2)) and the phase trajectory of the controlled system (c (mode 1), f (mode 2)): solid line - law (17), dotted line - law (18)

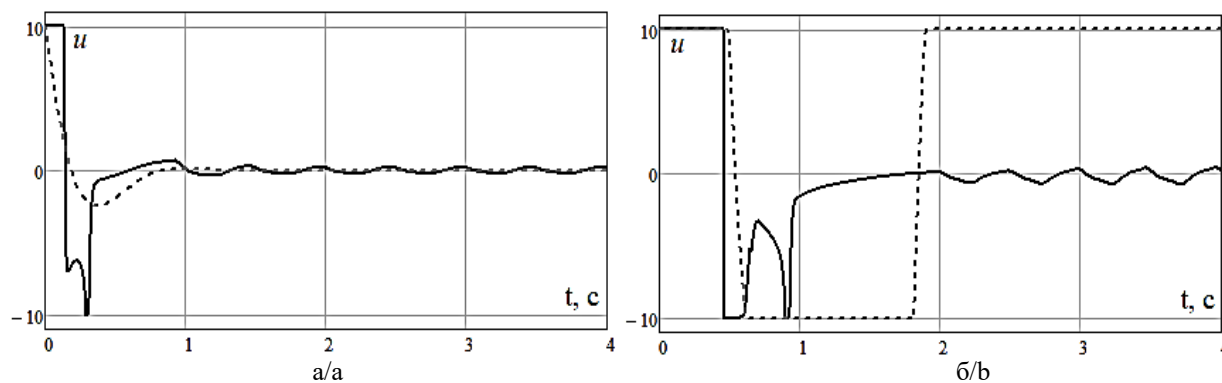


Рис. 3. Управление: а – в режиме 1; б – в режиме 2; сплошная линия – закон управления (17), пунктирная – закон (18) / Fig. 3. Control: a - in mode 1, b - in mode 2; solid line - control law (17), dotted line - law (18)

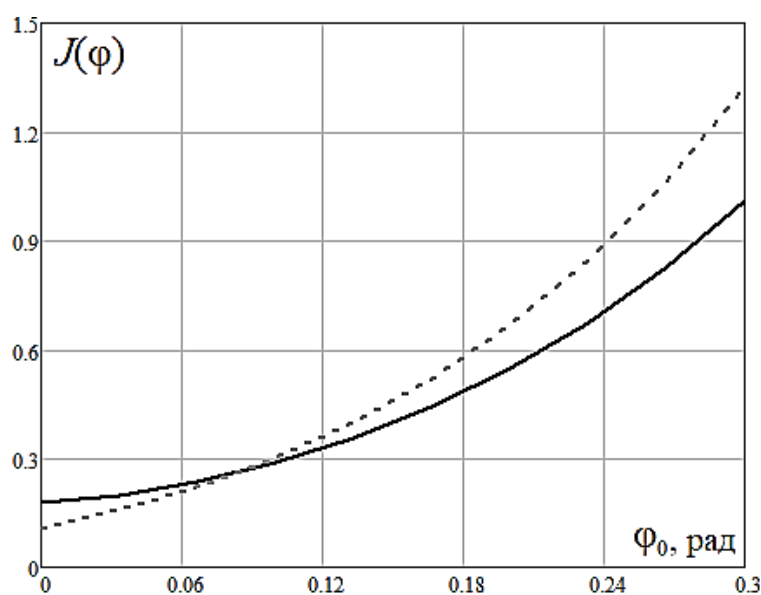


Рис. 4. Зависимость качества переходного процесса по квадратичному показателю от начального отклонения маятника при $\dot{\phi}_0 = 0,5$: сплошная линия – закон (17), пунктирная – закон (18) / Fig. 4. Quality dependence of transient process by quadratic criterion on the initial deviation of the pendulum at $\dot{\phi}_0 = 0,5$: solid line - law (17), dotted line - law (18)

Анализ результатов моделирования показывает, что полученный на основе предлагаемого метода закон управления позволяет увеличить область устойчивости до 40 % и повысить качество функционирования нелинейной динамической системы с дефицитом управляющих воздействий по квадратичному критерию в режиме больших отклонений в среднем на 15–20 % в сравнении с законом, полученным для линеаризованной модели.

Заключение

Предлагаемый в данной работе метод синтеза квазиоптимального нелинейного управления на основе условия максимума функции обобщенной мощности и принципа декомпозиции позволяет построить решение, обеспечивающее увеличение области устойчивости и качество переходного процесса по квадратичному показателю в сравнении с известными линейными алгоритмами.

Список источников

1. Матюхин В.И. Многорежимные законы управления движением твердого тела // Изв. РАН. МТТ. 2012. № 4. С. 21–31.

2. Пятницкий Е.С. Принцип декомпозиции в управлении механическими системами // Докл. АН СССР. 1988. Т. 300, № 2. С. 300–303.
3. Пятницкий Е.С. Синтез иерархических систем управления механическими и электромеханическими объектами на принципе декомпозиции. I // Автоматика и телемеханика. 1989. Т. 50, № 1. С. 87–99.
4. Пятницкий Е.С. Управляемость классов лагранжевых систем с ограниченными управлениями // Автоматика и телемеханика. 1996. Т. 57, № 12. С. 29–37.
5. Костоглотов А.А. Объединенный принцип Понтрягина – Гамильтона – Остроградского // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2007. № 6 (142). С. 13–17.
6. Андрашитов Д.С., Костоглотов А.А., Костоглотов А.И., Лазаренко С.В., Ценных Б.М. Универсальный метод синтеза оптимальных управлений нелинейными лагранжевыми динамическими системами // Инжен. вестн. Дона. 2014. № 1 (28). С. 2.
7. Костоглотов А.А., Лазаренко С.В. Метод квазиоптимального синтеза законов управления на основе редукции задачи Лагранжа к изопериметрической задаче с использованием асинхронного варьирования // Изв. РАН. Теория и системы управления. 2021. Т. 6, № 6. С. 3–12.
8. Костоглотов А.А., Костоглотов А.И., Лазаренко С.В. Объединенный принцип максимума в информационных технологиях анализа и синтеза. Ростов н/Д.: РТИСТ, 2010. 164 с.
9. Зехцер В.О., Костоглотов А.А. Синтез квазиоптимальных законов управления на основе принципа декомпозиции и редукции задачи Лагранжа к изопериметрической в условиях неопределенности // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2023. № 3 (219). С. 13–22.
10. Kostoglotov A.A., Lazarenko S.V., Pugachev I.V. Method of synthesis of multi-mode control under the expected uncertainty using the analysis of the phase-space decomposition on the basis of the generalized power maximum condition // AIP Conference Proceedings: Proceedings of XV International scientific-technical conference “Dynamics of technical systems” (DTS-2019). Rostov-on-Don: AIP Publ., 2019. Vol. 2188. P. 030005.
11. Костоглотов А.А., Лященко З.В., Лазаренко С.В. Синтез управления с адаптацией к неконтролируемым воздействиям в неустойчивом состоянии // Вестн. РГУПС. 2016. № 1 (61). С. 66–71.
12. Лурье А.И. Аналитическая механика. М.: Физматгиз, 1961. 824 с.
13. Пятницкий Е.С. Синтез иерархических систем управления механическими и электромеханическими объектами на принципе декомпозиции. II // Автоматика и телемеханика. 1989. Т. 50, № 2. С. 57–71.
14. Гантмахер Ф.П. Лекции по аналитической механике. М.: Наука, 1966. 300 с.
15. Кватернак Х., Сиван Р. Линейные оптимальные системы управления. М.: Мир, 1977. 650 с.
16. Колесников А.А. Метод синергетического синтеза системы управления колебаниями «перевернутого маятника на подвижной тележке» // Изв. ЮФУ. Техн. науки. 2011. № 6 (119). С. 110–117.

References

1. Matyukhin V.I. Multimode laws of motion control for solid body. *Izv. RAN. MTT = Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Solid Body Mechanics*. 2012;(4):21-31. (In Russ.).
2. Pyatnitsky E.S. Decomposition principle in the control of mechanical systems. *Dokl. AN SSSR = Reports of USSR Academy of Sciences*. 1988;300(2):300-303. (In Russ.).
3. Pyatnitsky E.S. Synthesis of hierarchical control systems for mechanical and electromechanical objects based on decomposition principle. I. *Avtomatika i telemekhanika = Automatics and Telemechanics*. 1989;50(1):87-99. (In Russ.).
4. Pyatnitsky E.S. Controllability of Lagrangian systems classes with limited controls. *Avtomatika i telemekhanika = Automatics and Telemechanics*. 1996;57(12):29-37. (In Russ.).
5. Kostoglotov A.A. Combined Pontryagin - Hamilton - Ostrogradsky principle. *Izv. vuzov. Sev.-Kavk. region. Estestv. nauki. = Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science*. 2007;(6):13-17. (In Russ.).
6. Andrashitov D.S., Kostoglotov A.A., Kostoglotov A.I., Lazarenko S.V., Tsennykh B.M. A universal method for the optimal controls synthesis of nonlinear lagrangian dynamic systems. *Inzhen. vestn. Dona = Engineering Bulletin of Don*. 2014;(1):2. (In Russ.).
7. Kostoglotov A.A., Lazarenko S.V. Method of quasi-optimal synthesis of control laws based on the reduction of the Lagrange problem to an isoperimetric problem using asynchronous variation. *Izv. RAN. Teoriya i sistema upravleniya = Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Control Theory and Systems*. 2021;6(6):3-12. (In Russ.).
8. Kostoglotov A.A., Kostoglotov A.I., Lazarenko S.V. *Combined maximum principle in information technologies of analysis and synthesis*. Rostov-on-Don: Rostov Technological Institute of Service and Tourism Press; 2010. 164 p. (In Russ.).
9. Zekhtser V.O., Kostoglotov A.A. Synthesis of quasi-optimal control laws based on the principle of decomposition and reduction of the Lagrange problem to an isoperimetric one under uncertainty. *Izv. vuzov. Sev.-*

Kavk. region. Estestv. nauki. = Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science. 2023;(3):13-22. (In Russ.).

10. Kostoglotov A.A., Lazarenko S.V., Pugachev I.V. Method of synthesis of multi-mode control under the expected uncertainty using the analysis of the phase-space decomposition on the basis of the generalized power maximum condition. AIP Conference Proceedings: Proceedings of XV International scientific-technical conference “Dynamics of technical systems” (DTS-2019). Rostov-on-Don: AIP Publ.; 2019;2188:030005.

11. Kostoglotov A.A., Lyaschenko Z.V., Lazarenko S.V. Synthesis of control with adaptation to uncontrolled influences in an unstable state. *Vestn. RGUPS = Bulletin of Rostov State Transport University.* 2016;(1):66-71. (In Russ.).

12. Lurie A.I. *Analytical mechanics.* Moscow: Fizmatgiz Publ.; 1961. 824 p. (In Russ.).

13. Pyatnitsky E.S. Synthesis of hierarchical control systems for mechanical and electromechanical objects based on decomposition principle. II. *Avtomatika i telemekhanika = Automatics and Telemechanics.* 1989;50(2):57-71. (In Russ.).

14. Gantmacher F.R. *Lectures on analytical mechanics.* Moscow: Nauka Publ.; 1966. 300 p. (In Russ.).

15. Kvakernaak H., Sivan R. *Linear optimal control systems.* Moscow: Mir Publ.; 1977. 650 p. (In Russ.).

16. Kolesnikov A.A. Synergetic synthesis method of the oscillation control system of “inverted pendulum on a movable trolley”. *Izv. YuFU. Tekhn. nauki = Bulletin of Southern Federal University. Technical Science.* 2011;(6):110-117. (In Russ.).

Информация об авторе

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

Information about the author

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

*Статья поступила в редакцию 01.04.2023; одобрена после рецензирования 24.05.2024; принята к публикации 04.07.2024.
The article was submitted 01.04.2023; approved after reviewing 24.05.2024; accepted for publication 04.07.2024.*

Научная статья

УДК 534.2

doi: 10.18522/1026-2237-2024-3-15-24

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ В ЗАДАЧЕ ИДЕНТИФИКАЦИИ ФОРМЫ ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА ПО ДИАГРАММЕ РАССЕЯНИЯ ЗВУКОВОГО ПОЛЯ

Наталья Кристиановна Мусатова

Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, Россия

musatova.nataliasfedu.ru@gmail.com

Аннотация. Строится математическая модель для обратной задачи восстановления формы и размера простейшей модели беспилотного летательного аппарата на основе акустического следа, который он оставляет. В целях упрощения расчетов в качестве возможных моделей исследуемых объектов для численных экспериментов выбраны четыре простейшие двумерные геометрические формы – окружность, эллипс, квадрат и четырехлепестная роза. Входные данные – диаграммы рассеяния звукового поля для каждого исследуемого контура, взятые из решения прямой задачи дифракции. Строится функционал невязки в виде разности между истинными данными о рассеянном звуковом поле, известными из условия задачи и полученными полуаналитическим методом с помощью использования метода граничных интегральных уравнений и интегрального уравнения Фредгольма второго рода при решении прямой задачи дифракции. Минимизация данного функционала приводит к решению обратной задачи дифракции. После дискретизации граничной кривой задача сводится к решению системы линейных алгебраических уравнений, из которой находится функция, численно описывающая форму объекта.

Ключевые слова: аэроакустика, беспилотный летательный аппарат, обратная задача дифракции, метод граничных интегральных уравнений, метод градиентного спуска

Для цитирования: Мусатова Н.К. Математическая модель в задаче идентификации формы летательного аппарата по диаграмме рассеяния звукового поля // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2024. № 3. С. 15–24.

Благодарности: автор выражает признательность своему научному руководителю, профессору ЮФУ М.А. Сумбатьяну за постановку задачи и обсуждение полученных результатов.

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

Original article

A MATHEMATICAL MODEL IN THE PROBLEM OF AIRCRAFT SHAPE IDENTIFICATION BASED ON A SOUND FIELD SCATTERED DIAGRAM

Natalia K. Musatova

Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia

musatova.nataliasfedu.ru@gmail.com

Abstract. This paper proposes a mathematical model to solve an inverse problem reconstructing the shape and size of possible models of an unmanned aerial vehicle based on its acoustic trail. To simplify the calculations, four two-dimensional simplest geometric shapes were chosen for numerical experiments - a circle, an

© Мусатова Н.К., 2024

ellipse, a square and a four-petal rose. The scattering diagrams of the sound field, as a solution to direct diffraction problem for each contour, were taken as the input data. A residual functional is constructed as a difference between the true data of the scattered sound field and the data obtained using the semi-analytical boundary integral equation method and the Fredholm integral equation of the second kind, in the direct diffraction problem. The minimization of this functional leads to the inverse diffraction problem. After discretizing the boundary curve, the problem is reduced to a linear algebraic equation system, from which a function is found that numerically describes the shape of the object.

Keywords: aeroacoustics, unmanned aerial vehicle, inverse diffraction problem, boundary integral equation method, gradient descent method

For citation: Musatova N.K. A Mathematical Model in the Problem of Aircraft Shape Identification Based on a Sound Field Scattered Diagram. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2024;(3):15-24. (In Russ.).

Acknowledgments: the author expresses gratitude to his scientific supervisor, SFedU professor M.A. Sumbatyan for setting the problem and discussing the results obtained.

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

Введение

Задача идентификации беспилотного летательного аппарата (БПЛА) сегодня представляет собой довольно актуальное исследовательское направление. Одним из важных факторов идентификации летательного аппарата является его акустическая заметность. В ходе полета БПЛА генерирует акустические волны, которые могут регистрироваться приемниками в виде специальных микрофонов. Источниками вышеупомянутых волн могут служить двигательные установки и лопасти воздушных винтов.

В мировой научной литературе автором не было обнаружено примеров восстановления конкретных размеров и форм областей по диаграмме рассеяния для задачи аэроакустики. В основном много работ посвящены задачам гидролокации – определению положения подводных объектов. Проблемам, связанным с воздушным пространством, уделяется значительно меньше внимания.

И даже среди задач гидролокации, наиболее часто встречающихся в литературе, имеются именно задачи активной гидролокации, т.е. когда в сторону объекта излучается сигнал и объект его отражает. В статье [1] представлена модель гидролокатора для обнаружения малых целей в подводном акустическом волноводе. В статье [2] предлагается метод акустической визуализации подводной цели. В работе [3] рассматривается рассеяние на трехмерной преграде в виде алюминиевой сферы, погруженной в пространство океанских отложений и озвученной акустическим источником. В работе [4] исследуют улавливание гидролокатором сложных целей (в том числе пластиковые объекты сантиметрового масштаба и оптические волокна), закопанных в отложениях.

Исследования, посвященные пассивной гидролокации, т.е. направленные на определение положения подводного объекта по звуковым сигналам, излучаемым самим объектом, более редки. В работе [5] изучается акустическое обнаружение кашалотов. Авторы выделяют щелчки, которые издают кашалоты, из общего потока данных. Интересный вариант пассивного обнаружения подводных источников звука – нахождение целей, излучающих звук, в районах, покрытых льдом. Для примера были проделаны эксперименты во льдах Арктики [6].

Близкий к настоящей задаче вопрос из области пассивной гидролокации рассмотрен в [7]. Здесь предлагается метод для обнаружения гребного винта судна по его акустическим сигналам. Задача похожа на настоящую тем, что мы также по акустическим сигналам пропеллеров идентифицируем саму область. Однако основное отличие состоит в том, что мы считаем задачу обнаружения уже решенной и решаем задачу идентификации обнаруженного объекта. А в работе [8], также из области задач гидролокации, как и в нашей задаче, особое внимание уделено форме и размеру цели. Авторы берут за основу распределение Вигнера – Вилля.

Наиболее близка к теме настоящего исследования работа [9]. В ней рассматривается трехмерная задача дифракции на объемном неоднородном теле. Главное отличие двух задач – мы рассматриваем дальнее поле, а в работе [9] – ближнее. В [10] дан большой обзор методов, применяемых к решению обратных задач дифракции на твердых телах. Также были найдены работы [11, 12], посвященные теоретическому описанию обратной задачи дифракции.

Стоит отметить, что большинство работ по этой тематике опубликовано в последние годы. Это свидетельствует о большом интересе к тематике акустической идентификации объектов.

Постановка задачи

Рассматривается объект, вблизи которого располагаются 4 источника звука. Будем считать, что такая комбинация является неким приближением летательного аппарата – квадрокоптера, где 4 источника звука – это 4 пропеллера. В результате решения прямой задачи дифракции получается набор данных, определяющих диаграмму рассеяния отраженного звукового поля. По этим данным необходимо определить форму и размер объекта. При проведении численных экспериментов рассматриваются 4 различные формы объекта.

Пусть известно расстояние от точки приемника до идентифицируемого объекта в дальней зоне (для определенности примем $R = 100$ м, волновое число $k = \frac{\omega}{c} = \frac{1000 \text{ рад/с}}{343 \text{ м/с}} \approx 3 \text{ м}^{-1}$, где

угловая скорость вращения винтов примерно соответствует использованному реальному микробиоту китайского производства). Возьмём в полярной системе координат набор из M углов: $\theta_n = \frac{2\pi n}{M}$, $n = \overline{1, M}$, которому соответствует набор из M расстояний $\rho(\theta_n)$, $n = \overline{1, M}$. Эта система определяет форму и размер восстанавливаемого объекта. Также нам известен набор величин акустического давления $p^{\text{sc}}(\theta_n)$, $n = \overline{1, M}$, по каждому направлению.

Имеем функционал невязки, который необходимо минимизировать, чтобы получить $\rho(\theta_n)$ – функцию, описывающую контур объекта:

$$F[\rho(\theta_n)] = \|A - A_0\|^2 = \sum_{k=1}^M [A(\rho_n) - A_0(\rho_n)]^2 \rightarrow \min, \quad (1)$$

$$\text{где } A_0(\rho_n) = A_0 \begin{pmatrix} \theta_1 \\ \dots \\ \theta_M \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} p_1^{\text{sc}} \\ \dots \\ p_M^{\text{sc}} \end{pmatrix} \text{ – истинная функция рассеяния, которая известна нам по усло-}$$

вию решения прямой задачи дифракции в виде массива размером $1 \times M$. $A(\rho_n)$ находится аналитическим способом:

$$A(\rho(\theta_n)) = \left| \int_l p(\xi) \frac{\partial G(\xi, \alpha)}{\partial n_\xi} dl \right| = \left| \frac{ikh}{4} \sum_{j=1}^M p_j \frac{(\mathbf{r}_{jn} \cdot \mathbf{n}_j)}{r_{jn}} H_1^{(1)}(kr_{jn}) dl_j \right|, \quad n = \overline{1, M}. \quad (2)$$

Здесь

$$\mathbf{r}_{jn} = |\xi - \alpha| = \{\rho_j \cos \theta_j - R \cos \theta_n; \rho_j \sin \theta_j - R \sin \theta_n\},$$

$$\mathbf{n}_j = \left\{ \frac{y_{j+1} - y_{j-1}}{hh_j}; -\frac{x_{j+1} - x_{j-1}}{hh_j} \right\}, \quad hh_j = \sqrt{(x_{j+1} - x_{j-1})^2 + (y_{j+1} - y_{j-1})^2}, \quad (3)$$

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

Метод граничных интегральных уравнений

Функция давления полного акустического поля $p(\xi)$ из уравнения (2) находится в явном виде. Ее получим, решив задачу дифракции с помощью метода граничных интегральных уравнений (ГИУ). Аналогичный подход представлен в работе [13]. Метод ГИУ уменьшает размерность задачи и сводит её к решению интегрального уравнения Фредгольма второго рода по граничному контуру неизвестной области: $p(\eta) - 2 \int_l \frac{\partial G(\xi, \eta)}{\partial n_\xi} p(\xi) dl = 2p^{\text{inc}}(\eta)$, $\eta \in l$.

Здесь η, ξ – внешняя точка и точка интегрирования соответственно. Функция Грина для двумерной задачи – это функция Ханкеля первого рода $G(\xi, \eta) = G(r) = \frac{i}{4} H_0^{(1)}(kr)$.

Производная функции Грина вычисляется как производная сложной функции: $\frac{\partial G}{\partial n_\xi} = \frac{\partial G}{\partial r} \cdot \frac{\partial r}{\partial n_\xi} = -\frac{ik}{4} H_1^{(1)}(kr) \cdot \frac{(\mathbf{r} \cdot \mathbf{n}_\xi)}{r}$.

После дискретизации граничной кривой и численного интегрирования с помощью метода прямоугольников имеем систему линейных алгебраических уравнений (СЛАУ)

$$p_k + \frac{ikh}{2} \sum_{m=1}^M p_m \frac{(\mathbf{r}_{mk} \cdot \mathbf{n}_m)}{r_{mk}} H_1^{(1)}(kr_{mk}) dl_m = 2p_k^{\text{inc}}.$$

Здесь величины нормали к контуру в точке ξ , т.е. величины \mathbf{n}_m и элементарной длины дуги dl_m вычисляются аналогично формуле (3). А расстояние между внешней точкой и точкой интегрирования равно

$$\mathbf{r}_{mk} = |\xi - \eta| = \{\rho_m \cos \theta_m - \rho_k \cos \theta_k; \rho_m \sin \theta_m - \rho_k \sin \theta_k\}.$$

Акустическое давление падающей волны состоит из вклада четырех источников звука:

$$2p_k^{\text{inc}} = \frac{i}{2} \sum_{j=1}^4 H_0^{(1)}(kr_{kS_j}).$$

В результате решения данной СЛАУ получаем функцию полного давления на контуре

$$p = \begin{pmatrix} p_1 \\ \dots \\ p_M \end{pmatrix}, \text{ которую в явном виде подставляем в формулу для } A(\rho) \text{ (2).}$$

Градиентный спуск для минимизации функционала

В итоге на каждой итерации решается прямая задача дифракции. Результатом ее решения является набор значений давления на контуре p_k , $k = \overline{1, M}$, зависящих от функции контура ρ_k . Эти значения затем подставляются в формулу (2) для рассеянного поля. Результатом также является набор значений рассеянного поля в каждой точке в дальней зоне $A(\rho_m)$, $m = \overline{1, M}$. Затем эти значения подставляются в функционал (1).

Задача минимизации функционала решается при помощи метода градиентного спуска. Для первых двух итераций подбираются произвольным образом $\rho[0]$ и $\rho[1]$ как два круга, правдоподобных по размеру, однако затем они корректируются, исходя из дальнейшей работы метода градиентного спуска. Для последующих итераций применяется следующая формула:

$$\rho[i+1] = \rho[i] - \varepsilon \cdot \text{grad}(F[i]), \quad i = \overline{2, M-1},$$

где ε – параметр, определяющий скорость работы градиентного спуска.

Так как функционал задан в дискретном виде, можем записать его градиент следующим образом: $\text{grad}(F[i]) = \lim_{\Delta\rho \rightarrow 0} \frac{F(\rho + \Delta\rho) - F(\rho)}{\Delta\rho}$.

На каждом шаге итерационного процесса для каждого направления θ_n берется малая величина $\Delta\rho$ и оценивается ее вклад в функционал F , т.е. вычисляется градиент функционала. Этот градиент указывает направление движения для функции $\rho(\theta_n)$ в сторону минимальной ошибки. Вычисление среднеквадратической ошибки на каждом шаге позволяет понять, в какой момент достигнута ошибка, достаточно малая, чтобы прервать итерационный процесс.

Численные эксперименты

Первый пример восстановления – окружность радиуса 1 м (рис. 1.1а). В качестве первых двух итераций взяты окружности радиусов 0,8 и 0,9 м соответственно. Координаты точек источника – (1,2;0), (0;1,2), (-1,2;0), (0;-1,2).

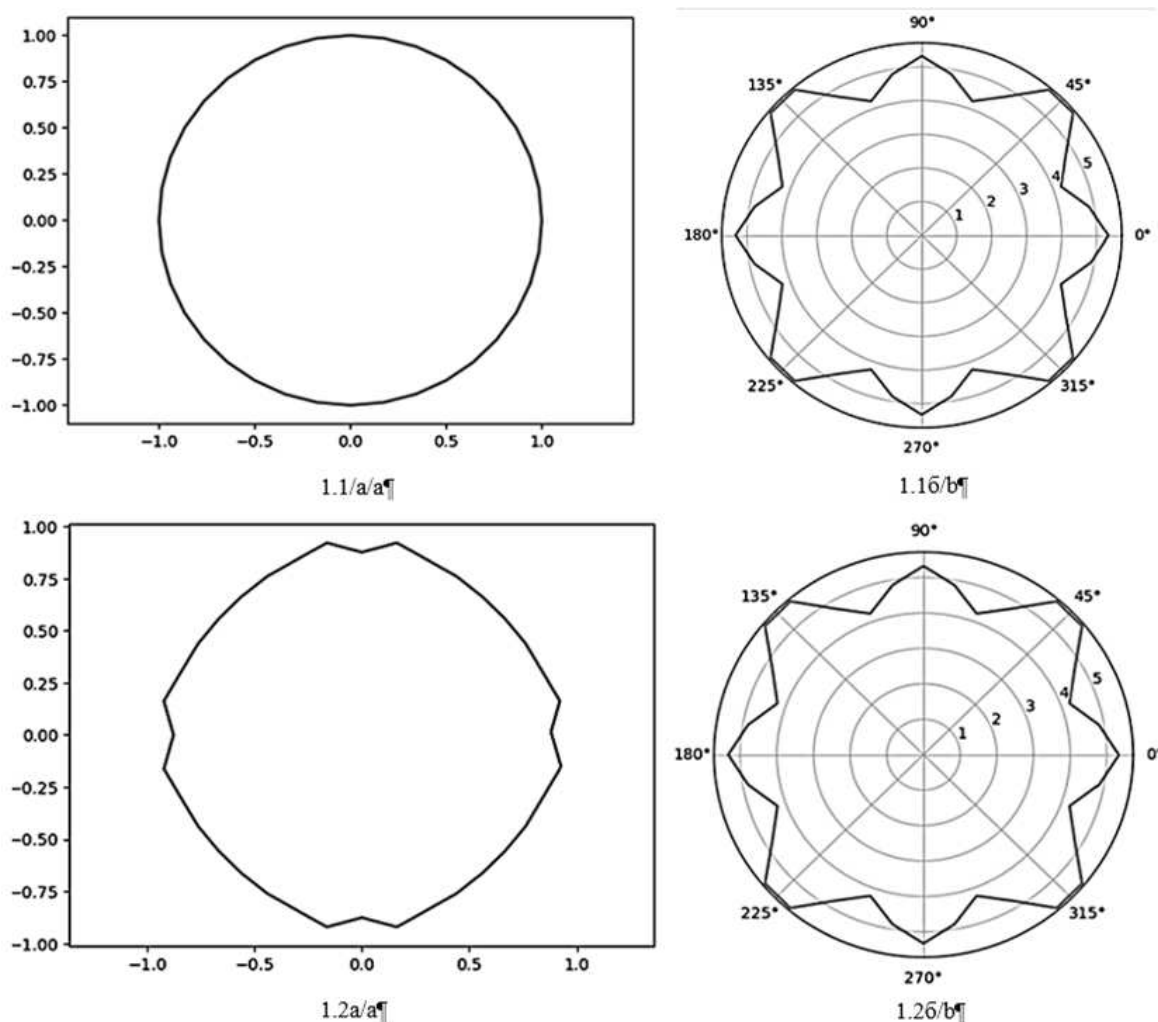


Рис. 1. Пример 1. Вверху (рис. 1.1) – исходный контур объекта (а) в виде окружности и его диаграмма рассеяния (b). Внизу (рис. 1.2) – восстановленный контур (а) и его диаграмма рассеяния (b) / Fig. 1. Example 1. Fig. 1.1 - the initial contour of a circle (a) and its scatter diagram (b); Fig. 1.2 is the reconstructed contour (a) and its scatter diagram (b)

В качестве метрики оценки качества работы градиентного спуска взята среднеквадратичная ошибка (mean squared error – MSE). Предельное значение выбрано равным $2 \cdot 10^{-2}$. На 143-й итерации оно было достигнуто: $MSE=0,01993111$. Восстановленный контур по форме близок к окружности, и размер восстановлен достаточно точно (рис. 1.2а). Диаграммы рассеяния для исходного контура и восстановленного визуально абсолютно идентичны.

Второй пример – эллипс с большой и малой полуосями, равными 1 и 0,5 м соответственно (рис. 2.1а). Первые две итерации – окружности с радиусом 0,5 и 0,6 м. Координаты точек источника, как и в первом примере, (1,2;0), (0;1,2), (-1,2;0), (0;-1,2). В ходе итерационного процесса контур приобрел черты эллипса – вытянулся по горизонтали. На 405-й итерации достигнута минимальная ошибка $MSE=0,01992888$. Размер восстановленной области соответствует действительной, форма немного отличается от исходной и имеет некие точки, которые выбиваются из общей эллипсоидной формы (рис. 2.2а). Диаграммы рассеяния для исходного контура и восстановленного также идентичны (рис. 2.1б и 2.2б).

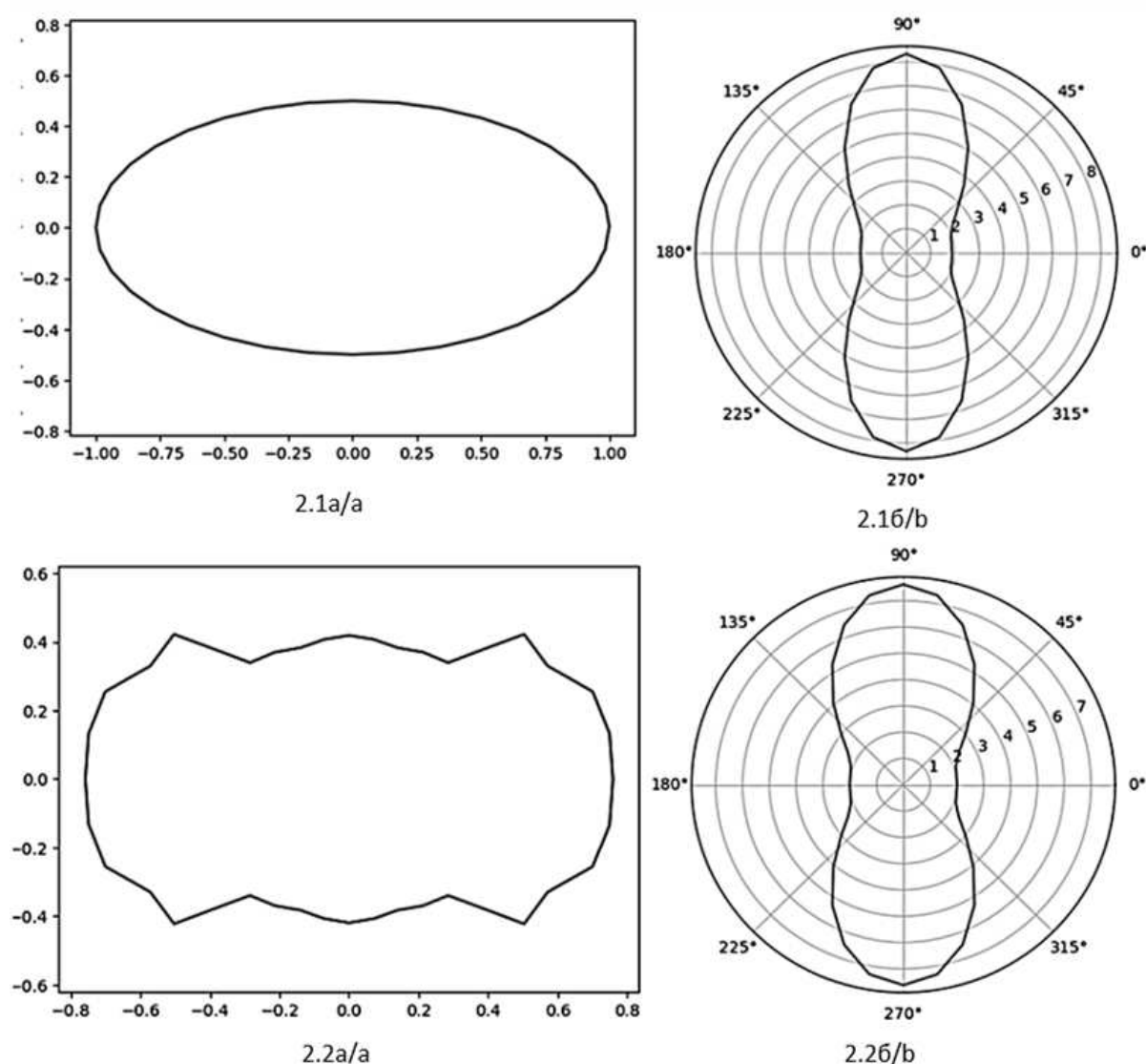


Рис. 2. Пример 2. Вверху (рис. 2.1) – исходный контур объекта (а) в виде эллипса и его диаграмма рассеяния (б). Внизу (рис. 2.2) – восстановленный контур (а) и его диаграмма рассеяния (б)
 / Fig. 2. Example 2. Fig. 2.1 is the original contour of an ellipse (a) and its scatter diagram (b);
 Fig. 2.2 is the reconstructed contour (a) and its scatter diagram (b)

Третий пример восстановления – квадрат со стороной, равной 2 м (рис. 3.1а). Первые две итерации – окружности радиусов 1,1 и 1,0 м. Координаты точек источника – (1,2;0), (0;1,2), (-1,2;0), (0;-1,2). На 218-й итерации ошибка составляет $MSE=0,01994738$. Размер угадан достаточно точно, форма близка к квадратной (рис. 3.2а). Также заметны точки, которые выбиваются из контура.

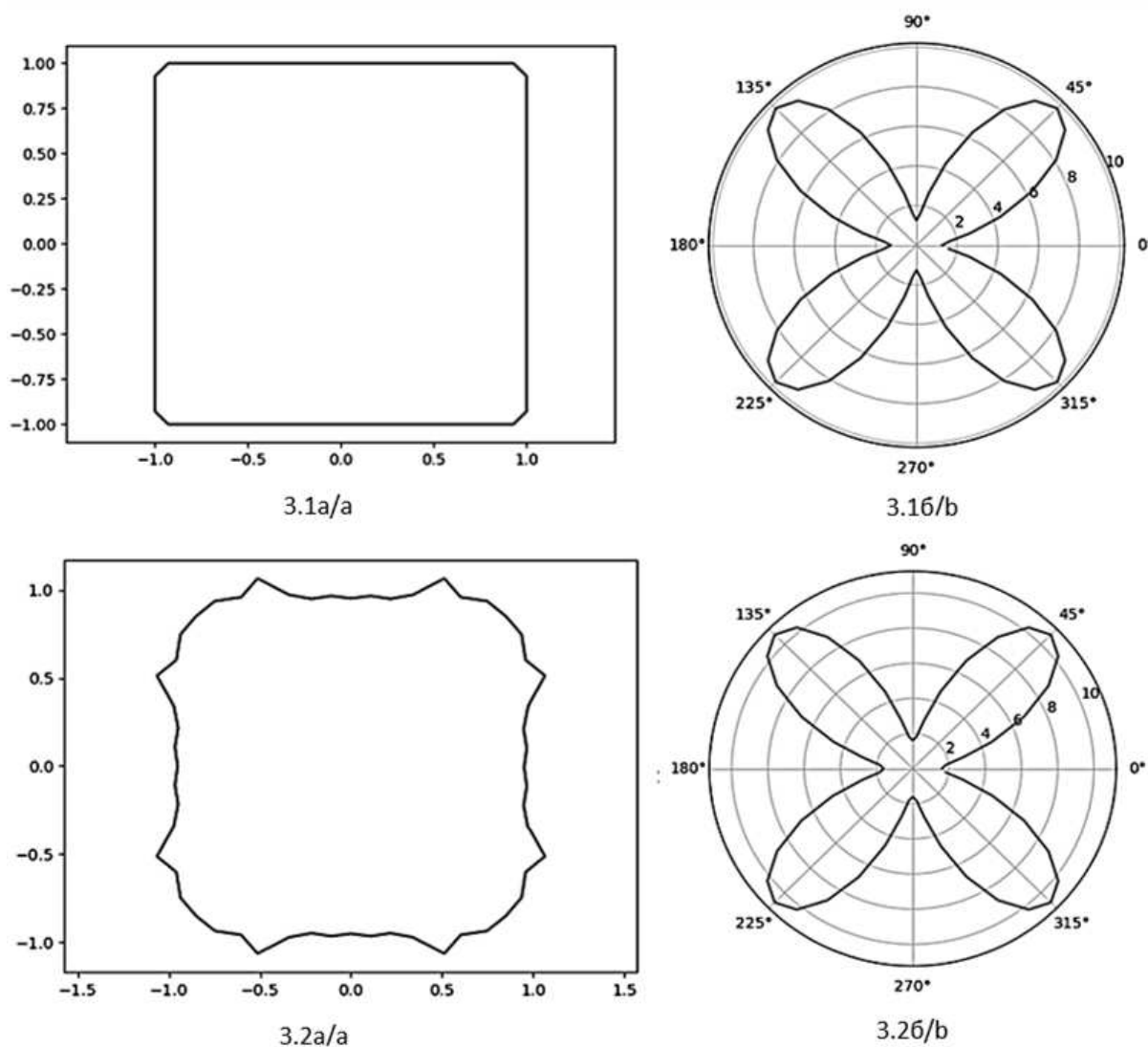


Рис. 3. Пример 3. Вверху (рис. 3.1) – исходный контур объекта (а) в виде квадрата и его диаграмма рассеяния (б). Внизу (рис. 3.2) – восстановленный контур (а) и его диаграмма рассеяния (б)
 / Fig. 3. Example 3. Fig. 3.1 is the initial contour of a square (a) and its scatter diagram (b).
 Fig. 3.2 is the reconstructed contour (a) and its scatter diagram (b)

Четвертый пример восстановления – четырехлепестковая роза (рис. 4.1а). Первые две итерации – окружности радиусов 0,7 и 0,8 м. Координаты точек источника – (1,0), (0,1), (-1,0), (0,-1). На 260-й итерации ошибка составляет $MSE=0,01995808$. Размер угадан достаточно точно, как и четырехлепестковая форма (рис. 4.2а), однако близость к исходному контуру и гладкость среди всех четырех примеров худшие.

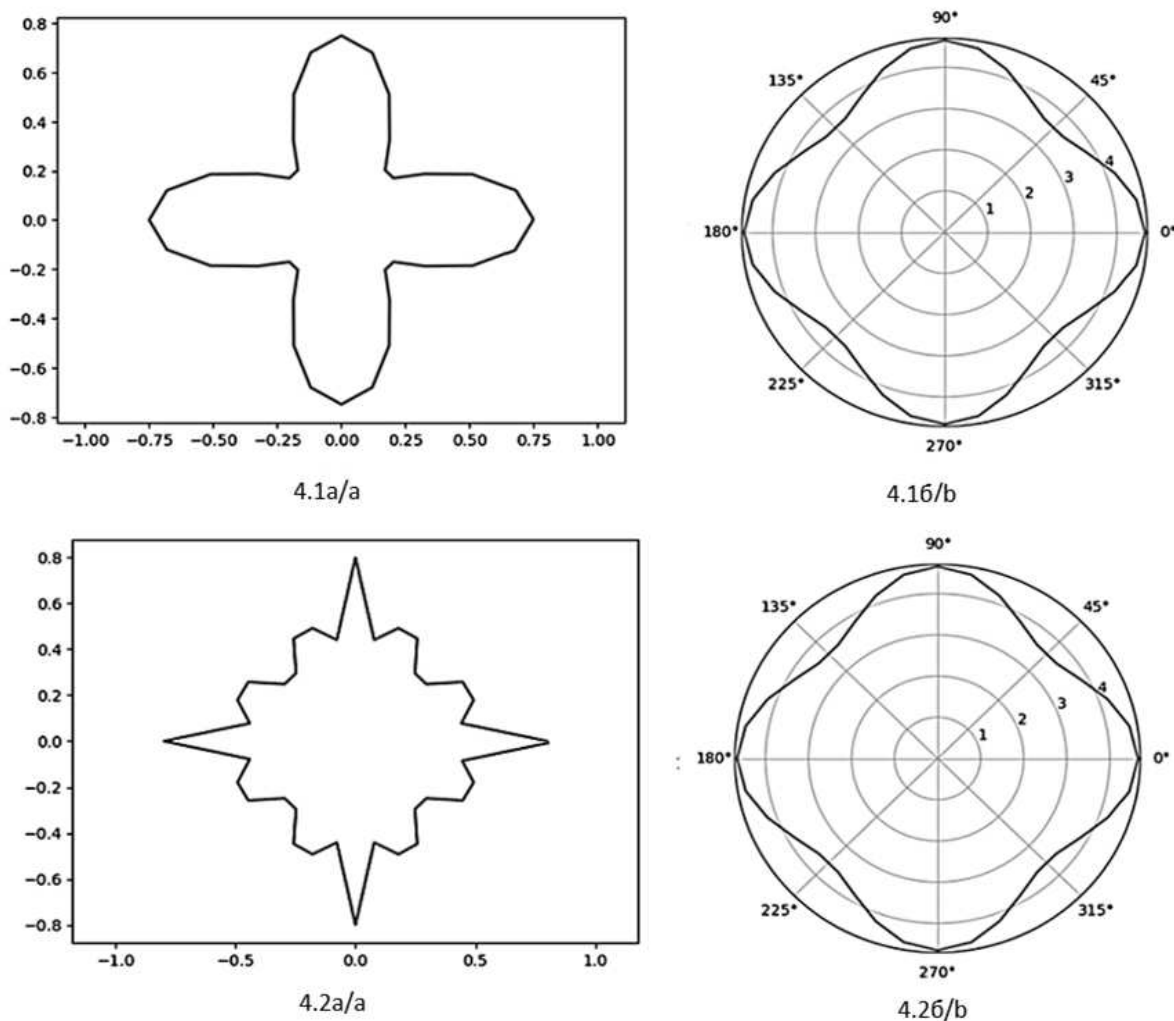


Рис. 4.1. Пример 4. Вверху (рис. 4.1) – исходный контур объекта (а) в виде четырехлепестковой розы и его диаграмма рассеяния (б). Внизу (рис. 4.2) – восстановленный контур (а) и его диаграмма рассеяния (б) / Fig. 4.1. Example 4. Fig. 4.1 is the initial contour of a four-peaks rose (a) and its scatter diagram (b); Fig. 4.2 is the reconstructed contour (a) and its scatter diagram (b)

Заключение

Анализ результатов исследования показал, что использование метода градиентного спуска в простейшей форме при решении обратной задачи дифракции оправдывает себя. Основной целью исследования было восстановление размеров объектов, и в этом отношении метод градиентного спуска продемонстрировал положительные результаты – размеры и формы объектов удалось успешно восстановить. Однако некоторое несоответствие между исходными и восстановленными областями объясняется стандартными трудностями, характерными для решения некорректных обратных задач. Во-первых, решение обратной задачи не является единственным, так как нескольким областям может соответствовать одна и та же диаграмма рассеяния. Здесь важно правильно подобрать как первоначальное приближение, так и коэффициент скорости работы градиентного спуска ε . Кроме того, из-за сложного М-мерного пространства функционала (в случае численных расчётов было взято 90-мерное пространство) мог быть найден локальный, а не глобальный минимум. Существует также возможность попадания в «овраг», что замедляет сходимость или даже приводит к ее полной остановке.

Таким образом, использование метода градиентного спуска оправдано для приблизительной реконструкции размеров простых двумерных контуров. Однако для достижения более точных результатов, создания более плавных контуров без осцилляций необходимо прибегнуть к использованию тех или иных методов регуляризации, применяемых при решении обратных задач. Это и станет предметом ближайших исследований автора в данном направлении. Заметим, что прямое применение метода градиентного спуска без использования регуляризации дает хотя и грубое, но качественно верное представление о типе объекта при его идентификации.

Список источников

1. Xiang Pan, Shu Hui, Xu Wen, Chapman N.R. TR-MIMO detection of a small target in a shallow water waveguide environment // *Applied Acoustics*. 2014. Vol. 79. P. 16–22.
2. Siwei Kou, Xi'an Feng. Angle-micro-Doppler frequency image of underwater target multi-highlight combining with sparse reconstruction // *Applied Acoustics*. 2022. Vol. 188. P. 108563. Doi: 10.1016/j.apacoust.2021.108563.
3. Lim R. Scattering by an obstacle in a plane-stratified poroelastic medium: Application to an obstacle in ocean sediments // *J. Acoust. Soc. Am.* 1994. Vol. 95(3). P. 1223–1244. Doi: 10.1121/1.408566.
4. Leighton T.G., Evans R.C.P. The detection by sonar of difficult targets (including centimetre-scale plastic objects and optical fibres) buried in saturated sediment // *Applied Acoustics*. 2008. Vol. 69(5). P. 438–463. Doi:10.1016/j.apacoust.2007.05.002.
5. Morrissey R.P., Ward J., DiMarzio N., Jarvis S., Moretti D.J. Passive acoustic detection and localization of sperm whales (*Physeter macrocephalus*) in the tongue of the ocean // *Applied Acoustics*. 2006. Vol. 67. P. 1091–1105. Doi: 10.1016/j.apacoust.2006.05.014.
6. Cheng Wang, Guangping Zhu, Jingwei Yin, Longxiang Guo, Yuzhe Zhang. Experimental study of passive detection of underwater targets across ice // *Applied Acoustics*. 2022. Vol. 191. P. 108672. Doi: 10.1016/j.apacoust.2022.108672.
7. Yongxing Song, Jingting Liu, Linlin Cao, Ning Chu, Dazhuan Wu. Robust passive underwater acoustic detection method for propeller // *Applied Acoustics*. 2019. Vol. 148. P. 151–161. Doi: 10.1016/j.apacoust.2018.12.024.
8. Yushuang Wu, Xiukun Li, Yang Wang. Extraction and classification of acoustic scattering from underwater target based on Wigner-Ville distribution // *Applied Acoustics*. 2018. Vol. 138. P. 52–59. Doi: 10.1016/j.apacoust.2018.03.026.
9. Евстигнеев П.О., Медведик М.Ю., Смирнов Ю. Г., Цупак А.А. Двухшаговый метод решения скалярной обратной трехмерной задачи дифракции на объемном неоднородном теле // *Изв. высших учебных заведений. Поволжский регион*. 2019. № 4 (52). С. 12–28. Doi: 10.21685/2072-3040-2019-4-2.
10. Добровольский Н.Н., Ларин Н.В., Скобельцын С.А., Толоконников Л.А. О решениях обратных задач дифракции звуковых волн // *Чебышевский сб.* 2019. № 20 (3). С. 220–245. Doi: 10.22405/2226-8383-2019-20-3-220-245.
11. Ramm A.G. On the Inverse Diffraction Problem // *J. of Mathematical Analysis and Applications*. 1984. Vol. 103. P. 139–141.
12. Буров В.А., Горюнов А.А. Обратная задача скалярной дифракции // *Вестн. МГУ. Физика. Астрономия*. 1980. № 21 (6). С. 44–49.
13. Сумбатян М.А., Мусатова Н.К. Излучение звука точечным источником вблизи поверхности летательного аппарата // *Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки*. 2020. № 1 (205). С. 17–25. Doi: 10.18522/1026-2237-2020-1-17-25.

References

1. Xiang Pan, Shu Hui, Xu Wen, Chapman N.R. TR-MIMO detection of a small target in a shallow water waveguide environment. *Applied Acoustics*. 2014;79:16-22.
2. Siwei Kou, Xi'an Feng. Angle-micro-Doppler frequency image of underwater target multi-highlight combining with sparse reconstruction. *Applied Acoustics*. 2022;188:108563. Doi: 10.1016/j.apacoust.2021.108563.
3. Lim R. Scattering by an obstacle in a plane-stratified poroelastic medium: Application to an obstacle in ocean sediments. *J. Acoust. Soc. Am.* 1994;95(3):1223-1244. Doi: 10.1121/1.408566.
4. Leighton T.G., Evans R.C.P. The detection by sonar of difficult targets (including centimetre-scale plastic objects and optical fibres) buried in saturated sediment. *Applied Acoustics*. 2008;69(5):438-463. Doi: 10.1016/j.apacoust.2007.05.002.

5. Morrissey R.P., Ward J., DiMarzio N., Jarvis S., Moretti D.J. Passive acoustic detection and localization of sperm whales (*Physeter macrocephalus*) in the tongue of the ocean. *Applied Acoustics*. 2006;67:1091-1105. Doi: 10.1016/j.apacoust.2006.05.014.
6. Cheng Wang, Guangping Zhu, Jingwei Yin, Longxiang Guo, Yuzhe Zhang. Experimental study of passive detection of underwater targets across ice. *Applied Acoustics*. 2022;191:108672. Doi: 10.1016/j.apacoust.2022.108672.
7. Yongxing Song, Jingting Liu, Linlin Cao, Ning Chu, Dazhuan Wu. Robust passive underwater acoustic detection method for propeller. *Applied Acoustics*. 2019;148:151-161. Doi: 10.1016/j.apacoust.2018.12.024.
8. Yushuang Wu, Xiukun Li, Yang Wang. Extraction and classification of acoustic scattering from underwater target based on Wigner-Ville distribution. *Applied Acoustics*. 2018;138:52-59. Doi: 10.1016/j.apacoust.2018.03.026.
9. Evstigneev R. O., Medvedik M. Yu., Smirnov Yu. G., Tsupak A. A. Two-step method for solving the scalar inverse three-dimensional problem of diffraction on a volumetric inhomogeneous body. *Izv. vysshikh uchebnykh zavedenii. Povolzhskii region = Proceedings of Higher Educational Institutions. Volga Region*. 2019;(4):12-28. Doi: 10.21685/2072-3040-2019-4-2. (In Russ.).
10. Dobrovolsky N. N., Larin N. V., Skobeltsyn S. A., Tolokonnikov L. A. On solutions of inverse problems of diffraction of sound waves. *Chebyshevskii sb. = Chebyshev Collection*. 2019;(20):220-245. Doi: 10.22405/2226-8383-2019-20-3-220-245. (In Russ.).
11. Ramm A.G. On the Inverse Diffraction Problem. *Journal of Mathematical Analysis and Applications*. 1984;103:139-141.
12. Burov V.A., Goryunov A.A. Inverse problem of scalar diffraction. *Vestn. MGU. Fizika. Astronomiya = Moscow University Physics Bulletin. Series 3. Physics. Astronomy*. 1980;(21):44-49. (In Russ.).
13. Sumbatyan M.A., Musatova N.K. Sound radiation by a point source near a surface of aircraft. *Izv. vuzov. Sev.-Kavk. region. Estestv. nauki = Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus region. Natural Science*. 2020;(1):17-25. Doi: 10.18522/1026-2237-2020-1-17-25. (In Russ.).

Информация об авторе

Н.К. Мусатова – аспирант, кафедра теоретической и компьютерной гидроаэродинамики, Институт математики, механики и компьютерных наук им. И.И. Воровича.

Information about the author

N.K. Musatova – Postgraduate Student, Department of Theoretical and Computational Hydroaerodynamics, Vorovich Institute of Mathematics, Mechanics and Computer Science.

*Статья поступила в редакцию 02.02.2024; одобрена после рецензирования 24.03.2024; принята к публикации 04.07.2024.
The article was submitted 02.02.2024; approved after reviewing 24.03.2024; accepted for publication 04.07.2024.*

Научная статья
УДК 519.634
doi: 10.18522/1026-2237-2024-3-25-33

СТРУЙНЫЙ ЭФФЕКТ ПРИ ВОЗНИКНОВЕНИИ ПРИСОЕДИНЕННОЙ КАВЕРНЫ ОТ СИСТЕМЫ ИМПУЛЬСИВНЫХ ДАВЛЕНИЙ

Михаил Викторович Норкин

Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, Россия
norkinmi@mail.ru

Аннотация. Рассматривается плоская задача о возникновении присоединенной каверны, обусловленной внезапным действием импульсивных давлений в некоторый начальный момент времени. Предполагается, что эти давления распределены на верхней части границы неподвижного кругового цилиндра, погруженного в жидкость. Течение жидкости в начальный момент времени и первоначальная зона отрыва находятся на основе решения задачи с односторонними ограничениями. В следующие моменты времени образуется присоединенная каверна, форма которой определяется на основе решения динамической задачи теории потенциальных течений идеальной несжимаемой жидкости со свободными границами. Главными неизвестными в ней являются потенциал скоростей, форма каверны, динамика точек отрыва и возмущение внешней свободной границы жидкости. Требуется изучить поставленную задачу на малых временах, уделив основное внимание поведению внутренней свободной границы жидкости вблизи точек отрыва. При исследовании данной задачи важную роль играет давление в каверне, которое создается искусственным путем. В случае небольших давлений внутренняя свободная граница жидкости вблизи точки отрыва расположена по разные стороны от этой точки. При этом концевая часть каверны напоминает струйку газа, направленную вдоль границы цилиндра в сторону жидкости.

Ключевые слова: идеальная несжимаемая жидкость, круговой цилиндр, импульсивные давления, присоединенная каверна, внутренняя свободная граница, малые времена, асимптотика, динамика точек отрыва, число кавитации

Для цитирования: Норкин М.В. Струйный эффект при возникновении присоединенной каверны от системы импульсивных давлений // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2024. № 3. С. 25–33.

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

Original article

JET EFFECT WHEN AN ATTACHED CAVITY ARISES FROM A SYSTEM OF PULSE PRESSURE

Mikhail V. Norkin

Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia
norkinmi@mail.ru

Abstract. We consider the plane problem of the emergence of an attached cavity caused by the sudden action of impulsive pressures at some initial time. It is assumed that these pressures are distributed on the upper part of the boundary of a stationary circular cylinder immersed in liquid. A problem with unilateral constraints is formulated, on the basis of which the flow of liquid at the initial moment of time and the initial zone of separation of liquid particles are determined. At the next moments of time, an attached cavity is formed, the shape of which is determined based on the solution of the dynamic initial-boundary value problem of the theory of potential flows

© Норкин М.В., 2024

of an ideal incompressible fluid with free boundaries. The main unknowns in it are the velocity potential, the shape of the cavity, the dynamics of the separation points, and the perturbation of the external free boundary of the liquid. It is required to study the posed problem at short times, focusing on the behavior of the internal free boundary of the liquid near the separation points. When studying this problem, pressure in the cavern, which is created artificially, plays an important role. At low pressures, the internal free boundary of the liquid near the separation point is located on opposite sides of this point. In this case, the end part of the cavity resembles a stream of gas directed along the boundary of the cylinder towards the liquid.

Keywords: ideal incompressible fluid, circular cylinder, impulsive pressures, attached cavity, internal free boundary, small times, asymptotics, dynamics of separation points, cavitation number

For citation: Norkin M.V. Jet Effect When an Attached Cavity Arises from a System of Pulse Pressure. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2024;(3):25-33. (In Russ.).

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

При резко нестационарном взаимодействии твердых тел с жидкостью во многих случаях происходит отрыв частиц жидкости от поверхности тела и образуется присоединенная каверна [1]. Асимптотический анализ таких задач на малых временах показывает, что внутренняя свободная граница жидкости вблизи точки отрыва не всегда расположена по одну сторону от этой точки. Так, например, при исследовании динамических задач удара решения типа пограничного слоя строились только при больших числах Фруда (порядка единицы и выше), где внутренняя свободная граница находилась по одну сторону от каждой точки отрыва [2–5]. При этом отмечалось, что при уменьшении числа Фруда возникает такое критическое значение этого параметра, при котором внутренняя свободная граница пересекает поверхность тела под прямым углом. Естественно предположить, что при дальнейшем уменьшении числа Фруда небольшая часть свободной границы окажется по другую сторону от точки отрыва. Однако этот случай не был подробно исследован.

В настоящей работе описанная ситуация изучается на примере задачи, в которой кавитация является следствием внезапного действия импульсивных давлений, распределенных вдоль верхней части границы неподвижного кругового цилиндра, погруженного в жидкость. Предполагается, что импульсивные давления пропорциональны ординатам точек границы цилиндра. В результате действия таких давлений вначале образуется первоначальная зона отрыва частиц жидкости на поверхности цилиндра, а затем начинает формироваться присоединенная каверна, ограниченная внутренней свободной границей жидкости и поверхностью тела. На форму каверны вблизи точки отрыва существенное влияние оказывает давление газа в каверне, которое создается искусственным путем. При больших давлениях в каверне точки отрыва движутся в разные стороны. При этом внутренняя свободная граница находится по одну сторону от данной точки (свободная граница подходит к точке отрыва по касательной, не опережая ее). При уменьшении давления в каверне вначале возникает прямой угол, а затем наблюдается переход небольшой части свободной границы по другую сторону от точки отрыва. При этом часть каверны, расположенная с другой стороны от точки отрыва, напоминает струйку газа, направленную вдоль границы тела в сторону жидкости. Важно отметить, что на достаточно малых временах указанный струйный эффект исчезает и свободная граница вблизи точки отрыва ведет себя как квадратный корень из отклонения угловой координаты этой точки (возникает прямой угол). Таким образом, струйный эффект проявляет себя только в следующем приближении по времени. По этой причине во многих случаях он оказывается весьма незначительным при малых временах.

Аналогичная ситуация имеет место в задачах удара плавающего тела (при малых числах Фруда или небольших давлениях в каверне). Интересно отметить, что при малых временах наличие прямого угла в задачах удара подтверждается экспериментально [6]. Кавитационные струи возникают во многих задачах. В частности, отметим задачу удара волны о стену с образованием воздушной каверны [7]. Общие принципы кавитационных течений при взаимодействии твердых тел с жидкостью изложены в [8, 9].

Постановка задачи

Рассматривается неподвижный круговой цилиндр, полностью погруженный в идеальную несжимаемую тяжелую жидкость. Предполагается, что в некоторый начальный момент времени на верхней части границы тела действует внезапно приложенная система импульсивных давлений. В результате этого возникает отрыв жидкости от тела и образуется присоединенная каверна. Требуется изучить динамику каверны на малых временах, уделив основное внимание построению решений типа пограничного слоя вблизи точек отрыва. Течение жидкости, возникающее из состояния покоя в результате действия системы импульсивных давлений, будет потенциальным. Причем потенциал скоростей $\Phi = \Phi(x, y, t)$ определяется на основе решения динамической смешанной краевой задачи теории потенциальных течений идеальной несжимаемой жидкости со свободными границами (рис. 1) [1–5].

$$\Delta\Phi = 0, \quad R \in \Omega(t), \quad \frac{\partial\Phi}{\partial n} = 0, \quad R \in S_{11}(t),$$

$$\frac{\partial\Phi}{\partial t} + 0,5(\nabla\Phi)^2 + y - H - 0,5\chi = 0,$$

$$R \in S_{12}(t),$$

$$\frac{\partial\Phi}{\partial r} = r^{-2} \frac{\partial\eta}{\partial\theta} \frac{\partial\Phi}{\partial\theta} + \frac{\partial\eta}{\partial t}, \quad R \in S_{12}(t),$$

$$\frac{\partial\Phi}{\partial t} + 0,5(\nabla\Phi)^2 + \xi(x, t) = 0, \quad R \in S_2(t), \quad (1)$$

$$\frac{\partial\Phi}{\partial y} = \frac{\partial\xi}{\partial x} \frac{\partial\Phi}{\partial x} + \frac{\partial\xi}{\partial t}, \quad R \in S_2(t),$$

$$\nabla\Phi \rightarrow 0, \quad R \rightarrow \infty,$$

$$\Phi(x, y, 0) = \Phi_0(x, y), \quad \eta(\theta, 0) = 0,$$

$$\xi(x, 0) = 0,$$

$$\Delta\Phi_0 = 0, \quad R \in \Omega(0); \quad \Phi_0 = 0, \quad y = H, \quad (2)$$

$$\frac{\partial\Phi_0}{\partial n} = 0, \quad R \in S_{11}(0); \quad \Phi_0 \leq -P_t, \quad R \in \sigma, \quad (3)$$

$$\frac{\partial\Phi_0}{\partial n} \geq 0, \quad \Phi_0 = -P_t, \quad R \in S_{12}(0), \quad (4)$$

$$\nabla\Phi_0 \rightarrow 0, \quad R \rightarrow \infty. \quad (5)$$

Математическая постановка задачи (1)–(5) формулируется в безразмерных переменных, которые вводятся с помощью соотношений (штрихами помечаются размерные величины)

$$t' = \frac{a}{\sqrt{ga}} t, \quad x' = ax, \quad y' = ay, \quad \Phi' = a\sqrt{ga}\Phi, \quad p' = \rho g a p, \quad \text{где } a \text{ – радиус цилиндра; } g \text{ – ускорение}$$

силы тяжести; ρ – плотность жидкости; p – давление.

Характерным физическим параметром задачи является число кавитации $\chi = 2 \frac{P_a - P_c}{\rho g a}$, где

P_a – атмосферное давление; P_c – давление в каверне.

В статье также используются следующие обозначения: $\Omega(t)$ – область течения жидкости; $S_{11}(t)$ – часть поверхности цилиндра, на которой не происходит отрыва частиц жидкости; $S_{12}(t)$ – внутренняя свободная граница жидкости (граница каверны); $S_2(t)$ – внешняя свободная поверхность ($y = H$ – ее невозмущенный уровень); $\eta = \eta(\theta, t)$, $\xi = \xi(x, t)$ – возмущения внутренней и внешней свободных границ жидкости; $P_t = \varepsilon y$ – импульсивное давление; r, θ – полярные координаты; R – радиус-вектор с координатами (x, y) .

На внутренней и внешней свободных границах $R = 1 + \eta(\theta, t)$, $y = H + \xi(x, t)$ задаются динамические и кинематические условия. В точках пересечения внутренней свободной границы

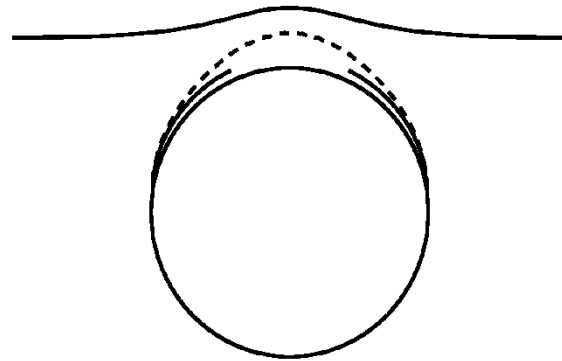


Рис. 1. Постановка задачи. Форма присоединенной каверны при $\chi = -3$. Согласование регулярных погранслоевых решений с внешним разложением / Fig. 1. Formulation of the problem. The shape of the attached cavity at $\chi = -3$. Coordination of regular boundary layer solutions with external decomposition

жидкости с поверхностью цилиндра (в точках отрыва) ставится условие Кутты – Жуковского, означающее, что скорость жидкости в этих точках должна быть конечной.

Потенциал скоростей Φ_0 и первоначальная зона отрыва $S_{12}(0)$ находятся на основе решения задачи с односторонними ограничениями, которая формулируется по аналогии с классической моделью удара с отрывом [1]. В такой постановке начальная зона отрыва частиц жидкости $S_{12}(0)$ оказывается уже, чем область задания импульсивных давлений $S_{12}(0) \cup \sigma$. Здесь через σ обозначена часть смоченной поверхности тела $S_{11}(0)$, примыкающая к зоне отрыва $S_{12}(0)$, где не происходит отрыва частиц жидкости. В силу неизвестности зоны отрыва задача (2)–(5) является нелинейной и относится к классу задач со свободными границами. Условие типа неравенства в (3) означает, что в зоне σ действующие со стороны тела аналогичные давления не превышают импульсивные давления, возникающие в жидкости. Неравенство в (4) говорит о том, что жидкие частицы на этой части границы могут двигаться только в сторону жидкости. Обратим внимание на свойство регулярности решения задачи с односторонними ограничениями, состоящее в непрерывности первых производных потенциала Φ_0 в каждой точке отрыва. Отсюда следует выполнение условия Кутты – Жуковского в главном асимптотическом приближении по времени.

Асимптотический анализ при малых временах

Далее кратко приведены основные этапы построения начальной асимптотики решения задачи (1)–(5). Здесь так же, как и в [3–5], разложения основных физических величин по малому времени проводятся не для исходной, а для преобразованной задачи. С этой целью задача (1)–(5) записывается в полярных координатах и делается следующая замена переменной по угловой координате: $\alpha = \frac{\pi - 2\theta_{s1}}{\pi - 2\theta_{s1}(t)} [\theta - \theta_{s1}(t)] + \theta_{s1}$, где $\theta_{s1}(t)$, $\pi - \theta_{s1}(t)$ – угловые координаты точек

отрыва в момент времени t , а θ_{s1} , $\pi - \theta_{s1}$ – в начальный момент времени.

Решение преобразованной задачи разыскивается в виде асимптотических разложений по малому времени:

$$\varphi = \varphi_0(\alpha, r) + t\varphi_1(\alpha, r) + \dots, \quad (6)$$

$$\zeta = t\zeta_0(\alpha) + t^2\zeta_1(\alpha) + \dots, \quad (7)$$

$$\xi = t\xi_0(x) + t^2\xi_1(x) + \dots, \quad (8)$$

$$\theta_{s1}(t) = \theta_{s1} + c_1t + \dots,$$

где введены обозначения: $\varphi(\alpha, r, t) = \Phi(\theta(\alpha, t), r, t)$, $\zeta(\alpha, t) = \eta(\theta(\alpha, t), t)$.

Главное приближение в (6) определяется на основе решения задачи с односторонними ограничениями (2)–(5), где положено $x = r \cos \alpha$, $y = r \sin \alpha$. После подстановки такого проекта решения в преобразованную задачу осуществляется стандартная процедура переноса краевых условий с возмущенных участков границы области на их первоначально невозмущенный уровень. Затем приравниваются коэффициенты при одинаковых степенях малого времени. В результате для определения функций φ_0 , φ_1 возникают смешанные краевые задачи для уравнений Лапласа и Пуассона в первоначально невозмущенной области $\Omega(0)$. Задача для уравнения Пуассона сводится к задаче для уравнения Лапласа при помощи подстановки, предложенной в [4]:

$$\varphi_1 = c \frac{\partial \varphi_0}{\partial \alpha} \left(\alpha - \frac{\pi}{2} \right) + u, \quad c = -\frac{2c_1}{\pi - 2\theta_{s1}}, \quad \Delta u = 0, \quad R \in \Omega(0), \quad \frac{\partial u}{\partial n} = 0, \quad R \in S_{11}(0),$$

$$u = -0,5(\nabla \varphi_0)^2 - y + H + 0,5\chi, \quad R \in S_{12}(0), \quad u = -0,5 \left(\frac{\partial \varphi_0}{\partial y} \right)^2, \quad y = H, \quad \nabla u \rightarrow 0, \quad R \rightarrow \infty.$$

Обратим внимание на то, что функция u не зависит от коэффициента c_1 . Он определяется из условия регулярности функции φ_1 вблизи точки отрыва. Рассуждая здесь так же, как и в [2–5], придем к следующим равенствам:

$$c_1 = -\frac{a_2}{a_1}, \quad a_1 = \lim_{\alpha \rightarrow \theta_{s1}-0} \frac{\partial^2 \varphi_0}{\partial \alpha^2} \sqrt{\theta_{s1} - \alpha}, \quad a_2 = \lim_{\alpha \rightarrow \theta_{s1}-0} \frac{\partial u}{\partial \alpha} \sqrt{\theta_{s1} - \alpha}.$$

На этом заканчивается первый этап построения асимптотики на малых временах, состоящий в определении потенциала скоростей и динамики точек отрыва. Отметим, что полученное решение должно удовлетворять условию Кутты – Жуковского в точках отрыва и условию положительности давления на смоченной поверхности тела. Первое из этих условий выполняется в силу выбора коэффициента c_1 , а также на основании регулярности решения задачи с односторонними ограничениями. Второе условие проверяется уже после определения потенциала скоростей. Для наиболее интересных случаев, которые характеризуются тем, что внутренняя свободная граница расположена по разные стороны от точки отрыва, давление на смоченной поверхности тела оказывается выше, чем давление в каверне (в расчетах давление в каверне равно атмосферному давлению). При увеличении давления в каверне эта ситуация меняется. Однако и в этом случае давление на поверхности тела остается положительным в широком диапазоне изменения характерных величин.

Второй этап построения асимптотики состоит в определении форм свободных границ жидкости. В рассматриваемом асимптотическом приближении эти этапы разделяются. Для коэффициентов асимптотических разложений (7), (8) справедливы формулы ($x_\alpha = r \cos \alpha$, $y_\alpha = r \sin \alpha$)

$$\xi_0(x_\alpha) = \frac{\partial \varphi_0}{\partial y_\alpha}, \quad \xi_1(x_\alpha) = 0,5 \frac{\partial u}{\partial y_\alpha}, \quad \zeta_0(\alpha) = \frac{\partial \varphi_0}{\partial r},$$

$$2\zeta_1(\alpha) = \frac{\partial^2 \varphi_0}{\partial r \partial \alpha} \left[2(c_1 + c(\alpha - \theta_{s1})) - \frac{\partial \varphi_0}{\partial \alpha} \right] + \frac{\partial u}{\partial r} - \left(\frac{\partial \varphi_0}{\partial r} \right)^2 - \frac{\partial^2 \varphi_0}{\partial \alpha^2} \frac{\partial \varphi_0}{\partial r},$$

где производные вычисляются при $y_\alpha = H$ и $r = 1$.

Решения типа пограничного слоя

Анализ формулы (7) показывает, что при $\alpha \rightarrow \theta_{s1} + 0$ функция $\zeta_1(\alpha)$ ведет себя как $\text{const}(\alpha - \theta_{s1})^{-0,5}$. Следовательно, вблизи первой точки отрыва разложение (7) неприменимо. В этом случае необходимо построить решение, эффективное вблизи этой точки (решение типа пограничного слоя), и согласовать его с внешним разложением (7). Вначале проведем рассуждения в предположении, что граница каверны находится по одну сторону от точки отрыва. Рассмотрим преобразованное кинематическое уравнение внутренней свободной границы жидкости

$$\frac{\partial \varphi}{\partial r} = r^{-2} \frac{\partial \zeta}{\partial \alpha} \frac{\partial \varphi}{\partial \alpha} \left(\frac{\partial \theta}{\partial \alpha} \right)^{-2} + \frac{\partial \zeta}{\partial t} - \frac{\partial \zeta}{\partial \alpha} \left(\frac{\partial \theta}{\partial \alpha} \right)^{-1} \frac{\partial \theta}{\partial t}.$$

Подставляя (6) в это уравнение, используя асимптотические формулы, эффективные при малых значениях $\alpha - \theta_{s1}$ или при малых t (последняя формула)

$$\frac{\partial \varphi_0}{\partial r} \sim \beta \sqrt{\alpha - \theta_{s1}}, \quad \alpha \rightarrow \theta_{s1} + 0, \quad \frac{\partial \varphi_0}{\partial \alpha} \sim -\varepsilon \cos \theta_{s1}, \quad \frac{\partial \theta}{\partial t} \sim c_1; \quad \frac{\partial \theta}{\partial \alpha} \sim 1,$$

приведем рассматриваемое уравнение к виду

$$f(\alpha) = -\beta_1 \frac{\partial \zeta}{\partial \alpha} + \frac{\partial \zeta}{\partial t}, \quad \beta_1 = c_1 + \varepsilon \cos \theta_{s1},$$

$$f(\alpha) = \beta \sqrt{\alpha - \theta_{s1}}, \quad \alpha > \theta_{s1}. \tag{9}$$

Решение уравнения (9) будем искать в форме

$$\zeta(\alpha, t) = \beta t^\gamma F(\tau) + \dots, \quad \tau = \frac{\alpha - \theta_{s1}}{t^\delta}. \tag{10}$$

После подстановки (10) в (9) и переходу к погранслошной переменной τ приходим к соотношению, члены которого имеют следующие порядки малости по t : $t^{0,5\delta}$, $t^{\gamma-\delta}$, $t^{\gamma-1}$. В самой хорошей ситуации, когда все показатели равны, величины γ , δ определяются следующим образом: $\gamma = 1,5$, $\delta = 1$. Для нахождения функции $F(\tau)$ приходим к обыкновенному дифференциальному уравнению первого порядка с нулевым начальным условием и условием срачивания с внешним разложением на бесконечности

$$(\tau + \beta_1)F'(\tau) - 1,5F(\tau) = -\sqrt{\tau}, \quad (11)$$

$$F(0) = 0, \quad F(\tau) = \sqrt{\tau} + \frac{\beta_1}{4\sqrt{\tau}} + \dots, \quad \tau \rightarrow \infty.$$

Последнее условие получается путем перехода в (7) к погранслошной переменной τ и использования асимптотического поведения функций $\zeta_0(\alpha)$, $\zeta_1(\alpha)$ вблизи точки отрыва.

В случае $\beta_1 < 0$ решение задачи (11) имеет хорошо предсказуемую форму

$$F(\tau) = \frac{2}{3|\beta_1|} \tau^{1,5}, \quad 0 \leq \tau \leq |\beta_1|. \quad (12)$$

$$F(\tau) = \frac{2}{3|\beta_1|} \left[\tau^{1,5} - (\tau - |\beta_1|)^{1,5} \right], \quad |\beta_1| \leq \tau < \infty. \quad (13)$$

Построенное решение удовлетворяет дифференциальному уравнению (11), нулевому начальному условию и условию срачивания с внешним разложением. Обратим внимание на то, что соответствующая кривая подходит к точке отрыва по касательной, а условие срачивания выполняется с учетом всех найденных членов (первые два члена разложения функции (13) при $\tau \rightarrow \infty$ совпадают с соответствующими слагаемыми в условии срачивания).

Проведенные рассуждения позволяют говорить о полном решении поставленной задачи на малых временах при $\beta_1 < 0$. Однако представляют интерес и другие возможные варианты выбора величин γ , δ . Рассмотрим случаи, когда равными оказываются только два показателя степени, а слагаемое, отвечающее за третий показатель, имеет более высокий порядок малости по t : $0,5\delta = \gamma - \delta$, $0,5\delta = \gamma - 1$, $\gamma - \delta = \gamma - 1$. В первом случае решение соответствующей задачи Коши совпадает с формулой (12) при $\beta_1 < 0$ и отличается от (12) знаком минус при $\beta_1 > 0$ (в последнем случае кривая оказывается внутри круга). В третьем случае независимо от знака β_1 получается решение, тождественно равное нулю. Поэтому остается только второй случай, который сводится к дифференциальному уравнению ($\gamma = 0,5\delta + 1$, $0 < \delta < 1$) $\delta \tau F'(\tau) - \gamma F(\tau) = -\sqrt{\tau}$ с общим решением $F(\tau) = \sqrt{\tau} + c\tau^{\gamma/\delta}$.

Здесь нулевое начальное условие выполняется при любой постоянной c , а условие срачивания – только при $c = 0$. В результате приходим к окончательному выражению для возмущения свободной границы жидкости вблизи точки отрыва

$$\zeta(\alpha, t) = \beta t^\gamma \sqrt{\tau} = \beta t \sqrt{\alpha - \theta_{s1}}. \quad (14)$$

Отметим, что в исходных переменных получается формула, не зависящая от параметра δ .

Случаи, когда два показателя степени оказываются больше третьего, не приводят к новым решениям.

Таким образом, построены два решения типа пограничного слоя: (10), (12), (13) при $\gamma = 1,5$, $\delta = 1$ и (14). Решение (14), имеющее вид квадратного корня, соответствует главному приближению по времени (условие срачивания выполняется только в главном приближении), а решение (10), (12), (13), подправляющее (14) вблизи точки отрыва и на некотором удалении от нее, отвечает уже следующему приближению. Оно работает в более широком временном диапазоне и переходит в (14) при $t \rightarrow 0$. Сравнение этих решений на малых временах показано на рис. 2. Как видно, различие между ними весьма незначительное.

Теперь перейдем к более сложному случаю $\beta_1 > 0$, где не удастся найти подходящее решение уравнения (11), удовлетворяющее нулевому начальному условию (так как соответствующая кривая оказывается внутри круга). Но при этом получается построить решение этого урав-

нения, удовлетворяющее условию срачивания с внешним разложением (7) (с учетом всех найденных членов):

$$F(\tau) = \frac{2}{3\beta_1} \left[(\tau + \beta_1)^{1.5} - \tau^{1.5} \right]. \quad (15)$$

Отметим, что формула (14) не зависит от параметра β_1 и, следовательно, оказывается справедливой также и для $\beta_1 > 0$. Таким образом, можно сказать, что решение типа пограничного слоя в главном приближении по времени построено. При этом наблюдается неплохое согласование с внешним разложением (рис. 3).



Рис. 2. Сравнение двух решений типа пограничного слоя в случае $\chi = -3$
 / Fig. 2. Comparison of two boundary layer solutions in the case $\chi = -3$

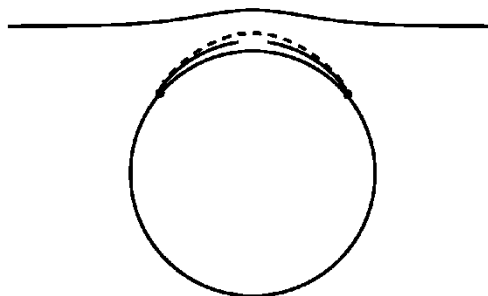


Рис. 3. Согласование погранслойных решений с внешним разложением при $\chi = 0$. Сплошными линиями показаны погранслойные решения типа квадратного корня
 / Fig. 3. Coordination of boundary layer solutions with external expansion at $\chi = 0$. Solid lines show boundary layer solutions like a square root

Однако не удастся найти решение типа (10), (12), (13), подправляющее это главное приближение. Причина этого в том, что при $\beta_1 > 0$ внутренняя свободная граница расположена по разные стороны от точки отрыва. Далее остановимся на построении решений типа пограничного слоя, соответствующих этому случаю. Так как справа от точки отрыва ($\alpha < \theta_{s1}$, $r = 1$) нормальная производная функции φ_0 равна нулю, а ее производная по α непрерывна при $\alpha = \theta_{s1}$, то в главном асимптотическом приближении преобразованное кинематическое уравнение внутренней свободной границы жидкости принимает вид (9) с $f(\alpha) = 0$ ($\alpha < \theta_{s1}$). Его решение будем искать в форме (10), где в выражении для τ следует поставить знак минус. После подстановки этого проекта решения в соответствующее дифференциальное уравнение и переходу к погранслойной переменной придем к соотношению, члены которого имеют следующие порядки малости по t : $t^{\gamma-\delta}$, $t^{\gamma-1}$. Имеет смысл рассмотреть два случая: $\gamma - \delta = \gamma - 1$ ($\delta = 1$) и $\gamma - \delta > \gamma - 1$. В первом случае возникает дифференциальное уравнение $(\beta_1 - \tau)F'(\tau) + \gamma F(\tau) = 0$ с общим решением $F(\tau) = c(\beta_1 - \tau)^\gamma$.

Показатель γ и постоянная c подбираются из условия согласования с решением (10), (15) (в (10) $\gamma = 1,5$, $\delta = 1$). В результате приходим к следующему выражению для возмущения свободной границы, которое является естественным непрерывно дифференцируемым продолжением решения (10), (15) в область $\alpha < \theta_{s1}$:

$$\zeta(\alpha, t) = \frac{2\beta}{3\beta_1} \left[\beta_1 t - (\theta_{s1} - \alpha) \right]^{1.5}. \quad (16)$$

Во втором случае получаем равенства $\delta F'(\tau) = \gamma F(\tau)$, $F(\tau) = c\tau^{\gamma/\delta}$.

Здесь показатель степени и постоянная c выбираются таким образом, чтобы при некотором α ($0 < \theta_{s1} - \alpha < \beta_1 t$) совпали возмущения свободных границ и модули их производных по α

(условие максимальной близости между решениями в окрестности их общей точки). В результате возмущение свободной границы вблизи точки отрыва представляется в форме

$$\zeta(\alpha, t) = \frac{2\beta}{3\beta_1} (\theta_{s1} - \alpha)^{1,5}. \quad (17)$$

При этом указанные равенства выполняются в точке $\alpha = \theta_{s1} - 0,5\beta_1 t$. Согласование трех погранслойных решений (10), (15), (16), (17) показано на рис. 4.

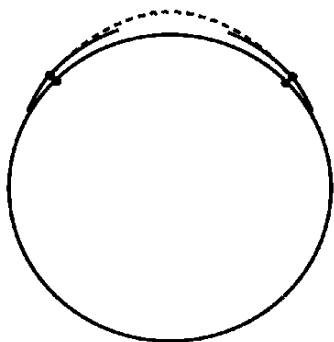


Рис. 4. Струйный эффект при $\chi = 0$
 / Fig. 4. Jet effect at $\chi = 0$

Численные расчеты проводились при следующих значениях параметров: $\varepsilon = 0,2$; $H = 1,2$; $t = 0,15$; $\chi = -3$ (рис. 1, 2); $\chi = 0$ (рис. 3, 4). Для этих случаев $\theta_{s1} \approx 0,324$; $c_1 \approx 3,152$ ($\chi = 0$); $c_1 \approx -1,029$ ($\chi = -3$). При численной реализации использовался пакет конечных элементов FreeFem++ [10].

Заключение

В работе определяется форма присоединенной каверны, образованной в результате действия системы импульсивных давлений, распределенных на верхней части границы

погруженного в жидкость кругового цилиндра. Основное внимание уделяется изучению формы внутренней свободной границы жидкости вблизи точки отрыва. В качестве основного математического аппарата применяется асимптотический анализ на малых временах вместе с методами теории пограничного слоя. Показывается, что при небольших давлениях в каверне внутренняя свободная граница жидкости вблизи точки отрыва расположена по разные стороны от этой точки. При этом концевая часть каверны напоминает струйку газа, стекающую вдоль границы цилиндра в сторону жидкости.

Список источников

1. Седов Л.И. Плоские задачи гидродинамики и аэродинамики. М.: Наука, 1966. 448 с.
2. Norkin M., Korobkin A. The motion of the free-surface separation point during the initial stage of horizontal impulsive displacement of a floating circular cylinder // J. Engng Math. 2011. Vol. 70. P. 239–254. Doi: 10.1007/s10665-010-9416-6.
3. Норкин М.В. Движение кругового цилиндра в жидкости после удара на малых временах с образованием каверны // Изв. РАН. МЖГ. 2012. № 3. С. 101–112.
4. Норкин М.В. Динамика внутренней свободной границы жидкости на малых временах при вертикальном ударе кругового цилиндра, полностью погруженного в жидкость // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2015. № 1. С. 30–35.
5. Норкин М.В. Образование каверны при наклонном отрывном ударе кругового цилиндра под свободной поверхностью тяжелой жидкости // Сиб. журн. индустриальной математики. 2016. Т. 19, № 4. С. 81–92. Doi: 10.17377/sibjim.2016.19.409.
6. Кудрявцева Н.А. Горизонтальный удар плавающего эллипса о несжимаемую жидкость // Прикл. математика и механика. 1960. Т. 24, № 2. С. 258–261.
7. Binyue Song. Fluid/Structure Impact with Air Cavity Effect. Dissertation. London: University College, 2015. 203 p.
8. Гуревич М.И. Теория струй идеальной жидкости. М.: Наука, 1979. 536 с.
9. Иванов А.Н. Гидродинамика развитых кавитационных течений. Л.: Судостроение, 1980. 240 с.
10. Жуков М.Ю., Ширяева Е.В. Использование пакета конечных элементов FreeFem++ для задач гидродинамики, электрофореза и биологии. Ростов н/Д.: Изд-во ЮФУ, 2008. 256 с.

References

1. Sedov L.I. *Plane problems of hydrodynamics and aerodynamics*. Moscow: Nauka Publ.; 1966. 448 p. (In Russ.).

2. Norkin M., Korobkin A. The motion of the free-surface separation point during the initial stage of horizontal impulsive displacement of a floating circular cylinder. *J. Engng Math.* 2011;70:239-254. Doi: 10.1007/s10665-010-9416-6.
3. Norkin M.V. Initial stage of the circular cylinder motion in a fluid after an impact with the formation of a cavity. *Fluid Dynamics.* 2012;47:375-386. Doi: 10.1134/S0015462812030118.
4. Norkin M.V. Dynamics of the internal free boundary of a liquid at short times during a vertical impact of a circular cylinder completely immersed in a liquid. *Izv. vuzov. Sev.-Kavk. region. Estestv. nauki = Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2015;(1):30-35. (In Russ.).
5. Norkin M.V. Cavity Formation at the Inclined Separated Impact on a Circular Cylinder under a Free Surface of a Heavy Liquid. *Journal of Applied and Industrial Mathematics.* 2016;10(4):538-548. Doi: 10.1134/S1990478916040104.
6. Kudryavtseva N.A. Horizontal impact of a floating ellipse on incompressible fluid. *Prikl. matematika i mekhanika = Applied Mathematics and Mechanics.* 1960;24(2):258-261. (In Russ.).
7. Bingyue Song. *Fluid/Structure Impact with Air Cavity Effect.* Dissertation. London: University College Press; 2015. 203 p.
8. Gurevich M.I. *Theory of jets of an ideal fluid.* Moscow: Nauka Publ.; 1979. 536 p. (In Russ.).
9. Ivanov A.N. *Hydrodynamics of developed cavitation flows.* Leningrad: Sudostroenie Publ.; 1980. 240 p. (In Russ.).
10. Zhukov M.Yu., Shiryayeva E.V. *Using the finite element package FreeFem++ for hydrodynamics problems, electrophoresis, and biology.* Rostov-on-Don: Southern Federal University Press; 2008. 256 p. (In Russ.).

Информация об авторе

М.В. Норкин – доктор физико-математических наук, доцент, профессор кафедры вычислительной математики и математической физики, Институт математики, механики и компьютерных наук им. И.И. Воровича.

Information about the author

M.V. Norkin - Doctor of Science (Physics and Mathematics), Associate Professor, Professor of the Department of Computational Mathematics and Mathematical Physics, Vorovich Institute of Mathematics, Mechanics and Computer Science.

*Статья поступила в редакцию 10.04.2024; одобрена после рецензирования 24.05.2024; принята к публикации 04.07.2024.
The article was submitted 10.04.2024; approved after reviewing 24.05.2024; accepted for publication 04.07.2024.*

Научная статья

УДК 539.3

doi: 10.18522/1026-2237-2024-3-34-38

КОНТАКТНАЯ ЗАДАЧА ДЛЯ ТРАНСВЕРСАЛЬНО ИЗОТРОПНОГО СЛОЯ С ТРЕНИЕМ

Дмитрий Александрович Пожарский¹, Никита Борисович Золотов²

^{1, 2} Донской государственный технический университет, Ростов-на-Дону, Россия

¹ pozharda@rambler.ru

² zolotov.nikita.borisovich@gmail.com

Аннотация. Изучается пространственная контактная задача о несимметричном взаимодействии двух штампов на трансверсально изотропном слое при учете сил трения в неизвестной области контакта. Плоскости изотропии параллельны граням слоя. Силы трения учитываются в направлении одной из координатных осей. Нижняя грань слоя подчинена условиям скользящей заделки. Материал слоя характеризуется пятью независимыми упругими параметрами. При помощи двойного интегрального преобразования Фурье и закона Кулона задача сводится к интегральному уравнению относительно контактного давления. Степень анизотропии определяется тремя безразмерными параметрами, входящими в ядро интегрального уравнения, два из которых удовлетворяют характеристическому уравнению. В частных случаях интегральное уравнение совпадает с известными интегральными уравнениями соответствующих контактных задач с трением для изотропного слоя и полупространства. Для численного решения используется метод Б.А. Галанова. Рассматривается система интегрального уравнения и интегрального неравенства. Задается прямоугольник, априори содержащий неизвестную область контакта. Путем введения специальных нелинейных операторов система сводится к одному нелинейному интегральному уравнению типа Гаммерштейна, которое решается методом последовательных приближений. Область контакта определяется узлами, в которых искомая функция положительна. Штампы берутся в форме несимметричных эллиптических параболоидов. Метод позволяет исследовать перколяцию, т.е. процесс слияния дискретных областей контакта при увеличении приложенных сил и осадок штампов. Расчеты сделаны для разных коэффициентов трения, материалов и относительных толщин трансверсально изотропного слоя.

Ключевые слова: теория упругости, трансверсально изотропный слой, контактные задачи, трение

Для цитирования: Пожарский Д.А., Золотов Н.Б. Контактная задача для трансверсально изотропного слоя с трением // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2024. № 3. С. 34–38.

Благодарности: исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-21-00014, <https://rscf.ru/project/24-21-00014/>.

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

Original article

CONTACT PROBLEM FOR A TRANSVERSALLY ISOTROPIC LAYER WITH FRICTION

Dmitry A. Pozharskii¹, Nikita B. Zolotov²

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

¹ pozharda@rambler.ru

² zolotov.nikita.borisovich@gmail.com

© Пожарский Д.А., Золотов Н.Б., 2024

Abstract. It is investigated the spatial contact problem of asymmetric interaction of two punches on a transversally isotropic layer with friction forces taken into account in an unknown contact domain. The planes of isotropy are parallel to the layer faces. The friction forces are taken into account along one coordinate axis. The lower layer face is subjected to sliding support. The layer material is characterized by five independent elastic parameters. The problem is reduced to an integral equation with respect to the contact pressure with the help of a double Fourier transformation together with the Coulomb law. The anisotropy degree is characterized by three dimensionless parameters arising in the kernel of the integral equation, two of which satisfy characteristic equation. In particular cases, the integral equation coincides with those well-known for the corresponding contact problems with friction for the isotropic layer and half-space. The B.A. Galanov method is used for numerical solutions. A system of the integral equation and integral inequality is considered. A rectangle is taken which a priori contains the unknown contact domain. By introducing special nonlinear operators, the system is reduced to only one nonlinear equation of the Hammerstein type which can be solved by the successive approximations method. The contact domain is determined by nodes at which the function required is positive. The punches are taken in the form of asymmetric elliptic paraboloids. The method allows us to investigate percolation, i.e. the process of junction of the discrete contact domains due to increasing the forces applied and settlements of the punches. Calculations are made for different friction coefficients, materials and relative thicknesses of the transversally isotropic layer.

Keywords: elasticity theory, transversally isotropic layer, contact problems, friction

For citation: Pozharskii D.A., Zolotov N.B. Contact Problem for a Transversally Isotropic Layer with Friction. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2024;(3):34-38. (In Russ.).

Acknowledgments: the research was supported by the Russian Science Foundation grant No. 24-21-00014, <https://rscf.ru/project/24-21-00014/>.

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

Введение

Многие современные материалы, играющие важную роль на практике, характеризуются трансверсальной изотропией [1]. При помощи разных методов изучались контактные задачи для трансверсально изотропного слоя без учета сил трения [2, 3], в том числе периодические контактные задачи [4]. Рассматривались контактные задачи, в которых плоскости изотропии перпендикулярны границе трансверсально изотропного полупространства [5] или слоя [3, 4]. В случае изотропного материала слоя исследованы контактные задачи как без учета [6, 7], так и с учетом сил трения [8]. Был предложен метод решения интегрального уравнения контактной задачи с трением для изотропного упругого полупространства [9]. При неизвестных областях контакта хорошо зарекомендовал себя численный метод, предложенный Б.А. Галановым [10]. В предлагаемой работе получено интегральное уравнение контактной задачи для трансверсально изотропного слоя с трением и применен численный метод в случае несимметричного контакта с двумя штампами.

Постановка задачи и интегральное уравнение

Рассмотрим трансверсально изотропный упругий слой $\{|x|<\infty, |y|<\infty, 0\leq z\leq h\}$, грань которого $z=h$ взаимодействует с двумя жесткими штампами в области контакта Ω . Грань $z=0$ лежит без трения на недеформируемом основании (скользящая заделка). Плоскости изотропии параллельны граням слоя. Закон Гука включает пять независимых упругих параметров [5]. Под действием нормальных сил P_1 и P_2 штампы внедряются без перекоса, испытывая осадки δ_1 и δ_2 . Также к штампам приложены одинаково направленные вдоль оси x касательные силы $T_1=\mu P_1$ и $T_2=\mu P_2$, под действием которых штампы начинают движение с учетом трения Кулона с коэф-

фициентом трения μ . Задача рассматривается в квазистационарной постановке. Пусть основания штампов имеют форму эллиптических параболоидов:

$$f(x, y) = \begin{cases} x^2 / (2R_{11}) + (y - l)^2 / (2R_{12}), & y \geq 0, \\ x^2 / (2R_{21}) + (y + l)^2 / (2R_{22}), & y < 0, \end{cases}$$

где $2l$ – расстояние между точками начального касания на оси y .

При заданных параметрах упругости A_{mn} , известных величинах h, μ, δ_1 и δ_2 , функции $f(x, y)$ требуется определить область контакта Ω и контактное давление $\sigma_z(x, y, 0) = -q(x, y), (x, y) \in \Omega$. Затем при использовании интегральных условий равновесия штампов могут быть найдены силы P_1 и P_2 .

Допустим, что двухсвязная или односвязная область контакта априори содержится в прямоугольнике $S: \{|x| \leq a, |y| \leq b\}, a \leq b$. Для простоты далее положим $\delta_1 = \delta_2 = \delta$. При помощи двойного интегрального преобразования Фурье и закона Кулона сведем контактную задачу к интегральному уравнению относительно $q(x, y)$, которое после выделения главных членов и введения безразмерных обозначений ($n=1, 2$):

$$x' = \frac{x}{b}, \quad y' = \frac{y}{b}, \quad \delta' = \frac{\delta}{b}, \quad l' = \frac{l}{b}, \quad \lambda = \frac{h}{b}, \quad \varepsilon = \frac{a}{b}, \quad q'(x', y') = \frac{q(x, y)}{2\pi\theta}, \quad \theta = \frac{A_{11}A_{33} - A_{13}^2}{A_{11}(\gamma_1 + \gamma_2)},$$

$$f'(x', y') = \frac{f(x, y)}{b}, \quad A_n = \frac{b}{2R_{n1}}, \quad B_n = \frac{b}{2R_{n2}}, \quad P_n' = \frac{P_n}{2\pi\theta b^2}, \quad S' \leftrightarrow S, \quad \Omega' \leftrightarrow \Omega,$$

можно записать в виде (штрихи далее опускаем, $(x, y) \in \Omega$)

$$\iint_{\Omega} q(\xi, \eta) K(x - \xi, y - \eta) d\xi d\eta = \delta - f(x, y), \tag{1}$$

$$K(x, y) = \frac{1}{\sqrt{x^2 + y^2}} - \mu\alpha \frac{x}{x^2 + y^2} + K_1(x, y) - \mu K_2(x, y),$$

$$K_1(x, y) = \frac{1}{\lambda} \int_0^{\infty} [L_1(u) - 1] J_0 \left(u \frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{\lambda} \right) du, \tag{2}$$

$$K_2(x, y) = \frac{x}{\lambda(x^2 + y^2)} \int_0^{\infty} [L_2(u) - \alpha] J_1 \left(u \frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{\lambda} \right) du, \tag{3}$$

$$L_1(u) = \frac{\gamma_1 - \gamma_2}{\gamma_1 \operatorname{cth}(u/\gamma_1) - \gamma_2 \operatorname{cth}(u/\gamma_2)}, \quad \alpha = \frac{\gamma_0 - \gamma_1 \gamma_2}{\gamma_1 + \gamma_2},$$

$$L_2(u) = \frac{(\gamma_0 + \gamma_2^2) \gamma_1 \operatorname{cth}(u/\gamma_1) - (\gamma_0 + \gamma_1^2) \gamma_2 \operatorname{cth}(u/\gamma_2)}{(\gamma_1 + \gamma_2)(\gamma_1 \operatorname{cth}(u/\gamma_1) - \gamma_2 \operatorname{cth}(u/\gamma_2))}.$$

Здесь $J_k(u)$ – цилиндрические функции; $\gamma_0 = A_{13}/A_{11}$; γ_n ($n=1, 2$; $\operatorname{Re}\gamma_1 > \operatorname{Re}\gamma_2 > 0$) – корни характеристического уравнения [1, 2, 5]

$$\gamma^4 A_{11} A_{44} - \gamma^2 [A_{11} A_{33} - A_{13} (A_{13} + 2A_{44})] + A_{33} A_{44} = 0.$$

Параметр λ характеризует относительную толщину трансформного слоя. Подынтегральные функции в ядрах (2) и (3) экспоненциально убывают на бесконечности.

Для перехода к изотропному случаю следует выполнить предельные переходы (ν – коэффициент Пуассона) $\gamma_0 \rightarrow \frac{\nu}{1-\nu}, \quad \gamma_n \rightarrow 1, \quad n = 1, 2.$

В этом случае интегральное уравнение (1) переходит в известное уравнение для изотропного слоя [8], а при дополнительном пределе $\lambda \rightarrow \infty$ уравнение (1) в точности совпадает с известным уравнением контактной задачи с трением для изотропного полупространства [9].

Численное решение

Для решения контактной задачи используем метод Б.А. Галанова [10], позволяющий одновременно определить область контакта и контактные давления. Объединим интегральное уравнение (1) с условием положительности контактного давления в Ω , а также с интегральным неравенством отсутствия контакта и равенством давления нулю в дополнительной области $S \setminus \Omega$. Введем специальные нелинейные операторы, которые автоматически удовлетворяют интегральному неравенству [10]. Сведем систему интегрального уравнения и неравенства к одному нелинейному интегральному уравнению типа Гаммерштейна в прямоугольной ячейке S . Для численного решения нелинейного уравнения применим модифицированный метод Ньютона последовательных приближений. Область контакта Ω определяется узлами сетки, покрывающей S , в которых искомая функция положительна.

Для расчетов выберем трансверсально изотропные материалы: гнейс влажный ($\gamma_0 = 0,4545$; $\gamma_1 = 1,621$; $\gamma_2 = 0,5476$) и древесина (ель Дугласа, $\gamma_0 = 0,05897$; $\gamma_1 = 1,621$; $\gamma_2 = 0,3503$) [1]. В табл. 1 приведены значения суммарной силы $P = P_1 + P_2$ в зависимости от осадки δ для случая вдавливания двух несимметричных параболоидов с параметрами $A_1 = B_1 = B_2 = 2,5$; $A_2 = 4,5$; $l = 0,5$ при $\varepsilon = 1$; $\mu = 0,2$ и разных λ . Сила растет как с увеличением осадки штампов, так и с уменьшением относительной толщины слоя.

Таблица 1 / Table 1

Значения силы P / Values of the force P

Параметр	Значение					
	0,5	0,7	0,9	0,5	0,7	0,9
Материал	Гнейс			Древесина		
$\lambda = 1$	0,160	0,280	0,421	0,223	0,406	0,635
$\lambda = 2$	0,128	0,218	0,320	0,159	0,278	0,418

При увеличении осадки δ и уменьшении расстояния $2l$ между вершинами штампов наблюдается процесс перколяции, т.е. слияния дискретных областей контакта [3, 4]. В табл. 2 даны значения силы и осадки в начале перколяции при $A_1 = 1$; $B_1 = 0,5$; $A_2 = 0,8$; $B_2 = 0,4$; $\varepsilon = 1$; $\mu = 0,2$ и разных λ и l . При утончении слоя перколяция наступает при меньших осадках, что связано с заделкой нижней грани слоя.

Таблица 2 / Table 2

Значения силы и осадки при перколяции / Values of the force and settlement for percolation

Параметр	Значение			
	1	1	3	3
l	0,3	0,4	0,3	0,4
Гнейс				
δ	0,11	0,20	0,13	0,27
P	0,0293	0,0877	0,0290	0,0950
Древесина				
δ	0,078	0,14	0,12	0,23
P	0,0214	0,0716	0,0295	0,0911

Выводы

Выбранный численный метод позволяет исследовать процесс перколяции дискретных областей контакта. Расчеты показывают, что трение приводит к несимметричному распределению контактных давлений вдоль линии своего действия относительно вершин штампов, но слабо влияет на вдавливающие силы и процесс перколяции. Показано, что требуемые для начала перколяции осадки штампов и расстояние между их вершинами существенно зависят от материала трансверсально изотропного слоя.

Список источников

1. Ding H., Chen W., Zhang L. *Elasticity of transversely isotropic materials*. Dordrecht: Springer, 2006. 435 p.
2. Fabrikant V.I. *Contact and crack problems in linear elasticity*. Sharjah: Bentham, 2010. 1030 p.
3. Pozharskii D.A., Zolotov N.B. Contact problems for a transversely isotropic layer // *PNRPU Mech. Bull.* 2022. № 2. P. 105–113. Doi: 10.15593/perm.mech/2022.2.10.
4. Pozharskii D.A., Zolotov N.B. Periodic contact problems for a transversely isotropic layer // *J. Appl. Mech. Tech. Phys.* 2022. Vol. 63, № 6. P. 1065–1072. Doi: 10.1134/S0021894422060207.
5. Fabrikant V.I. Non-traditional contact problem for transversely isotropic half-space // *Quart. J. Mech. Appl. Math.* 2011. Vol. 64, № 2. P. 151–170. Doi: 10.1093/qjmam/hbq029.
6. Ворович И.И., Александров В.М., Бабешко В.А. Неклассические смешанные задачи теории упругости. М.: Наука, 1974. 456 с.
7. Alexandrov V.M., Pozharskii D.A. *Three-dimensional contact problems*. Dordrecht: Kluwer, 2001. 406 p.
8. Александров В.М., Чебаков М.И. Аналитические методы в контактных задачах теории упругости. М.: Физматлит, 2004. 304 с.
9. Galin L.A., Goriacheva I.G. Three-dimensional contact problem of a motion of a stamp with friction // *J. Appl. Math. Mech.* 1982. Vol. 46, № 6. P. 819–824.
10. Galanov B.A. The method of boundary equations of the Hammerstein-type for contact problems of the theory of elasticity when the regions of contact are not known // *J. Appl. Math. Mech.* 1985. Vol. 49, № 5. P. 634–640.

References

1. Ding H., Chen W., Zhang L. *Elasticity of transversely isotropic materials*. Dordrecht: Springer Publ.; 2006. 435 p.
2. Fabrikant V.I. *Contact and crack problems in linear elasticity*. Sharjah: Bentham Publ.; 2010. 1030 p.
3. Pozharskii D.A., Zolotov N.B. Contact problems for a transversely isotropic layer. *PNRPU Mech. Bull.* 2022;(2):105-113. Doi: 10.15593/perm.mech/2022.2.10.
4. Pozharskii D.A., Zolotov N.B. Periodic contact problems for a transversely isotropic layer. *J. Appl. Mech. Tech. Phys.* 2022;63(6):1065-1072. Doi: 10.1134/S0021894422060207.
5. Fabrikant V.I. Non-traditional contact problem for transversely isotropic half-space. *Quart. J. Mech. Appl. Math.* 2011;64(2):151-170. Doi: 10.1093/qjmam/hbq029.
6. Vorovich I.I., Aleksandrov V.M., Babeshko V.A. *Non-classical mixed problems of the elasticity theory*. Moscow: Nauka Publ.; 1974. 456 p. (In Russ.).
7. Alexandrov V.M., Pozharskii D.A. *Three-dimensional contact problems*. Dordrecht: Kluwer Publ.; 2001. 406 p.
8. Aleksandrov V.M., Chebakov M.I. *Analytical methods in contact problem of the elasticity theory*. Moscow: Fizmatlit Publ.; 2004. 304 p. (In Russ.).
9. Galin L.A., Goriacheva I.G. Three-dimensional contact problem of a motion of a stamp with friction. *J. Appl. Math. Mech.* 1982;46(6):819-824.
10. Galanov B.A. The method of boundary equations of the Hammerstein-type for contact problems of the theory of elasticity when the regions of contact are not known. *J. Appl. Math. Mech.* 1985;49(5):634-640.

Информация об авторах

Д.А. Пожарский – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой прикладной математики.

Н.Б. Золотов – ассистент, кафедра прикладной математики.

Information about the authors

D.A. Pozharskii - Doctor of Science (Physics and Mathematics), Professor, Head of the Department of Applied Mathematics.

N.B. Zolotov - Assistant, Department of Applied Mathematics.

Статья поступила в редакцию 05.03.2024; одобрена после рецензирования 10.04.2024; принята к публикации 04.07.2024.
The article was submitted 05.03.2024; approved after reviewing 10.04.2024; accepted for publication 04.07.2024.

НАУКИ О ЗЕМЛЕ SCIENCES OF EARTH

Научная статья
УДК 551.578.42
doi: 10.18522/1026-2237-2024-3-39-47

КАДАСТР ЛАВИННОЙ ОПАСНОСТИ ТЕРРИТОРИИ ВТРК «МАМИСОН» (СЕВЕРНАЯ ОСЕТИЯ – АЛАНИЯ)

*Анатолий Хабасович Аджиев^{1✉}, Наталия Владимировна Кондратьева²,
Геннадий Владимирович Куповых³, Алан Леванович Кортиев⁴*

^{1, 2} *Высокогорный геофизический институт, Нальчик, Кабардино-Балкарская Республика, Россия*

³ *Южный федеральный университет, Таганрог, Россия*

⁴ *Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет), Владикавказ, Республика Северная Осетия – Алания, Россия*

¹ *adessa1@yandex.ru✉*

² *kondratyeva_nat@mail.ru*

³ *куповых@sfedu.ru*

⁴ *info@skgmi-gtu.ru*

Аннотация. Представлены карта и каталог лавин на территории всесезонного туристско-рекреационного комплекса (ВТРК) «Мамисон». Для их создания проведены рекогносцировочные обследования территории. При этом выявлены лавиносорбы, проведено их описание, в том числе зон зарождения, транзита и отложения. Установлено, что природные условия на исследуемой территории благоприятны для формирования снежных лавин и селей. Составлены реестр и карта лавинной опасности территории. Выполнены расчеты высоты снежного покрова 1- и 2%-й обеспеченности в зонах зарождения лавин. Полученные результаты имеют практическую значимость при освоении горных территорий и должны учитываться при проектировании объектов инфраструктуры ВТРК «Мамисон».

Ключевые слова: горные территории, природные процессы, климат, метеопараметры, высота снега, лавины, зоны транзита лавин, лавиноопасность

Для цитирования: Аджиев А.Х., Кондратьева Н.В., Куповых Г.В., Кортиев А.Л. Кадастр лавинной опасности территории ВТРК «Мамисон» (Северная Осетия – Алания) // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2024. № 3. С. 39–47.

Благодарности: работа выполнена при финансовой поддержке РФФ (соглашения № 24-27-20006 и 23-17-20001).

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

Original article

CADASTRE OF AVALANCHE HAZARD IN THE TERRITORY OF ASTRC “MAMISON” (NORTH OSSETIA-ALANIA)

Anatoly Kh. Adzhiev^{1✉}, Natalia V. Kondratyeva², Gennady V. Kupovykh³, Alan L. Kortiev⁴

^{1, 2} High Mountain Geophysical Institute, Nalchik, Kabardino-Balkarian Republic, Russia

³ Southern Federal University, Taganrog, Russia

⁴ North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy (State Technological University), Vladikavkaz, Republic of North Ossetia-Alania, Russia

¹ adessa1@yandex.ru

² kondratyeva_nat@mail.ru

³ kupovykh@sfedu.ru

⁴ info@skgmi-gtu.ru

Abstract. The article presents a map and catalog of avalanches on the territory of the creation of the All-Season tourist and recreational complex (ASTRC) “Mamison”. Reconnaissance surveys of the territory were conducted to create a map and catalog of avalanches. During the reconnaissance survey, avalanche collections were identified and their description was carried out, including the zones of origin, transit zones and avalanche deposits. It has been established that the natural conditions in the studied area are favorable for the formation of avalanches and mudslides. An avalanche hazard map of the territory and an avalanche register have been compiled. Height calculations were performed (from 106 cm to 274 cm) snow cover of 1 and 2 % is provided in avalanche zones. The results obtained are of practical importance in the development of mountainous areas and should be taken into account when designing infrastructure facilities at the ASTRC “Mamison”, in particular, it is recommended to carry out a set of measures to ensure avalanche safety.

Keywords: mountain areas, natural processes, climate, meteorological parameters, snow depth, avalanches, avalanche transit zones, avalanche hazard

For citation: Adzhiev A.Kh., Kondratyeva N.V., Kupovykh G.V., Kortiev A.L. Cadastre of Avalanche Hazard in the Territory of the ASTRC “Mamison” (North Ossetia-Alania). *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2024;(3):39-47. (In Russ.).

Acknowledgments: the work was carried out with the financial support of the Russian Science Foundation (Agreements No. 24-27-20006 and 23-17-20001).

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

Введение

Изучением снежных лавин на Кавказе занимались и занимаются многие советские и российские ученые [1–8]. Работ, посвященных снежным лавинам, достаточно много, но значительная ведомственная разрозненность издающихся научных трудов и отсутствие в стране единого методического центра по изучению снежных лавин существенно затрудняют ознакомление и использование результатов исследований в практических целях и при проведении научно-исследовательских работ.

Объект нашего исследования – территория создания всесезонного туристско-рекреационного комплекса (ВТРК) «Мамисон» в Северной Осетии – Алании. Данный участок характеризуется выпадением значительного для горных районов Большого Кавказа количества осадков с высокой степенью интенсивности (в жидком и твердом виде), а также большими амплитудами температур воздуха. Для него характерны фёновые ветры южного и юго-западного направлений, которые иногда достигают силы урагана. Такое сочетание метеорологических параметров способствует значительному накоплению снега на склонах, на ледниках и дальнейшему его метаморфизму, что в конечном итоге определяет высокую степень лавиноопасности территории ВТРК.

Целью работы является создание карты и каталога лавинных очагов для территории ВТРК «Мамисон».

Материалы и методы исследования

Результаты анализа фондовых материалов и дешифрирование космических и аэрофотоснимков, а также проведенное рекогносцировочное обследование территории свидетельствуют, что район ВТРК «Мамисон» характеризуется активной лавинной деятельностью. Собранный и систематизированный фактический и фондовый материал позволил создать карту и каталог лавин территории исследуемого комплекса.

При рекогносцировочном обследовании выявлены лавиносоры, в том числе зоны зарождения, транзита и отложения лавин, а также формы рельефа, свидетельствующие о движении лавин:

- наличие обломочных выносов под склоном у выхода лавинных выносов;
- гряды обломочных материалов с остатками растительности, сформированные осовами (тип лавин) у подножья склонов;
- лавинные бугры, созданные русловыми выносами в водотоках;
- углубления сферических форм, образованные лавинами;
- наличие лесных прочесов.

На рис. 1 показаны лавиноопасные склоны в верховьях р. Халаца.



Рис. 1. Вид на верховья р. Халаца (правый приток р. Земегондон) – лавиноопасные склоны (21.07.2023)
/ Fig. 1. View of the upper reaches of the river Halatsa (right tributary of the Zemegondon river) -
avalanche-prone slopes (07/21/2023)

По результатам рекогносцировочного обследования и анализа топографических карт крупных масштабов в соответствии с рекомендациями СП 428.1325800.2018 [9] нами построена карта лавинной опасности района ВТРК «Мамисон», создан каталог характеристик лавинных очагов, высоты снежного покрова в зоне зарождения лавин. Для решения данной задачи с помощью ГИС-программы ArcGIS 10.2 был создан растр средних уклонов поверхности территории исследования с градациями, отвечающими основному классификационному признаку лавиноведения [9], где в качестве вероятных зон зарождения лавин (лавинный очаг) выделялись все участки крутизной от 25 до 60° (склоны, на которых возможно образование лавин).

Графическим методом [9] рассчитывалась максимальная дальность выброса лавин. Учитывая длину пути лавины и используя растр уклонов, нижнюю границу лавиносбора, где происходит остановка снежных масс, определяли как участки поверхности с крутизной от 0 до 20° (территории, на которых зарождение лавин невозможно, а в случае расположения их под склонами, на которых возможно образование лавин, – это территории, на которых располагаются зоны отложения лавин). Средняя часть лавиносбора (между зонами зарождения и отложения лавин, с уклоном от 20 до 25°), согласно [9], считается зоной транзита лавин. При построении карты лавинной опасности района ВТРК «Мамисон» зоны транзита и отложения лавин были объединены в один полигон для удобства расчета характеристик.

Анализ полученных результатов и их обсуждение

В горной части Республики Северная Осетия – Алания лавинная деятельность распространена очень широко. Этому способствует наличие благоприятных для формирования условий: достаточно крутых склонов со значительной степенью изрезанности, больших превышений пригребневых частей горных хребтов, являющихся снегосборами, над днищами долин.

Территория ВТРК «Мамисон» ориентирована с северо-запада на юго-восток. Климатические условия холодного периода в горной части способствуют длительному существованию устойчивого снежного покрова. Продолжительность его залегания в горах Северной Осетии сильно варьируется в зависимости от абсолютной высоты местности. На высоте 1100–1200 м, у нижней границы лавинной деятельности в многоснежные зимы, устойчивый снежный покров может держаться до 50 дней. На высоте от 2500 до 3500 м продолжительность его залегания составляет от 140 до 220 дней. Климатическая снеговая линия, т.е. нижняя граница зоны постоянного снежного покрова, в горах находится, по данным [10, 11], на высоте 4400 м.

Мощность снежного покрова, во многом определяющая режим лавинной деятельности, зависит в первую очередь от ориентации склона по отношению к влагонесущим воздушным массам, наличия на склоне аккумулятивных форм рельефа и от экспозиции склона к солнцу. В обычные по снежности зимы южные склоны в горах большую часть холодного периода свободны от снега, на открытых участках северных склонов снежный покров не превышает 0,5 м, а в складках рельефа количество навешенного снега может достигать нескольких метров [4, 5]. Заметное влияние на процессы лавинообразования в горной части Северной Осетии оказывает метелевый перенос снега, особенно существенный на больших высотах, а также фёновые явления, наиболее частые и интенсивные в феврале – начале марта [6].

Процент зим с отсутствием устойчивого снежного покрова здесь составляет от 43 до 60. Высота снежного покрова определяется не только высотой местности и количеством выпавших осадков, но и в значительной степени расположением места измерения относительно элементов рельефа.

Устойчивый снежный покров образуется в основном в середине или конце декабря, когда верхний слой почвы промерзает. А полностью сходит в период с 28 февраля по 10 мая, когда среднесуточная температура воздуха больше 5 °С. Среднее число дней со снежным покровом в районе метеостанции (МС) «Нар», наиболее близкой к месту изыскания, составляет 100 дней.

Большая изрезанность и сложность рельефа определяют пестроту в распределении снежного покрова на исследуемой территории. Первый снег в интервале 2000–2500 м выпадает в октябре. Но он быстро тает, а постоянный снежный покров устанавливается в первой-второй декаде ноября. На высоте 2500–3600 м снег появляется в сентябре, а устанавливается в середине октября. Разность дат между появлением и установлением устойчивого снежного покрова с увеличением высоты над уровнем моря уменьшается.

Сроки устойчивости снежного покрова сильно колеблются из года в год. В среднем образование устойчивого снежного покрова на МС «Мамисонский перевал» на высоте 2854 м приходится на 16 октября, а самое раннее – на 17 сентября (табл. 1). На высоте 3653 м (МС «Казбеги», в/г) средняя дата образования устойчивого снежного покрова – 12 октября, самая ранняя – 27 августа.

Разрушение и сход снежного покрова протекают в более короткие сроки и в зависимости от высоты, формы рельефа, экспозиции склона значительно изменяются во времени. Средняя дата схода снежного покрова на высоте 2000 м приходится на 19 мая, на высоте Мамисонского перевала – на 18 июня. В холодные годы на высоте выше 1800 м сход снежного покрова

происходит на 20–30 дней позже, а в теплые – на 30–40 дней раньше средних дат. Весной сход снежного покрова отмечается после устойчивого прогрева воздуха и перехода температуры воздуха через 0 °С.

Наибольшая декадная высота снежного покрова по наблюдениям на метеостанциях района представлена в табл. 1.

Таблица 1 / Table 1

Наибольшая декадная высота снежного покрова в холодный период года по постоянной рейке, место установки рейки – открытое, см / The greatest ten-day depth of snow cover in the cold period of the year according to a permanent staff, the installation site of the staff is open, cm

Месяц, декада																	
IX			X			XI			XII			I			II		
1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Мамисонский перевал																	
4	11	30	23	36	71	61	58	60	91	108	119	104	105	99	106	126	149
Казбеги																	
30	39	73	57	58	56	57	100	90	48	56	53	49	45	48	50	41	41
III			IV			V			VI			VII			VIII		
1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Мамисонский перевал																	
142	137	131	149	175	174	157	134	75	69	16	10	2	8				1
Казбеги																	
60	73	48	45	71	66	88	126	136	156	143	110	74	66	19	8	8	19

На территории обследования растительность заметно меняется в зависимости от высотного положения, что обусловлено вертикальной зональностью. На небольшой территории наблюдаются почти все высотные зоны Большого Кавказа. Абсолютная высота района варьирует от 1800 до 3800 м, здесь преобладают нивально-гляциальные и горно-луговые ландшафты, а также присутствует горно-лесная зона.

В долинах рек Зедегондон, Козидон и Халаца до 2300 м растут сосновые леса (высота деревьев достигает 25 м). На многих участках эти леса неоднократно уничтожались лавинами, о чем свидетельствуют молодые сосны разного возраста.

Значительные площади склонов занимают горные луга, среди которых различаются альпийские и субальпийские. Субальпийские луга располагаются на высоте 2300–2700 м. Выше субальпийских лугов, на высоте от 2700 до 3000 м, находятся альпийские луга. Здесь много скальных выходов коренных пород. Эти луга злаково-разнотравные и разнотравно-злаковые, с низким травостоем (до 20 см), небольшим проективным покрытием. На высоте более 3000 м (до снежников и ледников) склоны покрыты пятнистым, низкорослым травостоем, на скалах и глыбах – лишайники.

Растительность отражает физико-географические условия района, в том числе влияет на высоту снежного покрова, т.е. способствует или препятствует формированию лавин.

Таким образом, сложный резко расчлененный рельеф, обилие атмосферных осадков, неустойчивый температурный режим зимнего периода в сочетании с интенсивным ветровым переносом снега в зоне выше 2000 м, широкое распространение лавинных очагов определяют лавинную деятельность на территории ВТРК.

На основе выполненных исследований на территории ВТРК «Мамисон» в соответствии с рекомендациями СП 428.1325800.2018 [9] составлен каталог лавинных очагов (табл. 2), границы выявленных лавиносборов (нумерация авторская) представлены на рис. 2.

Таблица 2 / Table 2

Характеристики лавинных очагов и высота снежного покрова в зоне зарождения лавин на территории ВТРК «Мамисон» / Characteristics of avalanche sources and the height of snow cover in the avalanche zone on the territory of the ASTRC «Mamison»

№ ЛО	Тип лавин	α , °	F, м ²	Н _{отр} , м	h, см	L, м	№ ЛО	Тип лавин	α , °	F, м ²	Н _{отр} , м	h, см	L, м
1	Л	28	494040	3164	223	1853	59	Л	25	179117	2980	205	1345
2	Л	27	230883	3154	222	2700	60	Л	25	107695	2834	190	405
3	Л	27	1980369	3133	220	2640	61	Л	29	69664	2754	182	556
4	Л	27	123640	2944	201	2705	62	Л	25	167698	2853	192	1130
5	Л	25	70399	2772	184	1556	63	О	27	48612	2811	188	730
6	Л	25	492754	3073	214	3170	64	Л	25	210125	2879	194	969
7	Л	25	622865	2990	206	3150	65	Л	27	60210	2649	172	282
8	О	27	343003	2836	190	924	66	Л	30	147565	2685	175	987
9	О	25	108449	2750	182	1160	67	Л	27	159391	2701	177	887
10	О	27	277839	2556	162	725	68	О	27	65081	2658	172	685
11	О	26	102693	2454	152	525	69	О	30	70147	2454	152	650
12	О	28	184743	2386	145	570	70	О	27	44211	2404	147	280
13	Л	30	2397753	3195	226	2100	71	Л	36	217283	2402	147	940
14	О	27	435689	2325	139	653	72	Л	40	337445	2327	139	703
15	О	26	41775	2271	134	134	73	О	32	51325	2279	134	556
16	О	25	3972	2244	131	84	74	Л	32	118697	2408	147	956
17	О	31	46691	2330	140	170	75	Л	30	68229	2299	136	806
18	О	26	53258	2461	153	523	76	О	29	102826	2190	126	477
19	О	35	88431	2484	155	348	77	О	25	8261	2117	118	271
20	О	28	161072	2712	178	887	78	О	27	89395	2202	127	515
21	О	37	28978	2492	166	324	79	О	25	28552	2229	129	480
22	О	32	106771	2739	180	774	80	О	34	58549	2243	131	240
23	Л	35	140246	2794	186	870	81	О	32	73240	2414	148	509
24	О	41	2976	2389	146	151	82	О	27	153227	2415	148	392
25	О	40	19832	2490	156	309	83	О	26	41060	2338	140	253
26	О	37	36525	2683	175	560	84	О	25	49524	2570	164	656
27	О	38	18174	2534	160	339	85	Л	26	190020	2581	165	471
28	Л	32	91338	2718	178	682	86	Л	30	144854	2689	176	668
29	О	38	25742	2497	156	265	87	О	28	49493	2604	167	808
30	Л	31	375680	2979	204	1153	88	О	27	47662	2669	173	1282
31	О	37	13944	2480	155	233	89	Л	27	264248	2873	211	1726
32	О	37	10146	2543	161	278	90	О	30	119740	2527	159	303
33	О	36	16490	2584	165	376	91	Л	27	83386	2744	181	587
34	Л	35	27393	2637	170	449	92	О	29	11493	2786	173	267
35	О	36	7016	2488	155	216	93	Л	25	202741	2611	168	1480
36	Л	34	38402	2685	175	510	94	Л	31	178603	2579	164	1188
37	О	33	34873	2684	175	583	95	О	30	97559	2429	150	888
38	О	35	32953	2575	164	334	96	Л	25	700814	2777	184	1990
39	Л	30	1092213	3123	219	2016	97	О	34	180559	2379	144	570
40	Л	27	658449	3100	217	1956	98	О	35	238840	2441	151	650
41	Л	30	495534	3099	216	1940	99	Л	25	3214124	3071	214	3600
42	Л	27	452932	2929	199	1630	100	О	30	125721	2447	151	735
43	Л	27	76983	2886	195	958	101	Л	26	406924	2735	180	2310
44	Л	25	33596	2637	170	206	102	О	30	590264	2568	163	968
45	О	26	68481	2934	200	456	103	О	29	57037	2494	156	735
46	О	30	227665	2921	199	630	104	О	29	87124	2535	160	793
47	О	32	469734	3272	234	1140	105	О	28	58607	2601	167	933
48	Л	35	267156	3475	254	2140	106	О	25	37711	2391	146	448

Окончание табл. 2

№ ЛО	Тип лавин	α , °	F, м ²	H _{отр.} , м	h, см	L, м	№ ЛО	Тип лавин	α , °	F, м ²	H _{отр.} , м	h, см	L, м
49	Л	38	429857	3516	258	1805	107	Л	32	62702	2620	169	975
50	О	31	1791867	3357	242	1050	108	Л	31	69915	2702	177	1221
51	О	33	2641030	3672	274	1400	109	О	30	17346	2449	156	345
52	О	25	166341	2924	199	1530	110	О	33	21339	2499	157	332
53	Л	30	209872	2901	197	1600	111	О	32	23165	2625	169	535
54	О	30	81272	2925	199	458	112	О	34	8635	2475	154	223
55	Л	29	283479	3094	216	1240	113	Л	35	95809	2782	185	1235
56	Л	32	281190	3084	215	1254	114	О	37	14774	2533	160	256
57	Л	31	83966	2780	185	635	115	Л	37	106777	2797	186	1100
58	Л	25	430003	3098	216	2010							

Примечание. Л – лотковая лавина; О – осов; α – угол наклона зоны зарождения и транзита; F – площадь лавинного очага в горизонтальной проекции; H_{отрыва} – максимальная высота отрыва лавины; h – расчетная высота снежного покрова 1%-й обеспеченности; L – дальность выброса лавин в горизонтальной проекции.

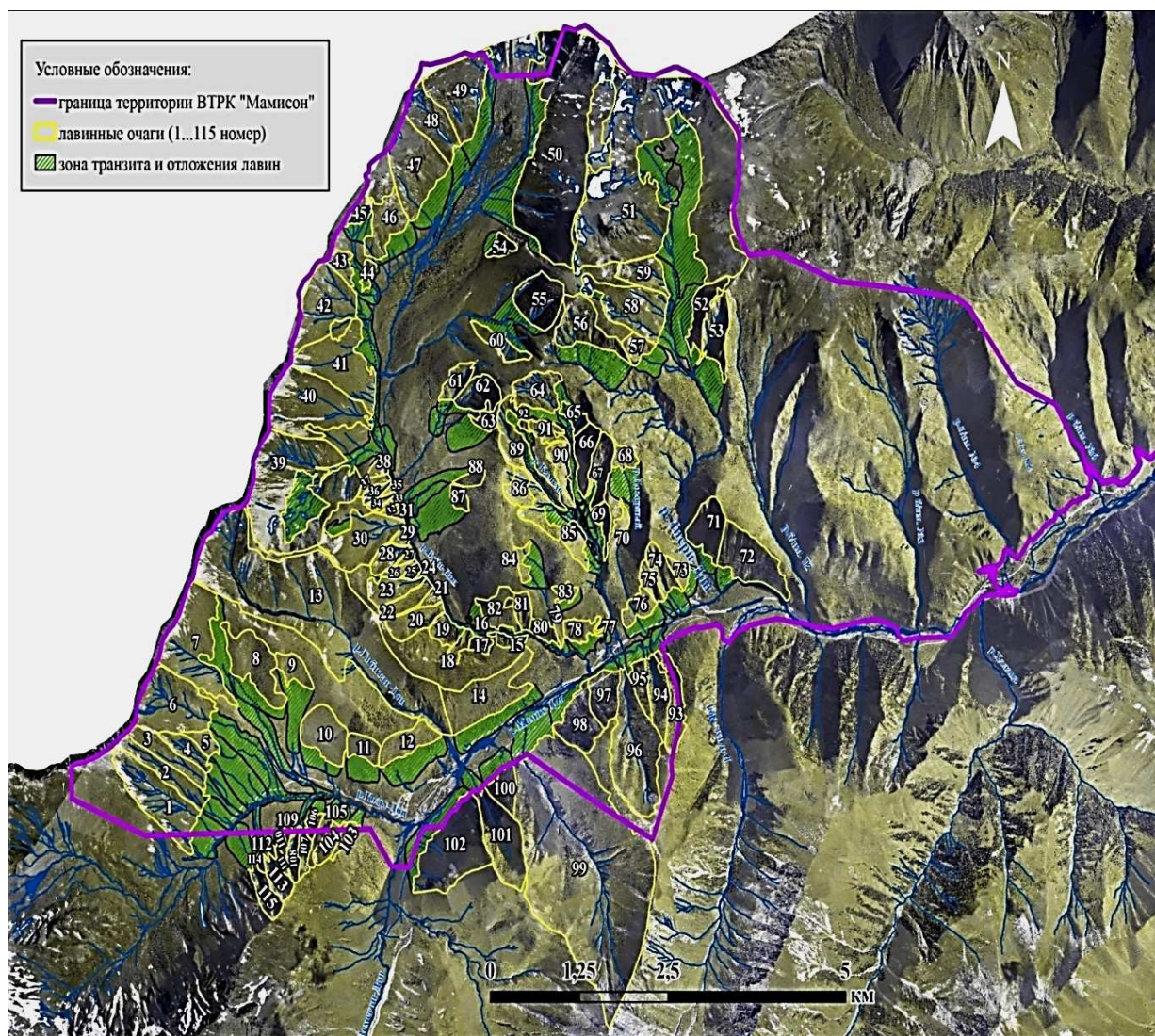


Рис. 2. Карта лавинной опасности в районе ВТРК «Мамисон» и на прилегающей территории (подложка – ортофотоплан, 2022 г.) / Fig. 2. Map of avalanche hazard in the area of the ASTRC “Mamison” and the adjacent territory (background - orthophotomap, 2022)

Выводы

1. Природные условия на территории ВТРК «Мамисон» благоприятны для формирования снежных лавин [12, 13]. Небольшие по объему снежные лавины сходят ежегодно и останавливаются у подножия крутых участков в долинах р. Зедегондон, Козидон, Гибитандон, Бубидон, Камсхо.

2. На территории ВТРК «Мамисон» по топографическому плану, анализу архивных материалов и полевых исследований в соответствии с рекомендациями СП 428.1325800.2018 выделены 115 лавинных очагов.

3. Определена высота снежного покрова 1%-й обеспеченности в зонах зарождения лавин. Значения варьируют от 118 до 274 см.

4. Определены характеристики лавинных очагов, такие как тип лавин, угол наклона зоны зарождения и транзита, площадь лавинного очага в горизонтальной проекции, максимальная высота отрыва лавины, дальность выброса лавин в горизонтальной проекции.

5. На основе собранного и систематизированного фактического и фондового материала создана карта лавинной опасности и каталог характеристик лавин территории ВТРК «Мамисон». Карту и каталог необходимо использовать для мониторинга и пространственного анализа лавинной опасности, при проведении противолавинных мероприятий, а также при проектировании и строительстве объектов рекреации.

Список источников

1. Аджиев А.Х., Разумов В.В., Разумова Н.В., Глушко А.Я., Шагин С.И., Кондратьева Н.В., Притворов А.П., Колычев А.Г., Шаповалов М.А. Опасные природные процессы Северного Кавказа. М.: Феория, 2013. 320 с.
2. Залиханов М.Ч., Ефремов Ю.В., Панов В.Д. Ледяная корона Кавказа Нальчик: Эль-Фа, 1999. 233 с.
3. Тавасиев Р.А. Ледники и каменные глетчеры Козского ущелья // Вестн. Владикавказского науч. центра РАН. 2008. Т. 8, № 4. С. 63–68.
4. Залиханов М.Ч. Снежные лавины и перспективы освоения гор Северной Осетии. Орджоникидзе: Ир, 1974. 141 с.
5. Кадастр лавин СССР. Л.: Гидрометеиздат, 1989. Т. 8. 142 с.
6. Опасные гидрометеорологические явления на Кавказе / под ред. Г.Г. Сванидзе, Я.А. Цуцкиридзе. Л.: Гидрометеиздат, 1983. 264 с.
7. Погорелов А.В. Снежный покров Большого Кавказа. М.: Академкнига, 2002. 287 с.
8. Кондратьева Н.В., Гегиев К.А., Анаев М.Т., Куповых Г.В. Селевая опасность Восточного Кавказа // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2016. № 3. С. 72–75.
9. СП 428.1325800.2018. Инженерные изыскания для строительства в лавиноопасных районах. Общие требования. М., 2018. 58 с.
10. Панова С.В., Погорелов А.В. Снежный покров // Природные ресурсы Республики Северная Осетия – Алания. Климат. Владикавказ: Проект-Пресс, 2002. С. 74–81.
11. Залиханов М.Ч. Снежно-лавиновый режим и перспективы освоения гор Большого Кавказа. М.: Официальная и деловая Россия, 2014. 612 с.
12. Аджиев А.Х., Кондратьева Н.В., Кортиев А.Л., Шидугов И.Ж. Динамика и оценка метеоусловий всесезонного туристско-рекреационного комплекса «Мамисон» // Устойчивое развитие горных территорий. 2023. Т. 15, № 3. С. 493–504.
13. Кондратьева Н.В., Керефова З.М. Оценка лавинной опасности на территории всесезонного туристско-рекреационного комплекса «Мамисон» // Успехи современного естествознания. 2024. № 3. С. 41–45.

References

1. Adzhiev A.Kh., Razumov V.V., Razumova N.V., Glushko A.Ya., Shagin S.I., Kondratyeva N.V., Pritvorov A.P., Kolychev A.G., Shapovalov M.A. *Hazardous natural processes of the North Caucasus*. Moscow: Feoriya Publ.; 2013. 320 p. (In Russ.).
2. Zalikhanov M.Ch., Efremov Yu.V., Panov V.D. *Ice Crown of the Caucasus*. Nalchik: El'-Fa Publ.; 1999. 233 p. (In Russ.).
3. Tavasiev R.A. Glaciers and rock glaciers of the Koz Gorge. *Vestn. Vladikavkazskogo nauch. tsentra RAN = Bulletin of the Vladikavkaz Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2008;8(4):63-68. (In Russ.).

4. Zalikhanov M.Ch. *Snow avalanches and prospects for development of the mountains of North Ossetia*. Ordzhonikidze: Ir Publ.; 1974. 141 p. (In Russ.).
5. *Avalanche cadastre of the USSR*. Leningrad: Gidrometeoizdat Publ.; 1989. Vol. 8. 142 p. (In Russ.).
6. Svanidze G.G., Tsutskiridze Ya.A., eds. *Dangerous hydrometeorological phenomena in the Caucasus*. Leningrad: Gidrometeoizdat Publ.; 1983. 264 p. (In Russ.).
7. Pogorelov A.V. *Snow cover of the Greater Caucasus*. Moscow: Akademkniga Publ.; 2002. 287 p. (In Russ.).
8. Kondratyeva N.V., Gegiev K.A., Anaev M.T., Kupovykh G.V. Mudflow hazard of the Eastern Caucasus. *Izv. vuzov. Sev.-Kavk. region. Estestv. nauki = Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science*. 2016;(3):72-75. (In Russ.).
9. SP 428.1325800.2018. *Engineering surveys for construction in avalanche-prone areas. General requirements*. Moscow, 2018. 58 p. (In Russ.).
10. Panova S.V., Pogorelov A.V. Snow cover. *Natural resources of the Republic of North Ossetia-Alania. Climate*. Vladikavkaz: Proekt-Press Publ.; 2002:74-81. (In Russ.).
11. Zalikhanov M.Ch. *Snow-avalanche regime and prospects for development of the Greater Caucasus Mountains*. Moscow: Ofitsial'naya i delovaya Rossiya Publ.; 2014. 612 p. (In Russ.).
12. Adzhiev A.Kh., Kondratyeva N.V., Kortiev A.L., Shidugov I.Zh. Dynamics and assessment of weather conditions of the All-Season tourist and recreational complex "Mamison". *Ustoichivoe razvitie gornyykh territorii = Sustainable Development of Mountain Areas*. 2023;15(3):493-504. (In Russ.).
13. Kondratyeva N.V., Kerefova Z.M. Assessment of avalanche danger on the territory of the All-Season tourist and recreational complex "Mamison". *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya = Advances of Modern Natural Science*. 2024;(3):41-45. (In Russ.).

Информация об авторах

А.Х. Аджиев – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий отделом стихийных явлений.

Н.В. Кондратьева – доктор географических наук, доцент, старший научный сотрудник отдела стихийных явлений.

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

А.Л. Кортиев – кандидат технических наук, доцент кафедры начертательной геометрии и геодезии.

Information about the authors

A.H. Adzhiev - Doctor of Science (Physics and Mathematics), Professor, Head of the Department of Natural Phenomena.

N.V. Kondratyeva - Doctor of Science (Geography), Associate Professor, Senior Researcher, Department of Natural Phenomena.

G.V. Kupovykh - Doctor of Science (Physics and Mathematics), Professor, Head of the Department of Physical and Mathematical Foundations.

A.L. Kortiev - Candidate of Science (Technical), Associate Professor, Department of Descriptive Geometry and Geodesy.

Статья поступила в редакцию 15.04.2024; одобрена после рецензирования 26.05.2024; принята к публикации 04.07.2024.

The article was submitted 15.04.2024; approved after reviewing 26.05.2024; accepted for publication 04.07.2024.

Научная статья
УДК 551.501.777
doi: 10.18522/1026-2237-2024-3-48-53

ОБ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ МОБИЛЬНЫХ ПУНКТОВ ВОЗДЕЙСТВИЯ В КРАСНОДАРСКОЙ ПРОТИВОГРАДОВОЙ СЛУЖБЕ

Сергей Леонидович Алита¹, **Жанна Юсуповна Аппаева²**

^{1, 2} *Высокогорный геофизический институт, Нальчик, Кабардино-Балкарская Республика, Россия*

¹ *alitasergei@yandex.ru*

² *conkordya@mail.ru*

Аннотация. Представлена классификация причин пропусков града в Краснодарской противоградовой службе, сделанная на основе результатов исследований случаев крупных градобитий за последнее время, представляемых в ежегодных отчетах службы. Основное внимание уделяется группе причин, обусловленных недостатками в схеме размещения пунктов воздействия по защищаемой территории, а именно наличию обширной непростреливаемой области, расположенной на границах Западного, Чамлыкского и Мостовского противоградовых отрядов. Исследуется вопрос об экономической целесообразности применения мобильных пунктов воздействия на градовые процессы в Краснодарской противоградовой службе для решения проблемы непростреливаемой области между отрядами расположенной на юго-западе защищаемой территории. Описана расчетная методика, определение максимального количества мобильных пунктов воздействия с точки зрения рентабельности, которые целесообразно развернуть для решения данной проблемы в непростреливаемой области между противоградовыми отрядами. Также произведена оценка периода окупаемости мероприятий, связанных с организацией данного количества мобильных пунктов воздействия.

Ключевые слова: мобильный пункт воздействия, среднегодовой ущерб, защищаемая территория, рентабельность, срок окупаемости

Для цитирования: Алита С.Л., Аппаева Ж.Ю. Об экономической целесообразности применения мобильных пунктов воздействия в Краснодарской противоградовой службе // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2024. № 3. С. 48–53.

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

Original article

ON THE ECONOMIC FEASIBILITY OF USING MOBILE IMPACT POINTS IN THE KRASNODAR ANTI-HAIL SERVICE

Sergey L. Alita¹, **Zhanna Yu. Appaeva²**

^{1, 2} *High Mountain Geophysical Institute, Nalchik, Kabardino-Balkarian Republic, Russia*

¹ *alitasergei@yandex.ru*

² *conkordya@mail.ru*

© Алита С.Л., Аппаева Ж.Ю., 2024

Abstract. The article presents a classification of the causes of hail omissions in the Krasnodar Anti-Hail Service, made on the basis of the results of investigations of cases of large hail strikes in recent years, presented in the annual reports of the service. Of all the reasons for hail skips, the main attention is paid to a group of reasons due to shortcomings in the layout of impact points in the protected area, namely the presence of an extensive non-shootable area located on the borders of the Western, Chamlyk and Mostovsky anti-hail detachments. The article examines the issue of the economic feasibility of using mobile points of influence on hail processes in the Krasnodar anti-hail service to solve the problem of the non-shooting area between detachments located in the south-west of the protected area. The calculation method is described, according to which the maximum number of mobile impact points was determined, which, from the point of view of profitability, it is advisable to deploy to solve this problem in the non-shootable area between anti-hail detachments. The article also evaluates the payback period of measures related to the deployment of a given number of mobile impact points, in the sense of exceeding the cost of prevented damage over the costs necessary to deploy a given number of mobile impact points.

Keywords: mobile impact points, average annual damage, protected area, profitability, payback period

For citation: Alita S.L., Appaeva Zh.Yu. On the Economic Feasibility of Using Mobile Impact Points in the Krasnodar Anti-Hail Service. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2024;(3):48-53. (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

Противоградовые работы в Краснодарском крае проводятся на протяжении более 50 лет. За это время накоплен обширный статистический материал по эффективности работы противоградовой службы. По данным, приведенным в [1, 2], экономический эффект от проведения противоградовых работ в среднем превышает затраты на них примерно в 9 раз. Несмотря на это, до сих пор имеют место случаи крупных градобитий с причинением больших финансовых потерь производителям сельскохозяйственной продукции. Расследования случаев градобитий на территориях, охваченных противоградовой защитой, показали, что при использовании ракетной технологии [3] все причины, приводящие к пропуску града, можно разделить на четыре группы. Первую группу составляют причины, связанные с техническим несовершенством применяемых средств активного воздействия, а именно противоградовых ракет и пусковых установок. Вторая группа – ошибки персонала при проведении активного воздействия. Третья группа – обусловленные ошибками в организации противоградовых работ. Четвертая группа – вызванные недостатками в схеме размещения стационарных пунктов воздействия (ПВ) на защищаемой территории.

В данной статье рассматриваются экономические перспективы применения мобильных пунктов воздействия (МПВ) на градовые процессы [4] в Краснодарской противоградовой службе в части сопоставления затрат на их развертывание с ущербом от градобитий, ставших следствием недостатков в схеме размещения стационарных ПВ. В отличие от стационарных ПВ жилой модуль, пусковая установка и склад для ракет у МПВ размещены на шасси [5, 6] и могут быть передислоцированы с места на место в течение минимального времени.

Материалы и методика исследований

Исследование было проведено по данным о причинах пропусков града и величине среднегодового ущерба от градобитий, представленным в ежегодных отчетах Краснодарской противоградовой службы за период с 2010 по 2023 г. Из всех причин пропуска града выделялись только те, которые напрямую были связаны с недостатками в схеме размещения ПВ на защищаемой территории (таблица).

Причины пропуска града, связанные с недостатками в схеме размещения ПВ в Краснодарской противоградовой службе за период с 2010 по 2023 г. / Causes of hail misses related to deficiencies in the scheme of location of impact points in the Krasnodar anti-hail service for the period from 2010 to 2023

Причина пропуска града	Число пропусков града	% от общего числа случаев	Ущерб, руб.	Общее число пропусков града за весь период	Суммарный ущерб за весь период, руб.
Наличие запретных секторов	82	11,9	705 206 164	692	5 926 102 219
Отсутствие зоны предзащиты	71	10,3	610 388 529		
Малая плотность ПВ	67	9,7	574 831 915		
Наличие непростреливаемой области	20	2,9	171 856 964		

В четвертом столбце таблицы приведена величина суммарного ущерба, вызванного конкретной причиной пропуска града, за рассматриваемый период времени, рассчитанная по формуле

$$y_i = \frac{p}{100} \cdot U_{\text{сум}}, \quad (1)$$

где y_i – величина ущерба от i -й причины пропуска града, руб.; p – процент, который составляет число пропусков по конкретной причине от общего числа пропусков града (третий столбец); $U_{\text{сум}}$ – величина суммарного ущерба от пропусков града по всем причинам (шестой столбец), руб.

Как следует из таблицы, на долю причин пропуска града, связанных с распределением ПВ по защищаемой территории в Краснодарской противоградовой службе, приходится около 35 % от всех случаев градобитий (240 случаев из 692).

Отдельной строкой в таблице представлен ущерб, связанный с существованием обширной непростреливаемой области между ПВ Западного отряда (Республика Адыгея) и Чамлыкского и Мостовского отрядов (Краснодарский край) (рисунок).

На рисунке красным контуром показана суммарная область обстрела всех ПВ. В любое место внутри данной области при необходимости может быть внесен реагент посредством запуска ракеты минимум с одного ПВ. Непростреливаемая область между отрядами показана штриховкой. Наличие данной области создает системные проблемы при проведении противоградовых работ ввиду того, что на регулярной основе реализуется следующий сценарий развития ситуации: градовое облако зарождается на юге вне зоны действия ПВ, что исключает возможность его разрушения на ранних стадиях развития. Затем оно, как правило, движется на север или северо-северо-восток, проходя по непростреливаемой области между отрядами, и входит на защищаемую территорию, развившись до третьей или четвертой категории и давая град на земле (рисунок). Таким образом, эффективность воздействия на градовое облако снижается из-за того, что работать приходится на прерывание уже выпадающего града, а расход противоградовых ракеткратно возрастает [7].

В работе [8] был представлен анализ схемы расположения ПВ в Краснодарской противоградовой службе по методике, изложенной в работе [9]. В целом схема расположения ПВ была признана удовлетворительной, о чем свидетельствует относительно небольшой процент пропусков града по причинам, связанным с размещением ПВ, в отличие от Ставропольской и Крымской служб, в которых процент пропусков града по данной причине значительно выше [9, 10]. Ощутимо снизить его можно за счет размещения в заштрихованной области рисунка некоторого количества МПВ для обработки градовых ячеек, идущих с южного или юго-западного направления.



Конфигурация защищаемой территории в Краснодарской противорадовой службе
 / Configuration of the protected area in the Krasnodar Anti-Hail Service

Оценку рентабельного количества МПВ, которое можно развернуть для закрытия непротреливаемой области между отрядами, определим исходя из следующего неравенства:

$$N_{\text{МПВ}} < \frac{\bar{Y}}{Z_{\text{МПВ}} + \bar{C}_{\text{ПГР}}}, \quad (2)$$

где $N_{\text{МПВ}}$ – количество планируемых МПВ; \bar{Y} – среднегодовой ущерб от причин, связанных с наличием непротреливаемой области, руб/год; $Z_{\text{МПВ}}$ – затраты на годовое содержание одного МПВ, руб/год; $\bar{C}_{\text{ПГР}}$ – стоимость среднегодового расхода противорадовых ракет на одном ПВ, руб/год.

Величину $\bar{C}_{\text{ПГР}}$ можно рассчитать по формуле

$$\bar{C}_{\text{ПГР}} = \bar{n} \cdot c_{\text{ПГР}}, \quad (3)$$

где \bar{n} – среднегодовой расход ракет на одном ПВ; $c_{\text{ПГР}}$ – стоимость одной противорадовой ракеты.

Период окупаемости планируемого количества МПВ можно оценить при помощи соотношения

$$T = \frac{N_{\text{МПВ}} \cdot C_{\text{МПВ}}}{\bar{Y} - N_{\text{МПВ}} \cdot (Z_{\text{МПВ}} + \bar{C}_{\text{ПГР}})}, \quad (4)$$

где T – продолжительность срока окупаемости, лет; $C_{\text{МПВ}}$ – стоимость одного МПВ, руб.

Результаты исследования

Согласно данным таблицы, оценочную величину среднегодового ущерба от градобитий, вызванных наличием непростреливаемой области между отрядами, можно рассчитать по формуле

$$\bar{Y} = \frac{y}{M}, \quad (5)$$

где y – величина ущерба от наличия непростреливаемой области $y = 171\,856\,964$ руб.; M – число лет в рассматриваемом периоде, $M = 14$. Таким образом, величина среднегодового ущерба от наличия непростреливаемой области составляет $\bar{Y} = 12\,273\,497$ руб/год.

По данным противорадовых служб, в 2023 г. стоимость разворачивания одного стационарного ПВ, в зависимости от региона, составляла от 3 до 5 млн руб. В первом приближении можно считать, что стоимость создания одного МПВ будет находиться примерно в этих же пределах. Ввиду того, что при разворачивании МПВ не требуется производить работы по строительству капитального ограждения, а также заливке площадок под пусковые установки и склад, примем эту стоимость равной нижнему пределу: $C_{МПВ} = 3\,000\,000$ руб.

Стоимость одной противорадовой ракеты в 2023 г. равнялась 27 000 руб. для «Алазани-9» и 30 840 руб. для «Алазани-6». Исходя из того, что при проведении активного воздействия ракеты этих типов расходуются примерно в пропорции 1:1, примем оценочную стоимость одной ракеты равной средней величине $\sim 28\,920$ руб. По данным, представленным в статье [8], среднегодовой расход ракет на одном ПВ Краснодарской противорадовой службы составил ~ 103 ракеты, следовательно, среднегодовые затраты на закупку ракет для одного МПВ составят $\bar{C}_{ПВР} = 2\,978\,760$ руб/год.

По данным Краснодарской противорадовой службы, в 2023 г. годовые расходы на содержание одного стационарного ПВ – 1 696 733 руб. В случае с МПВ все статьи расходов будут аналогичными, исключение составят только расходы на ГСМ и электроснабжение. В случае с МПВ стационарное электроснабжение на них не предусматривается. Каждый МПВ должен быть снабжен автономным электрогенератором. В связи с этим в первом приближении примем, что расходы на электроснабжение обнуляются, а к расходам на ГСМ добавится сумма, входившая ранее в расходы на электроснабжение стационарного ПВ. Таким образом, оценочно будем считать, что расходы на содержание одного МПВ в течение года будут аналогичными расходам на содержание стационарного ПВ и составят $Z_{МПВ} = 1\,696\,733$ руб/год.

Подставляя значения для \bar{Y} и $Z_{МПВ}$ в формулу (2), получим количество МПВ, которое можно развернуть в непростреливаемой области: $N_{МПВ} \leq 2$. Срок окупаемости затрат при $N_{МПВ} = 2$, рассчитанный по формуле (4), составит $T = 2,1$ года.

Заключение

В результате проведенного анализа было получено оценочное количество МПВ, которое целесообразно с точки зрения рентабельности развернуть в непростреливаемой области между Западным, Чамлыкским и Мостовским отрядами в Краснодарской противорадовой службе. Произведена оценка периода окупаемости затрат на развертывание двух МПВ. С учетом затрат на их закупку, приобретение противорадовых ракет и текущие расходы по содержанию МПВ продолжительность этого периода составит $\sim 2,1$ года. При существующем уровне затрат на проведение противорадовой защиты и текущем уровне ущерба от градобитий, связанных с непростреливаемой областью между отрядами, размещение большего числа МПВ в данной области, по нашему мнению, представляется нецелесообразным.

Список источников

1. Лиев К.Б., Куцев С.А., Долова М.Л. Экономическая эффективность противорадовой защиты Краснодарской военизированной службы // Каспий и глобальные вызовы: материалы Междунар. науч.-практ. конф. Астрахань: Астраханский гос. ун-т, 2022. С. 446–450.

2. Лиев К.Б., Куцев С.А. Экономическая эффективность противоградовой защиты // Безопасность жизнедеятельности. 2022. № 10. С. 49–52.
3. Абшаев А.М., Абшаев М.Т., Бареева М.В., Малкарова А.М. Руководство по организации и проведению противоградовых работ. Нальчик: Печатный двор, 2014. 508 с.
4. Алита С.Л. Перспективы создания мобильных пунктов воздействия на градовые процессы // Доклады Всерос. открытой конф. по физике облаков и активным воздействиям на метеорологические процессы. Нальчик: Принт Центр, 2021. С. 371–375.
5. Пат. РФ № 2738319. Автоматизированная ракетная пусковая установка / С.Л. Алита. Заявл. 17.03.2020. Оpubл. 11.12.2020.
6. АС РФ № 220863. Контейнер на колесном шасси для хранения и перевозки противоградовых ракет / С.Л. Алита, Х-М.Х. Байсиев. Заявл. 06.03.2023. Оpubл. 06.10.2023.
7. Отчет ФГБУ ВГИ, НИТР. Раздел 2: Методическое сопровождение работы военизированных служб Росгидромета, региональных противолавинных центров Росгидромета, снеголавинных станций и наблюдений за снежным покровом в горах. 2023. 84 с.
8. Алита С.Л., Борисова Н.А. Анализ схемы расположения пунктов воздействия в Краснодарской противоградовой службе // Тр. ГГО. 2021. Вып. 602. С. 116–123.
9. Алита С.Л., Борисова Н.А. Разработка концепции расположения мобильных пунктов воздействия на градовые процессы // Тр. ГГО. 2020. Вып. 599. С. 151–161.
10. Алита С.Л., Борисова Н.А. Анализ схемы расположения пунктов воздействия в Крымской противоградовой службе // Тр. ГГО. 2023. Вып. 608. С. 145–158.

References

1. Liev K.B., Kushchev S.A., Dolova M.L. Economic efficiency of anti-hail protection of the Krasnodar paramilitary service. *The Caspian Sea and global challenges*. Materials of the International Scientific and Practical Conference. Astrakhan: Astrakhan State University Press; 2022:446-450. (In Russ.).
2. Liev K.B., Kushchev S.A. Economic efficiency of anti-hail protection. *Bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti = Life Safety*. 2022;(10):49-52. (In Russ.).
3. Abshaev A.M., Abshaev M. T., Barekova M. V., Malkarova A.M. *Guidelines for the organization and conduct of anti-hail work*. Nalchik: Pechatnyi dvor Publ.; 2014. 508 p. (In Russ.).
4. Alita S.L. Prospects for the creation of mobile impact points on hail processes. *Proceedings of the All-Russian Open Conference on Cloud Physics and Active Impacts on Meteorological Processes*. Nalchik: Print Tsentrl Publ.; 2021:371-375. (In Russ.).
5. Alita S.L. *An automated rocket launcher*. Patent No. 2738319. Appl. 17th March 2020. Publ. 11th December 2020. (In Russ.).
6. Alita S.L., Baisiev H-M.H. *A container on a wheeled chassis for storing and transporting anti-hail missiles*. Certificate No. 220863. Appl. 6th March 2023. Publ. 6th October 2023. (In Russ.).
7. *Report of FSBI HMGI, NITR. Section 2: Methodological support of the work of the paramilitary services of Roshydromet, regional avalanche centers of Roshydromet, snow avalanche stations and observations of snow cover in the mountains*. 2023. 84 p. (In Russ.).
8. Alita S.L., Borisova N.A. Analysis of the layout of impact points in the Krasnodar Anti-Hail Service. *Tr. GGO = Proceedings of Main Geophysical Observatory*. 2021;(602):116-123. (In Russ.).
9. Alita S.L., Borisova N.A. Development of the concept of the location of mobile impact points on hail processes. *Tr. GGO = Proceedings of Main Geophysical Observatory*. 2020;(599):151-161. (In Russ.).
10. Alita S.L., Borisova N.A. Analysis of the layout of impact points in the Crimean Anti-Hail Service. *Tr. GGO = Proceedings of Main Geophysical Observatory*. 2023;(608):145-158. (In Russ.).

Информация об авторах

С.Л. Алита – кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией средств воздействия отдела активных воздействий.

Ж.Ю. Аппаева – кандидат физико-математических наук, научный сотрудник отдела активных воздействий лаборатории радиометеорологии.

Information about the authors

S.L. Alita - Candidate of Science (Physics and Mathematics), Head of the Laboratory of Influencing Means of the Active Influences Department.

Zh.Yu. Appaeva - Candidate of Science (Physics and Mathematics), Researcher of the Active Influences Department of the Radio Meteorology Laboratory.

Статья поступила в редакцию 25.03.2024; одобрена после рецензирования 27.04.2024; принята к публикации 04.07.2024.
The article was submitted 25.03.2024; approved after reviewing 27.04.2024; accepted for publication 04.07.2024.

Научная статья

УДК 631.472

doi: 10.18522/1026-2237-2024-3-54-62

КЛИМАТИЧЕСКИЕ И ПАЛЕОКЛИМАТИЧЕСКИЕ ФАКТОРЫ ПОЧВООБРАЗОВАНИЯ НА ТЕРРИТОРИИ КРЫМСКОГО ПОЛУОСТРОВА

Елена Ивановна Ергина^{1✉}, Екатерина Андреевна Артемова²

^{1, 2} Крымский федеральный университет имени В. И. Вернадского, Симферополь, Республика Крым, Россия

¹ ergina65@mail.ru

² artemova199829@mail.ru

Аннотация. Приведены данные об особенностях динамики климата на территории Крымского полуострова на протяжении голоцена. Учет палеоклиматических данных необходим для прогнозирования направленности эволюции почв и почвенного покрова полуострова. Особенно важно учитывать наличие реликтовых свойств почв в связи с прогрессирующим антропогенным вмешательством в процессы современного почвообразования. Акцентируется внимание на необходимости учета несвойственных зональным почвам признаков при разработке стратегий рационального использования почв. Ведь чаще всего по объективным причинам измененный или унаследованный признак навсегда исчезает из нынешней природной обстановки и не может быть восстановлен.

Ключевые слова: климат, палеоклимат, почвы, голоцен, Крымский полуостров

Для цитирования: Ергина Е.И., Артемова Е.А. Климатические и палеоклиматические факторы почвообразования на территории Крымского полуострова // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2024. № 3. С. 54–62.

Благодарности: исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда № 24-17-20020.

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

Original article

CLIMATIC AND PALEOCLIMATIC FACTORS OF SOIL FORMATION IN THE TERRITORY OF THE CRIMEAN PENINSULA

Elena I. Ergina^{1✉}, Ekaterina A. Artemova²

^{1, 2} Vernadsky Crimean Federal University, Simferopol, Republic of Crimea, Russia

¹ ergina65@mail.ru

² artemova199829@mail.ru

Abstract. The article provides data on the peculiarities of climate dynamics on the territory of the Crimean Peninsula during the Holocene. Taking into account paleoclimatic data is necessary to predict the direction of evolution of soils and soil cover of the peninsula. It is especially important to take into account the presence of relict properties of soils, taking into account the progressive anthropogenic interference in the processes of modern soil formation. Attention is focused on the need to take into account features unusual for zonal soils when developing Soil management strategies. After all, most often, for objective reasons, a changed or inherited trait disappears forever from the current natural environment and cannot be restored.

Keywords: climatic, paleoclimate, soils, Holocene, Crimean Peninsula

© Ергина Е.И., Артемова Е.А., 2024

For citation: Ergina E.I., Artemova E.A. Climatic and Paleoclimatic Factors of Soil Formation in the Territory of the Crimean Peninsula. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2024;(3):54-62. (In Russ.).

Acknowledgments: the research was supported by a grant from the Russian Science Foundation No. 24-17-20020.

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

Введение

Современные почвы – уникальные источники информации о состоянии географической среды как в прошлом, так и в настоящем. Иногда при морфологическом или визуальном исследовании разрезов видны следы несоответствия строения профиля сформированной почвенной системы современным факторам почвообразования, и тогда некоторые признаки древнего почвообразования могут неправильно истолковываться и искажать правильное определение актуального почвообразующего потенциала факторов почвообразования. Это может привести к ошибкам при проведении сравнительно-географического и историко-географического анализа исследуемой территории. Ведь некоторые реликтовые свойства почв могут быть приняты за индикаторы при палеоклиматических и палеогеографических исследованиях.

Для Крымского полуострова с его высоким почвенным разнообразием, наличием почв со свойствами, которые не соответствуют современным факторам почвообразования, в первую очередь климатическому как наиболее динамичному, эта проблема остается чрезвычайно актуальной. Особое внимание обнаружению таких унаследованных признаков и свойств необходимо уделять при разработке и усовершенствовании стратегий землепользования в условиях изменчивости среды, трансформации вещественно-энергетических потоков в результате синтеза как естественных причин, так и антропогенного воздействия. Особенно аккуратно необходимо подходить к вопросам использования почв с применением всевозможных методов мелиорации, ренатурации и стимулирования процессов почвообразования. Ведь если некоторые свойства современных почв с разной скоростью, пусть даже незначительной, могут быть восстановлены в естественной среде [1], а некоторые процессы можно даже оптимизировать (мощность гумусового горизонта, содержащее гумуса и др.), то для почв, имеющих унаследованные признаки, такой подход может привести к полной потере реликтовых признаков.

В данной работе более подробно рассмотрим вклад наиболее динамичного фактора – климатического – в процессы почвообразования, или, как принято называть в литературе, почвообразующий потенциал климата. Согласно С.А. Шобе и др. это «теоретически возможная способность данного стабильного объединения климата через процессы выветривания и почвообразования максимально полно и глубоко превращать данную материнскую породу в определенных условиях рельефа в климаксное почвенное тело на протяжении неограниченного времени действия» [2, с. 91].

Результаты и их обсуждение

Современное теоретическое почвоведение трактует возможность образования различных почв при одинаковых сочетаниях тепла и влаги, но при различных геологических, геоморфологических, геохимических и гидрологических комбинациях окружающей среды. Это явление В.О. Таргульян с соавторами предлагает называть неклиматической дивергенцией почв внутри одной климатической зоны [3]. Основные закономерности возникновения педоразнообразия, сводятся к таким группам: литоразнообразие (литоматричность почв); топоразнообразие (топоматричность); хроноразнообразие (хроностадиальность); биогенное педоразнообразие [3].

Перечисленные выше условия почвообразования характерны для Крымского полуострова, их сочетание приводит к высокому почвенному разнообразию полуострова. В пределах незначительной по площади территории формируется почти 440 видов и родов почв [4, 5].

Каковы же климатические закономерности, обусловившие почвенное разнообразие Крыма?

Во-первых, для Крыма характерен значительный приток солнечной радиации и тепловой энергии в течение года; во-вторых, мягкая зима, жаркое лето; в-третьих, дефицит осадков почти на всей территории.

Продолжительность солнечного сияния на полуострове достигает 2180–2470 ч в год с максимальным объёмом в летний период, так, в июле продолжительность сияния Солнца составляет 320–360 ч. Максимальные значения прямой солнечной радиации наблюдаются в июне – 473,1–523,4 МДж/м², минимум – в декабре – 41,87–62,8 МДж/м².

Теплообмен как один из основных циклов климатообразования предопределяет климат территории и характер погоды. В Крыму среднемноголетняя годовая динамика приземной температуры воздуха почти совпадает с закономерностями среднемноголетней годовой динамики радиационного баланса. Географические закономерности поступления тепла на полуостров закономерно изменяются с севера на юг, за исключением Южного берега Крыма, где отмечается зональность в направлении восток – запад. Самый жаркий месяц – июль, среднемесячная температура приземного слоя воздуха достигает +23 ... +24 °С, а в горах – +16 °С. Самый холодный месяц – февраль. Среднемесячная температура приземного слоя воздуха в феврале опускается до –4,0 °С в горных районах полуострова, а наиболее высокая – около 5 °С – на южном побережье [6].

Большая часть территории полуострова относится к зоне недостаточного увлажнения, характерной особенностью которой является вертикальная зональность в распределении влажности воздуха и количества осадков, особенно в предгорье и горах. Осадки распределяются крайне неравномерно, что связано с неоднородностью рельефа территории и закономерностями циркуляции атмосферы с учетом местных циркуляционных процессов. Годовая сумма осадков в среднемноголетнем режиме колеблется в пределах 300–400 мм в степных районах, в центральных областях равнинного Крыма увеличивается до 460 мм, на Тарханкутском и Керченском полуострове – 316–412 мм. В горах среднемноголетняя сумма осадков достигает 1000 мм и больше. Величина испаряемости почти в 2 раза больше количества выпавших осадков и составляет 744–855 мм. В предгорье Главной гряды Крымских гор годовое количество осадков составляет 500–570 мм, в прибрежной части – 395 мм [6]. Из данных табл. 1 следует, что наиболее полно влага в виде эффективных осадков участвует в процессе почвообразования в предгорной лесостепи и западной части южнобережного субсредиземноморья (до 82–88 % от годовой суммы осадков).

Коэффициент годового увлажнения (по Иванову) в равнинной части полуострова изменяется в пределах 0,34–0,47. В предгорье коэффициент увлажнения – 0,56. Особенностью режима осадков над полуостровом является их преимущественное выпадение в теплое время над равнинной и предгорной частью и зимний максимум над территорией южного берега в пределах субтропического типа климата. К сожалению, большинство осадков летом выпадает в виде ливней, провоцируя развитие эрозии почв на территории полуострова.

Для проведения ретроспективного анализа палеоклиматических условий Крыма и, как следствие, определения тенденций эволюции почв использовались разнообразные источники, содержащие информацию о климате Европы, Восточно-Европейской равнины и Крыма.

Изучению закономерностей доголоценового этапа почвообразования на территории Крымского полуострова посвящены работы многих отечественных авторов [7–10]. В большинстве из них на основе изучения погребенных почв проводится реконструкция условий почвообразования в геохронологической последовательности. В этот период времени этапы почвообразования чередовались с этапами породообразования, но процесс почвообразования при этом не прерывался, хотя и имел различную интенсивность, коррелирующую с факторами – почвообразователями.

Сведения об изменении климата на территории Крымского полуострова в исторический период неоднозначны и разновременны, но являются источниками информации. Первые письменные источники о Крыме появляются во времена Античности – конец суббореальной и начало атлантической эпохи голоцена. Наиболее интересными и информативными являются работы древних греков и позже римлян: Геродота, Страбона, Вергилия, Гая Плиния Секунда и др.

В эпоху Средневековья сведения о природе полуострова можно получить путем анализа русских писцовых книг, свидетельств турецких и арабских путешественников. Другие методы – лихенометрический, радиоуглеродный, стратиграфический, палинологический – дают надежные результаты в пределах тысячелетий при сочетании с анализом письменных свидетельств.

Таблица 1 / Table 1

Климатическая характеристика Крыма [11] / Climatic characteristics of the Crimea [11]

Метеостанция	Средне-годовая температура, °С	Годовая сумма осадков, мм	Годовая испаряемость, мм	Коэффициент увлажнения	Эффективные осадки ¹ , мм	Почвы
Армянск	10,0	341	958	0,36	263	Каштановые солонцеватые, солонцы
Черноморское	10,5	316	771	0,42	247	Черноземы южные мицеллярно-карбонатные, дерново-карбонатные
Евпатория	11,0	353	872	0,40	283	
Клепинино	10,0	466	931	0,50	338	
Джанкой	10,6	418	966	0,43	–	Черноземы южные мицеллярно-карбонатные, каштановые
Керчь	10,6	412	841	0,49	301	Черноземы южные мицеллярно-карбонатные
Севастополь	12,0	349	940	0,37	292	Коричневые, в комплексе с дерново-карбонатными
Почтовое	10,3	482	953	0,51	209	Черноземы карбонатные и дерново-карбонатные
Симферополь	10,1	501	958	0,52	420	Черноземы карбонатные и дерново-карбонатные
Ай-Петри	5,7	1052	755	1,39	1052	Бурые горно-лесные, горно-луговые
Ялта	13,0	560	1059	0,23	558	Коричневые
Алушта	12,3	427	1023	0,42	349	Коричневые
Судак	11,9	318	1048	0,30	238	Коричневые

Примечание. 1 – часть осадков, которая остается в почве и доступна растениям.

Историко-географические исследования XVIII в. сопряжены с наличием картографической информации и началом инструментальных исследований. С освоением южных окраин России проводится широкое исследование природы региона. Поэтому уже в первые годы после вхождения территорий северного побережья Черного моря в состав России Петербургская академия наук начала исследования Крыма. Итогом этих работ служили обзоры природы и крупномасштабные карты отдельных частей полуострова. Они выполнены под руководством К.И. Габлица в 1786 г. и опубликованы митрополитом Евгением Болховитиновым [10]. Ценными источниками информации стали работы П.С. Палласа и Ф. Дюбуа де Монперё, а также работы офицеров Генерального штаба, обобщенные в [13]. После создания сети метеорологических станций на полуострове начался этап статистической обработки рядов инструментальных климатических наблюдений.

При палеорекострукциях природы Крыма довольно часто возникают проблемы с актуализацией сведений, обусловленные отсутствием информации в некоторые периоды, что объясняется историей заселения края. Метод аналогий позволяет восстановить недостающие фрагменты и выявить закономерности процесса или явления на других территориях. Так, например, в периоды потеплений на севере европейской части страны климат южных регионов и Крыма становится более сухим, особенно в летний период, а во времена похолоданий – более влажным.

Палинологические данные [8, 9] свидетельствуют, что в период похолодания предбореала (включает в себя арктический и субарктический периоды по [10]), нижняя граница датируется 10200 лет тому назад, на территории Крыма, как и на большей части Европы, господствовали березовые леса с участием граба и ольхи, под которыми на северных склонах Крымских гор и на территории Юго-Западного Крыма сформировались бурые лесные почвы (в современном почвенном покрове это, несомненно, реликтовые образования). В бореальный период (9500 лет тому назад) происходит незначительное потепление климата в целом в Европе и в ландшафтах появляются смешанные и дубовые леса. Начало атлантического этапа (нижняя граница 8000 лет тому назад) в южной части Европы характеризовалось сухим и теплым климатом. Этот период заслуженно называют климатическим оптимумом голоцена. В Европе преобладал теплый сухой климат. Среднегодовая температура превышала современную на 1,5–2 °С. Увлажненность незначительно превышала современные значения, но тем не менее осадков выпадало больше на 50–100 мм/год. Климатические и ландшафтные зоны в регионе были сдвинуты на 500 км к северу. 6000 лет назад уровень океана был близок к современному и не превышал нынешние значения. В Европе господствовали дубовые леса. А в Крыму в пыльце выявлено увеличение числа теплолюбивых видов средиземноморского происхождения, которое свидетельствует о потеплении на ранней стадии атлантики (7500–6000 лет тому назад). Климатические изменения этого периода способствовали развитию новых трендов в эволюции почв: «...быстрому переходу от бурой лесной почвы плейстоцена к черноземам бореального этапа и, в конце концов, развитию коричневых почв ранней атлантики» [10, с. 96]. Вторая половина атлантического этапа и начало суббореального (6000–4200 лет тому назад) характеризовались увеличением гумидности. В Крыму это отразилось в увеличении лесистости и развитии более влажных вариантов коричневых почв, известных как луговые коричневые почвы. Сухой период (4200–3300 лет тому назад) на территории Крыма отразился в пыльце растений [8, 9]. В этот период на территории Крыма на месте зоны современных темно-каштановых почв располагались каштановые и светло-каштановые [10]. Анализ погребенных палеопочв подтверждает, что за последние 45 веков почвы не эволюционировали в другие генетические почвы. Но происходили изменения в пределах родов и видов. Например, по [10], 5–4,5 тыс. лет на месте зоны современных каштановых почв располагались каштановые и светло-каштановые. В погребенных почвах наблюдаются следующие тенденции эволюции почвенного покрова: уменьшение обменного натрия и магния, более широкая граница соотношения кальция и магния по сравнению с современными зональными почвами [10].

По данным П.Д. Подгородецкого с соавторами, в погребенных почвах насыпи Золотого кургана с течением времени происходит осолонцевание черноземов [14]. В почвах, сформированных в этот период, содержится большее количество хлора и сульфатов.

Усиливается влияние Черного моря на процессы местной циркуляции атмосферы. В Крыму формируется широтная аномалия почвенных подзон. Начинаются процессы рассоления и осолонцевания почв. Уровень Черного моря в III тысячелетии до н.э. снижается и достигает уровня на 10–8 м меньше современного. В этот период происходит заполнение котловины Азовского моря [11, 12]. В позднем суббореале в районе озера Джарылгач появляются долинные леса со значительным участием широколиственных пород [10].

С увеличением доли древесной растительности в ландшафте также связана следующая влажная фаза конца суббореального этапа (3300–2700 лет тому назад), которая достигла своего пика 2–1,5 тыс. лет назад. В целом суббореальный период (нижняя граница которого 5000 лет назад) отличался похолоданием и смещением ландшафтных зон к экватору, наступлением горных ледников в Европе и Америке, а в аридных областях этот период характеризовался засухливостью.

Субатлантический период (нижняя граница – 2100 лет тому назад) в целом характеризуется увеличением влажности и распространением в европейской части страны влаголюбивых пород (бук, граб). По данным о годовом стоке р. Днепр и отложениях в Сакском озере величина коэффициента увлажнения достигала 1,15 [14].

Характеристику последнего этапа голоцена уместно рассмотреть в масштабе многовековой динамики. Начало субатлантического периода (V–VI вв. до н.э.) ознаменовалось значительным похолоданием. Происходило смещение ландшафтных зон к экватору, наступление горных ледников в Европе и Америке. В Крыму отмечалась большая водность рек, увеличение количества

временных водотоков, источников, повышение уровня внутренних водоемов, что обеспечивало местное население водными ресурсами. О климате Крыма Геродот писал: «Страна скифов представляет собой богатую травой ... равнину ... с толстым слоем почвы ... Во всей земле скифов ... не встретишь деревьев ... зима столь сурова, что восемь месяцев ... стоит невыносимая стужа. В это время хоть лей на землю воду, грязи не будет ... Море здесь и весь Боспор Киммерийский замерзают, так что скифы ... на своих повозках переезжают на ту сторону ... Такие холода продолжаются в тех странах сплошь восемь месяцев, да и остальные четыре месяца не тепло» [15]. В IV в. до н.э. наблюдался период незначительного потепления и увлажнения. В Крыму сложились благоприятные условия для выращивания сельскохозяйственных культур. Письменные документы свидетельствуют о значительных объемах вывоза зерна из Причерноморья в страны Средиземноморья в V–IV вв. до н.э. С конца IV в. до н.э. наблюдалось повышение температуры воздуха [16]. Период похолодания III–I вв. до н.э. характеризуется резким снижением урожайности в Причерноморье. Объемы вывозимого зерна с территории Крыма в Грецию снижались. Сохранились свидетельства о замерзании Черного моря. Наиболее печальные картины климата Крыма описаны Овидием (I в. до н.э. – начало н.э.): «Седая полынь ледяного Понта ... В пустых районах печально щетинится полынь и горькая жатва» [цит. по: 16, с. 63]. Зимние картины Вергилия также впечатляют: «Между тем снег идет по всему воздуху; гибнут стада, большие тучи быков стоят, окруженные снегами, и олени густыми стадами вязнут в новых снежных скалах, из которых виднеются вершущки их рогов» [цит. по: 16, с. 63].

С I–IV вв. н.э. климатические условия в целом были близки к современным – наблюдалось незначительное потепление и повышение увлажненности. Гай Плиний Секунд (I в. н.э.) писал: «В Скифии водится очень мало животных вследствие недостатка растительности» [цит. по: 16 с. 64], отмечал частое замерзание Керченского пролива. Лавр не удалось развести в Крыму, но гранат, смоковница, яблоки и груши хорошо плодоносили. Повысилась урожайность сельскохозяйственных культур [16].

В V–IX вв. в результате потепления ожили города Причерноморья. Валы Перекопа заросли деревьями, о чем писал Константин Багрянородный.

Следующий этап (X–XII вв.) выделяется повышением температур на большей части Восточно-Европейской равнины. В степной и полупустынной зоне климатические условия были близки к современным. В XII–XV вв. в Крыму отмечалось незначительное похолодание, что сказалось на снижении урожайности зерновых культур. Этот температурный тренд продолжился и в XV–XVIII вв. В этот период наблюдалось и увеличение увлажненности. В результате чего происходило разрастание буковых лесов, что возможно при высокой летней увлажненности [16]. Рост увлажненности сказывался на появлении мелких озер. Многие западины заняты водой, что необходимо учитывать при изучении морфологии почв, сформированных на днище западин и подов. Но в целом энергетические характеристики климата не оказывали влияния на тренды процессов почвообразования.

С середины XIX в. начинается новый этап, климатические закономерности которого нам относительно хорошо известны благодаря инструментальным метеорологическим наблюдениям. В этот период сокращаются массивы лесов в предгорьях Крыма, что связано с антропогенным воздействием, усиливаются позиции степных элементов флоры, происходит снижение процесса восстановления буковых лесов, особенно в нижних частях склонов Крымских гор, усиление позиций степных элементов флоры; в степях усиливаются процессы аридизации, что выражается в развитии дерновинных злаков, пустынных полукустарничков [16]. Почвообразование происходило в условиях, близких к современным.

Основные закономерности динамики климатической системы полуострова на протяжении голоцена [8, 14, 16–19] представим в виде табл. 2.

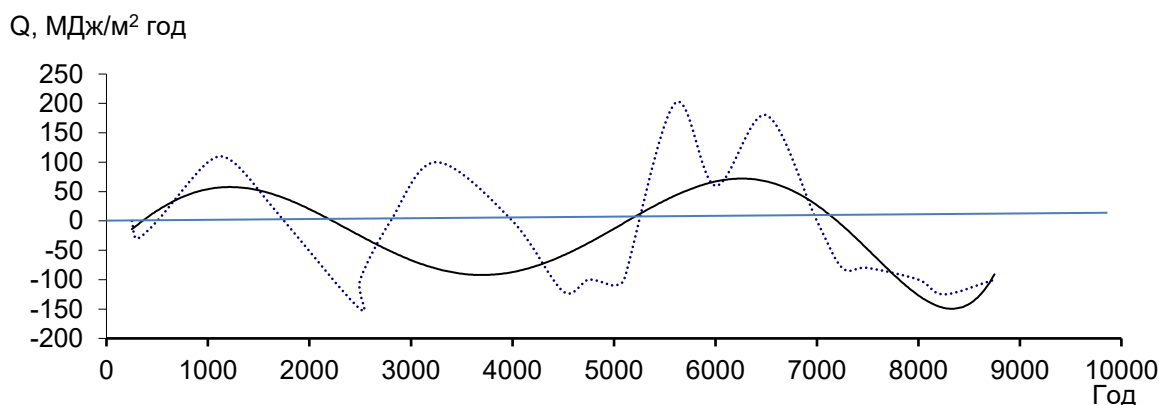
Климатическая обусловленность процесса почвообразования хорошо выражается через энергетические затраты на него (Q). Величина энергетических затрат на почвообразование отражает общие закономерности почвенно-географической зональности и позволяет количественно оценить роль основных климатических факторов (солнечная энергия и суммарное количество осадков), влияющих на почвообразовательный процесс. Ранее нами установлены географические зависимости распределения величины энергетических затрат на почвообразование для территории Крымского полуострова [1] (рисунок).

Таблица 2 / Table 2

**Характеристики климата Крыма в историческое время
 / Characteristics of the climate of Crimea in historical times**

Эпоха		Климатические тенденции в Крыму
DR-3 ² ; PB-1; PB-2; BO-1; BO-2	11–8 тыс. л. т. н.	Похолодание
AT-1; AT-2	8–6 тыс. л. т. н.	Похолодание
AT-3; AT-4	6–4,5 тыс. л. т. н.	Потепление
SB-1; SB-2	4,5–3 тыс. л.т.н.	
SB-3; SA-I	3–1,5 тыс. л.т.н.	Прохлада и влажнее
SB-3; SA-1	VI–V в. до н.э.	Прохлада и влажнее современного
	IV в. до н.э.	Незначительное потепление и влажнее
	IV–I в. до н.э.	Прохлада и суше современного
	I в. до н.э.	Прохлада и влажнее
	I в.	Незначительное потепление, влажнее
	II–III вв.	Потепление и влажнее
SA-2; SA-3	V–IX вв.	Потепление
	XII–XV вв.	Похолодание
SA-3	XV–XVIII вв.	Похолодание, увеличение увлажненности
	XIX–XX вв.	Повышение температур и региональные особенности динамики осадков

Примечание. Периодизация голоцена Блитта – Сернандера (по Хотинскому [20]) для Евразии: позднее послеледниковье (DR) – 10300–10500 л. т. н.; предбореальный (PB) бореальный (BO) – 9000–9500 л. т. н.; бореально (BO) – атлантический (AT) – 9500–8000 л. т. н.; атлантико (AT) – суббореальный (SB) – 8000–4500 (5000) л.т.н; суббореально-субатлантический (SA) – 4500 (5000) – 2500 (2200) л. т. н.



Энергетические затраты на почвообразование в голоцене на территории Крымского полуострова (0 – современные значения) / Energy costs for soil formation in the Holocene on the territory of the Crimean Peninsula (0 - modern values)

Анализ многовековых циклов динамики энергетических затрат на почвообразование позволяет предположить, что в течение голоцена на территории Крымского полуострова наблюдались условия для формирования почв с различными свойствами. Поскольку изменение энергетических затрат на почвообразование в пределах 100 МДж/м²·год должно приводить к процессу почвообразования смежных типов. Да и длительность некоторых периодов более 1500 лет достаточно для формирования полнопрофильных почв [1]. Следы отражения итогов древнего почвообразования могут оставаться в профиле в виде реликтовых свойств. Такие условия на территории полуострова наблюдались в периоды 7000–5000 и 4500–2500 лет назад. Трудности восстановления полной

картины почвообразования в голоцене связаны с тем, что крымские почвы являются полигенетическими и на многие процессы почвообразования с течением времени накладываются иные условия. Учет особенностей влияния энергетических затрат на почвообразование в настоящее время является наиболее актуальным при проведении почвенно-генетических исследований.

Выводы

Территория Крыма характеризуется значительным почвенным разнообразием, обусловленным наряду с иными факторами почвообразования значительной флуктуацией климатических условий.

При изучении направленности эволюции для создания прогнозов использования почв важно учитывать реликтовые свойства почв, сформированных в иных климатических условиях. Большинство современных почв на территории полуострова начали формироваться более 5000 лет назад. Конечно, учет амплитуды метеоэлементов за весь период должен проводиться, основываясь на нескольких периодах как минимум вековой продолжительности, но опубликованные данные инструментальных наблюдений охватывают лишь полуторавековую продолжительность. Однако имеющиеся палеоклиматические исследования, свидетельствующие об относительной внутренней однородности субатлантического периода голоцена, позволяют распространить данные инструментального периода на последние 2500 лет и считать почвообразующий потенциал климата относительно устойчивым.

При морфологическом исследовании профиля почв при обнаружении реликтовых признаков рекомендуется относить их к категории «редкие почвы» Красной книги почв Крыма.

Список источников

1. *Ергина Е.И.* Пространственно-временные закономерности процессов современного почвообразования на Крымском полуострове. Симферополь: Ариал, 2017. 220 с.
2. *Шоба С.А., Герасимова М.И., Таргульян В.О., Урусевская И.С., Алябина И.О., Макеев А.О.* Почвообразующий потенциал природных факторов // Генезис, география и экология почв. Львов: Львовский гос. ун-т, 1999. С. 90–92.
3. Память почв: почва как память биосферно-геосферно-антропоферных взаимодействий / отв. ред. В.О. Таргульян, С.В. Горячкин. М.: ЛКИ, 2008. 692 с.
4. *Драган Н.А.* Почвенные ресурсы Крыма. Симферополь: Доля, 2004. 208 с.
5. *Ергина Е.И., Горбунов Р.В., Табуцик В.А., Петлюкова Е.А.* Почвенное разнообразие территории Крымского полуострова // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2023. № 1 (217). С. 61–69.
6. Климатический атлас Крыма: приложение к науч.-практ. дискус.-аналит. сб. «Вопросы развития Крыма» / сост. И.П. Ведь, Л.Н. Савенко. Симферополь: Таврия-Плюс, 2000. 120 с.
7. *Герасименко Н.П.* Зміни положення ландшафтних зон на території України у плейстоцені і голоцені // Укр. геогр. журн. 2004. № 3. С. 20–28.
8. *Cordova C.E., Lehman P.H.* Archaeopalynology of Synanthropic Vegetation in the Chora of Chersonesos, Crima, Ukraine // J. of Archaeological Science. 2003. Vol. 30 (11). P. 1483–1501.
9. *Cordova C.E., Lehman P.H.* Holocene Environmental Change in Southwestern Crimea (Ukraine) in Pollen and Soil Records // The Holocene. 2005. Vol. 15, № 2. P. 263–277.
10. *Золотун В.П.* Эволюция почв юга Украины в голоцене // Экологические проблемы сельского хозяйства. М.: Наука, 1978. С. 94–96.
11. *Подгородецкий П.Д.* Крым. Природа. Симферополь: Таврия, 1988. 192 с.
12. *Евгений (митрополит).* О следах древнего греческого города Херсона, донныне видимых в Крыму // Отечественные записки. 1822. Ч. 9, кн. 22. С. 145–163.
13. Военно-статистическое обозрение Российской империи (1837–1854 гг.): в 17 т. Т. 11, кн. 2: Таврическая губерния. СПб.: Тип. департамента Генерального штаба, 1849. 306 с.
14. *Подгородецкий П.Д., Щепинский А.А., Шумский Я.А.* Природа Крыма и ее освоение в эпоху энеолита // Физическая география и геоморфология. 1983. Вып. 30. С. 55–66.
15. *Геродот.* История. М.: АСТ, 2006. Кн. 4. 356 с.
16. *Турманина В.И.* Вековые изменения природы европейской части СССР // Вестн. МГУ. Серия 5: География. 1985. № 5. С. 61–69.
17. *Веклич М.Ф., Сиренко Н.А.* Почвообразование на территории Украины в плиоцене и антропогене // Геология четвертичного периода. Ереван: Изд-во АН Арм. СССР, 1977. С. 333–336.
18. *Иванов И.В.* Эволюция почв степной зоны в голоцене. М.: Наука, 1992. 230 с.

19. Сиренко Н.А., Турло С.Н. Развитие почв и растительности Украины в плиоцене и плейстоцене. К.: Наукова думка, 1981. 86 с.
20. Хотинский Н.А. Голоцен Северной Евразии. М.: Наука, 1977. 198 с.

References

1. Ergina E.I. *Spatiotemporal patterns of modern soil formation processes on the Crimean Peninsula*. Simferopol: Arial Publ.; 2017. 220 p. (In Russ.).
2. Shoba S.A., Gerasimova M.I., Targulyan V.O., Urusevskaya I.S., Alyabina I.O., Makeev A.O. Soil-forming potential of natural factors. *Genesis, geography and ecology of soils*. Lvov: Lvov State University Press; 1999:90-92. (In Russ.).
3. Targulyan V.O., Goryachkin S.V., resp. ed. *Soil memory: soil as a memory of biosphere-geosphere-anthroposphere interactions*. Moscow: LKI Publ.; 2008. 692 p. (In Russ.).
4. Dragan N.A. *Soil resources of Crimea*. Simferopol: Dolya Publ.; 2004. 208 p. (In Russ.).
5. Ergina E.I., Gorbunov R.V., Tabunshchik V.A., Petlyukova E.A. Soil diversity of the territory of the Crimean Peninsula. *Izv. vuzov. Sev.-Kavk. region. Estestv. nauki = Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science*. 2023;(1):61-69. (In Russ.).
6. Ved' I.P., Savenko L.N., comp. *Climatic atlas of Crimea*. The appendix to the scientific and practical discussion and analytical collection "Issues of the development of Crimea". Simferopol: Tavria-Plus Publ.; 2000. 120 p. (In Russ.).
7. Gerasimenko N.P. Changes in the position of landscape zones on the territory of Ukraine during the Pleistocene and Holocene. *Ukrainian Geographical Journal*. 2004;(3):20-28. (In Ukr.).
8. Cordova C.E., Lehman P.H. Archaeopalynology of Synanthropic Vegetation in the Chora of Chersonesos, Crima, Ukraine. *Journal of Archaeological Science*. 2003;30(11):1483-1501.
9. Cordova C.E., Lehman P.H. Holocene environmental change in Southwestern Crimea (Ukraine) in pollen and soil records. *The Holocene*. 2005;15(2):263-277.
10. Zolotun V.P. Evolution of soils in the south of Ukraine in the Holocene. *Ecological problems of agriculture*. Moscow: Nauka Publ.; 1978:94-96. (In Russ.).
11. Podgorodetsky P.D. *Crimea. Nature*. Simferopol: Tavria Publ.; 1988. 192 p. (In Russ.).
12. Eugene (Metropolitan). On the Traces of the Ancient Greek City of Kherson, Still Visible in the Crimea. *Otechestvennye zapiski = Notes of the Fatherland*. 1822;9(22):145-163. (In Russ.).
13. Military Statistical Review of the Russian Empire (1837-1854): in 17 vols. Vol. 11, book 2: Taurida Province. St. Petersburg: Printing House of the Department of the General Staff, 1849. 306 p. (In Russ.).
14. Podgorodetsky P.D., Shchepinsky A.A., Shumsky Ya.A. The nature of Crimea and its development in the Eneolithic era. *Fizicheskaya geografiya i geomorfologiya = Physical Geography and Geomorphology*. 1983;(30):55-66. (In Russ.).
15. Herodotus. *History*. Moscow: AST Publ.; 2006. Book 4. 356 p. (In Russ.).
16. Turmanina V.I. Secular changes in the nature of the European part of the USSR. *Vestn. MGU. Seriya 5: Geografiya = Moscow University Bulletin. Series 5, Geography*. 1985;(5):61-69. (In Russ.).
17. Veklich M.F., Sirenko N.A. Soil formation on the territory of Ukraine in the Pliocene and Anthropocene. *Geology of the Quaternary period*. Yerevan: Publishing House of the Academy of Sciences of Armenian USSR; 1977:333-336. (In Russ.).
18. Ivanov I.V. *Evolution of soils in the steppe zone in the Holocene*. Moscow: Nauka Publ.; 1992. 230 p. (In Russ.).
19. Sirenko N.A., Turlo S.N. *Development of soils and vegetation of Ukraine in the Pliocene and Pleistocene*. Kiev: Naukova dumka Publ.; 1981. 86 p. (In Russ.).
20. Khotinsky N.A. *Holocene of Northern Eurasia*. Moscow: Nauka Publ.; 1977. 198 p. (In Russ.).

Информация об авторах

Е.И. Ергина – доктор географических наук, профессор, профессор кафедры физической географии и геоморфологии, Таврическая академия.

Е.А. Артемова – аспирант кафедры физической географии и геоморфологии, Таврическая академия.

Information about the authors

E.I. Ergina - Doctor of Science (Geography), Professor, Professor of the Department of Physical Geography and Geomorphology, Tauride Academy.

E.A. Artemova - Postgraduate Student, Department of Physical Geography and Geomorphology, Tauride Academy.

Статья поступила в редакцию 14.02.2024; одобрена после рецензирования 23.04.2024; принята к публикации 04.07.2024.
The article was submitted 14.02.2024; approved after reviewing 23.03.2024; accepted for publication 04.07.2024.

Научная статья

УДК 549.905

doi: 10.18522/1026-2237-2024-3-63-70

ГЕОХИМИЧЕСКИЕ И ТИПОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ДЕТРИТОВЫХ ЦИРКОНОВ СОСНОВСКОЙ ТОЛЩИ ПАЛЕОГЕНА (РУССКАЯ ПЛИТА)

Светлана Олеговна Зорина^{1✉}, Константин Игоревич Никашин²

^{1, 2} Казанский федеральный университет, Казань, Республика Татарстан, Россия

¹svzorina@yandex.ru ✉

²kostya97@inbox.ru

Аннотация. Сосновская толща, представленная стекольными кварцевыми песками, широко распространена в палеогеновых отложениях востока Русской плиты. Интерес к палеогеновым кварцевым пескам в России возрастает в связи с необходимостью прироста минерально-сырьевой базы стекольного сырья, которая в европейской части России практически полностью исчерпана. В последние годы комплексом современных минералого-геохимических методов обоснован инжективный механизм образования сосновских кварцевых песков, что позволит разработать новые подходы к прогнозированию песчаных залежей. Приведены результаты изучения морфологических и геохимических особенностей детритовых цирконов, экстрагированных из песков сосновской толщи палеогена и лукаюновской свиты батского яруса средней юры – предполагаемого слоя – источника палеогеновых песчаных инжективов. Установлено, что цирконы обеих толщ имеют сходную типологию по Пупену и происходят из магматических пород преимущественно основного, среднего, реже – кислого состава. В качестве наиболее вероятного источника цирконов предполагается Пучеж-Катунская эндогенная структура. Подтверждено, что батские лукаюновские пески являются наиболее вероятным слоем-источником при инжектировании песков сосновской толщи палеогена.

Ключевые слова: детритовые цирконы, морфологическая типизация, геохимия цирконов, сосновская толща, лукаюновская свита, песчаный инжектив, палеоген, батский ярус, Русская плита

Для цитирования: Зорина С.О., Никашин К.И. Геохимические и типологические особенности детритовых цирконов сосновской толщи палеогена (Русская плита) // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2024. № 3. С. 63–70.

Благодарности: исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-27-00070, <https://rscf.ru/project/22-27-00070/>.

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

Original article

GEOCHEMICAL AND TYPOLOGICAL PECULIARITIES OF DETRITAL ZIRCONS FROM THE PALEOGENE SOSNOV FORMATION (RUSSIAN PLATFORM)

Svetlana O. Zorina^{1✉}, Konstantin I. Nikashin²

^{1, 2} Kazan Federal University, Kazan, Republic of Tatarstan, Russia

¹svzorina@yandex.ru ✉

²kostya97@inbox.ru

© Зорина С.О., Никашин К.И., 2024

Abstract. The Paleogene Sosnov Formation is represented by glass quartz sands which are widely occurred in the eastern part of the Russian Platform. Interest in Paleogene quartz sands in Russia is increasing due to the growing needs of the glass industry. But by now, the mineral resource base of glass raw materials in the European part of Russia is of almost complete exhaustion. In recent years, the comprehensive study using modern mineralogical and geochemical methods is undertaken resulting in substantiation of the injecting mechanism of formation of Sosnov quartz sands. The current paper presents the results of the study of morphologic and geochemical features of detrital zircons extracted from the sands of the Paleogene Sosnov Formation and the Bathonian Lukoyanov Formation. The latest can be proposed as a source layer for the Paleogene sand injectites. It has been determined that zircons from both strata are of the same Pupin's morphological types and regarded to be originated from predominantly intermediate, mafic, and rarely felsic rocks. The Puchezh-Katunk endogenous structure is suggested to be the most probable source area. The assumption that the Bathonian Lukoyanov sandstones are the most probable source for the injection of the Paleogene sands is confirmed.

Keywords: detrital zircons, morphological typing, geochemistry of zircons, Sosnov Formation, Lukoyanov Formation, sand injectite, Paleogene, Bathonian, Russian Platform

For citation: Zorina S.O., Nikashin K.I. Geochemical and Typological Peculiarities of Detrital Zircons from the Paleogene Sosnov Formation (Russian Platform). *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2024;(3):63-70. (In Russ.).

Acknowledgments: the research is supported by the grant of the Russian Science Foundation (project No. 22-27-00070, <https://rscf.ru/en/project/22-27-00070>).

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

Введение

Сосновская толща широко распространена в палеогеновых отложениях востока Русской плиты [1]. Она представлена мономинеральными кварцевыми песками с линзовидными конкрециями песчаников, имеет крайне неравномерную мощность (до 180 м) и является ценным источником стекольного и строительного сырья. В последние годы интерес к палеогеновым кварцевым пескам в России возрастает в связи с необходимостью прироста минерально-сырьевой базы стекольного сырья [2], что крайне затруднительно из-за ее практически полного исчерпания в европейской части страны. Сосновские кварцевые пески, отобранные в карьерах Восточно-Ташлинского и Кучуровского месторождений (рис. 1), были детально изучены комплексом современных минералого-геохимических методов, что позволило обосновать инъектный механизм их образования [3–5].

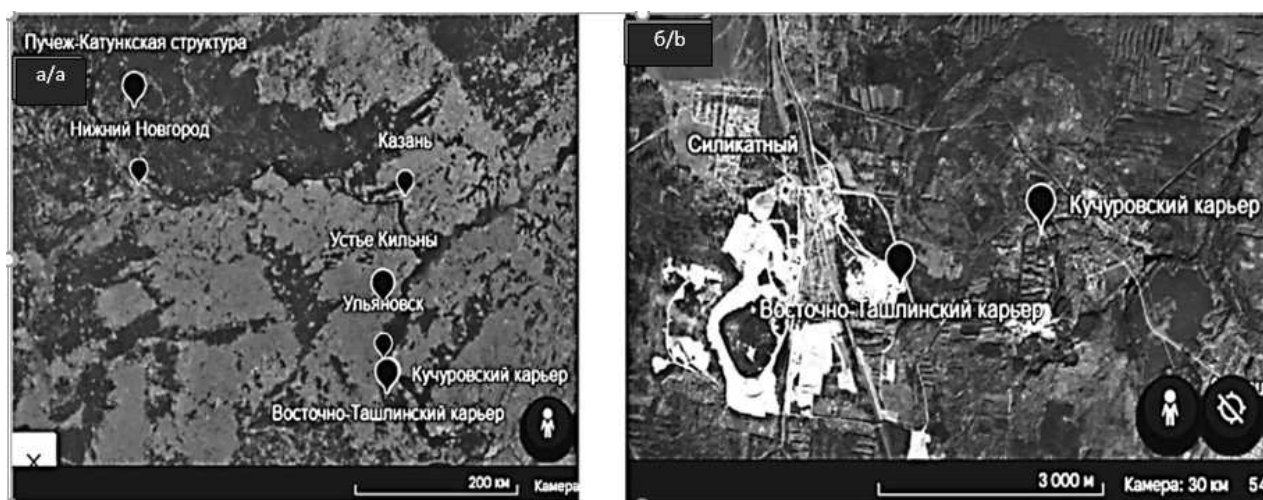


Рис. 1. Расположение рассматриваемых объектов на Google-картах: а – Пучеж-Катункской структуры; б – карьеров по добыче песков сосновской толщи палеогена / Fig. 1. Location of the study objects on Google maps: a - Puchezh-Katunk structure; b - sand quarries of the Paleogene Sosnov Formation

Минералогическим анализом установлено, что сосновские пески имеют мономинеральный кварцевый состав, содержание кварца в пробах составляет 93–100 %. Размер зерен изменяется от 0,02 до 12 мм. Обычно кварц водяно-прозрачный, матовый, иногда розовый, желтовато-бурый и бурый. В тяжелой фракции песков выявлены весовые содержания рутила, ильменита, лейкоксена, циркона, рудных минералов, второстепенную роль играют кианит, ставролит, хромит, турмалин, лейкоксен, силлиманит, гранат, брукит и гематит (рис. 2).

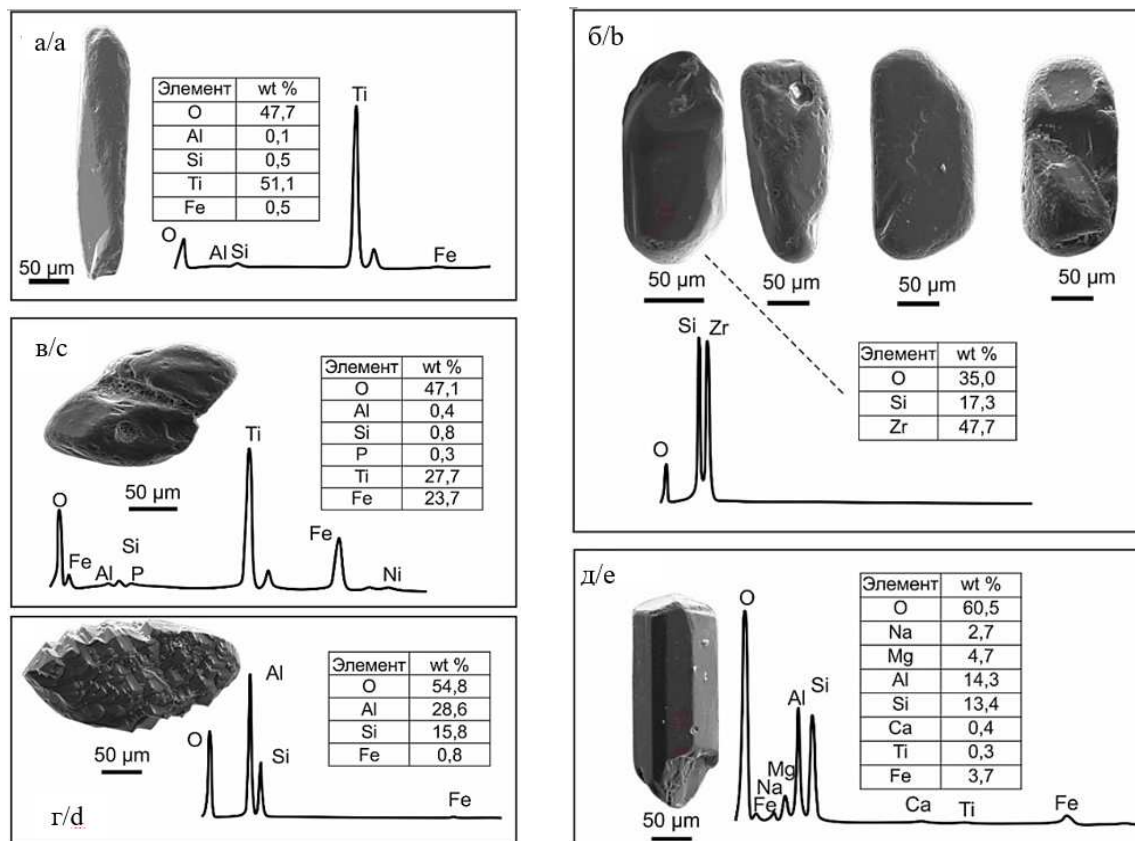


Рис. 2. Электронно-микроскопические изображения некоторых зерен тяжелых минералов сосновской толщи и их энергодисперсионные спектры: а – рутил; б – циркон; в – лейкоксен; г – силлиманит; д – турмалин / Fig. 1. Electron microscope images of some grains of heavy minerals from the Sosnov Formation and their energy-dispersion spectra: a - rutile; b - zircon; c - leucoxene; d - sillimanite; e - tourmaline

Изучение морфологических и геохимических особенностей детритовых цирконов, экстрагированных из сосновских песков, оказалось весьма информативным, так как позволило не только провести реконструкцию состава питающих провинций, но и выявить признаки типологического и геохимического сходства с цирконами лукояновской свиты батского яруса средней юры – предполагаемого слоя – источника палеогеновых инжективов [3]. Первые результаты данного исследования приведены в данной работе.

Материалы и методы

Валовые пробы песков сосновской толщи, отобранные из карьеров Восточно-Ташлинского и Кучуровского месторождений кварцевых песков (Ульяновская область), и песков лукояновской свиты бата из обнажения в устье р. Кильна (Республика Татарстан) (рис. 1), были промыты с выделением тяжелой фракции. Проведен отбор монофракций цирконов с помощью магнитной сепарации и тяжелой жидкости ГПС-В (концентрированный водный раствор гетерополивольфрамата натрия) максимальной плотностью $3,00 \pm 0,05$ г/мл. Для определения морфологии цирконов использовались электронно-микроскопические изображения минералов, полученные растровым электронным микроскопом FEI XL-30 ESEM (Phillips) со встроенным ЭДС-детектором фирмы EDAX (аналитик Б.М. Галиуллин) (рис. 2).

Морфологические типы сосновских и лукаяновских цирконов были определены в соответствии с типологической классификацией Пупена [6].

В 20 зернах сосновских и лукаяновских цирконов методом ICP-MS с использованием изотопного масс-спектрометра iCAP Qc (Thermo Fisher Scientific) были определены концентрации редкоземельных элементов (РЗЭ), которые обработаны с применением дискриминантной диаграммы Y–Hf [7] для реконструкции возможного состава материнских пород.

Аналитические исследования выполнены в Центре геотермохронологии (руководитель Б.И. Гареев) и лабораториях Института геологии и нефтегазовых технологий КФУ.

Результаты и обсуждение

Согласно типологической геотермометрической классификации Пупена [6], определенным температурным условиям кристаллизации магмы соответствуют определенные морфологические типы кристаллов цирконов. Предложенная этим автором типизация цирконов (рис. 3) основана на присутствии в кристалле простых форм (призм {100} и {010} и пирамид {101} и {211}) и их соотношении друг с другом. Каждому морфологическому типу соответствует пара индексов (I.A. и I.T.), определяющая его положение на диаграмме условий кристаллизации. Таким образом, анализируя морфологию цирконов, можно определить температурный режим кристаллизации.

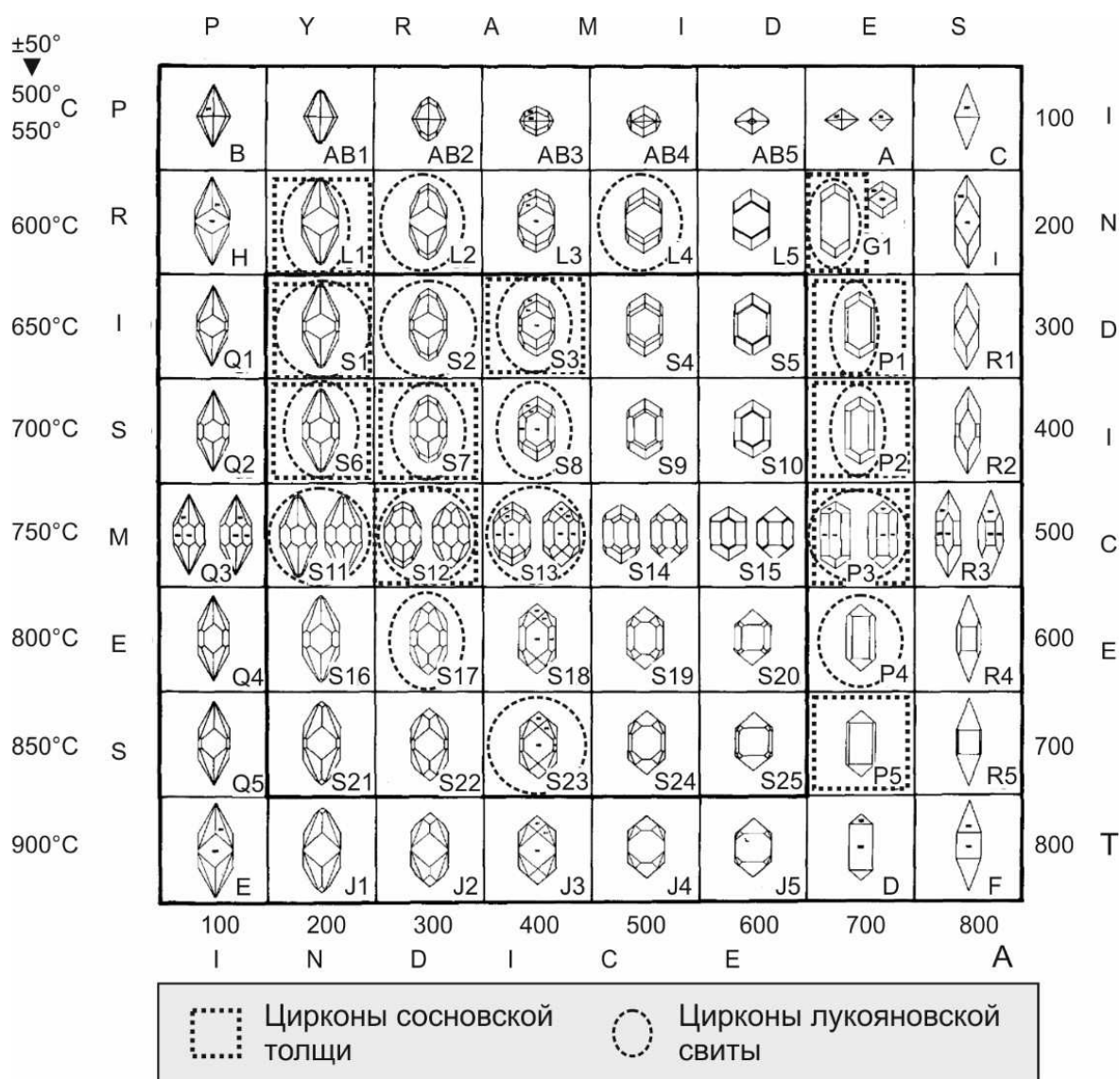


Рис. 3. Типологическая классификация цирконов [6] / Fig. 3. Typological classification of zircons [6]

Типологическому анализу были подвергнуты выборки наименее окатанных детритовых цирконов (от 15 до 37 зерен) из двух проб сосновской толщи (Kuch-1 и Sm-2) и одной пробы лукояновской свиты (UK-7). Цирконы сосновской толщи отнесены к 11 морфологическим типам, лукояновской свиты – к 19 типам (рис. 3), причем зерна распределены крайне неравномерно.

Среди сосновских цирконов доминирующими оказались типы G1, P1 и P2 (до 90 % зерен) (рис. 3, 4). Незначительное количество зерен (< 10 %) отнесено к типам L1, P3, P5, S1, S3, S6, S7, S12.

В песках лукояновской свиты преобладают цирконы типов G1, P1, P2, S1 и S2 (40–50 %) (рис. 3). В значительно меньших количествах встречены типы L1, L2, L4, P3, P4, S3, S6, S7, S8, S11, S12, S13, S17, S23, в сумме составляющие половину выборки.

При вынесении выявленных типов сосновских и лукояновских цирконов на дискриминантную диаграмму Пупена [6] (рис. 5) отчетливо просматривается, что большинство зерен обеих толщ относятся к трем общим типам (G1, P1, P2), что свидетельствует об идентичности их источника.

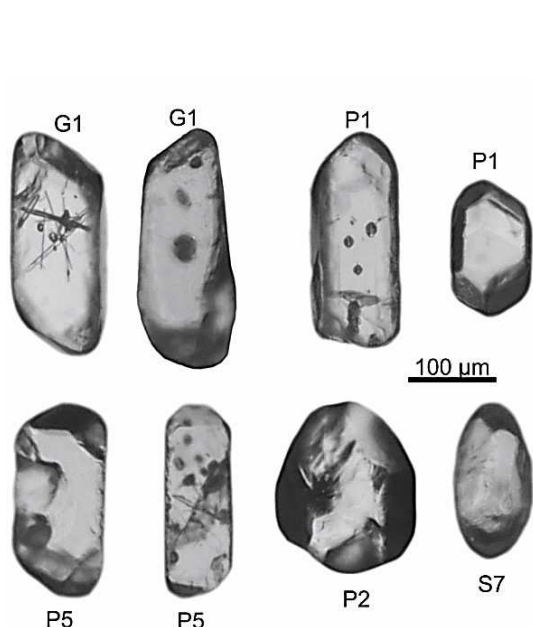


Рис. 4. Морфологические типы цирконов из песков сосновской толщи / Fig. 4. Morphologic types of zircons from sands of the Sosnov Formation

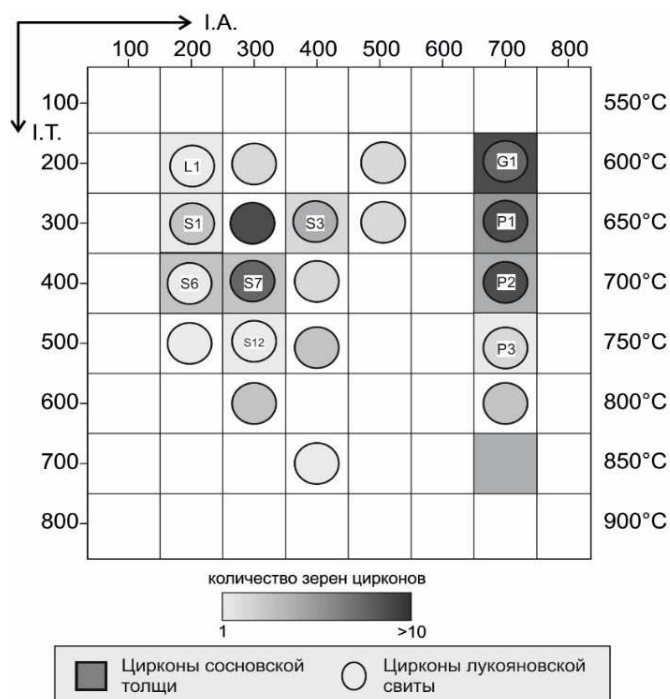


Рис. 5. Распределение цирконов сосновской толщи и лукояновской свиты на дискриминантной диаграмме Пупена [6] / Fig. 5. Distribution of zircons of the Sosnov and Lukoyanov Formations on the Pupin's discriminant diagram [6]

Концентрации PЗЭ и значения Th/U в цирконах сосновской толщи и лукояновской свиты приведены в таблице.

Величина Th/U в сосновских цирконах составляет 0,3–1, в лукояновских – 0,3–0,8 (таблица), что указывает на их магматический генезис [7]. При обработке концентраций PЗЭ использована дискриминантная диаграмма Y-Hf [8] (рис. 6), согласно которой большинство цирконов обеих толщ ассоциирует с основными и средними породами, меньшая часть – с кислыми и кварцосодержащими средними породами.

Изученная выборка цирконов сосновской толщи и лукояновской свиты, таким образом, происходит из магматических пород преимущественно основного, среднего, реже – кислого

состава. В силу незначительной окатанности сосновских цирконов можно заключить, что они не были рециркулированы, и их источник расположен на незначительном расстоянии от области распространения сосновских песков. В качестве наиболее вероятного источника предполагается Пучеж-Катунская эндогенная структура, расположенная на востоке Русской плиты, в 380 км северо-западнее Восточно-Ташлинского и Кучуровского месторождений (рис. 1а). В строении этой сложной кольцевой структуры, как известно, выделяются диатремы и трубки взрыва, сложенные эксплозивными брекчиями, а также лавовые брекчии и базальты [9]. В батском веке средней юры, после завершения эксплозивной фазы активизации, Пучеж-Катунская структура подверглась, интенсивному размыву с образованием прибрежно-морских титан-циркониевых россыпей, приуроченных к базальным пескам лукаюновской свиты среднего бата [10]. Примечательно, что лукаюновские пески бата и сосновские пески палеогена имеют генетическое сходство по комплексу минералого-геохимических свойств [3], что позволяет обоснованно предполагать основание лукаюновской свиты в качестве слоя – источника палеогеновых песчаных инжективов Русской плиты.

Концентрации РЗЭ в цирконах сосновской толщи и лукаюновской свиты, ‰
/ REE concentrations in zircons of the Sosnov and Lukoyanov Formations, ‰

Номер образца	La	Ce	Pr	Yb	Lu	Nb	Hf	Y	Ta	Th/U	
Сосновская толща	01	0,17	10,66	0,09	378,25	4228,30	0,174	15510,92	1243,84	1,33	0,45
	02	0,17	42,47	0,09	155,14	3034,41	0,174	11369,33	575,75	0,43	1,06
	17	0,17	39,15	0,09	515,38	4676,32	8,890	16709,84	1541,17	4,13	0,51
	24	0,17	12,11	0,09	317,53	5196,55	0,174	19498,45	678,94	1,46	0,42
	37	0,17	72,25	0,09	282,47	4443,92	2,195	16444,07	734,90	2,33	0,78
	40	0,17	28,77	0,09	243,89	4450,28	0,174	16584,87	836,85	1,19	0,84
	49	0,17	24,45	0,09	335,65	4981,33	1,637	18417,09	925,74	2,47	0,32
	63	0,17	40,57	0,09	295,65	4652,26	0,174	17458,48	711,34	0,94	0,54
	80	0,17	6,78	0,09	218,89	3697,35	0,174	13570,89	700,83	0,77	0,31
	90	0,17	8,92	0,39	413,95	3653,46	0,174	12994,44	1809,27	0,82	0,47
	92	0,17	17,95	0,09	123,70	3469,87	0,174	13294,83	399,141	0,44	0,46
Лукояновская свита	08	0,09	33,05	0,09	408,96	3384,52	1,96	12381,29	937,67	0,60	0,72
	09	0,09	9,81	0,60	995,82	3232,04	4,22	10149,79	3727,88	1,67	0,51
	15	0,09	21,07	0,24	459,37	3234,10	0,72	11650,41	1500,72	0,29	0,82
	25	0,09	18,48	0,42	351,69	3028,57	0,56	10833,31	822,63	0,31	0,75
	42	2,96	32,05	1,40	436,82	3233,63	0,83	11508,56	1350,73	0,51	0,68
	45	0,09	3,73	0,16	631,06	3182,66	0,27	10735,24	1904,74	0,24	0,43
	47	0,09	38,45	0,12	869,41	3800,48	4,26	12660,24	2116,12	1,12	0,29
	57	0,09	16,27	0,09	252,02	3251,62	0,84	12251,65	677,83	0,40	0,43
	67	0,09	10,05	0,09	501,98	3946,06	2,44	14182,41	1184,26	1,34	0,34
80	0,09	9,35	0,09	548,80	4237,67	0,40	15386,37	991,93	0,22	0,36	

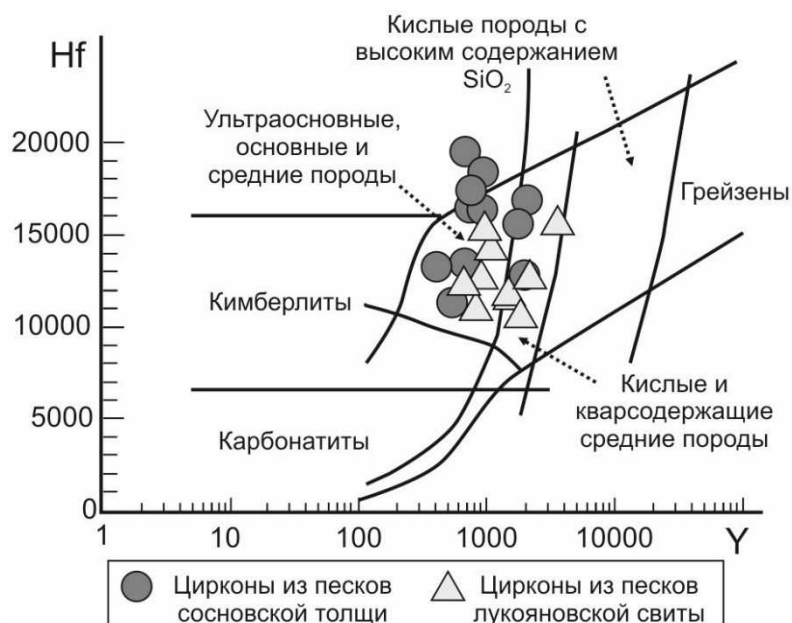


Рис. 6. Дискриминантная диаграмма Y-Hf [8] и распределение фигуративных точек цирконов из песков сосновской толщи и лукаюновской свиты / Fig. 6. Y-Hf discriminant diagram [8] and distribution of zircons from the Sosnov and Lukoyanov sands

Проведенное изучение детритовых цирконов сосновской толщи палеогена и лукаюновской свиты батского яруса средней юры показало, что преобладающее большинство изученных зерен обеих толщ имеет сходные типологические и геохимические свойства. Это указывает на их общий источник и подтверждает сделанное ранее предположение, что батские лукаюновские пески следует считать наиболее вероятным слоем-источником при инжектировании палеогеновых сосновских песков.

Список источников

1. Ахметьев М.А., Шик С.М., Алексеев А.С. Унифицированная стратиграфическая схема палеогеновых отложений Поволжско-Прикаспийского субрегиона. М.: ВНИГНИ, 2015. 96 с.
2. Аксенов Е.М., Бирюлов Г.Н., Дистанов У.Г., Кандауров П.М. Минерально-сырьевая база стекольной промышленности России: состояние и перспективы развития // Стекло России. 2011. № 3. С. 24–26.
3. Афанасьева Н.И., Зорина С.О., Никашин К.И., Хамада Н. Песчаные интрузии в палеогеновых отложениях Ульяновско-Сызранского Поволжья (восток Русской плиты) // Изв. УГГУ. 2023. Вып. 1 (69). С. 46–56.
4. Зорина С.О., Никашин К.И., Афанасьева Н.И., Хамада Н. Микроструктуры на поверхности зерен кварца и происхождение палеогеновых песков Ульяновско-Сызранского Поволжья // Учен. зап. Казанского ун-та. Естеств. науки. 2023. Т. 165, кн. 2. С. 295–307.
5. Hamada N., Zorina S.O., Mohammad N. Quartz Grain Microtextures in the Paleogene Sosnov Formation: Implications for Sediment Provenance in the Eastern Russian Platform // News of the Ural State Mining University. 2023. № 4 (72). P. 7–18.
6. Pupin J.P. Zircon and granite petrology // Contrib. Mineral. Petrol. 1980. Vol. 73. P. 207–220.
7. Hartmann L.A., Santos J.O.S. Predominance of high Th/U, magmatic zircon in Brazilian Shield sandstones // J. Geol. 2004. Vol. 32(1). P. 73–76.
8. Belousova E.A., Griffin W.L., O'Reilly S.Y., Fisher N.I. Igneous zircon: trace element composition as an indicator of source rock type // Contrib. Mineral. Petrol. 2002. Vol. 143(5). P. 602–622.
9. Маракушев А.А., Панях Н.А. Формирование алмазонасных взрывных кольцевых структур // Пространство и время. 2011. № 2 (4). С. 118–123.
10. Лаломов А.В., Бочнева А.А. Центральное, Лукаюновское и Унечское месторождения цирконий-титановых песков как база для создания минерально-сырьевого центра и осуществления стратегии импортозамещения России // Молодой ученый. 2020. № 2 (292). С. 333–340.

References

1. Akhmetiev M.A., Shik S.M., Alekseev A.S. *Unified stratigraphic scheme of Paleogene deposits of the Volga-Pre-Caspian subregion*. Moscow: Russian Geological Research and Petroleum Institute Press; 2015. 96 p. (In Russ.).
2. Aksenov E.M., Biryulev G.N., Distanov U.G., Kandaurov P.M. Mineral raw material base of the glass industry of Russia: status and prospects of development. *Steklo Rossii = Glass of Russia*. 2011;(3):24-26. (In Russ.).
3. Afanasieva N.I., Zorina S.O., Nikashin K.I., Hamada N. Paleogene sand injectites of the Uljanovsk-Syzran Volga region (eastern Russian platform). *Izv. UGGU = News of the Ural State Mining University*. 2023;(1):46-56. (In Russ.).
4. Zorina S.O., Nikashin K.I., Afanasieva N.I., Hamada N. Surface microtextures of quartz grains and origin of the Paleogene sands in the Ulyanovsk-Syzran Volga region. *Uchen. zap. Kazanskogo un-ta. Estestv. nauki. = Scientific Notes of the Kazan University. Natural Science*. 2023;165(2):295-307. (In Russ.).
5. Hamada N., Zorina S.O., Mohammad N. Quartz Grain Microtextures in the Paleogene Sosnov Formation: Implications for Sediment Provenance in the Eastern Russian Platform. *News of the Ural State Mining University*. 2023;(4):7-18.
6. Pupin J.P. Zircon and granite petrology. *Contrib. Mineral. Petrol.* 1980;73:207-220.
7. Hartmann L.A., Santos J.O.S. Predominance of high Th/U, magmatic zircon in Brazilian Shield sandstones. *J. Geol.* 2004;32(1):73-76.
8. Belousova E.A., Griffin W.L., O'Reilly S.Y., Fisher N.I. Igneous zircon: trace element composition as an indicator of source rock type. *Contrib. Mineral. Petrol.* 2002;143(5):602-622.
9. Marakushev A.A., Paneyakh N.A. Formation of diamondiferous explosive ring structures. *Prostranstvo i vremya = Space and Time*. 2011;(2):118-123. (In Russ.).
10. Lalomov A.V., Bochneva A.A. Central, Lukoyanovskoye and Unechskoye deposits of zirconium-titanium sands as a base for the creation of mineral raw material center and implementation of the strategy of import substitution of Russia. *Molodoi uchenyi = Young Scientis*. 2020;(2):333-340. (In Russ.).

Информация об авторах

С.О. Зорина – доктор геолого-минералогических наук, профессор, доцент, Институт геологии и нефтегазовых технологий.

К.И. Никашин – аспирант, младший научный сотрудник, Институт геологии и нефтегазовых технологий.

Information about the authors

S.O. Zorina - Doctor of Science (Geology and Mineralogy), Professor, Associate Professor, Institute of Geology and Petroleum Technologies.

K.I. Nikashin - Postgraduate Student, Junior Researcher, Institute of Geology and Petroleum Technologies.

*Статья поступила в редакцию 05.03.2024; одобрена после рецензирования 19.04.2024; принята к публикации 04.07.2024.
The article was submitted 05.03.2024; approved after reviewing 19.04.2024; accepted for publication 04.07.2024.*

Научная статья

УДК 502.58

doi: 10.18522/1026-2237-2024-3-71-80

СКЛОНОВАЯ И ВЫСОТНАЯ ПРИУРОЧЕННОСТЬ МОЛНИЕВЫХ РАЗРЯДОВ И ПОЖАРОВ ОТ ГРОЗ В ГОРНОЙ МЕСТНОСТИ (НА ПРИМЕРЕ ТЕРРИТОРИИ РЕСПУБЛИКИ АЛТАЙ)

Андрей Владимирович Каранин^{1✉}, Марина Юрьевна Беликова², Нина Алексеевна Кочеева³,
Виктор Александрович Какорин⁴

^{1, 2, 3, 4} Горно-Алтайский государственный университет, Горно-Алтайск, Республика Алтай, Россия

¹ vedmedk@bk.ru✉

² belikovamy@yandex.ru

³ nina_kocheewa@mail.ru

⁴ wittorio.kakorin@mail.ru

Аннотация. Целью предлагаемого исследования является анализ приуроченности молниевых разрядов и пожаров от гроз к высоте над уровнем моря и углу наклона земной поверхности. Установлено, что наиболее высокая доля и плотность пожаров свойственны для высотного диапазона от 1000 до 1500 м над уровнем моря. Наивысшая плотность молниевой активности отмечена для высотного диапазона 500–750 м. С дальнейшим увеличением высоты плотность молний и пожаров снижается. Выявлена прямая зависимость увеличения плотности пожаров с увеличением крутизны склона до 35°.

Работа выполнена на основании данных Всемирной сети регистрации грозовой активности WWLLN и данных о пожарах, предоставленных Министерством природных ресурсов, экологии и туризма Республики Алтай и Алтайским государственным природным биосферным заповедником.

Оценка морфометрической приуроченности грозовых лесных пожаров на исследуемой территории проводится впервые.

Ключевые слова: природный пожар, пожары от гроз, грозовая активность, плотность молний, высота над уровнем моря, крутизна склона, WWLLN, Республика Алтай

Для цитирования: Каранин А.В., Беликова М.Ю., Кочеева Н.А., Какорин В.А. Склоновая и высотная приуроченность молниевых разрядов и пожаров от гроз в горной местности (на примере территории Республики Алтай) // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2024. № 3. С. 71–80.

Благодарности: авторы работы признательны Министерству природных ресурсов, экологии и туризма Республики Алтай и сотрудникам Алтайского государственного природного биосферного заповедника за предоставленные сведения и сотрудничество.

Кроме того, авторы благодарны коллаборации Всемирной сети регистрации молниевых разрядов (World Wide Lightning Location Network (<http://wwlln.net>)) за предоставление данных, использованных в работе.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Республики Алтай в рамках научного проекта № 20-45-040012.

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

Original article

SLOPE AND ALTITUDE DEPENDENCY OF LIGHTNING DISCHARGES AND FIRES FROM THUNDERSTORMS IN MOUNTAINOUS TERRAIN (CASE STUDY OF THE ALTAI REPUBLIC TERRITORY)

Andrey V. Karanin^{1✉}, Marina Yu. Belikova², Nina A. Kocheeva³, Victor A. Kakorin⁴

^{1, 2, 3, 4} Gorno-Altai State University, Gorno-Altai, Altai Republic, Russia

¹ vedmedk@bk.ru✉

² belikovamy@yandex.ru

³ nina_kocheewa@mail.ru

⁴ wittorio.kakorin@mail.ru

Abstract. The aim of the proposed study is to analyze the relationship of lightning discharges and fires from thunderstorms to altitude above sea level and slope angle of the terrain. It has been found that the highest proportion and density of fires are characteristic of the altitude range from 1000 to 1500 meters above sea level. The highest density of lightning activity is observed in the altitude range of 500-750 meters. With further increase in altitude, the density of lightning and fires decreases. A direct correlation has been noted between the increase in fire density and the increase in slope steepness up to 35 degrees.

The study is based on data from the World Wide Lightning Location Network (WWLLN) and fire data provided by the Ministry of Natural Resources, Ecology and Tourism of the Altai Republic and the Altai State Natural Biosphere Reserve.

The assessment of morphometric dependence of thunderstorm forest fires on the studied territory is conducted for the first time.

Keywords: wildfire, lightning initiated wildfire, thunderstorm activity, lightning density, altitude, slope steepness, WWLLN, Altai Republic

For citation: Karanin A.V., Belikova M.Yu., Kocheeva N.A., Kakorin V.A. Slope and Altitude Dependency of Lightning Discharges and Fires from Thunderstorms in Mountainous Terrain (Case Study of the Altai Republic Territory). *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2024;(3):71-80. (In Russ.).

Acknowledgments: the authors are grateful to the Ministry of Natural Resources, Ecology and Tourism of the Altai Republic and the staff of the Altai State Natural Biosphere Reserve for the provided information and cooperation.

In addition, the authors are grateful to the World Wide Lightning Location Network (<http://wwlln.net>) collaboration for providing the data used in the work.

The study was financially supported by the Russian Foundation for Basic Research and Altai Republic within the framework of scientific project No. 20-45-040012.

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

Введение

Пожары от гроз чаще всего возникают при внутримассовых грозах, которые характеризуются выпадением небольшого количества осадков [1, 2]. Между прохождением грозы и возникновением пожара может пройти от нескольких часов до нескольких суток [3, 4]. «Запаздывание» активного проявления стадии горения осложняет своевременную регистрацию пожара, особенно на труднодоступных и удалённых территориях. Значительная часть Республики Алтай относится к таким территориям и характеризуется низкой плотностью населения (2,3 чел/км²) [5], слабой хозяйственной освоенностью, недостаточным уровнем развития транспортной сети, при этом отличается сложным горным рельефом, разнообразием природных комплексов и условий. Около 44 % территории республики покрыты лесами. Указанные особенности обуславливают ведущую

роль молниевой активности в возникновении природных пожаров, за 2016–2020 гг. доля грозových пожаров составила 61 % от общего количества возгораний.

Вопросы о механизме возникновения и распространения пожара от удара молнии до настоящего времени остаются дискуссионными. Считается, что грозвые явления способны спровоцировать возникновение десятков возгораний за короткий срок. Исследователями данного вопроса были предприняты попытки определить четкую зависимость молниевой активности от природно-климатических факторов и выявить закономерность процесса возникновения природных пожаров [6–9].

В ряде современных публикаций затрагивается вопрос влияния морфометрических особенностей местности на распространение пожаров [10–13]. Однако в большинстве таких исследований не учитываются причины возникновения пожара, при этом существуют свидетельства [14], что средняя площадь пожара от молнии в несколько раз превышает площадь пожаров, инициированных человеческой деятельностью.

Теме природных пожаров и молниевой активности на территории Республики Алтай посвящено много работ [15–20], ни одна из которых, впрочем, не ставила целью изучение морфометрической приуроченности пожаров от гроз. Исследование подобного рода для изучаемой территории представляется актуальным и выполняется впервые.

Целью исследования является анализ связи пожаров от гроз с морфометрическими характеристиками рельефа: высотой над уровнем моря и углом наклона земной поверхности.

Материалы и методы

Сведения о природных пожарах, на основе которых выполнялись расчёты, были предоставлены Министерством природных ресурсов, экологии и туризма Республики Алтай и Алтайским государственным природным биосферным заповедником. Эти данные сведены в таблицы с описанием и координатами природных пожаров, которые были картированы нами в геоинформационной системе. Из расчетов исключались случаи некачественной привязки пожара. Всего было учтено 102 пожара от гроз из 134 зафиксированных.

Для сбора данных о высоте расположения участков пожаров и молниевых разрядов относительно уровня моря использовалась цифровая модель рельефа SRTMGL3 [21] с разрешением 3 угловые секунды, на её основе также были вычислены углы наклонов земной поверхности.

Информация о молниевой активности получена от Всемирной сети локализации молниевых разрядов WWLLN (World Wide Lightning Location Network) [22]. Станции этой сети регистрируют главным образом разряды типа облако – земля, которые детерминируют возникновение пожаров от гроз. Следует отметить, что WWLLN является единственным средством регистрации разрядов, охватывающим всю территорию Республики Алтай. Учёт молниевых разрядов в республике производится также сетью станций Горно-Алтайского центра по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды [23]. Однако работа этих станций имеет ограничения в пространственном плане, горный рельеф ограничивает обзор территории и регистрацию гроз, а также не позволяет оценить грозовую активность на тех участках, которые не попадают в поле обзора.

Обработка сведений о грозových пожарах и молниевой активности выполнялась в геоинформационной системе QGIS [24]. Для анализа некоторых закономерностей распределения изучаемых характеристик использовался метод ранговой корреляции Спирмена [25].

Результаты и обсуждение

В период с 2016 по 2020 г. на территории Республики Алтай возникло 219 пожаров, из них 134 – из-за гроз (при этом точные координаты были получены для 102 грозových пожаров).

Риск возникновения пожара, как считают некоторые авторы [11, 26], уменьшается с увеличением высоты территории над уровнем моря. В то же время имеются свидетельства обратного для отдельных регионов, например Альп, где грозвые пожары чаще регистрируются на возвышенностях [27].

На территории Республики Алтай наибольшее количество пожаров случается в среднегорьях, на высоте от 1000 до 2000 м над уровнем моря (рис. 1).

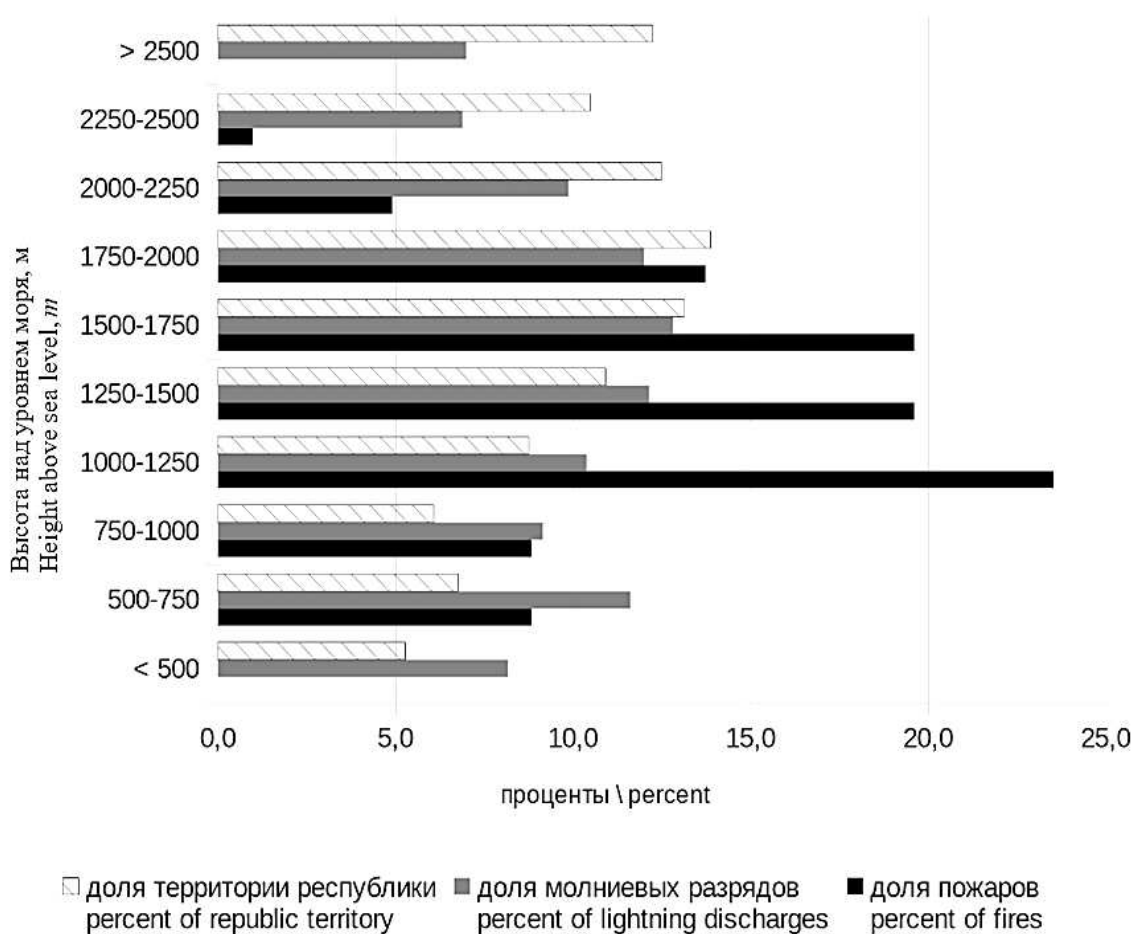


Рис. 1. Доля молниевых разрядов, пожаров от гроз, территории республики на разных высотных уровнях, % / Fig. 1. Share of lightning discharges, fires from thunderstorms, territory of the republic at different altitude levels, %

Выше 2500 и ниже 500 м на территории республики в период исследования пожары от гроз не были отмечены. Наибольшая доля зарегистрированных пожаров установлена в диапазоне высоты от 1000 до 1500 м (43,1 %) и от 1500 до 2000 м (33,3 %).

Для всех интервалов высоты была вычислена плотность природных пожаров и плотность молниевых разрядов (табл. 1).

Плотность пожаров выше всего на уровне от 1000 до 1500 м, здесь она составляет 0,002–0,003 пожара на 1 км². С повышением или снижением высоты от этого интервала плотность пожаров постепенно уменьшается. Несмотря на то что эти высоты в разных частях республики сильно варьируются по количеству тепла и влаги, это преимущественно залесённая зона. Среднегорные ландшафты Алтая характеризуются узкими водоразделами и крутыми склонами долин, что способствует ускорению дренажа и формирует небольшие реки и ручьи в узких долинах. Соответственно, на сухих склонах легче возникает и распространяется пожар.

Наименьшая плотность пожаров отмечается для высокогорий (выше 2000 м над уровнем моря), которые занимают 35 % площади республики. Древесной растительности на такой высоте мало, она концентрируется на затененных северных склонах хребтов, получающих меньшее количество солнечной радиации и менее прогреваемых. На территориях, расположенных выше 2500 м, возгорания не отмечены. Причина может быть в недостатке горючего материала для возникновения и развития пожара. Часто большие площади здесь занимают курумы, осыпи, скалы, на которых растительность представлена в стланиковой форме или отдельно стоящими деревьями, которые не позволяют развиваться возгораниям на больших площадях.

Таблица 1 / Table 1

**Распределение пожаров и молниевых разрядов по высоте над уровнем моря
 (суммарные значения за период с 2016 по 2020 г.) / Distribution of fires and lightning
 discharges by altitude (total values for the period from 2016 to 2020)**

Высота, м над уровнем моря	Доля пожаров от их общего числа, %	Плотность пожаров на 1 км ²	Плотность молний на 1 км ²
< 500	0	0	1,405
500–750	8,8	0,0014	1,560
750–1000	8,8	0,0016	1,365
1000–1250	23,5	0,0030	1,075
1250–1500	19,6	0,0020	1,008
1500–1750	19,6	0,0016	0,885
1750–2000	13,7	0,0011	0,785
2000–2250	4,9	0,0004	0,717
2250–2500	1,0	0,0001	0,595
> 2500	0	0	0,517

Для молниевой активности максимум плотности приходится на высотный диапазон от 500 до 750 м, с повышением высоты плотность разрядов уменьшается, причем указанная закономерность сильная (ранговый коэффициент корреляции Спирмена $r_s = -0,99$, $p < 0,01$). При этом грозовые пожары, в силу специфики природных условий, частично выбиваются из этого тренда и повторяют его только в среднегорьях и высокогорьях.

Интересным представляется вопрос склоновой приуроченности пожаров от гроз. Распределение долей пожаров от гроз от их общего числа (в %) в зависимости от крутизны склонов представлено на рис. 2.

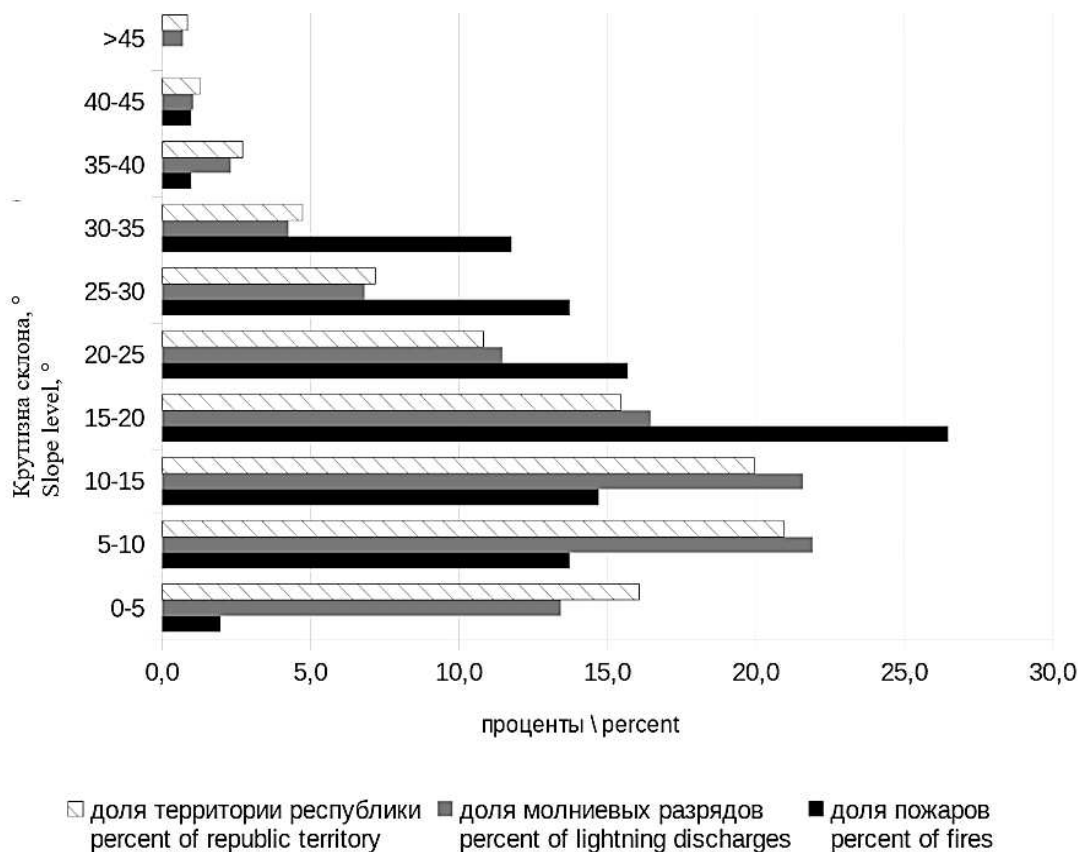


Рис. 2. Доля молниевых разрядов, пожаров от гроз, территории республики на склонах различной крутизны, % / Fig. 2. Share of lightning discharges, fires from thunderstorms, territory of the republic on slopes of different steepness, %

Отметим, что на очень крутых склонах (более 45°) пожары от гроз не были зарегистрированы. Наибольшая доля пожаров от гроз произошла на склонах от 15 до 20° (26,5 %).

Распределение плотности пожаров и плотности молниевых разрядов в зависимости от крутизны склонов представлено в табл. 2.

Таблица 2 / Table 2

Распределение пожаров и молниевых разрядов по склонам различной крутизны (суммарные значения за период с 2016 по 2020 г.) / Distribution of fires and lightning discharges on slopes of different steepness (total values for the period from 2016 to 2020)

Крутизна склона, °	Доля пожаров от их общего числа, %	Плотность пожаров на 1 км ²	Плотность молний на 1 км ²
0–5	2,0	0,0001	0,775
5–10	13,7	0,0007	0,949
10–15	14,7	0,0008	0,981
15–20	26,5	0,0019	0,966
20–25	15,7	0,0016	0,961
25–30	13,7	0,0021	0,861
30–35	11,8	0,0027	0,816
35–40	1,0	0,0004	0,769
40–45	1,0	0,0008	0,742
>45	0,0	0	0,751

Увеличение крутизны склона до 35° приводит к увеличению риска возникновения пожара. Если по равнинным территориям (0–5°) для инициации одного пожара необходимо порядка 5659 разрядов, фиксируемых сетью грозопеленгации WWLLN, то для крутых склонов (30–35°) – всего 299 – в 19 раз меньше. Данное заключение подтверждается высоким положительным коэффициентом корреляции между показателями плотности грозовых пожаров и крутизной склона от 0 до 35° (ранговый коэффициент корреляции Спирмена $r_s = 0,96$, $p < 0,01$). Плотность молниевых разрядов в указанном диапазоне крутизны (0–35°) не имеет выраженных закономерностей, однако если рассмотреть все интервалы, приведённые в табл. 2 (от 0 до 90°), зависимость молниевой активности от крутизны склона будет отрицательной (ранговый коэффициент корреляции Спирмена $r_s = -0,66$, $p < 0,05$).

Склоны характеризуются существенными различиями в физико-географических провинциях Горного Алтая. В юго-восточном Алтае крутые склоны (30–45°) южной экспозиции почти лишены растительности и представляют собой скальные выходы, обширные территории, покрытые обломочным материалом разной размерности с участками луговой и степной растительности, с редкими лиственными насаждениями. Макросклоны северной экспозиции – чаще всего хвойные леса с ведущей ролью лиственницы и кедра. В центральном Алтае экспозиционные различия менее выражены, но общая приуроченность древесной растительности к северным склонам сохраняется. Только в среднегорье северного и северо-восточного Алтая лес встречается на макросклонах любой пространственной ориентации.

Склоны средней крутизны (15–30°) относительно хорошо доступны для закрепления древесной растительности (особенно в нижней части этого диапазона), они хорошо дренируются, что приводит к быстрому высыханию лесной подстилки. Наличие сухого горючего материала объясняет повышенную долю пожаров по сравнению с долей молниевых разрядов.

Пологие склоны (5–15°) имеют хорошую облесенность, но меньшую дренируемость по сравнению со склонами средней крутизны, что обуславливает относительно большую влажность лесной подстилки и меньшую долю пожаров.

Равнинные участки (до 5°) в границах Республики Алтай занимают небольшие площади и тяготеют к долинам рек и котловинам, которые либо давно освоены человеком, либо представляют собой полупустыни и степи. На этих территориях лесная растительность почти полностью отсутствует.

Распределение плотности и количества пожаров в зависимости от крутизны склона хорошо согласуется с основными положениями ряда работ [28–30]. В то же время существуют исследования, где отмечается обратная ситуация – снижение пожарной опасности с увеличением крутизны склона, например [11, 12]. По мнению авторов, подобные различия могут быть вызваны природными особенностями территории, которые обуславливают наличие горючего материала, характер увлажнения и дренажа подстилающей поверхности.

Подводя итог, следует отметить, что количество молниевых ударов в землю нельзя назвать главным фактором формирования пожара. Полученные результаты подтверждают другие исследования, которые основным фактором формирования лесного пожара считают засуху в предгрозовую период, которая приводит к иссушению лесной подстилки и ускорению возгорания [6, 31, 32].

Заключение

Наивысшая плотность молниевой активности отмечена для высотного диапазона 500–750 м (1,56 молний на 1 км², с 2016 по 2020 г.). С дальнейшим увеличением высоты плотность молний последовательно уменьшается.

Наиболее пожароопасным высотным диапазоном является интервал от 1000 до 1500 м над уровнем моря, здесь отмечается не только наивысшая доля пожаров (43 %), но и их максимальная плотность (0,0024 пожара на 1 км²). Указанный высотный ярус характеризуется достаточным уровнем залесённости и высокой мозаичностью температурно-влажностных показателей, что в совокупности и приводит к наибольшему числу пожаров. С дальнейшим увеличением высоты плотность пожаров снижается, на территориях выше 2500 м возгорания не зафиксированы.

Отмечена зависимость увеличения количества и плотности пожаров с увеличением крутизны склона (до 35°), за исключением очень крутых склонов, на которых отсутствует горючий материал или его недостаточно для значимого возгорания. Склоны с более высокой крутизной дренируются интенсивнее и быстрее теряют влагу, чем менее крутые. При прочих равных условиях крутые склоны являются более сухими, что приводит к формированию пожароопасных условий при наличии горючего материала.

Результаты работы могут быть использованы для определения зон риска природной пожарной опасности. Конкретизация условий морфометрической приуроченности пожаров от гроз позволит уточнить модели возникновения и распространения пожаров в горах.

Список источников

1. Иванов В.А., Коршунов Н.А., Матвеев П.М. Пожары от молний в лесах Красноярского Приангарья. Красноярск: СибГТУ, 2004. 132 с.
2. Larjavaara M., Pennanen J., Tuomi T. Lightning that ignites forest fires in Finland // Agr. Forest Meteorol. 2005. Vol. 132. P. 171–180.
3. Козлов В.И., Муллаяров В.А., Соловьев В.С. Лесные пожары в Якутии от гроз // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2009. Т. 2, № 6. С. 388.
4. Wierzchowski J., Heathcott M., Flannigan M.D. Lightning and lightning fire, central cordillera, Canada // Int. J. of Wildland Fire. 2002. Vol. 11, № 1. P. 41–51. <https://doi.org/10.1071/WF01048>.
5. Регионы России. Социально-экономические показатели. 2023: стат. сб. М.: Росстат, 2023. 1126 с.
6. Швецов Е.Г., Сухинин А.И., Пономарев Е.И. Исследование пространственных и временных соотношений между молниевыми разрядами и лесными пожарами на территории Восточной Сибири // Сиб. аэрокосм. журн. 2007. № 2. С. 13–18. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-prostranstvennyh-i-vremennyh-sootnosheniy-mezhdu-molnievymi-razryadami-i-lesnymi-pozharami-na-territorii-vostochnoy> (дата обращения: 13.03.2024).
7. Тарабукина Л.Д., Кононова Н.К. Циркуляция атмосферы, грозы и лесные пожары в Северной Азии в 2009–2016 гг. // Жизнь Земли. 2018. № 1. С. 22–30. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/tsirkulyatsiya-atmosfery-grozy-i-lesnye-pozhary-v-severnoy-azii-v-2009-2016-gg> (дата обращения: 13.03.2024).
8. Rorig M.L., McKay S.J., Ferguson S.A., Werth P. Model-generated predictions of dry thunderstorm potential // J. of Applied Meteorology and Climatology. 2007. Vol. 46, № 5. P. 605–614. <https://doi.org/10.1175/JAM2482.1>.
9. Dowdy A.J., Mills G.A. Atmospheric and fuel moisture characteristics associated with lightning-attributed fires // J. of Applied Meteorology and Climatology. 2012. Vol. 51, № 11. P. 2025–2037. <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-11-0219.1>.

10. Qiao C., Wu L., Chen T., Huang Q., Li Z. Study on forest fire spreading model based on remote sensing and GIS // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2018. Vol. 199, № 2. P. 022017. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/199/2/022017>.
11. Pandey K., Ghosh S.K. Modelling of Parameters for Forest Fire Risk Zone Mapping // ISPRS-International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2018. XLII, 5. P. 299–304. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-5-299-2018>.
12. Baltaci U., Yildirim F. Effect of Slope on the Analysis of Forest Fire Risk // Hacettepe J. of Biology and Chemistry. 2020. Vol. 48 (4). P. 373–379. <https://doi.org/10.15671/hjbc.753080>.
13. Hong H., Tsangaratos P., Ilija I., Liu J., Zhu A.X., Xu C. Applying genetic algorithms to set the optimal combination of forest fire related variables and model forest fire susceptibility based on data mining models. The case of Dayu County, China // Science of the Total Environment. 2018. Vol. 630. P. 1044–1056. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.02.278>.
14. Ahrens M. Brush, grass, and forest fires. Quincy: National Fire Protection Association, Fire Analysis and Research Division, 2013. 64 p.
15. Дмитриев А.Н., Кречетова С.Ю., Кочеева Н.А. Грозы и лесные пожары от гроз на территории Республики Алтай. Горно-Алтайск: РИО ГАГУ, 2011. 154 с.
16. Каранина С.Ю., Каранин А.В., Лукашева М.А., Глебова А.В. Природные пожары от гроз в Республике Алтай в 2015–2020 гг. и их сопоставление с данными WWLLN // Закономерности формирования и воздействия морских, атмосферных опасных явлений и катастроф на прибрежную зону РФ в условиях глобальных климатических и промышленных вызовов («Опасные явления-III»). Ростов н/Д.: ЮНЦ РАН, 2021. С. 381–385.
17. Горбатенко В.П., Ершова Т.В., Константинова Д.А. Пространственное распределение плотности разрядов молнии в землю над территорией Западной Сибири // Вестн. Томского гос. ун-та. 2009. № 329. С. 251–255. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/prostranstvennoe-raspredelenie-plotnosti-razryadov-molnii-v-zemlyu-nad-territoriye-zapadnoy-sibiri> (дата обращения: 15.03.2024).
18. Константинова Д.А. Пространственное распределение параметров грозовой активности и конвекции над Западной Сибирью : автореф. дис. ... канд. геогр. наук. Томск, 2013. 19 с.
19. Каранина С.Ю., Кочеева Н.А., Каранин А.В. Сопоставление геолого-географической характеристики и грозовой активности Республики Алтай // Геология, география и глобальная энергия. 2018. № 2. С. 167–177.
20. Дмитриев А.Н., Шитов А.В., Кочеева Н.А., Щетинин Д.И. Влияние подземных, наземных и воздушных ядерных испытаний на Семипалатинском испытательном полигоне на грозовой режим Горного Алтая // Проблемы геологии и географии Сибири: материалы науч. конф., посвященной 125-летию основания Томского гос. ун-та и 70-летию образования геол.-геогр. факультета. Вестн. Томского гос. ун-та. 2003. № 3 (IV). С. 168–170.
21. NASA JPL (2013). NASA Shuttle Radar Topography Mission Global 3 arc second [Data set]. NASA EOSDIS Land Processes DAAC. <https://doi.org/10.5067/MEaSUREs/SRTM/SRTMGL3.003>.
22. Всемирная сеть локализации молниевых разрядов (WWLLN). URL: <http://wwlln.net> (дата обращения: 12.03.2024).
23. Горно-Алтайский ЦГМС. URL: <http://meteo-altai.ru/> (дата обращения: 12.03.2024).
24. QGIS.org (2022). QGIS Geographic Information System. QGIS Association. URL: <http://www.qgis.org> (дата обращения: 12.03.2024).
25. Spearman Rank Correlation Coefficient // The Concise Encyclopedia of Statistics. New York: Springer, 2008. https://doi.org/10.1007/978-0-387-32833-1_379.
26. Matin M.A., Chitale V.S., Murthy Manchiraju S.R., Uddin K., Bajracharya B., Pradhan S. Understanding forest fire patterns and risk in Nepal using remote sensing, geographic information system and historical fire data // Int. J. of Wildland Fire. 2017. Vol. 26 (4). P. 276–286. <https://doi.org/10.1071/WF16056>.
27. Conedera M., Cesti G., Pezzatti G.B., Zumbrennen T., Spinedi F. Lightning-induced fires in the Alpine region: An increasing problem // Forest Ecology and Management. 2006. Vol. 234(1). P. S68. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2006.08.096>.
28. Jaiswal R.K., Mukherjee S., Raju K.D., Saxena R. Forest fire risk zone mapping from satellite imagery and GIS // Int. J. of Applied Earth Observation and Geoinformation. 2002. Vol. 4, № 1. P. 1–10. [https://doi.org/10.1016/S0303-2434\(02\)00006-5](https://doi.org/10.1016/S0303-2434(02)00006-5).
29. Erten E., Kurgun V., Musaoglu N. Forest Fire Risk Zone Mapping from Satellite Imagery and GIS Case Study // 20th ISPRS Congress. Istanbul, 2004. P. 33–39.
30. Adab H., Kanniah K.D., Solaimani K. Modeling forest fire risk in the northeast of Iran using remote sensing and GIS techniques // Natural Hazards: J. of the Int. Society for the Prevention and Mitigation of Natural Hazards. 2013. Vol. 65 (3). P. 1723–1743. <https://doi.org/10.1007/s11069-012-0450-8>.
31. Князев Н.В., Исаева Л.Г. Лесные пожары в Мурманской области и возникновение пожаров от гроз // Экологические проблемы северных регионов и пути их решения: тез. докл. VII Всерос. науч. конф. с

междунар. участием, посвященной 30-летию Института проблем промышленной экологии Севера ФИЦ КНЦ РАН и 75-летию со дня рождения В. В. Никонова. Апатиты: ФИЦ КНЦ РАН, 2019. С. 49–50.

32. Renkin R.A., Despain D.G. Fuel moisture, forest type, and lightning-caused fire in Yellowstone National Park // Canadian J. of Forest Research. 1992. Vol. 22, № 1. P. 37–45.

References

1. Ivanov V.A., Korshunov N.A., Matveev P.M. *Fires from lightning in the forests of the Krasnoyarsk Angara*. Krasnoyarsk: SibSAU Press; 2004. 132 p. (In Russ.).
2. Larjavaara M., Pennanen J., and Tuomi T. Lightning that ignites forest fires in Finland. *Agr. Forest Meteorol.* 2005;132:171-180.
3. Kozlov V.I., Mullayarov V.A., Solov'ev V.S. Forest Fires in Yakutia from Thunderstorms. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa = Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space*. 2009;2(6):388. (In Russ.).
4. Wierzchowski J., Heathcott M., Flannigan M.D. Lightning and lightning fire, central cordillera, Canada. *International Journal of Wildland Fire*. 2002;11(1):41-51. <https://doi.org/10.1071/WF01048>.
5. *Regions of Russia. Socio-economic indicators*. 2023. Moscow: Rosstat Press; 2023. 1126 p. (In Russ.).
6. Shvetsov E.G., Sukhinin A.I., Ponomarev E.I. Study of spatial and temporal correlations between lightning strikes and forest fires in Eastern Siberia. *Sib. aerokosm. zhurn. = The Siberian Aerospace Journal*. 2007;(2):13-18. Available from: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-prostranstvennyh-i-vremennyh-sootnosheniy-mezhdu-molnievymi-razryadami-i-lesnymi-pozharami-na-territorii-vostochnoy> [Accessed 13th March 2024]. (In Russ.).
7. Tarabukina L.D., Kononova N.K. Atmospheric circulation, thunderstorms and forest fires in North Asia in 2009-2016. *Zhizn' Zemli = Life of the Earth*. 2018;(1):22-30. Available from: <https://cyberleninka.ru/article/n/sirkulyatsiya-atmosfery-grozy-i-lesnye-pozhary-v-severnoy-azii-v-2009-2016-gg> [Accessed 13th March 2024]. (In Russ.).
8. Rorig M.L. McKay S.J., Ferguson S.A., Werth P. Model-generated predictions of dry thunderstorm potential. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*. 2007;46(5):605-614. <https://doi.org/10.1175/JAM2482.1>.
9. Dowdy A.J., Mills G.A. Atmospheric and fuel moisture characteristics associated with lightning-attributed fires. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*. 2012;51(11):2025-2037. <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-11-0219.1>.
10. Qiao C., Wu L., Chen T., Huang Q., Li Z. Study on forest fire spreading model based on remote sensing and GIS. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2018;199(2):022017. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/199/2/022017>.
11. Pandey K., Ghosh S.K. Modelling of Parameters for Forest Fire Risk Zone Mapping. *ISPRS-International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2018;XLII(5):299-304. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-5-299-2018>.
12. Baltaci U., Yildirim F. Effect of Slope on the Analysis of Forest Fire Risk. *Hacettepe Journal of Biology and Chemistry*. 2020;48(4):373-379. <https://doi.org/10.15671/hjbc.753080>.
13. Hong H., Tsangaratos P., Ilia I., Liu J., Zhu A.X., Xu C. Applying genetic algorithms to set the optimal combination of forest fire related variables and model forest fire susceptibility based on data mining models. The case of Dayu County, China. *Science of the Total Environment*. 2018;630:1044-1056. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.02.278>.
14. Ahrens M. *Brush, grass, and forest fires*. Quincy: National Fire Protection Association, Fire Analysis and Research Division Press; 2013. 64 p.
15. Dmitriev A.N., Krechetova S.Yu., Kocheeva N.A. *Thunderstorms and forest fires caused by thunderstorms in the territory of the Altai Republic*. Gorno-Altai: Gorno-Altai State University Press; 2011. 154 p. (In Russ.).
16. Karanina S.Yu., Karanin A.V., Lukasheva M.A., Glebova A.V. Natural fires from thunderstorms in the Altai Republic in 2015-2020 and their comparison with WWLLN data. *Regularities of formation and impact of marine and atmospheric hazardous phenomena and disasters on the coastal zone of the Russian Federation under the conditions of global climatic and industrial challenges ("Dangerous phenomena-III")*. Rostov-on-Don: Southern Scientific Center of Russian Academy of Sciences Press; 2021:381-385. (In Russ.).
17. Gorbatenko V.P., Ershova T.V., Konstantinova D.A. Spatial distribution of the lightning discharges density into the ground over the territory of Western Siberia. *Vestn. Tomskogo gos. un-ta = Tomsk State University Journal*. 2009;(329):251-255. Available from: <https://cyberleninka.ru/article/n/prostranstvennoe-raspredelenie-plotnosti-razryadov-molnii-v-zemlyu-nad-territoriy-zapadnoy-sibiri> [Accessed 15th March 2024]. (In Russ.).
18. Konstantinova D.A. *Spatial distribution of thunderstorm activity and convection parameters over Western Siberia*. Dissertation Thesis. Tomsk, 2013. 19 p. (In Russ.).

19. Karanina S.Yu., Kocheeva N.A., Karanin A.V. Mapping of geological and geographical characteristics and thunderstorm activity in the Republic of Altai. *Geologiya, Geografiya i Globalnaya Energiya = Geology, Geography and Global Energy*. 2018;(2):167-177. (In Russ.).
20. Dmitriev A.N., Shitov A.V., Kocheeva N.A., Schetin D.I. Impact of underground, surface and air nuclear tests at the Semipalatinsk test site on the thunderstorm regime of the Altai Mountains. *Problems of geology and geography of Siberia. Tomsk State University Journal*. 2003;(3):168-170. (In Russ.).
21. NASA JPL. *NASA Shuttle Radar Topography Mission Global 3 arc second* [Data set]. NASA EOSDIS Land Processes DAAC. 2013. <https://doi.org/10.5067/MEaSUREs/SRTM/SRTMGL3.003>.
22. *World Wide Lightning Location Network (WWLLN)*. Available from: <http://wwlln.net> [Accessed 12th March 2024].
23. *Gorno-Altai'sk CHEM*. Available from: <http://meteo-altai.ru/> [Accessed 12th May 2024]. (In Russ.).
24. *QGIS Geographic Information System*. QGIS Association, 2022. Available from: <http://www.qgis.org> [Accessed 12th March 2023].
25. Spearman Rank Correlation Coefficient. *The Concise Encyclopedia of Statistics*. New York: Springer Publ.; 2008. https://doi.org/10.1007/978-0-387-32833-1_379.
26. Matin M.A., Chitale V.S., Murthy Manchiraju S.R., Uddin K., Bajracharya B., Pradhan S. Understanding forest fire patterns and risk in Nepal using remote sensing, geographic information system and historical fire data. *International Journal of Wildland Fire*. 2017;26(4): 276-286. <https://doi.org/10.1071/WF16056>.
27. Conedera M., Cesti G., Pezzatti G.B., Zumbrennen T., Spinedi F. Lightning-induced fires in the Alpine region: An increasing problem. *Forest Ecology and Management*. 2006;234(1):S68. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2006.08.096>.
28. Jaiswal R.K., Mukherjee S., Raju K.D., Saxena R. Forest fire risk zone mapping from satellite imagery and GIS. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2002;4(1):1-10. [https://doi.org/10.1016/S0303-2434\(02\)00006-5](https://doi.org/10.1016/S0303-2434(02)00006-5).
29. Erten E., Kurgun V., Musaoglu N. Forest Fire Risk Zone Mapping from Satellite Imagery and GIS Case Study. *20th ISPRS Congress*. Istanbul, 2004:33-39.
30. Adab H., Kanniah K.D., Solaimani K. Modeling forest fire risk in the northeast of Iran using remote sensing and GIS techniques. *Natural Hazards: Journal of the International Society for the Prevention and Mitigation of Natural Hazards*. 2013;65(3):1723-1743. <https://doi.org/10.1007/s11069-012-0450-8>.
31. Knyazev N.V., Isaeva L.G. Forest fires in Murmansk region and thunderstorms as a fire agent. *Ecological problems of the Northern Regions and ways to their solution*. Abstracts of the 7th Russian Scientific Conference with international participation "Ecological problems of the Northern Regions and ways to their solution", dedicated to the 30th anniversary of the Institute of North Industrial Ecology Problems and to the 75th anniversary celebration of V. V. Nikonov. Apatity: Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences Press; 2019:49-50. (In Russ.).
32. Renkin R.A., Despain D.G. Fuel moisture, forest type, and lightning-caused fire in Yellowstone National Park. *Canadian Journal of Forest Research*. 1992;22(1):37-45.

Информация об авторах

А.В. Каранин – кандидат географических наук, доцент кафедры географии и природопользования.
М.Ю. Беликова – старший преподаватель кафедры математики, физики и информатики.
Н.А. Кочеева – кандидат геолого-минералогических наук, доцент кафедры географии и природопользования.
В.А. Какорин – аспирант кафедры географии и природопользования.

Information about the authors

A.V. Karanin - Candidate of Science (Geography), Associate Professor of the Department of Geography and Environmental Management.
M.Yu. Belikova - Senior Lecturer of the Department of Mathematics, Physics and Informatics.
N.A. Kocheeva - Candidate of Science (Geology and Mineralogy), Associate Professor of the Department of Geography and Environmental Management.
V.A. Kakorin – Postgraduate Student of the Department of Geography and Environmental Management.

Статья поступила в редакцию 02.04.2024; одобрена после рецензирования 08.04.2024; принята к публикации 04.07.2024.
The article was submitted 02.04.2024; approved after reviewing 08.04.2024; accepted for publication 04.07.2024.

Научная статья

УДК 631.811.1:631.811.98

doi: 10.18522/1026-2237-2024-3-81-90

ВЛИЯНИЕ БИОЛОГИЧЕСКИХ И ГУМИНОВЫХ ПРЕПАРАТОВ НА ДИНАМИКУ ПОДВИЖНЫХ ФОРМ АЗОТА В ЧЕРНОЗЕМЕ ОБЫКНОВЕННОМ ПРИ ВОЗДЕЛЫВАНИИ НУТА

Евгений Сергеевич Патрикеев¹, Елена Александровна Полиенко²,

Ольга Степановна Безуглова³✉

^{1, 2, 3} Федеральный Ростовский аграрный научный центр, Рассвет, Ростовская область, Россия

¹ koan5@rambler.ru

² polienkoe468@gmail.com

³ lola314@mail.ru✉

Аннотация. Представлены результаты полевого эксперимента по изучению влияния биологических препаратов на динамику подвижных форм азота в 2021–2023 гг. Испытания проводились в условиях Ростовской области, на черноземах обыкновенных карбонатных. Схема опыта включала бактериальные («Планриз», «Геостим») и гуминовые («БИО-Дон 10», гумат калия) препараты, а также разные уровни питания (без удобрений и азофоска 250 кг/га). Минеральный азот характеризуется высокой мобильностью, приведены данные гидротермических условий и динамика аммонийного и нитратного азота по годам и уровням питания. Установлено, что применение гуминовых препаратов стимулирует питание растений, что выражено в отрицательной динамике по сравнению с контролем, этот эффект усиливается при совместном использовании бактериальных и гуминовых препаратов. Результат – повышение урожайности до 28,0 % к контролю и до 24,9 % к фону.

Ключевые слова: нут, минеральный азот, динамика, гидротермические условия, гуминовые препараты, бактериальные препараты, урожайность

Для цитирования: Патрикеев Е.С., Полиенко Е.А., Безуглова О.С. Влияние биологических и гуминовых препаратов на динамику подвижных форм азота в черноземе обыкновенном при возделывании нута // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2024. № 3. С. 81–90.

Благодарности: работа выполнена по государственному заданию FNFZ-2022-0001.

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

Original article

INFLUENCE OF BIOLOGICAL AND HUMIC PREPARATIONS ON THE DYNAMICS OF MOBILE FORMS OF NITROGEN IN ORDINARY CHERNOZEM DURING CHICKPEAS CULTIVATION

Evgeniy S. Patrikeev¹, Elena A. Polienko², Olga S. Bezuglova³✉

^{1, 2, 3} Federal Rostov Agrarian Research Center, Rassvet, Rostov Region, Russia

¹ koan5@rambler.ru

² polienkoe468@gmail.com

³ lola314@mail.ru✉

Abstract. The results of a field experiment to study the influence of biological preparations on the dynamics of mobile forms of nitrogen in 2021–2023 are presented. The tests were carried out in the conditions of the Rostov region, on ordinary carbonate chernozems. The experimental design included bacterial (“Planriz”, “Geostim”) and humic (“BIO-Don 10”, potassium humate) preparations, as well as different nutrition levels (without fertilizers and azofoska 250 kg/ha). Mineral nitrogen is characterized by high mobility; data on hydrothermal conditions

© Патрикеев Е.С., Полиенко Е.А., Безуглова О.С., 2024

and the dynamics of ammonium and nitrate nitrogen by year and nutrition level are presented. It has been established that the use of humic preparations stimulates plant nutrition, which is expressed in negative dynamics compared to the control; this effect is enhanced by the combined use of bacterial and humic preparations. As a result, an increase in yield up to 28.0 % compared to the control and up to 24.9 % compared to the background.

Keywords: chickpeas, mineral nitrogen, dynamics, hydrothermal conditions, humic preparations, bacterial preparations, yield

For citation: Patrikeev E.S., Polienko E.A., Bezuglova O.S. Influence of Biological and Humic Preparations on the Dynamics of Mobile Forms of Nitrogen in Ordinary Chernozem During Chickpeas Cultivation. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2024;(3):81-90. (In Russ.).

Acknowledgments: the work was carried out according to state assignment FNFZ-2022-0001.

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

Введение

Азот – один из важнейших макроэлементов, необходимый для развития растения и формирования урожая [1, 2]. Большая доля почвенного азота (более 90 %) находится в составе гумуса и лишь около 10 % представлено минеральными формами [2]. Для питания растений доступны минеральные формы и легкогидролизуемый азот, миграция и превращение которых очень сильно зависят от интенсивности биологических процессов и абиотических факторов.

Бобовые культуры благодаря симбиотическим связям с азотфиксаторами и способности обогащать почву азотом являются хорошим предшественником в севообороте [3, 4]. В масштабах страны с учетом посевных площадей и величины урожая валовое накопление азота может достигать более 860 тыс. т, при этом на долю фиксированного клубеньками приходится более 60 % [5]. Многие исследователи считают, что при возделывании нута необходимо использовать бактериальные препараты (ризотрофин) для стимулирования клубеньков и ограничиваться фосфорно-калийными удобрениями, так как минеральный азот подавляет процесс азотфиксации [6, 7]. Однако донской регион характеризуется неустойчивым увлажнением, недостаток влаги негативно влияет на связывание атмосферного азота, поэтому рекомендуется вносить минеральный азот до 30 кг д.в./га [8].

В Ростовской области среди бобовых культур ведущее место принадлежит гороху, несмотря на то что нут является более засухоустойчивой культурой по сравнению с горохом. Это связано с высокой чувствительностью нута к гербицидам, которые могут вызывать фитотоксический эффект [9]. Он проявляется в пожелтении листьев, видоизменении побегов, в крайнем случае приводит к гибели растения, поэтому особый интерес представляют препараты (средства биологической защиты и стимулятора роста), которые повышают иммунитет растений и устойчивость к различным, в том числе химическим, стрессорам.

В связи с этим цель исследований – изучить влияние биологических препаратов на динамику минерального азота в почве при выращивании нута в условиях Ростовской области.

Материалы и методы

Объект исследования – чернозем обыкновенный карбонатный, сельскохозяйственная культура – нут, сорт Донплаза. Исследования проводили в стационаре агрохимии и защиты растений (Аксайский район Ростовской области) в 2021–2023 гг. В качестве биологических препаратов были использованы бактериальные («Планриз», НПП «Агроген»; «Геостим», ООО «Биотехагро») и гуминовые препараты: «БИО-Дон 10» (ООО «БИО-ДОН») и гумат калия (ГК «Флексом»). Препарат «Планриз Ж» (*Pseudomonas fluorescens* штамм AP-33) применяли для предпосевной обработки семян в качестве контактного биологического фунгицида, 0,3 л/т. Для профилактики развития болезней в период вегетации использовали «Геостим Фит» марки В, доза – 1,0 л/га. В составе препарата – 8 видов микроорганизмов: *Chaetomium globosum*, *Trichoderma viride*, *Bacillus megaterium*, *Azospirillum brasilense*, *Rhizobium leguminosarum*, *Mesorhizobium ciceri*, *Bradyrhizobium japonicum*, *Bacillus subtilis*.

«ВЮ-Дон 10» – гуминовый препарат, получаемый щелочной экстракцией едким натром из вермикомпоста, содержание гумата натрия – более 10 г/л; гумат калия жидкий торфяной – гуминовое органоминеральное удобрение, получаемое щелочной экстракцией едким калием из торфа с добавлением микроэлементов, содержание гумата калия – 36–45 г/л. Схема опыта представлена в табл. 1.

Таблица 1 / Table 1

Схема опыта / Experience scheme

№	Вариант опыта
1	Контроль
2	«ВЮ-Дон» (0,3 л/га)
3	Гумат калия (0,1 л/га)
4	«Планриз» + «Геостим» (0,3 л/т + 1,0 л/га)
5	«Планриз» + «Геостим» + «ВЮ-Дон» (0,3 л/т + 1,0 л/га + 0,3 л/га)
6	«Планриз» + «Геостим» + гумат калия (0,3 л/т + 1,0 л/га + 0,3 л/га)
7	Фон (N ₄₀ P ₄₀ K ₄₀)
8	Фон (N ₄₀ P ₄₀ K ₄₀) + «ВЮ-Дон» (0,3 л/га)
9	Фон (N ₄₀ P ₄₀ K ₄₀) + гумат калия (0,1 л/га)
10	Фон (N ₄₀ P ₄₀ K ₄₀) + «Планриз» + «Геостим» (0,3 л/т + 1,0 л/га)
11	Фон (N ₄₀ P ₄₀ K ₄₀) + «Планриз» + «Геостим» + «ВЮ-Дон» (0,3 л/т + 1,0 л/га + 0,3 л/га)
12	Фон (N ₄₀ P ₄₀ K ₄₀) + «Планриз» + «Геостим» + гумат калия (0,3 л/т + 1,0 л/га + 0,3 л/га)

Опыт заложен в четырехкратной повторности, расположение делянок – системное. Площадь опыта с учетом защитных полос – 2500 м², площадь делянки – 36 м², учетная площадь делянок – 25 м². Посев проводили рядовым способом с междурядьем 15 см, норма высева – 310 кг/га (800 тыс. шт. /га).

Для защиты посевов от сорных растений и вредителей проводились фоновые обработки химическими препаратами: почвенный гербицид «Ацетал Про, КЭ» (3,0 л/га) – до всходов, инсектицид «Амплиго, МКС» (0,2 л/га) – в фазу бутонизации. Бактериальным препаратом «Геостим» и гуматами также обрабатывали в фазу бутонизации, доза внесения составила 1,0 л/га («Геостим»), 0,3 л/га («ВЮ-Дон 10»), 0,1 л/га (гумат калия). Опыт заложен по Б.А. Доспехову [10], проведена математическая обработка с помощью анализа пакета данных MS Excel.

Для оценки эффективности биологических препаратов изучали их влияние на биологическую урожайность нута и физико-химические свойства чернозема обыкновенного карбонатного (динамика подвижных форм азота, ГОСТ 26951-86 [11], ГОСТ 26489-85 [12]).

Результаты и обсуждение

Ростовская область считается засушливым регионом, где лимитирующим фактором получения стабильных и высоких урожаев является количество влаги. В последние десятилетия в целом по Ростовской области отмечается аридизация климата [13], но Приазовская природно-сельскохозяйственная зона по условиям увлажнения более благоприятная, и ГТК здесь составляет 0,7. Однако следует отметить, что в исследуемые годы вегетационные сезоны по гидротермическим условиям различались весьма существенно: от влажных 2021–2023 гг. до засухи в 2022 г. (табл. 2).

В 2021 г. в апреле количество осадков превысило среднее многолетнее значение примерно в 2 раза (35 и 59 мм соответственно), далее фиксировалось небольшое превышение в период активного формирования вегетативной массы, а также в фазу бутонизации и цветения, в фазу созревания установилась жаркая и засушливая погода.

В 2022 г., наоборот, сложились крайне засушливые условия, за весь период наблюдений апрель – июль выпало всего 57 мм осадков, а ГТК составил 0,3. В 2023 г. погода была не похожа ни на 2021 г., ни на 2022 г., так как аномально влажные условия сохранялись на протяжении всего периода вегетации.

Минеральные формы азота крайне подвижны, причем мобильность нитратного азота несколько выше аммонийного, количество атмосферных осадков оказывает непосредственное влияние на динамику подвижных форм азота в почве.

Таблица 2 / Table 2

Характеристика гидротермических условий / Characteristics of hydrothermal conditions

Месяц	2021			2022			2023			Ср
	$\sum_{t>10}, ^\circ\text{C}$	R, мм	ГТК	$\sum_{t>10}, ^\circ\text{C}$	R, мм	ГТК	$\sum_{t>10}, ^\circ\text{C}$	R, мм	ГТК	ГТК
Апрель	291	59	2,0	371	11	0,3	324	84	2,6	1,6
Май	549	52	0,9	453	18	0,4	537	84	1,6	1,0
Июнь	648	51	0,8	693	1	0,0	679	33	0,5	0,4
Июль	806	40	0,5	732	27	0,4	759	52	0,7	0,5
Апрель – июль	2294	202	0,9	2249	57	0,3	2299	253	1,1	0,8

При анализе содержания подвижных форм азота в целом за три года из-за большого размаха варьирования значений не было установлено достоверных различий по вариантам опыта, хотя дисперсионный анализ каждого года в отдельности показывает наличие значимых различий средних значений. Поэтому в приведенных графиках представлена динамика подвижных форм в среднем за период наблюдений и по каждому году в отдельности (рис. 1–4).

Так, на рис. 1 представлена динамика нитратного азота без внесения минеральных удобрений.

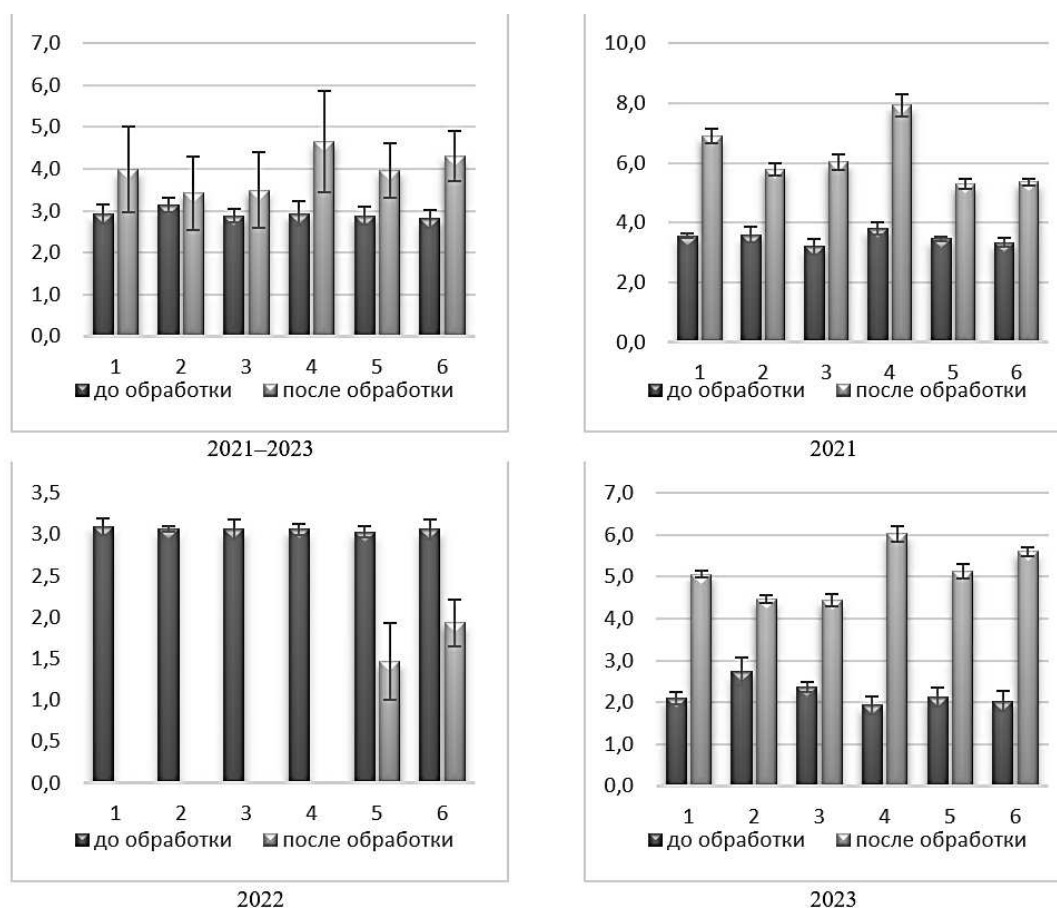


Рис. 1. Динамика нитратного азота в почве без внесения минеральных удобрений по вариантам опыта, мг/кг / Fig. 1. Dynamics of nitrate nitrogen in the soil without the application of mineral fertilizers according to experimental options, mg/kg

В 2021 г. содержание N-NO₃ до обработки биологическими препаратами составляло в среднем 3,5 мг/кг, т.е. обеспеченность этой формой азота была очень низкой [14]. Через 14 дней после обработки в почве наблюдается положительная динамика, количество нитратного азота повысилось в среднем на 2,7 мг/кг. Отметим, что в июне уже установилась жаркая погода и азот нитратов аккумулировался в верхнем слое почвы. На контроле минеральные удобрения не вносили и накопление данной формы происходит за счет биологических процессов (деятельности микроорганизмов). При использовании бактериальных препаратов накопление было максимальным –

7,9 мг/кг (прибавка по сравнению с контролем 4,1 мг/кг, но обеспеченность азотом нитратов остается очень низкой).

При использовании гуминовых препаратов совместно с бактериальными и самостоятельно также фиксируется положительная динамика, но менее выраженная. К тому же гуматы являются стимуляторами физиологических процессов, что способствует более интенсивному поглощению азота растениями. По результатам дисперсионного анализа $F = 17,5$ ($F_t = 3,1$), т.е. имеющиеся различия существенны.

В 2022 г. в фазу бутонизации содержание нитратной формы в среднем составляло 3,1 мг/кг, а в фазу начала созревания нитратов в почве не было. Исключение составили варианты применения биологических и гуминовых препаратов, где присутствует положительная динамика, но содержание очень низкое, увеличение по сравнению с нулевыми значениями на контроле составило в среднем 1,7 мг/кг ($F = 15,9$; $F_t = 3,1$).

В 2023 г. содержание азота нитратов было еще ниже и составляло 2,2 мг/кг, в июне количество осадков сопоставимо со средним многолетним значением, как и в 2021 г., наблюдается положительная динамика по всем вариантам опыта в среднем на 2,9 мг/кг и максимальное значение соответствует варианту с применением бактериальных препаратов (6,0 мг/кг) там, где применяли гуматы, положительная динамика присутствует, но немного ниже – 4,4–5,6 мг/кг ($F = 20,5$; $F_t = 3,1$).

Динамика нитратного азота на фоне минерального питания представлена на рис. 2. В качестве азотного удобрения использовали азофоску (16:16:16), азотные соединения которой в почве диссоциируют на нитратный и аммонийный ионы. Внесение в количестве 40 кг д.в./га считается достаточно высокой дозой для нута, однако в связи с обильными весенними осадками большая часть азота вымывается вниз по почвенному профилю.

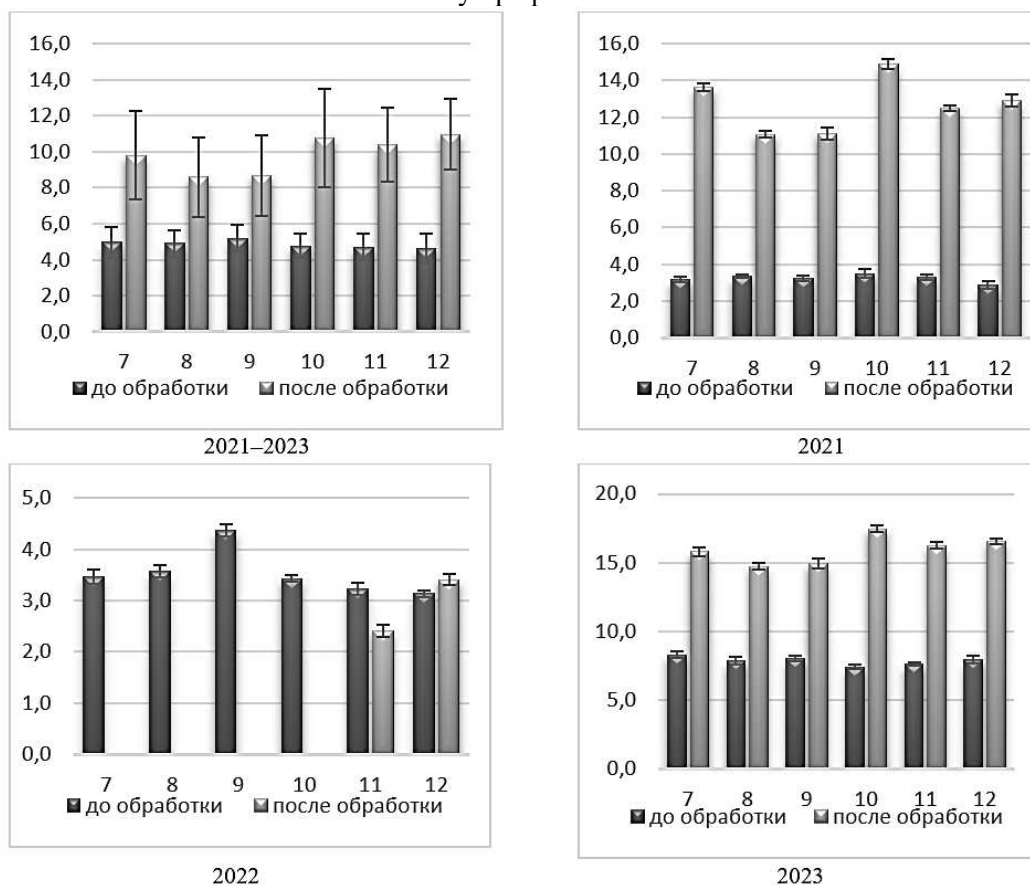


Рис. 2. Динамика нитратного азота в почве на фоне минерального питания по вариантам опыта, мг/кг / Fig. 2. Dynamics of nitrate nitrogen in soil with mineral nutrition according to experimental options, mg/kg

В 2021 г. содержание нитратного иона на фоновом варианте в среднем составило 3,2 мг/кг, даже несколько меньше, чем на контроле (3,5 мг/кг), т.е. произошло вымывание азота нитратов, поступающего с удобрением, условия увлажнения в апреле превышали средние многолетние в 2 раза (ГТК составит 2,0, а среднее многолетнее в этом месяце – 1,1). Однако повышение темпе-

ратуры в мае и июне приводит к обратному процессу и подтягиванию нитратов из нижележащих горизонтов. В фазу начала созревания, когда был проведен отбор после обработки биологическими препаратами, в фоновом варианте содержание нитратного иона составляет в среднем 13,6 мг/кг, на всех вариантах наблюдалось положительная динамика – от 7,7 до 11,4 мг/кг, т.е. обеспеченность азотом нитратов повышается до градации «низкая». На вариантах, где применяли бактериальные препараты, динамика выражена наиболее четко, содержание N-NO₃ достигает 14,9 мг/кг. Однако при использовании гуматов наблюдается ситуация, аналогичная вариантам без удобрения: по содержанию азота нитратов эти варианты уступают фоновым значениям при общей положительной динамике ($F = 34,2$; $Ft = 3,1$), что обусловлено стимуляцией физиологической активности растений нута и повышенным выносом азота.

В 2022 г. содержание нитратов в фазу бутонизации составляло в среднем 3,5 мг/кг, незначительно превышая варианты без удобрений, и также к началу созревания содержание нитратов опускается до 0, за исключением вариантов с применением бактериальных и гуминовых препаратов, и составляет в среднем 3,1 мг/кг. Гуминовые препараты усиливают секрецию корневых волосков, что активизирует ризосферные микроорганизмы, которые трансформируют аммонийный азот в нитратный в процессе нитрификации ($F = 526,1$; $Ft = 3,1$).

В 2023 г. содержание нитратного азота в фоновом варианте составляло 7,8 мг/кг, аналогично 2021 г. при повышении температуры воздуха происходит обратная миграция нитрата вверх по профилю, к фазе начала созревания его содержание на всех вариантах увеличивается на 7–10 мг/кг и достигает в варианте «фон» 15,8 мг/кг, а в варианте «фон + биологические препараты» – 17,5 мг/кг ($F = 13,7$; $Ft = 3,1$).

Таким образом, несмотря на высокую подвижность нитратного иона, бактериальные препараты способны повысить его содержание в почвенной ризосфере за счет нитрификации, применение гуминовых препаратов благодаря наращиванию физиологических процессов и воздействию на клеточные мембраны усиливает поглощение азота нитратов из почвы.

Аммонийный азот по сравнению с нитратным обладает меньшей подвижностью, тем не менее гидротермические условия также оказывают существенное влияние на его содержание в почве. Динамика аммонийного азота без внесения минеральных удобрений представлена на рис. 3.

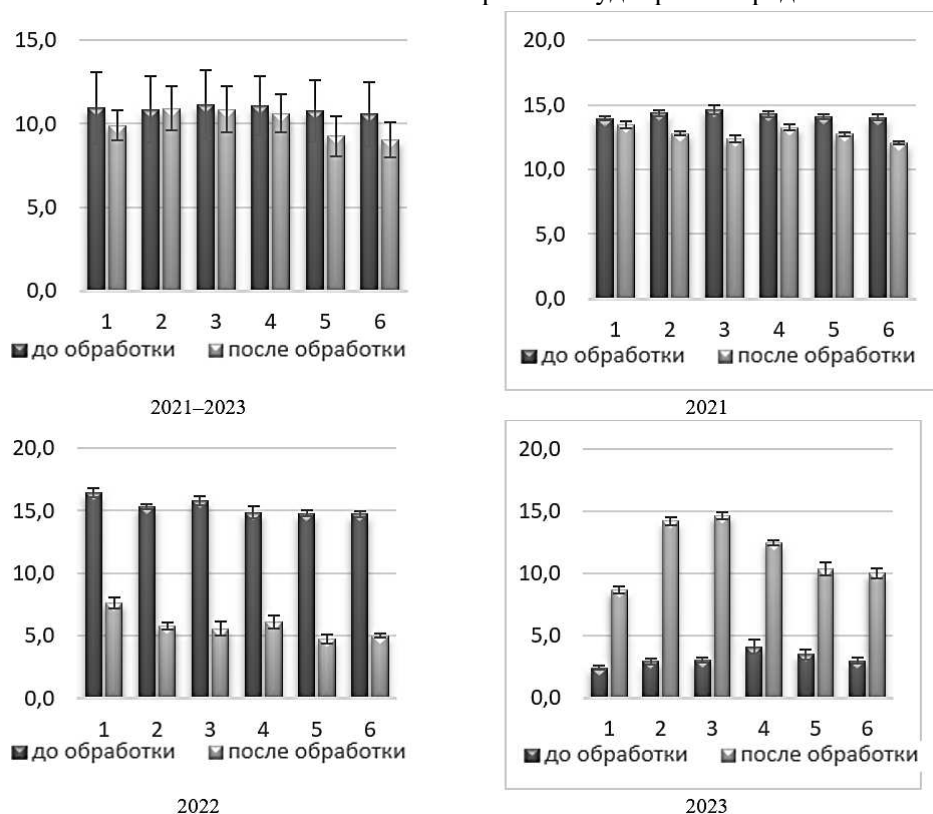


Рис. 3. Динамика аммонийного азота в почве без внесения минеральных удобрений по вариантам опыта, мг/кг / Fig. 3. Dynamics of ammonium nitrogen in the soil without the application of mineral fertilizers according to experimental options, mg/kg

В 2021 г. содержание аммонийного азота в фазу бутонизации составляло 14,2 мг/кг, обеспеченность минеральным азотом в почве оценивалась по Г.П. Гамзикову [14] как низкая. В фазу начала созревания во всех вариантах отмечается отрицательная динамика: в среднем уменьшение составило 1,5 мг/кг. Данная форма азота легко вовлекается в биологические процессы и поглощается не только растениями, но и микроорганизмами, с учетом наблюдающейся положительной динамики нитратов можно констатировать протекание нитрификации. При использовании бактериальных и гуминовых препаратов вынос усиливается ($F = 5,6$; $F_t = 3,1$), что также обусловлено более интенсивными физиологическими процессами и повышенной потребностью в питании.

В 2022 г. содержание минерального азота составляло 18,5 мг/кг, в том числе аммонийного – 15,3 мг/кг, обеспеченность минеральным азотом низкая. К началу созревания его содержание резко снижается по всем вариантам опыта в среднем на 9,5 мг/кг. Динамика в варианте «контроль» и «биологические препараты» идентична, бактериальные препараты очень плохо работают при высоких температурах, а ГТК в июне составило 0, что говорит о полном отсутствии атмосферных осадков. Однако при использовании гуматов отмечается большее снижение на 25–3 % относительно контроля ($F = 6,0$; $F_t = 3,1$).

В 2023 г. продолжительные весенние осадки привели к содержанию аммонийного азота в пахотном слое почвы в фазу бутонизации 3,3 мг/кг, а суммарно аммонийного и нитратного – в среднем 5,3 мг/кг, что соответствует очень низкой обеспеченности азотом. К началу созревания в контрольном варианте отмечается положительная динамика в среднем до 13,7 мг/кг, при этом в вариантах с применением гуминовых препаратов содержание азота достигает почти 20 мг/кг, но остается в градации «низкая обеспеченность». Это, скорее всего, связано с корневыми экссудатами, которые являются источником органического азота, а в ранее проведенных исследованиях установлено, что общая численность аммонификаторов ризосферы активно реагирует на обработки гуматами по листу [15].

На рис. 4 представлена динамика аммонийного азота на фоне минерального питания.

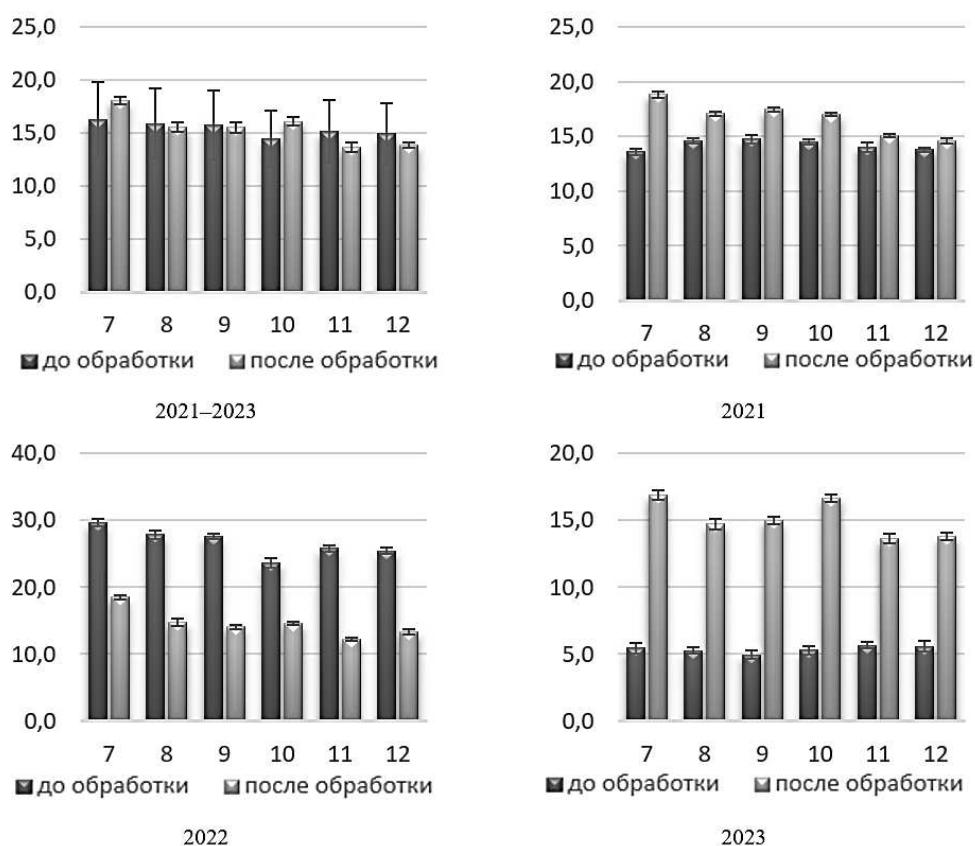


Рис. 4. Динамика аммонийного азота в почве на фоне минерального питания по вариантам опыта, мг/кг / Fig. 4. Dynamics of ammonium nitrogen in soil with mineral fertilizers according to experimental options, mg/kg

Если в 2021 г. в вариантах без применения минеральных удобрений наблюдалась отрицательная динамика, то на фоне минерального питания, наоборот, за счет миграции вверх по профилю – положительная. В варианте «фон» в среднем содержание повысилось на 5,2 мг/кг, в остальных вариантах с использованием гуминовых и бактериальных препаратов динамика есть, но в меньшей степени, увеличение аммонийного азота возрастает в среднем на 1,9 мг/кг, что свидетельствует о более интенсивном питании ($F = 54,5$; $F_t = 3,1$).

В 2022 г. обеспеченность минеральным азотом в фазу бутонизации колеблется от низкой к средней: содержание подвижных форм составляло 25,9–34,3 мг/кг, в том числе аммонийного азота – 22,4–30,8 мг/кг. Засушливые условия, недостаток влаги и высокие температуры угнетают биологическую активность почвы, и к фазе начала созревания так же, как в вариантах без удобрений, отмечается отрицательная динамика, более сильная по сравнению с контролем без удобрений (вариант 1), но относительно фона (вариант 7) составляет 20–33 %. Действие бактериальных препаратов нивелировано ($F = 33,4$; $F_t = 3,1$).

В 2023 г. обеспеченность минеральным азотом оценивается как низкая и варьирует от 12,1 до 14,3 мг/кг, ненамного превышая варианты без удобрений. К фазе созревания в фоновом варианте наблюдается положительная динамика, повышение составляет на 11,4 мг/кг. При использовании гуминовых препаратов содержание аммонийного азота достоверно (на 11–12 %) ниже фоновое, а при использовании бактериальных и гуминовых – на 18–19 % ($F = 17,0$; $F_t = 3,1$).

Таким образом, при различных гидротермических условиях гуминовые вещества оказывают стимулирующее влияние на растения, усиливая поглощение аммонийного азота. Бактериальные препараты также проявляют стимулирующие свойства, однако только при оптимальных условиях влажности, в засушливых условиях они не работают.

Результаты урожайности нута представлены в табл. 3. Азот как важный биогенный элемент участвует в формировании вегетативной массы, в которой происходит накопление органических веществ для будущего урожая.

Таблица 3 / Table 3

**Урожайность нута при использовании биологических препаратов
/ Chickpea yield using biological preparations**

Вариант	2021	2022	2023	Ср	Прибавка к контролю		Прибавка к фону	
					ц/га	%	ц/га	%
1	10,5	9,1	12,9	10,8	–	–	–	–
2	11,5	12,3	14,6	12,8	2,0	18,2	–	–
3	11,8	12,1	14,9	12,9	2,1	19,4	–	–
4	11,2	12,0	13,8	12,3	1,5	13,8	–	–
5	12,3	13,2	15,2	13,6	2,7	25,2	–	–
6	12,6	13,4	15,6	13,9	3,0	28,0	–	–
7	12,5	11,2	18,4	14,0	3,2	29,5	–	–
8	13,7	14,4	19,6	15,9	5,1	46,8	1,9	13,3
9	14,0	14,9	19,4	16,1	5,3	48,6	2,1	14,7
10	13,5	14,4	19,8	15,9	5,1	46,8	1,9	13,3
11	14,9	15,9	21,6	17,5	6,6	61,2	3,4	24,5
12	15,2	16	21,4	17,5	6,7	61,8	3,5	24,9
НСР ₀₅					1,8			

В период проведения исследований урожайность нута без применения минеральных удобрений в среднем составила 10,8 ц/га, внесение азотосодержащих удобрений в количестве 250 кг/га позволяет получить прибавку к урожайности 3,2 ц/га, что составляет 29,5 % к контролю. Применение только гуминовых препаратов за счет стимулирования физиологических процессов и более интенсивного поглощения элементов питания дает дополнительно 18,2–19,4 % относительно контроля и 13,3–14,7 % относительно фона, а совмещение бактериальных и гуминовых препаратов обеспечивает прибавку до 28,0 к контролю и до 24,9 % к фону.

Заключение

По результатам трехлетних испытаний установлено, что гуминовые препараты оказывают стимулирующее действие на растения, которое усиливается при совмещении их с бактериальными препаратами. Несмотря на высокую подвижность нитратного иона, бактериальные препараты способны повысить его содержание в почвенной ризосфере за счет усиления нитрификации. Применение гуминовых препаратов благодаря активизации физиологических процессов и воздействию на клеточные мембраны улучшает поглощение азота нитратов из почвы. При различных гидротермических условиях гуминовые вещества оказывают стимулирующее влияние на растения, усиливая поглощение аммонийного азота. Бактериальные препараты также проявляют стимулирующие свойства, однако только при оптимальных условиях влажности, в засушливых условиях они не работают.

Список источников

1. Семенов В.М. Современные проблемы и перспективы агрохимии азота // Проблемы агрохимии и экологии. 2008. № 1. С. 55–63.
2. Гамзиков Г.П. Системный комплексный подход в агрохимических исследованиях биогенных элементов в агроценозах (на примере азота) // Агрохимия. 2014. № 8. С. 3–16.
3. Пимонов К.И., Ионов Д.Ф. Современное состояние производства зернобобовых культур в Ростовской области // Вестн. Донского гос. аграр. ун-та. 2015. № 3-1. С. 46–52.
4. Германцева Н.И. Нут – культура больших возможностей // Теоретические и прикладные аспекты современной науки. 2014. № 4-1. С. 50–53.
5. Завалин А.А. Оптимизация минерального питания и продуктивности растений при использовании биопрепаратов и удобрений // Достижения науки и техники АПК. 2015. Т. 29, № 5. С. 26–28.
6. Клостер Н.И., Азаров В.Б., Соловиченко В.Д., Ступаков А.Г. Влияние агротехнологий на азотфиксирующую способность бобовых культур в юго-западной части ЦЧЗ // Вестн. Курской гос. с.-х. академии. 2012. Т. 2, № 2. С. 68–70.
7. Тедеева А.А., Абаев А.А., Хохоева А.А., Гериева Ф.Т. Эффективность минеральных удобрений в повышении продуктивности сортов гороха // Горное сельское хозяйство. 2016. № 1. С. 97–102.
8. Михайличенко Е.Н., Пимонов К.И., Данилов А.Н., Гусакова Н.Н. Влияние минеральных удобрений и биопрепаратов на урожайность нута на черноземе южном // Аграр. науч. журн. 2018. № 4. С. 16–21.
9. Патрикеев Е.С., Коленов А.В. Биологическая эффективность почвенных гербицидов при возделывании нута Донплаза в условиях Ростовской области // Актуальные вопросы развития отраслей сельского хозяйства: теория и практика: материалы Всерос. конф. (18–19 мая). Рассвет, 2023. С. 102–108.
10. Доспехов Б.А. Методика полевого опыта с основами статистической обработки результатов исследований. М.: Агропромиздат, 1985. 351 с.
11. ГОСТ 26951-86. Почвы. Определение нитратов ионометрическим методом. М.: Изд-во стандартов, 1986. 10 с.
12. ГОСТ 26489-85. Почвы. Определение обменного аммония по методу ЦИНАО. М.: Изд-во стандартов, 1986. 5 с.
13. Безуглова О.С., Ильинская И.Н., Закруткин В.Е., Назаренко О.Г., Литвинов Ю.А., Гаевая Э.А., Мезенков А.А., Жумбей А.И. Динамика деградации земель в Ростовской области // Изв. РАН. Серия геогр. 2022. № 86 (1). С. 41–54. <https://doi.org/10.31857/S2587556622010034>.
14. Гамзиков Г.П. Почвенная диагностика азотного питания растений и применение азотных удобрений в севооборотах // Плодородие. 2018. № 1. С. 8–14.
15. Безуглова 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.

References

1. Semenov V. M. Modern problems and prospects of agrochemistry of nitrogen. *Problemy agrokhimii i ekologii = Problems of Agrochemistry and Ecology*. 2008;(1):55-63. (In Russ.).
2. Gamzikov G.P. Systematic integrated approach in agrochemical studies of nutrients in agrocenoses (using the example of nitrogen). *Agrokhimiya = Agrochemistry*. 2014;(8):3-16. (In Russ.).
3. Pimonov K.I., Ionov D.F. Current state of grain legume production in the Rostov region. *Vestn. Donskogo gos. agrar. un-ta = Bulletin of the Don State Agrarian University*. 2015;(3-1):46-52. (In Russ.).

4. Germantseva N.I. Chickpeas - a culture of great possibilities. *Teoreticheskie i prikladnye aspekty sovremennoi nauki = Theoretical and Applied Aspects of Modern Science*. 2014;(4-1):50-53. (In Russ.).
5. Zavalin A.A. Optimization of mineral nutrition and plant productivity when using biological products and fertilizers. *Dostizheniya nauki i tekhniki APK = Achievements of Science and Technology of the Agro-Industrial Complex*. 2015;29(5):26-28. (In Russ.).
6. Kloster N.I., Azarov V.B., Solovichenko V.D., Stupakov A.G. The influence of agricultural technologies on the nitrogen-fixing ability of legumes in the southwestern part of the Central Chernobyl Zone. *Vestn. Kurskoi gos. s.-kh. akademii = Bulletin of the Kursk State Agricultural Academy*. 2012;2(2):68-70. (In Russ.).
7. Tedeeva A.A., Abaev A.A., Khokhoeva A.A., Gerieva F.T. Efficiency of mineral fertilizers in increasing the productivity of pea varieties. *Gornoe sel'skoe khozyaistvo = Mountain Agriculture*. 2016;(1):97-102. (In Russ.).
8. Mikhailichenko E.N., Pimonov K.I., Danilov A.N., Gusakova N.N. The influence of mineral fertilizers and biological products on the yield of chickpeas on southern chernozem. *Agrar. nauch. zhurn. = Agricultural Scientific Journal*. 2018;(4):16-21. (In Russ.).
9. Patrikeev E.S., Kolenov A.V. Biological effectiveness of soil herbicides when cultivating Donplaza chickpea in the conditions of the Rostov region. *Current issues in the development of agricultural sectors: theory and practice*. Materials of the All-Russian conference, May 18-19. Rassvet, 2023:102-108. (In Russ.).
10. Dospikhov B.A. *Field experience methodology with the basis of statistical processing of research results*. Moscow: Agropromizdat Publ.; 1985. 351 p. (In Russ.).
11. GOST 26951-86. *Soils. Determination of nitrates by ionometric method*. Moscow: Publishing House of Standards; 1986. 10 p. (In Russ.).
12. GOST 26489-85. *Soils. Determination of exchangeable ammonium by CINAO method*. Moscow: Publishing House of Standards; 1986. 5 p. (In Russ.).
13. Bezuglova O.S., Ilyinskaya I.N., Zakrutkin V.E., Nazarenko O.G., Litvinov Yu.A., Gaevaya E.A., Mezhenkov A.A., Zhumbey A.I. Dynamics of land degradation in the Rostov region. *Izv. RAN. Seriya geogr. = News of the Russian Academy of Sciences. Geographical Series*. 2022;86(1):41-54. <https://doi.org/10.31857/S2587556622010034>. (In Russ.).
14. 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.).
15. 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 Publishing House; 2019. 154 p. (In Russ.).

Информация об авторах

Е.С. Патрикеев – аспирант, научный сотрудник.

Е.А. Полиенко – кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник.

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

Information about the authors

E.S. Patrikeev - Postgraduate Student, Researcher.

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

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

Статья поступила в редакцию 12.02.2024; одобрена после рецензирования 12.03.2024; принята к публикации 04.07.2024.
The article was submitted 12.02.2024; approved after reviewing 12.03.2024; accepted for publication 04.07.2024.

Научная статья

УДК 551.586

doi: 10.18522/1026-2237-2024-3-91-97

АГРОКЛИМАТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ПЕРИОДА ПЕРЕЗИМОВКИ ОЗИМОЙ ПШЕНИЦЫ В ЦЕНТРАЛЬНО-ЧЕРНОЗЕМНОМ ЭКОНОМИЧЕСКОМ РАЙОНЕ

Иван Андреевич Смирнов

Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева, Москва, Россия
ivan-2-2-99@yandex.ru

Аннотация. Данное исследование было проведено с целью выявить наиболее значимые с точки зрения влияния агроклиматические показатели периода перезимовки для озимой пшеницы на территории областей, входящих в состав Центрально-Черноземного экономического района. Для этого были использованы метеорологические данные о средней, минимальной и максимальной температуре воздуха, количестве осадков и высоте снежного покрова за период с 1993 по 2022 г. и проведен корреляционно-регрессионный анализ зависимостей урожайности данной культуры от рассчитанных показателей. В ходе анализа были рассмотрены статистически значимые зависимости урожайности озимой пшеницы от ряда агроклиматических показателей периода перезимовки, выявленные при использовании критерия Фишера и оценке Р-значений коэффициентов уравнения регрессии. По результатам анализа наиболее значимыми показателями периода перезимовки можно назвать: среднюю температуру воздуха за самый холодный месяц и самую холодную пятидневку, продолжительность периода между датами устойчивого перехода температуры воздуха через 0 °С осенью и весной, а также суммы отрицательных температур воздуха между этими датами. Полученные результаты потенциально могут быть более наглядными при использовании большего объема данных, а также при проведении множественной регрессии.

Ключевые слова: урожайность озимой пшеницы, Центрально-Черноземный экономический район, зима, период перезимовки, агроклиматическая оценка, температура воздуха, снежный покров, корреляционно-регрессионный анализ

Для цитирования: Смирнов И.А. Агроклиматическая оценка периода перезимовки озимой пшеницы в Центрально-Черноземном экономическом районе // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2024. № 3. С. 91–97.

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

Original article

AGROCLIMATIC ASSESSMENT OF THE OVERWINTERING PERIOD OF WINTER WHEAT IN THE CENTRAL BLACK EARTH ECONOMIC REGION

Ivan A. Smirnov

Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Moscow, Russia
ivan-2-2-99@yandex.ru

Abstract. This study was conducted in order to identify the most significant, in terms of influence, agroclimatic indicators of the overwintering period for winter wheat in the territories of the regions that are part of the Central

© Смирнов И.А., 2024

Black Earth Economic Region. For this purpose, meteorological data on average, minimum and maximum air temperature, precipitation and snow cover height for the period from 1993 to 2022 were used, and a correlation and regression analysis of the dependence of the yield of this crop on the calculated indicators was carried out. During the analysis, statistically significant dependences of winter wheat yield on a number of agroclimatic indicators of the overwintering period were considered, revealed when using the Fisher criterion and estimating the P-values of the coefficients of the regression equation. According to the results of the analysis, the most significant indicators of the overwintering period are: the average air temperature for the coldest month and the coldest five-day period, the duration of the period between the dates of a steady transition of air temperature through 0°C in autumn and spring, as well as the sum of negative air temperatures between these dates. The results obtained can potentially be more visible when using a larger amount of data, as well as when performing multiple regression.

Key words: winter wheat yield, Central Black Earth Economic Region, winter, overwintering period, agroclimatic assessment, air temperature, snow cover, correlation and regression analysis

For citation: Smirnov I.A. Agroclimatic Assessment of the Overwintering Period of Winter Wheat in the Central Black Earth Economic Region. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2024;(3):91-97. (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

Рост и развитие озимой пшеницы, как и всех сельскохозяйственных растений, в значительной степени определяются агрометеорологическими и агроклиматическими условиями весенне-летнего периода вегетации. Однако немаловажную роль при возделывании этой культуры также играют условия перезимовки. В свою очередь, согласно данным Росстата, Центральном-Черноземном экономическом районе (ЦЧЭР), включающий в себя Воронежскую, Белгородскую, Курскую, Липецкую и Тамбовскую области, является одним из ключевых регионов производства зерна озимой пшеницы в России [1]. На фоне наблюдающихся изменений климата стоит особое внимание уделять агроклиматической оценке условий холодного периода года и анализу изменчивости наиболее значимых, в плане влияния на продуктивность посевов, агроклиматических показателей.

В рамках исследования, направленного на оценку агроклиматических условий периода перезимовки озимой пшеницы и их влияния на последующее формирование урожайности данной культуры, была рассмотрена зависимость между рядом агроклиматических характеристик холодного периода года и многолетней динамикой урожайности данной сельскохозяйственной культуры за период с 1993 по 2022 г.

Стоит отметить, что существуют работы, в которых оцениваются изменения агроклиматических ресурсов и агрометеорологических характеристик в рамках исследуемого региона [2–9]. Однако они зачастую опираются на иные временные периоды [5], могут не включать в себя анализ условий перезимовки [3, 6–8], рассматривают анализируемую территорию разобщенно, по отдельным областям [6, 7], или же оценивают влияние агрометеорологических и агроклиматических факторов в рамках одной станции [9, 10]. Кроме того, в большинстве подобных работ не рассматривается связь агроклиматических показателей и фактических данных об урожайности [5]. В связи с этим данное исследование можно считать актуальным и оригинальным.

Объекты и методы исследования

Объектом исследования являются агроклиматические условия холодного периода года, выраженные через различные многолетние агрометеорологические показатели, и их взаимосвязь с урожайностью озимой пшеницы на исследуемой территории. Данные о среднеобластной урожайности озимой пшеницы получены из статистических сборников Росстата [1], а также в отделе агрометеорологических прогнозов Гидрометцентра России.

Метеорологические данные, включающие в себя суточные значения минимальной, средней и максимальной температуры воздуха, суммы осадков и высоты снежного покрова, взяты из базы данных Всероссийского научно-исследовательского института гидрометеорологической информации (мировой центр данных) [11]. Для исследования были отобраны метеостанции: «Воронеж» и «Каменная степь» (Воронежская область), «Курск», «Поныри», «Рыльск» (Курская область), «Готня», «Богородицкое-Фенино», «Валуйки» (Белгородская область), «Тамбов» (Тамбовская область), «Конь-Колодезь» (Липецкая область) – как единственные станции в рассматриваемом регионе с наиболее полным и доступным архивом метеоданных.

На основе имеющихся метеоданных определены следующие показатели за каждый год тридцатилетнего периода для каждой из десяти метеостанций: среднемесячная температура воздуха за январь, °С; среднемесячная температура воздуха за самый холодный месяц, °С; абсолютный минимум температуры воздуха, °С, и дата, когда наблюдался; средняя температура воздуха за самую холодную пятидневку, °С; даты устойчивого перехода температуры воздуха через 5 и 0 °С осенью и весной; продолжительность периодов между этими датами, дней; суммы отрицательных температур воздуха за период между датами перехода через 0 °С осенью и весной, °С; сумма осадков за декабрь, январь и февраль, мм; дата выпадения первого снега; даты установления и схода устойчивого снежного покрова; продолжительность периода залегания устойчивого снежного покрова, дней; средняя высота устойчивого снежного покрова, см; максимальная высота снежного покрова, см.

Также для комплексной оценки условий зимы определены коэффициенты суровости зимы А.В. Попова, рассчитываемые на основе метеоданных о температуре воздуха и сумме осадков за декабрь – февраль [12].

К сожалению, в данный момент из-за отсутствия необходимых данных не удалось рассчитать один из важнейших показателей при оценке качества перезимовки озимых культур – температуру почвы на глубине узла кущения, которая позволяет судить о возможном вымерзании или выпревании растений.

Корреляционно-регрессионный анализ выполнен с применением встроенных функций Microsoft Excel. Для проведения анализа по Белгородской и Курской (по три метеостанции), а также Воронежской (две метеостанции) областям рассчитанные метеопараметры усреднены на основе данных с нескольких метеостанций. В то же время при анализе в Тамбовской и Липецкой областях за среднеобластные значения рассматриваемых метеопараметров приняты данные единственных доступных метеостанций.

Обсуждение результатов исследования

Выявление наиболее значимых агроклиматических показателей периода перезимовки для озимой пшеницы на территории ЦЧЭР основывалось на оценке моделей парной регрессии, полученных путем корреляционно-регрессионного анализа влияния ряда таких показателей на продуктивность рассматриваемой сельскохозяйственной культуры.

Были рассчитаны коэффициенты детерминации (R-квадрат), коэффициенты корреляции, константы уравнения регрессии и коэффициенты при переменной X, а также P-значения и критерий Фишера (F), свидетельствующие о значимости коэффициентов уравнения регрессии [13]. Уровень значимости $\alpha = 5\% = 0,05$.

Все рассчитанные коэффициенты детерминации меньше 0,5. Но тем не менее имеются показатели, которые можно назвать статистически значимыми, так как рассчитанные при их использовании значения критерия Фишера больше табличных при заданном уровне значимости $\alpha = 5\%$ [13]. Такого рода зависимости потенциально могли бы быть более существенными и выраженными в случае наличия более обширного набора данных.

Все полученные статистически значимые регрессионные модели имеют также значимые константы и коэффициенты регрессии при переменной X, о чем свидетельствуют рассчитанные P-значения.

В таблице представлены коэффициенты корреляции статистически значимых зависимостей среднеобластной урожайности озимой пшеницы в областях ЦЧЭР от различных агроклиматических показателей.

Коэффициенты корреляции для статистически значимых зависимостей урожайности озимой пшеницы от агроклиматических показателей периода перезимовки в областях ЦЧЭР в 1993-2022 гг. / Correlation coefficients for statistically significant dependences of winter wheat yield on agroclimatic indicators of the overwintering period in the regions of the CBEER in 1993-2022

Агроклиматический показатель	Область				
	Тамбовская	Липецкая	Воронежская	Курская	Белгородская
Температура воздуха за самый холодный месяц, °С	0,54	0,47	0,56	0,48	0,54
Абсолютный минимум температуры воздуха, °С		0,53	0,51	0,54	0,54
Дата абсолютного минимума температуры воздуха		0,48			
Температура воздуха за самую холодную пятидневку, °С	0,45	0,53	0,51	0,50	0,51
Устойчивый переход температуры воздуха через	0 °С весной	0,57	0,36	0,46	0,43
	5 °С весной		0,44		0,41
Продолжительность периода между датами перехода, дней	0–0 °С	0,54	0,48	0,46	0,41
	0–5 °С весна	0,53			
Σt воздуха < 0 °С	0,55	0,59	0,57	0,57	0,56
Дата схода устойчивого снежного покрова	0,47		0,45	0,41	
Период залегания устойчивого снежного покрова, дней	0,45			0,43	
Коэффициент суровости зимы по формуле А.В. Попова		0,45		0,46	

Всего при анализе периода с 1993 по 2022 г. было получено 10, 9, 8, 7 и 6 статистически значимых зависимостей урожайности озимой пшеницы от агроклиматических показателей периода перезимовки для Курской, Липецкой, Тамбовской, Воронежской и Белгородской областей соответственно.

Наиболее значимыми агроклиматическими показателями периода перезимовки для озимой пшеницы, при рассмотрении которых статистически значимые зависимости были выявлены во всех пяти областях ЦЧЭР, являются:

- средняя температура воздуха за самый холодный месяц и самую холодную пятидневку;
- продолжительность периода между датами устойчивого перехода температуры воздуха через 0 °С осенью и весной;
- суммы отрицательных температур воздуха между этими датами.

При этом большинство коэффициентов корреляции находится в диапазоне от 0,45 до 0,59, а наиболее высокие отмечены при оценке зависимости урожайности от сумм отрицательных температур воздуха.

Рассматривая остальные агроклиматические показатели, можно отметить, что во всех областях, кроме Тамбовской, за тридцатилетний период выявлена статистически значимая зависимость урожайности озимой пшеницы от значения абсолютного минимума температуры воздуха за холодный период года, коэффициенты корреляции – в пределах от 0,51 до 0,54. Зависимость от даты абсолютного минимума отмечена только в Липецкой области, коэффициент корреляции – 0,48.

Статистически значимая зависимость урожайности озимой пшеницы от дат устойчивого перехода температуры воздуха через 0 °С весной отмечена для всех областей, кроме Белгородской, но только в Тамбовской коэффициент корреляции больше 0,5. Значимая зависимость от даты устойчивого перехода температуры воздуха через 5 °С весной наблюдается в Липецкой, Курской и Белгородской областях с коэффициентом корреляции от 0,41 до 0,44.

В Тамбовской, Воронежской и Курской областях отмечается статистически значимая зависимость урожайности от даты полного схода устойчивого снежного покрова, кроме того, в Тамбовской и Курской областях наблюдается такая зависимость от продолжительности его залегания. Однако свойственные им коэффициенты корреляции находятся лишь в пределах от 0,41 до 0,47.

Статистически значимая зависимость урожайности озимой пшеницы от общих зимних условий, выраженных через коэффициент суровости зимы А.В. Попова, отмечена в Липецкой и Курской областях с коэффициентом корреляции 0,45 и 0,46 соответственно.

Также в ходе корреляционно-регрессионного анализа для полученных зависимостей были определены коэффициенты уравнения регрессии при переменной. По знаку этого коэффициента можно судить о том, какие из рассматриваемых агроклиматических параметров зимы отвечают за снижение урожайности озимой пшеницы, а какие – за ее рост. Так, за снижение урожайности по результатам парной регрессии отвечает изменение (увеличение, а в случае дат – более позднее наступление) таких показателей, как даты устойчивого перехода температуры воздуха через 0 и 5 °С весной, продолжительность периода между датами перехода температуры воздуха через 0 °С осенью и весной, максимальная и средняя высота устойчивого снежного покрова, а также даты его схода.

Заключение

В рамках исследования были выявлены статистически значимые агроклиматические показатели периода перезимовки озимой пшеницы на территории областей в составе ЦЧЭР. Для исследуемой территории при рассмотрении периода с 1993 по 2022 г. наиболее значимыми показателями являются средняя температура воздуха за самый холодный месяц и самую холодную пятидневку, продолжительность периода между датами устойчивого перехода температуры воздуха через 0 °С осенью и весной, а также суммы отрицательных температур воздуха между этими датами. При рассмотрении данных агроклиматических показателей статистически значимые зависимости урожайности озимой пшеницы от них получены для всех пяти областей рассматриваемого региона. Для более наглядных результатов в дальнейшем стоит провести и множественную регрессию, так как многие параметры, например температура воздуха и высота снега, находятся в тесной взаимосвязи, тем самым оказывая совокупное воздействие на посеы озимых культур.

Полученные результаты в дальнейшем будут использованы для оценки комплексного воздействия агроклиматических условий осеннего и весенне-летнего периода вегетации, а также перезимовки на формирование урожайности озимой пшеницы в областях рассматриваемого региона.

Анализ многолетней изменчивости выявленных в данном исследовании наиболее значимых агроклиматических показателей периода перезимовки озимой пшеницы был представлен на конференции, посвященной 145-летию Метеорологической обсерватории имени В.А. Михельсона (март 2024 г.).

Список источников

1. Бюллетени о состоянии сельского хозяйства / Федеральная служба государственной статистики. URL: <https://rosstat.gov.ru/compendium/document/13277> (дата обращения: 18.09.2023).
2. Павлова В.Н., Варчева С.Е. Оценка климатических рисков потерь урожая в региональных системах земледелия // *Фундаментальная и прикладная климатология*. 2017. № 3. С. 122–132. Doi: 10.21513/2410-8758-2017-3-122-132.
3. Павлова В.Н. Продуктивность зерновых культур в России при изменении агроклиматических ресурсов в XX – XXI века: автореф. дис. ... д-ра геогр. наук. М., 2021. 45 с.
4. Моисейчик В.А., Богомолова Н.А., Страшная А.И., Максименкова Т.А. Влияние глобального изменения климата на агрометеорологические условия перезимовки и формирования урожая озимых зерновых культур в России за последние 50 лет // *Тр. ВНИИСХМ*. 2007. № 36. С. 106–132.

5. Тарасова Л.Л. Оценка агрометеорологических показателей условий зимовки озимых зерновых культур в центральных черноземных областях в условиях климатических изменений // Тр. Гидрометеорол. науч.-исслед. центра Российской Федерации. 2016. № 360. С. 26–44.
6. Толстопятова О.С., Голованова Е.В., Толстопятов С.Н. Зависимость урожайности основных сельскохозяйственных культур Белгородской области от климатических показателей // Инновации в АПК: проблемы и перспективы. 2019. № 1 (21). С. 141–147.
7. Соловьев А.Б., Марциневская Л.В., Вагурин И.Ю., Шушурikhина Д.С. Влияние изменений агроклиматических условий на зерновое хозяйство Белгородской области // Евразийский союз ученых. 2014. № 7–8. С. 49–52.
8. Смирнов И.А., Дронова Е.А. Возникновение опасных агрометеорологических явлений в годы со снижением урожайности озимой пшеницы на примере Белгородской области // Междунар. науч. конф. молодых учёных и специалистов, посвящённая 180-летию со дня рождения К.А. Тимирязева: сб. ст. М.: Рос. гос. аграр. ун-т МСХА им. К.А. Тимирязева, 2023. С. 379–384.
9. Дорохов Б.А., Васильева Н.М. Современные погодные условия и их воздействие на хозяйственные показатели озимой пшеницы // Междунар. журн. гуманитар. и естеств. наук. 2019. № 11–2. С. 106–111. Doi: 10.24411/2500-1000-2019-11762.
10. Перевертин К.А., Белолюбцев А.И., Дронова Е.А., Асауляк И.Ф., Кузнецов И.А., Мазиров М.А., Васильев Т.А. Влияние режима снежного покрова на агрономические риски развития розовой снежной плесени // Лёд и снег. 2022. № 1 (62). С. 75–80. Doi: 10.31857/S2076673422010117.
11. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2014620549. Описание массива срочных данных об основных метеорологических параметрах на станциях России / О.Н. Булыгина, В.М. Веселов, В.Н. Разуваев, Т.М. Александрова. URL: <http://meteo.ru/data/163-basic-parameters#описание-массива-данных> (дата обращения: 07.11.2023)
12. Попов А.В. О возможности прогноза теплых многоснежных и холодных малоснежных зим // Тр. Гидрометцентра СССР. 1975. № 156. С. 77–84.
13. Кеткина О.С. Возможности MS Excel для регрессионного анализа. Екатеринбург: УрФУ, 2020. 43 с.

References

1. *Bulletins on the state of agriculture*. Federal State Statistics Service. Available from: <https://rosstat.gov.ru/compendium/document/13277> [Accessed 18th September 2023]. (In Russ.).
2. Pavlova V.N., Varcheva S.E. Assessment of climatic risks of yeild loss in regional crop production systems. *Fundamental'naya i prikladnaya klimatologiya = Fundamental and Applied Climatology*. 2017;(3):122-132. Doi: 10.21513/2410-8758-2017-3-122-132. (In Russ.).
3. Pavlova V.N. *Productivity of grain crops in Russia with changes in agroclimatic resources in the 20th and 21st centuries*. Dissertation Thesis. Moscow, 2021. 45 p. (In Russ.).
4. Moiseichik V.A., Bogomolova N.A., Strashnaya A.I., Maksimenkova T.A. The impact of global climate change on the agrometeorological conditions of overwintering and the formation of winter grain crops in Russia over the past 50 years. *Trudy VNIISHM = Proceedings of the ARRIAM*. 2007;(36):106-132. (In Russ.).
5. Tarasova L.L. Assessment of agrometeorological indicators of wintering conditions of winter crops in the Central Chernozem regions under conditions of climatic changes. *Tr. Gidrometeorol. nauch.-issled. tsentra Rossiiskoi Federatsii = Proceedings of the Hydrometeorological Research Center of the Russian Federation*. 2016;(360):26-44. (In Russ.).
6. Tolstopyatova O.S., Golovanova E.V., Tolstopyatov S.N. The dependence of the major crops of the Belgorod region from climatic indicators. *Innovatsii v APK: problemy i perspektivy = Innovations in Agriculture: Problems and Prospects*. 2019;(1):141-147. (In Russ.).
7. Solov'ev A.B., Martsinevskaya L.V., Vagurin I.Yu., Shushurikhina D.S. The impact of changes in agroclimatic conditions on the grain industry of the Belgorod region. *Evraziiskii soyuz uchenykh = Eurasian Union of Scientists*. 2014;(7-8):49-52. (In Russ.).
8. Smirnov I.A., Dronova E.A. The occurrence of dangerous agrometeorological events in years with a decrease in winter wheat yields on the example of the Belgorod region. *Collection of articles of International Scientific Conference of young scientists and specialists dedicated to the 180th anniversary of the birth of K.A. Timiryazev*. Moscow: Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy Press; 2023:379-384. (In Russ.).
9. Dorokhov B.A., Vasil'eva N.M. Modern weather conditions and their impact on the economic indicators of winter wheat. *Mezhdunarodnyi zhurnal gumanitarnykh i estestvennykh nauk = International Journal of Humanities and Natural Sciences*. 2019;(11-2):106-111. Doi: 10.24411/2500-1000-2019-11762. (In Russ.).

10. Perevertin K.A., Belolyubcev A.I., Dronova E.A., Asaulyak I.F., Kuznecov I.A., Mazirov M.A., Vasil'ev T.A. Impact of changes in snow cover regime on agronomic risks causing pink snow mold. *Led i sneg = Ice and Snow*. 2022;(1):75-80. Doi: 10.31857/S2076673422010117. (In Russ.).

11. Bulygina O.N., Veselov V.M., Razuvaev V.N., Aleksandrova T.M. *Description of the array of urgent data on the main meteorological parameters at Russian stations. Certificate of state registration of the database No. 2014620549*. Available from: <http://meteo.ru/data/163-basic-parameters#описание-массива-данных> [Accessed 7th November 2023]. (In Russ.).

12. Popov A.V. On the possibility of forecasting warm, snowy and cold winters with little snow. *Trudy Gidromettsentra SSSR = Proceedings of the Hydrometeorological Center of the USSR*. 1975;(156):77-84. (In Russ.).

13. Ketkina O. S. *Features of MS Excel for regression analysis*. Yekaterinburg: Ural Federal University Press; 2020. 43 p. (In Russ.)

Информация об авторе

И.А. Смирнов – аспирант кафедры метеорологии и климатологии, Институт агробиотехнологии.

Information about the author

I.A. Smirnov - Postgraduate Student, Department of Meteorology and Climatology, Institute of Agrobiotechnology.

*Статья поступила в редакцию 10.04.2024; одобрена после рецензирования 24.05.2024; принята к публикации 04.07.2024.
The article was submitted 10.04.2024; approved after reviewing 24.05.2024; accepted for publication 04.07.2024.*

Научная статья

УДК 631.416.8

doi: 10.18522/1026-2237-2024-3-98-106

РАЗЛИЧНЫЕ ФОРМЫ Sr В АГРОТЕМНОГУМУСОВЫХ ПОДБЕЛАХ ЮГА ПРИМОРСКОГО КРАЯ

Яна Олеговна Тимофеева^{1✉}, Дарья Олеговна Взорова², Роман Витальевич Тимошинов³

^{1,2} Федеральный научный центр биоразнообразия наземной биоты Восточной Азии ДВО РАН, Владивосток, Россия

³ Федеральный научный центр агробиотехнологий Дальнего Востока им. А.К. Чайки, Уссурийск, Россия

¹ timofeeva@biosoil.ru✉

² zaqdo@mail.ru

³ fe.smc_rf@mail.ru

Аннотация. Для оценки уровня концентрации и выявления основных фаз – носителей различных форм стронция (Sr) изучено валовое содержание и концентрация водорастворимых форм элемента в агротемногумусовых подбелах, составляющих основной объем пахотного фонда региона проведения исследований. Полнопрофильные почвенные разрезы были заложены на длительных залежных, фитомелиоративных и удобряемых минеральными и органическими удобрениями вариантах опыта. Исследование содержания различных форм Sr проводилось методами энергодисперсионной рентгенфлуоресцентной спектроскопии и атомно-абсорбционной спектрометрии. В почвах всех исследованных вариантов опыта основной объем Sr иммобилизован в составе минеральной фазы почв. Внесение в почву минеральных удобрений сопровождалось увеличением валового содержания (на 6,4 %) и концентрации водорастворимых форм (в 5,7 раза) Sr по сравнению с почвами залежи и активизацией сорбции Sr Mn-содержащими соединениями почв. Длительное внесение различных видов органических удобрений способствовало активизации формирования устойчивых Sr-органических комплексов. При использовании фитомелиорантов в условиях снижения кислотности почвенного раствора отмечено усиление влияния Ca-содержащих соединений почв на распределение Sr. Почвы всех исследованных вариантов опыта характеризовались отсутствием факторов и условий, способствующих значительному накоплению Sr в профиле, что подтверждается пониженным валовым содержанием Sr по сравнению с общемировым уровнем и содержанием в пахотных почвах Японии.

Ключевые слова: стронций (Sr), удобрения, агротемногумусовые подбелы, загрязнение почв

Для цитирования: Тимофеева Я.О., Взорова Д.О., Тимошинов Р.В. Различные формы Sr в агротемногумусовых подбелах юга Приморского края // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2024. № 3. С. 98–106.

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


VARIOUS FORMS OF Sr IN ALBIC STAGNOSOILS FROM THE SOUTH OF PRIMORSKII REGION

Yana O. Timofeeva^{1✉}, Dariya O. Vzorova², Roman V. Timoshinov³

^{1,2} Federal Scientific Center of the East Asia Terrestrial Biodiversity, Far East Branch, Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russia

³ Chaika Federal Scientific Center of Agricultural Biotechnology of the Far East, Ussuriysk, Russia

© Тимофеева Я.О., Взорова Д.О., Тимошинов Р.В., 2024

¹ timofeeva@biosoil.ru 

² zaqdo@mail.ru

³ fe.smc_rf@mail.ru

Abstract. To assess the concentration level and identify the main phase-carriers of various forms of strontium (Sr), the total content, distribution and concentration of water-soluble forms of the element in Albic Stagnosols, which composed the bulk of the arable fund of the region under study, were studied. Full-profile soil pits were dug at the long-term fallow, phytoreclamative, and fertilized with mineral and organic fertilizer variants of the experience. The study of the different Sr forms contents was carried out by energy dispersive X-ray fluorescence spectroscopy and atomic absorption spectrometry. The main Sr volume was immobilized in the composition of soil mineral phase in soils of all variants of the experience. The addition of mineral fertilizers to soil was accompanied by an increase in the total content (by 6.4 %) and concentration of water-soluble (by 5,7 times) Sr forms, compared to the soil of fallow, and intensification of Sr sorption by Mn-containing soil compounds. The long-term addition of different types of organic fertilizers contributed to the activation of stable Sr-organic complexes formation. Under a green manure application in conditions of soil solution acidity decrease, the increase in the influence of Ca-containing soil compounds on the distribution of Sr has been shown. The soils of all variants of the experience were characterized by the absence of factors and conditions that contributed to the Sr accumulation in profiles, it was suggested by the lower total Sr content compared to the mean background content for surface soils around the world and to the mean content in agricultural soils in Japan.

Keywords: strontium (Sr), fertilizers, Albic Stagnosols, soils contamination

For citation: Timofeeva Ya.O., Vzorova D.O., Timoshinov R.V. Various Forms of Sr in Albic Stagnosols from the South of Primorskii Region. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2024;(3):98-106. (In Russ.).

Acknowledgments: the research was carried out within the state assignment of Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (theme 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

Согласно ГОСТ 17.4.1.02.83 (переизд. в августе 2008 г.), стронций (Sr) относится к элементам третьего класса опасности [1]. Уровень средних значений Sr в почвах разных стран мира весьма разнообразен [2]. Основным источником поступления Sr в почвы естественных ландшафтов являются горные породы, при выветривании которых Sr мобилизуется и поступает в почвенный раствор [3, 4]. Содержание Sr в почвах сельскохозяйственных угодий корректируется внесением удобрений, что сопровождается увеличением содержания и подвижности Sr в пахотных почвах [5–7]. Вертикальное распределение, накопление и мобилизация Sr в профиле почв контролируются широким набором физико-химических свойств. В большинстве исследований отмечается ведущая роль органического вещества, (гидр)оксидов Fe и глинистых минералов в накоплении и распределении Sr [2, 8]. Однако результаты отдельных работ указывают на варьирование набора основных фаз – носителей Sr в зависимости от условий почвообразования и интенсивности техногенного воздействия [9–11].

Результаты исследований содержания различных форм Sr в пахотных почвах юга Приморского края крайне эпизодичны и не дают полного представления о влиянии различных видов удобрений на содержание, распределение и накопление Sr в агротемногумусовых подбелах, составляющих основной объем пахотного фонда региона.

Целью настоящего исследования являлась количественная оценка валового содержания и концентрации водорастворимых форм Sr, а также определение основных фаз – носителей Sr в агротемногумусовых подбелах, подверженных различным приемам агротехнической обработки.

Объекты и методы исследования

Объекты исследования – агротемногумусовые подбелы, используемые в длительных полевых опытах стационара ФНЦ агробиотехнологий Дальнего Востока им. А.К. Чайки. Названия почв приведены согласно классификации и диагностики почв России [12]. Образцы почв были отобраны из полнопрофильных разрезов, заложенных в залежном варианте опыта (выведены из сельскохозяйственного оборота 85 лет назад), фитомелиоративном варианте (посев костреца безостого (*Bromus inermis*) в течение 15 лет) и удобряемых вариантах опыта, включающих использование навоза КРС (62 года) и минеральных удобрений, вносимых в форме суперфосфата, хлористого калия и аммиачной селитры (80 лет). Морфологическое описание почвенных профилей и методика измерения величины pH_{H_2O} , pH_{KCl} и содержания гумуса приведены в [13].

Содержание оксидов макроэлементов и уровень валового содержания Sr в образцах почв определялись методом энергодисперсионной рентгенфлуоресцентной спектроскопии на анализаторе EDX 800HS-P (Shimadzu, Япония) в формате количественного анализа согласно М-02-0604-2007 [14]. Концентрацию водорастворимых форм Sr определяли методом атомно-абсорбционной спектроскопии на спектрометре AA-6800 (Shimadzu, Япония) согласно рекомендациям [15].

В работе использовали современное научное оборудование центра коллективного пользования «Биотехнология и генетическая инженерия» на базе ФНЦ биоразнообразия ДВО РАН.

Математическая обработка полученных данных проводилась с применением программ Statistica и Microsoft Excel 2007. Уровень значимости полученных результатов (P) не превышал 0,05.

Результаты и обсуждение

На основе анализа литературных данных в качестве основных параметров, влияющих на содержание и распределение различных форм Sr в почвах, были выбраны величина pH, содержание гумуса и концентрация оксидов макроэлементов (Si, Ca, Mn, Fe). Анализу влияния различных приемов агротехнического возделывания на изменение уровней pH и содержания гумуса в исследованных почвах посвящена работа [13]. Для изучения вертикального распределения различных форм Sr в почвах отдельные результаты указанной работы использованы в настоящем исследовании (табл. 1).

Исследованные почвы относятся к малогумусированным, с резко убывающим количеством гумуса по профилю. Кислотность почв залежи и вариантов с использованием различных удобрений соответствовала слабокислоте диапазону, величина pH почв фитомелиоративного варианта варьировала от нейтральных до слабощелочных значений [13]. Наибольшее содержание SiO_2 в исследованных почвах отмечено в верхней и средней частях профиля, Fe_2O_3 – в средней и нижней частях, что характерно для большинства почв региона со схожей направленностью основных почвообразующих процессов (табл. 1). Содержание MnO в исследованных почвах различалось: почвы с внесением минеральных и органических удобрений характеризуются снижением величины содержания элемента по всему профилю по сравнению с почвами залежи. Почвы фитомелиоративного варианта отличались наиболее высоким уровнем содержания MnO. Распределение CaO в исследованных почвах характеризовалось элювиально-иллювиальной направленностью. По сравнению с почвами залежи отмечено увеличение содержания CaO в почвах фитомелиоративного варианта (на 35 %) и в почвах варианта с длительным применением минеральных удобрений (на 12 %). Некоторое увеличение уровня содержания оксидов Mn и Ca в почвах фитомелиоративного варианта, вероятно, связано со снижением подвижности элементов при нейтральных и слабощелочных значениях pH и активацией комплексообразования с органическим веществом [10].

Уровень валового содержания Sr оценивался по величине среднего содержания в почвах мира (175 мг/кг) и по значению среднего содержания в сельскохозяйственных почвах Японии (ближайший к исследуемой территории регион) (190 мг/кг) [2, 16].

Таблица 1 / Table 1

**Физико-химические свойства и содержание оксидов макроэлементов в почвах
/ Physical and chemical properties and macroelements oxides content in soils**

Горизонт	Глубина, см	Гумус, %**	pH _{H2O} **	pH _{KCl} **	SiO ₂ , %	Fe ₂ O ₃ , %**	MnO, %**	CaO, %
Агротемногумусовый подбел типичный (залежь)								
PU	4–11	5,5±0,1*	5,9±0,1	5,1±0,1	79,7±2,7	4,0±0,2	0,08±0,004	0,9±0,03
PU–ELnn	11–35	4,1±0,1	6,1±0,1	5,1±0,1	79,8±2,6	3,9±0,1	0,09±0,005	0,9±0,03
ELnn	35–55	0,1±0,01	6,2±0,1	4,7±0,1	80,6±2,9	3,6±0,2	0,04±0,002	0,7±0,02
BTnn	55–111	0,2±0,01	6,2±0,1	4,5±0,1	77,5±2,8	7,9±0,3	0,05±0,001	0,8±0,03
BT	111–153	0,01±0,001	6,6±0,1	4,6±0,1	78,1±2,8	6,8±0,3	0,07±0,003	0,9±0,03
C	153–192	–	7,0±0,1	4,8±0,1	78,1±2,6	7,0±0,3	0,13±0,006	0,9±0,03
Агротемногумусовый подбел глееватый (фитомелиоративный опыт)								
PU	0–11	3,5±0,1	7,1±0,2	6,3±0,1	79,6±2,8	3,7±0,1	0,12±0,006	1,3±0,05
PU–ELnn	11–27	2,7±0,1	7,8±0,2	6,8±0,2	79,8±2,6	3,5±0,1	0,12±0,006	1,3±0,04
ELnn	27–49	1,4±0,03	7,9±0,2	6,8±0,2	79,9±2,8	3,9±0,1	0,22±0,011	1,0±0,04
BTnn,g	49–83	0,01±0,001	8,0±0,3	6,0±0,1	77,8±2,7	7,3±0,3	0,19±0,006	0,9±0,03
BTg	83–112	0,01±0,001	7,9±0,3	5,9±0,1	77,4±2,7	10,3±0,5	0,08±0,003	0,8±0,03
Cg	112–122	–	7,7±0,2	5,4±0,1	78,8±2,8	10,8±0,4	0,12±0,007	0,8±0,03
Агротемногумусовый подбел глеевый типичный (опыт с внесением органических удобрений)								
PU	0–27	3,8±0,1	5,8±0,1	4,7±0,1	80,1±3,2	3,6±0,1	0,05±0,002	0,9±0,03
ELnn,g	27–42	3,7±0,1	5,6±0,1	4,7±0,1	80,9±3,0	3,8±0,1	0,04±0,001	0,9±0,03
BTnn,g	42–91	0,4±0,02	5,9±0,1	4,5±0,1	77,6±2,7	7,4±0,3	0,03±0,001	0,9±0,03
G	91–132	1,0±0,04	6,3±0,1	4,4±0,1	78,3±2,9	6,3±0,3	0,04±0,001	0,8±0,03
CG	132–170	0,9±0,04	6,9±0,1	4,7±0,1	78,5±2,6	6,3±0,3	0,04±0,002	0,9±0,03
Агротемногумусовый подбел глеевый типичный (опыт с внесением минеральных удобрений)								
PU	0–30	1,2±0,03	6,2±0,1	5,3±0,1	80,1±3,0	3,7±0,1	0,05±0,002	1,0±0,04
ELnn,g	30–46	0,9±0,03	6,6±0,1	5,2±0,1	80,8±2,8	4,0±0,1	0,03±0,001	0,8±0,03
BTnn,g	46–83	1,6±0,04	6,3±0,1	4,8±0,1	78,3±2,5	5,8±0,2	0,02±0,001	0,9±0,03
G	83–119	0,7±0,02	6,4±0,1	4,7±0,1	77,4±2,4	7,1±0,34	0,03±0,001	0,9±0,02

Примечание. * – среднее арифметическое значение ± значение среднего квадратического отклонения;
** – результаты представлены в работе [13].

В почвах залежного, фитомелиоративного и удобряемого органическими удобрениями вариантов отмечено пониженное валовое содержание Sr по сравнению со средним уровнем содержания в почвах Японии и в почвах мира (табл. 2).

В исследованных почвах максимальный уровень валового содержания Sr, локализованный в горизонте PU, был приближен к значениям среднего содержания в почвах мира. Результаты исследований, проведенных в различных регионах мира, указывают на активный привнос Sr в почвы при использовании различных видов минеральных и органических удобрений [2, 5–7, 17]. Почвы исследованного варианта опыта с 80-летним периодом внесения минеральных удобрений характеризовались увеличением валового содержания Sr только в пахотном горизонте. Повышение содержания было незначительным и превышало уровень содержания в почвах мира и в исследованных почвах залежи на 6,4 %.

Анализ взаимосвязи величины валового содержания Sr с исследованными свойствами почв указывает на наличие высокой корреляционной связи Sr с Si-содержащими компонентами, что подтверждает преимущественное нахождение Sr в составе минеральной фазы почв (рисунок). В почвах залежи содержание SiO₂ было единственным показателем, имеющим высокий уровень положительной корреляционной зависимости от валового содержания и распределения Sr. В почвах варианта опыта с длительным внесением минеральных удобрений, помимо SiO₂, на содержание и распределение валового Sr существенное влияние оказывали Mn-содержащие соединения и уровень pH_{KCl}. С учётом увеличения валового содержания Sr в почвах данного варианта опыта можно предположить, что при дополнительном внесении Sr в почвы, имеющие слабокислую реакцию среды и низкое содержание гумуса, происходит активизация сорбционной активности Mn-содержащих фаз в отношении ионов Sr.

Таблица 2 / Table 2

Содержание Sr в почвах / Content of Sr in soils

Горизонт	Глубина, см	Sr, мг/кг	
		валовое	водорастворимые формы
Агротемногумусовый подбел типичный (залежь)			
PU	4–11	175,99±6,93*	0,03±0,001
PU–ELnn	11–35	178,04±7,21	0,03±0,001
ELnn	35–55	175,52±6,98	0,01±0,001
BTnn	55–111	110,24±4,33	0,02±0,001
BT	111–153	139,70±5,00	0,02±0,001
C	153–192	134,82±5,37	0,01±0,001
Агротемногумусовый подбел глееватый (фитомелиоративный опыт)			
PU	0–11	179,03±7,36	0,06±0,002
PU–ELnn	11–27	176,66±6,61	0,09±0,003
ELnn	27–49	175,23±6,62	0,02±0,001
BTnn,g	49–83	128,71±4,97	0,04±0,001
BTg	83–112	106,93±3,92	0,04±0,001
Cg	112–122	159,63±5,70	0,01±0,001
Агротемногумусовый подбел глеевый типичный (опыт с внесением органических удобрений)			
PU	0–27	173,35±6,08	0,09±0,003
ELnn,g	27–42	167,01±6,41	0,08±0,003
BTnn,g	42–91	116,12±4,32	0,08±0,003
G	91–132	139,05±5,13	0,04±0,001
CG	132–170	144,76±5,72	0,01±0,001
Агротемногумусовый подбел глеевый типичный (опыт с внесением минеральных удобрений)			
PU	0–30	187,97±7,34	0,17±0,004
ELnn,g	30–46	172,94±6,53	0,08±0,003
BTnn,g	46–83	148,03±5,61	0,06±0,002
G	83–119	131,29±4,99	0,02±0,001

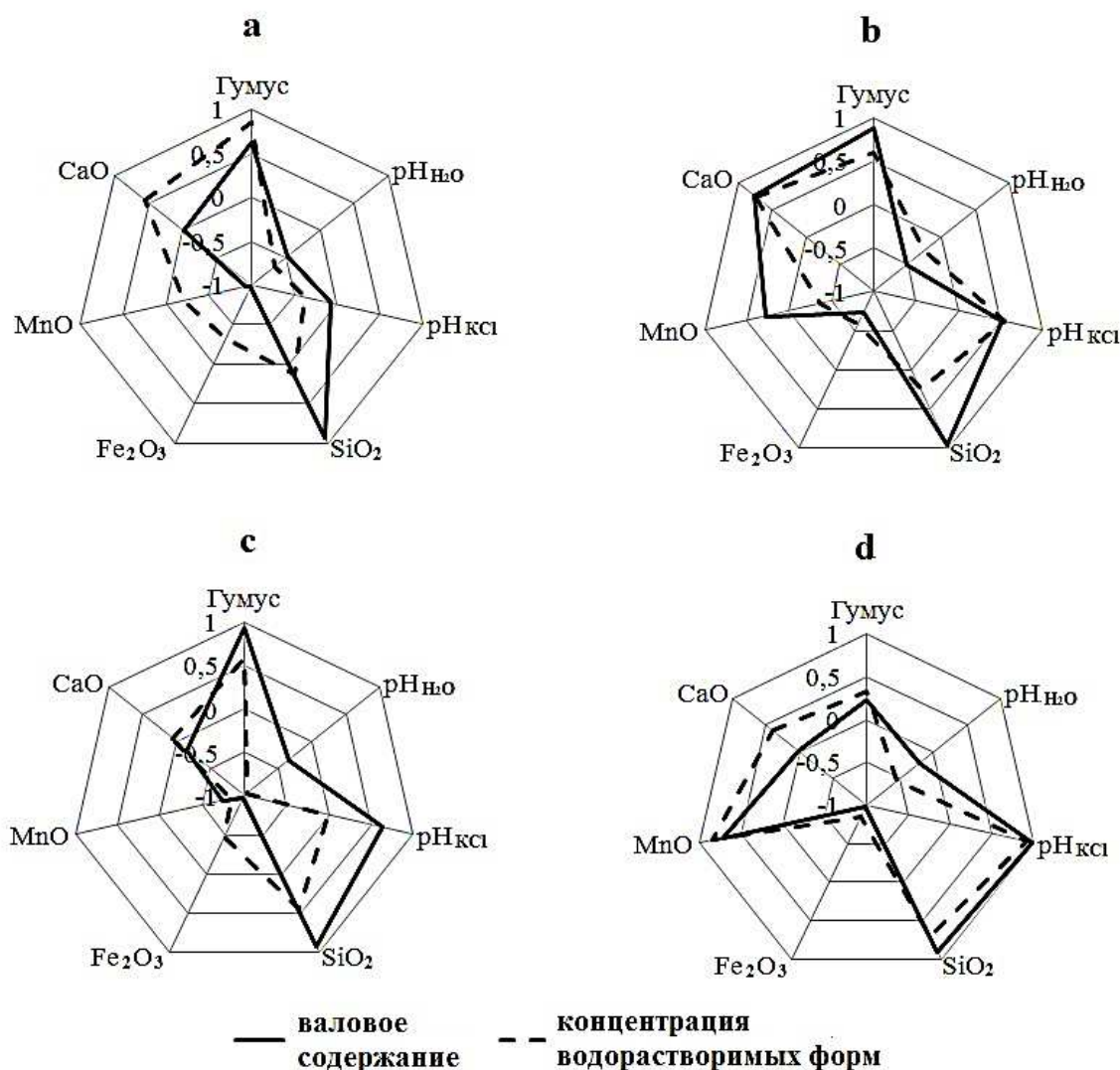
* – среднее арифметическое значение ± значение среднего квадратического отклонения.

Внесение в почву различных органических удобрений сопровождалось увеличением уровня взаимосвязи между валовым содержанием Sr и содержанием гумуса. В целом образование Sr-органических комплексов сопровождается снижением сорбции Sr почвенными минералами [10]. Однако в почвах вариантов опыта с внесением фитомелиорантов и органических удобрений связь Sr с минеральными компонентами оставалась высокой. В почвах фитомелиоративного варианта отмечен высокий уровень корреляции Sr с CaO, что указывает на влияние ионов Ca на распределение Sr в почвах при снижении уровня кислотности почвенного раствора.

Содержание водорастворимых форм Sr в исследованных почвах выражалось в сотых долях процента от валового содержания. Наибольший уровень содержания водорастворимых форм Sr соответствовал максимальному уровню валового содержания элемента и был локализован в верхних горизонтах почв. Сравнительный анализ содержания водорастворимых форм Sr в верхних горизонтах почв разных вариантов опыта указывает на увеличение содержания в удобряемых почвах. При использовании фитомелиорантов отмечается увеличение содержания водорастворимых форм Sr в 2 раза, при использовании навоза – в 3, при использовании минеральных удобрений – в 5,7 раза. Отсутствие значительного увеличения валового содержания Sr в почвах удобряемых вариантов опыта по сравнению с почвами залежи позволяет предположить, что вероятной причиной увеличения концентраций водорастворимых форм Sr является изменение взаимосвязи между Sr и основными фазами – носителями элемента в почвах.

В почвах вариантов опыта с использованием минеральных и органических удобрений содержание водорастворимых форм Sr снижалось от верхней части профиля к нижней. В профиле почв залежи максимальное количество данной формы Sr отмечается в горизонтах PU и PU–ELnn,

в элювиальном горизонте происходит резкое снижение содержания, в нижележащих горизонтах установлено некоторое накопление водорастворимых форм Sr с последующим снижением в горизонтах C(g). Особенностью почв фитомелиоративного варианта опыта является максимальный уровень содержания водорастворимых форм Sr в подпахотном горизонте (PU–ELnn). Интенсивное биологическое поглощение Sr разными видами растений и увеличение накопления Sr надземной массой лугово-осоковой и разнотравной растительности подтверждают возможность активизации выноса водорастворимых форм Sr из пахотного горизонта (PU) почв исследованного фитомелиоративного варианта опыта в условиях активного развития растений с большой продуктивностью фитомассы [6, 18].



Коэффициенты корреляции между содержанием различных форм Sr и свойствами агротемногумусовых подбелов: а – залежь; б – фитомелиоративный опыт; в – опыт с внесением органических удобрений; д – опыт с внесением минеральных удобрений / Correlation coefficients between the content of different forms Sr and properties of Albic Stagnosols: a - fallow; b - phytoreclamation; c - manured; d - with mineral fertilizer

Внутрипрофильная миграция водорастворимых форм Sr связывается с диффузией почвенного раствора, содержащего соединения Sr в форме растворимых солей и комплексов с органическими лигандами [3, 9, 10]. Однако высокий уровень взаимосвязи между содержанием водорастворимых форм Sr и содержанием гумуса был отмечен только в почвах залежи, что может быть связано с формированием неустойчивых комплексных соединений Sr с органическим веществом.

В почвах вариантов опыта с внесением органических удобрений значимого влияния гумуса на содержание и распределение водорастворимых форм Sr не установлено. В почвах фитомелиоративного варианта наибольшее влияние на распределение водорастворимых форм Sr оказывало содержание CaO. Схожий уровень взаимосвязи между валовым содержанием Sr и CaO в почвах данного варианта позволяет утверждать, что в составе комплексных соединений с Ca часть Sr находится в легкоподвижном состоянии и переходит в почвенный раствор. В почвах варианта с длительным применением минеральных удобрений набор фаз и свойств, контролирующих содержание и распределение водорастворимых форм Sr, соответствовал показателям, контролирующим валовое содержание и распределение элемента. Вероятно, дополнительное поступление ионов Sr в почву при внесении минеральных удобрений сопровождается формированием легкоподвижных внешнесферных поверхностных комплексов Sr с минеральной фазой почв. В почвах варианта с длительным применением органических удобрений значимого влияния исследованных свойств почв на содержание и распределение водорастворимых форм Sr не установлено.

Заключение

Изученные почвы характеризуются отсутствием факторов и условий, способствующих значительному накоплению Sr. Длительное внесение в почву минеральных удобрений сопровождалось дополнительным поступлением Sr и увеличивало уровень валового содержания. Несмотря на незначительные различия в валовом содержании Sr, почвы удобряемых вариантов характеризовались увеличением содержания водорастворимых форм Sr в верхней части профиля (от 2 до 5,7 раза) в результате изменения взаимосвязи между Sr и основными фазами – носителями элемента в почвах. Уровень валового содержания Sr в почвах контролируется преимущественно Si-содержащими фазами почв. В почвах залежи и вариантов с внесением органических удобрений различного происхождения Sr в составе Si-содержащих соединений находится в труднодоступной форме. Внесение в почву различных органических удобрений сопровождалось увеличением взаимосвязи Sr с гумусом и формированием устойчивых Sr-органических комплексов. В почвах фитомелиоративного варианта опыта отмечено усиление влияния Ca-содержащих соединений на распределение Sr. Часть Sr, входящего в состав комплексных соединений с Ca, находится в легкоподвижном состоянии и переходит в почвенный раствор. Дополнительное поступление ионов Sr в почву при внесении минеральных удобрений сопровождалось активизацией сорбции Sr Mn-содержащими соединениями и формированием легкоподвижных соединений Sr.

Список источников

1. ГОСТ 17.4.1.02-83. Охрана природы. Почвы. Классификация химических веществ для контроля загрязнения. М.: Стандартинформ, 2008.
2. Kabata-Pendias A. Trace elements in soils and plants. N.Y.: CRC Press, 2011. 534 p.
3. Литвинович А.В., Павлова О.Ю., Лаврищев А.В., Плылова И.А. Пространственная неоднородность содержания стабильного стронция в целинной и пахотной дерново-подзолистых почвах и роль гумусовых веществ в его закреплении // Агрохимия. 2012. № 4. С. 77–88.
4. Медведев И.Ф., Деревягин С.С., Панасов М.Н., Ефимова В.И. Эколого-ландшафтные закономерности распределения валового стронция (Sr) в системе почва – вода – растение // Аграр. науч. журн. 2015. № 3. С. 14–18.
5. Карпова Е.А., Потатуева Ю.А. Последствия применения различных форм фосфорных удобрений: стронций в системе дерново-подзолистая почва – растения // Агрохимия. 2004. № 1. С. 91–96.
6. Литвинович А.В., Лаврищев А.В. Стронций в системе удобрения (мелиоранты) – почва – природные воды – растения – животные (человек) // Агрохимия. 2008. № 5. С. 73–86.
7. Литвинович А.В., Небольсина З.П., Витковская С.Е., Яковлева Л.В. Влияние длительного применения фосфорных удобрений и мелиорантов на накопление в почвах и растениях стабильного стронция // Агрохимия. 2011. № 1. С. 35–41.
8. Водяницкий Ю.Н., Савичев А.Т., Васильев А.А., Лобанова Е.С., Чащин А.Н., Прокопович Е.В. Содержание тяжелых щелочноземельных (Sr, Ba) и редкоземельных (Y, La, Ce) металлов в техногенно загрязненных почвах // Почвоведение. 2010. № 7. С. 879–890.
9. Dinu M.I. Interaction between metal ions in waters with humic acids in gley-podzolic soils // Geochemistry International. 2015. Vol. 53. P. 265–276.

10. Helal A.A., Imam D.M., Khalifa S.M., Aly H.F. Effect of some environmental ligands and fertilizers on humic acid complexation with strontium // *J. of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. 1998. Vol. 232. P. 159–161.
11. Timofeeva Ya.O., Kosheleva Yu.A., Semal V.A., Burdukovskii M.L. Origin, baseline contents, and vertical distribution of selected trace lithophile elements in soils from nature reserves, Russian Far East // *J. of Soils and Sediments*. 2018. Vol. 18. P. 968–982.
12. Шишов Л.Л., Тонконогов В.Д., Лебедева И.И., Герасимова М.И. Классификация и диагностика почв России. Смоленск: Ойкумена, 2004. 342 с.
13. Пуртова Л.Н., Тимофеева Я.О. Изучение некоторых свойств и активности каталазы агротемногумусовых подбелов при различных видах агротехнического воздействия // *Почвоведение*. 2022. № 10. С. 1277–1289.
14. М-02-0604-2007. Методика выполнения измерений массовой доли кремния, кальция, титана, ванадия, хрома, бария, марганца, железа, никеля, меди, цинка, мышьяка, стронция, свинца, циркония, молибдена, в порошковых пробах почв и донных отложений рентгеноспектральным методом с применением энергодисперсионных рентгенофлуоресцентных спектрометров типа EDX фирмы Shimadzu. СПб., 2007. 17 с.
15. Seguin V., Gagnon C., Courchesne F. Changes in water extractable metals, pH and organic carbon concentrations at the soil-root interface of forested soils // *Plant and Soil*. 2004. Vol. 260. P. 1–17.
16. Takeda A., Kimura K., Yamasaki S.-I. Analysis of 57 elements in Japanese soils, with special reference to soil group, and agricultural use // *Geoderma*. 2004. Vol. 119. P. 291–307.
17. Кошелева Ю.А., Тимофеева Я.О. Стронций (Sr) и ванадий (V) в пахотных почвах при длительном внесении удобрений // *Аграр. вестн. Урала*. 2018. № 7. С. 26–33.
18. Каушин В.К. Стронций в растениях Забайкалья // *Агрохимия*. 2009. № 8. С. 65–71.

References

1. GOST 17.4.1.02-83. *Protection of Nature. Soils. Classification of chemicals for pollution control*. Moscow: Standartinform Publ.; 2008. (In Russ.).
2. Kabata-Pendias A. *Trace elements in soils and plants*. New York: CRC Press; 2011. 534 p.
3. Litvinovich A.V., Pavlova O.Yu., Lavrishchev A.V., Plylova I.A. Spatial variability of stable strontium and the role of humic substances in its immobilization in virgin and arable soddy-podzolic soils. *Agrokhimiya = Agrochemistry*. 2012;(4):77-88. (In Russ.).
4. Medvedev I.F., Derevyagin S.S., Panasov M.N., Efimova V.I. Ecological and landscape regularities of distribution of gross strontium (Sr) in the system the soil-the water-the plant. *Agrarnyi nauchnyi zhurnal = Agricultural Science Journal*. 2015;(3):14-18. (In Russ.).
5. Karpova E.A., Potatueva Yu.A. The effect of different phosphoric fertilizers: strontium in a soddy-podzolic soil-plant system. *Agrokhimiya = Agrochemistry*. 2004;(1):91-96. (In Russ.).
6. Litvinovich A.V., Lavrishchev A.V. Strontium in the soil-fertilizers (ameliorants)-natural water-plants-animals (humans) system. *Agrokhimiya = Agrochemistry*. 2008;(5):73-86. (In Russ.).
7. Litvinovich A.V., Nebol'sina Z.P., Vitkovskaya S.E., Yakovleva L.V. Effect of the long-term application of phosphoric fertilizers and ameliorants on the accumulation of stable strontium in soils and plants. *Agrokhimiya = Agrochemistry*. 2011;(1):35-41. (In Russ.).
8. Vodyanitskii Yu.N., Savichev A.T., Vasilyev A.A., Lobanova E.S., Chashchin A.N., Prokopovich E.V. Contents of heavy alkaline-earth (Sr, Ba) and rare-earth (Y, La, Ce) metals in technogenically contaminated soils. *Eurasian Soil Sci*. 2010;43(7):822-832.
9. Dinu M.I. Interaction between metal ions in waters with humic acids in gley-podzolic soils. *Geochemistry International*. 2015;53:265-276.
10. Helal A.A., Imam D.M., Khalifa S.M., Aly H.F. Effect of some environmental ligands and fertilizers on humic acid complexation with strontium. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. 1998;232:159-161.
11. Timofeeva Ya.O., Kosheleva Yu.A., Semal V.A., Burdukovskii M.L. Origin, baseline contents, and vertical distribution of selected trace lithophile elements in soils from nature reserves, Russian Far East. *Journal of Soils and Sediments*. 2018;18:968-982.
12. Shishov L.L., Tonkonogov V.D., Lebedeva I.I., Gerasimova M.I. *Classification and diagnostics of Russian soils*. Smolensk: Oikumena Publ.; 2004. 342 p. (In Russ.).
13. Purtova L.N., Timofeeva Ya.O. Study of some properties and catalase activity in Albic Stagnosols under different agrogenic impacts. *Eurasian Soil Sci*. 2022;55(10):1436-1445.
14. М-02-0604-2007. *Method for measuring the mass fraction of silicon, calcium, titanium, vanadium, chromium, barium, manganese, iron, nickel, copper, zinc, arsenic, strontium, lead, zirconium, molybdenum in powder samples of soils and bottom sediments by the X-ray spectral method using energy-dispersive X-ray fluorescence Shimadzu EDX type spectrometers*. St. Petersburg, 2007. 17 p. (In Russ.).

15. Seguin V., Gagnon C., Courchesne F. Changes in water extractable metals, pH and organic carbon concentrations at the soil-root interface of forested soils. *Plant and Soil*. 2004;260:1-17.
16. Takeda A., Kimura K., Yamasaki S.-I. Analysis of 57 elements in Japanese soils, with special reference to soil group, and agricultural use. *Geoderma*. 2004;119:291-307.
17. Kosheleva Yu.A., Timofeeva Ya.O. Strontium (Sr) and vanadium (V) in arable soils under long-term fertilization. *Agrarnyi vestnik Urala = Ural Agricultural Bulletin*. 2018;(7):26-33. (In Russ.).
18. Kashin V.K. Strontium in plans of the Transbaikalia. *Agrokhimiya = Agrochemistry*. 2009;(8):65-71. (In Russ.).

Информация об авторах

Я.О. Тимофеева – кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории почвоведения и экологии почв.

Д.О. Взорова – ведущий инженер лаборатории почвоведения и экологии почв.

Р.В. Тимошинов – кандидат сельскохозяйственных наук, заведующий отделом земледелия и агрохимии.

Information about the authors

Ya.O. Timofeeva - Candidate of Science (Biology), Leading Researcher, Laboratory of Soil Science and Ecology of Soil.

D.O. Vzorova - Lead Engineer, Laboratory of Soil Science and Ecology of Soil.

R.V. Timoshinov - Candidate of Science (Agriculture), Head of the Department of Agriculture and Agrochemistry.

Статья поступила в редакцию 29.02.2024; одобрена после рецензирования 24.03.2024; принята к публикации 04.07.2024.

The article was submitted 29.02.2024; approved after reviewing 24.03.2024; accepted for publication 04.07.2024.

Научная статья
УДК 551.594+504.3
doi: 10.18522/1026-2237-2024-3-107-116

МОДЕЛИРОВАНИЕ СУТОЧНОЙ ВАРИАЦИИ АТМОСФЕРНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ В ТУРБУЛЕНТНОМ ПРИЗЕМНОМ СЛОЕ

Дмитрий Владимирович Тимошенко
Южный федеральный университет, Таганрог, Россия
dmitrytim@sfedu.ru

Аннотация. Представлена электродинамическая модель динамики поведения напряжённости электрического поля в приземном слое атмосферы вследствие действия локальных факторов. Модель получена путем приведения системы дифференциальных уравнений электродного эффекта к так называемому уравнению полного тока, представляющему собой уравнение второго порядка параболического типа, рассматриваемое в двумерной области пространство – время. Уравнение полного тока позволяет связать совокупность основных факторов, влияющих на состояние электрического поля приземного слоя атмосферы: ток проводимости, турбулентный ток и ток, возникающий в результате конвективных процессов в атмосфере с так называемым полным током в приземном слое, отражающим изменение потенциала ионосферы. Описанный способ дает значительные преимущества в исследовании, поскольку в рамках одной модели позволяет осуществлять постановки различных задач электродинамики приземного слоя и проводить сравнительный анализ влияния на поведение электрического поля в приземном слое как отдельных факторов, так и их совокупностей. На основе метеорологических наблюдений на горной станции «Пик Чегет» в Приэльбрусье построен суточный ход значений коэффициента турбулентной диффузии. Полученная аналитическая зависимость использовалась при решении уравнения для полного тока в приземном слое при условии его постоянства на верхней границе турбулентного электродного слоя. Решения, полученные методом Фурье, описывают суточный ход напряженности электрического поля в зависимости от степени турбулентного перемешивания в атмосфере. Установлено появление сдвига по времени суточных экстремумов, изменение их амплитуды и появление дополнительных экстремумов, зависящих от значений электрического поля. Все перечисленные эффекты сопоставимы с глобальной унитарной вариацией и увеличиваются с усилением электрического поля.

Ключевые слова: приземный слой, атмосфера, турбулентная диффузия, электродный слой, электрическое поле, математическое моделирование

Для цитирования: Тимошенко Д.В. Моделирование суточной вариации атмосферного электрического поля в турбулентном приземном слое // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2024. № 3. С. 107–116.

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

Original article

MODELING OF THE ATMOSPHERIC ELECTRIC FIELD DAILY VARIATION IN THE TURBULENT SURFACE LAYER

Dmitry V. Timoshenko
Southern Federal University, Taganrog, Russia
dmitrytim@sfedu.ru

© Тимошенко Д.В., 2024

Abstract. An electrodynamic model of the electric field dynamics behavior in the atmospheric surface layer due to the action of local factors is presented. The model was obtained by reducing the differential equations system of the electrode effect to the so-called total current equation, which is a second-order equation of parabolic type, considered in a two-dimensional space-time region. The total current equation allows us to connect the set of main factors influencing on the atmospheric surface layer electric field state: conduction current, turbulent current and current arising as a result of convective processes in the atmosphere with the so-called total current in the near-ground layer, reflecting changes in the ionospheric potential. The described method provides significant advantages in research, since within the framework of one model it allows the formulation of various problems of electrostatics of the surface layer and a comparative analysis of the influence on the behavior of the electric field in the surface layer of both individual factors and their combinations. Based on meteorological data at the Peak Cheget mountain station in the Elbrus region, a daily variation in the values of the turbulent diffusion coefficient was constructed. The resulting analytical dependence was used to solve the equation for the total current in the surface layer, provided that it is constant at the upper boundary of the turbulent electrode layer. Solutions obtained by the Fourier method describe the daily variation of the electric field strength depending on the degree of turbulent mixing in the atmosphere. The appearance of a time shift in daily extrema, a change in their amplitude, and the appearance of additional extrema depending on the electric field values have been established. All of these effects are comparable to the global unitary variation and increase with increasing electric field.

Keywords: surface layer, atmosphere, turbulent diffusion, electrode layer, electric field, mathematical modeling

For citation: Timoshenko D.V. Modeling of the Atmospheric Electric Field Daily Variation in the Turbulent Surface Layer. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2024;(3):107-116. (In Russ.).

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

Введение

Суточная динамика электрического поля в приземном слое атмосферы определяется значительным числом факторов, которые можно разделить на глобальные, зависящие от параметров глобальной электрической цепи [1, 2], и локальные, зависящие от географических (широта, высота над уровнем моря и т.п.) и метеорологических параметров [1, 3]. Известны экспериментальные [1, 2] и теоретические [4–6] исследования процессов генерации суточных вариаций напряженности электрического поля в турбулентном приземном слое вследствие изменений во времени значений глобального тока, которые в целом повторяют по своему характеру кривую Карнеги [7–9], но и имеют дополнительные экстремумы [10–12]. Из общих уравнений модели электродного эффекта [2, 10] следует уравнение для полного электрического тока, содержащего коэффициент турбулентной диффузии в качестве множителя при старшей производной напряженности электрического поля. Данный параметр в приведенных работах носил вспомогательный характер относительно задачи исследования вариации потенциала ионосферы на электрическое поле приземного слоя и рассматривался в качестве постоянной по времени и координатам. Однако и в такой постановке задачи наряду с исследованием влияния глобальных факторов была обнаружена зависимость поведения вариации электрического поля приземного слоя от значений локального параметра – коэффициента турбулентной диффузии. В частности, было установлено, что с увеличением значений коэффициента турбулентности в суточном ходе электрического поля происходит смещение максимумов и минимумов суточной вариации на 2–3 ч относительно колебаний плотности тока [3–6, 13, 14]. Выявление описанной закономерности побуждает к детальным исследованиям влияния локальных факторов на поведение электрического поля приземного слоя. Это, в свою очередь, ведет к необходимости уточнения исследуемой математической модели, что целесообразно проделать в части применения обоснованной закономерности, отражающей реальное поведение коэффициента турбулентной диффузии в течение суток в результате анализа экспериментальных данных.

Суточный ход коэффициента турбулентности по данным метеонаблюдений

В качестве основы для выявления экспериментальной закономерности суточного изменения коэффициента турбулентности (турбулентной диффузии) использованы данные градиентных измерений температуры и скорости ветра в пунктах, расположенных в высокогорной зоне Приэльбрусья, где практически отсутствует аэрозольное и радиоактивное загрязнение воздуха [11, 12]. В рамках гармонического анализа рассчитывались амплитуда (отклонение от среднего) и фаза (время наступления максимума исследуемой величины) для первой гармоники с периодом 24 ч и её вклад в общую дисперсию.

Гармонический анализ применялся для исследования суточного хода коэффициента турбулентной диффузии, рассчитанного исходя из линейной модели [1, 3] в приземном слое атмосферы 0,5–2 м. На основании гармонического анализа с учетом первой гармоники (с периодом 24 ч) получено выражение для описания суточного хода исследуемой характеристики – коэффициента турбулентной диффузии [6, 10]:

$$D = D_0 + A \cdot \sin\left(\frac{\pi}{12}t\right) + B \cdot \cos\left(\frac{\pi}{12}t\right), \quad (1)$$

где $D_0 = 0,053 \text{ м}^2/\text{с}$ – среднее значение коэффициента турбулентной диффузии (экспериментально определенное в целом для всего периода измерений); t – период, ч; $A = -0,028$ и $B = -0,043$ – коэффициенты, $\text{м}^2/\text{с}$.

Следует отметить, что первая гармоника (соответствующая суточной компоненте) ряда значений концентрации радона учитывает 80–90 % от общей дисперсии (т.е. суммарного изменения данной величины), что явно свидетельствует о наличии периодической (суточной) компоненты в рядах динамики коэффициента турбулентности.

Построение и анализ математической модели

Поставим задачу определения пространственно-временной зависимости напряженности электрического поля $E(z, t)$ в приземном слое от суточного хода значений коэффициента турбулентной диффузии, предполагая постоянство плотности тока на верхней границе электродного слоя. В этом случае уравнение полного тока в приземном слое можно записать в виде [10]

$$\frac{\partial E}{\partial t} - D(t) \frac{\partial^2 E}{\partial z^2} + 4\pi\lambda E = 4\pi j, \quad (2)$$

где правая часть, представляющая собой полный ток j на верхней границе электродного слоя, является постоянной величиной; λ – электрическая проводимость воздуха, которую также приемлем постоянной в пределах электродного слоя; z – высота.

Начальные и граничные условия для уравнения (1) будем рассматривать в виде

$$E|_{t=0} = E_0 e^{-\frac{z}{L}}, \quad E|_{z=0} = E_0, \quad \frac{\partial E}{\partial z} \Big|_{z=z_{\infty}} = 0. \quad (3)$$

Величина E_0 представляет собой значение напряженности электрического поля у поверхности земли.

Теоретическую оценку характерной высоты турбулентного слоя можно сделать на основании представления коэффициента турбулентной диффузии как $D(z) = D_1 z$ (для нейтральной стратификации приземного слоя) и времени электрической релаксации $\tau = (q\alpha)^{-1/2}$. Тогда получаем высоту $L = D_1 \tau$, которая равна $L = 10\text{--}30$ м при значениях $q = 7 \cdot 10^6 \text{ м}^{-3} \text{ с}^{-1}$, $\alpha = 1,6 \cdot 10^{-12} \text{ м}^{-3} \text{ с}$ для $D_1 = (0,0\text{--}0,1) \text{ м}/\text{с}$.

В качестве закона, описывающего суточные вариации коэффициента турбулентной диффузии, приемлем соотношение

$$D(t) = D_0 + A \sin\left(\frac{\pi}{12}(t-3)\right) + B \cos\left(\frac{\pi}{12}(t-3)\right), \quad (4)$$

где аргумент входящих в (4) функций берется в виде $(t-3)$ с целью обеспечить совпадение локальной временной шкалы пунктов наблюдения с часовым поясом по Гринвичу.

Представление коэффициента при старшей производной уравнения полного тока (2) функцией вида (4) превращает указанное уравнение в уравнение с переменными коэффициентами.

Для преобразования уравнения (1) воспользуемся известным соотношением

$$A \sin\left(\frac{\pi}{12}(t-3)\right) + B \cos\left(\frac{\pi}{12}(t-3)\right) = \sqrt{A^2 + B^2} \sin\left(\frac{\pi}{12}(t-3) + \varphi\right), \quad (5)$$

где $\varphi = -\arccos \frac{B}{\sqrt{A^2 + B^2}}$.

С учетом представления (4) исходное уравнение (2) примет вид

$$\frac{\partial E}{\partial t} - \left(D_0 + \sqrt{A^2 + B^2} \sin\left(\frac{\pi}{12}(t-3) + \varphi\right) \right) \frac{\partial^2 E}{\partial z^2} + 4\pi\lambda E = 4\pi j. \quad (6)$$

В результате получаем нестационарную начально-краевую задачу (3)–(6) для уравнения параболического типа (6) относительно неизвестной функции $E_1(t, z)$ с неоднородным начальным и граничными условиями (3). Эта задача с положительно определенным самосопряженным дифференциальным оператором относительно координаты в левой части уравнения (11), поэтому она разрешима при помощи метода Фурье [15, 16].

Аналитическое решение задачи (3)–(6) подробно изложено в работе [6], здесь приведем только основные положения данного случая.

Поскольку граничные условия (3) являются неоднородными, необходимо выполнить следующую замену переменных: $E - E_0 = E_1(t, z)$.

При указанной замене уравнение (1) сохраняет свою структуру, однако граничные условия меняются и становятся однородными.

$$\frac{\partial E_1}{\partial t} - \left(D_0 + \sqrt{A^2 + B^2} \sin\left(\frac{\pi}{12}(t-3) + \varphi\right) \right) \frac{\partial^2 E_1}{\partial z^2} + 4\pi\lambda E_1 = 4\pi(j - \lambda E_0), \quad (7)$$

$$E_1|_{t=0} = E_0 \left(e^{-\frac{z}{L}} - 1 \right), \quad (8)$$

$$E_1|_{z=0} = 0, \quad \frac{\partial E_1}{\partial z}|_{z=L} = 0. \quad (9)$$

В результате получаем неоднородную начально-краевую задачу для уравнения параболического типа (7) относительно неизвестной функции $E_1(z, t)$ с неоднородным начальным условием (8) и однородными граничными условиями (9), которую будем решать методом Фурье. Неизвестную функцию представим в виде ряда

$$E_1 = \sum_{n=1}^{\infty} T_n(t) \Phi_n(z), \quad (10)$$

где функции $\{\Phi_n(z)\}_{n=1}^{\infty}$ являются решением задачи Штурма – Лиувилля [16]

$$-D_0 \frac{d^2 \Phi}{dz^2} = \mu \Phi(z), \quad (11)$$

с граничными условиями

$$\Phi(0) = \Phi(L) = 0. \quad (12)$$

Собственные числа и собственные функции задачи (7) имеют вид

$$\mu_n = \left(\frac{\pi(2n-1)}{2L} \right)^2, \quad \Phi_n(z) = \sqrt{\frac{2}{L}} \sin \frac{\pi(2n-1)}{2L} z. \quad (13)$$

Для определения функций $\{T_n(t)\}_{n=1}^{\infty}$ необходима подстановка ряда (9) в уравнение (6) и начальные условия (7) (условия (8) выполняются автоматически). Соответствие коэффициентов

при базисном наборе $\{\Phi_n(z)\}_{n=1}^{\infty}$ приводит к составлению следующей задачи Коши для определения функций $T_n(t)$:

$$T_n'(t) + D(t)\mu_n T_n(t) = \alpha_n. \quad (14)$$

с начальным условием

$$T_n(0) = \beta_n, \quad (15)$$

где функции α_n и β_n представляют собой коэффициенты разложения, соответственно, начального условия (7) и правой части уравнения (6) по системе собственных функций $\{\Phi_n(z)\}_{n=1}^{\infty}$.

Решение неоднородной краевой задачи (6)–(9), описывающее суточные вариации электрического поля $E(z, t)$ задается следующим рядом Фурье:

$$E(t, z) = E_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{\frac{2}{L}} \beta_n \left[e^{-\left(\frac{\pi(2n-1)}{2L}\right)^2 \left(2t - \frac{1}{\omega} \sin \omega t\right)} + e^{-\left(2t - \frac{1}{\omega} \sin \omega t\right)} \int e^{-\left(\frac{\pi(2n-1)}{2L}\right)^2 \left(2t - \frac{1}{\omega} \sin \omega t\right)} dt \right] \times \sin \frac{\pi(2n-1)z}{2L}. \quad (16)$$

Таким образом, мы получили распределение напряженности электрического поля под влиянием переменного по времени коэффициента турбулентной диффузии. Кроме того, к числу существенных гипотез, позволяющих аналитически проинтегрировать задачу (3)–(6), следует отнести предположение о постоянном характере электрической проводимости в пределах электродного слоя. Естественным обобщением данной гипотезы служит случай переменной проводимости, а точнее, проводимости, зависящей от высоты в пределах электродного слоя. Как показано в [10], зависимость проводимости от высоты имеет экспоненциальный характер:

$\lambda(z) = \lambda_0 e^{-\frac{z}{L}}$, где L – высота электродного слоя. В этом случае задачу (3)–(6) не удастся решить методом Фурье, поскольку становится невозможным разделение переменных и составление соответствующей задачи Штурма – Лиувилля.

С другой стороны, как установлено наблюдениями [3, 10], коэффициент турбулентной диффузии может также зависеть от высоты в пределах электродного слоя. В качестве зависимости общего вида для такого случая получено выражение [1]

$$D_T(z) = D_m z^m, \quad (17)$$

где $m = 0; 1; 4/3$.

При этом относительно выбранной закономерности поведения величины $D_T(z)$ можно рассматривать как нестационарную, так и стационарную задачу.

Для стационарной задачи уравнение полного тока преобразуется в обыкновенное дифференциальное уравнение относительно напряженности электрического поля приземного слоя. Оно решается как обыкновенное дифференциальное линейное неоднородное уравнение второго порядка с переменными коэффициентами. Для его решения стандартным методом служит представление решения в виде степенного ряда. Соответствующее решение получено в [6].

Для нестационарной задачи уравнение (8) с учетом зависимости (17) преобразуется к виду [8]

$$\frac{\partial E}{\partial t} - \varepsilon_0 \frac{\partial}{\partial z} \left[D_T(z) \frac{\partial E}{\partial z} \right] + \lambda E = j(t). \quad (18)$$

Начальные и граничные условия для задачи (18) сохраняют форму (12).

Дифференциальный оператор в левой части уравнения (18) для коэффициента турбулентной диффузии, заданного зависимостью (17), не является положительно определенным [15]. В соответствии с теорией метода Фурье в данной ситуации допустимо существование так называемого весового множителя $g(z)$, при умножении на который обеих частей уравнения (8) соот-

Достаточные условия сходимости метода Галёркина, а также доказательство теоремы приведены в работе [16].

Результаты моделирования и обсуждение

1. По аналогии с работами [4–6] вначале рассмотрим поведение суточной вариации электрического поля, когда закон суточных вариаций $D(t)$ совпадает с унитарной вариацией (кривой Карнеги) [7–9]:

$$D = D_0(2 - \cos(\omega t + \varphi_0)), \quad (24)$$

где начальную фазу φ_0 принимаем равной нулю.

Результаты решения краевой задачи (2)–(3) с учетом (24) (при $E_0 = -300$ В/м) в сравнении с кривой Карнеги приведены на рис. 1.

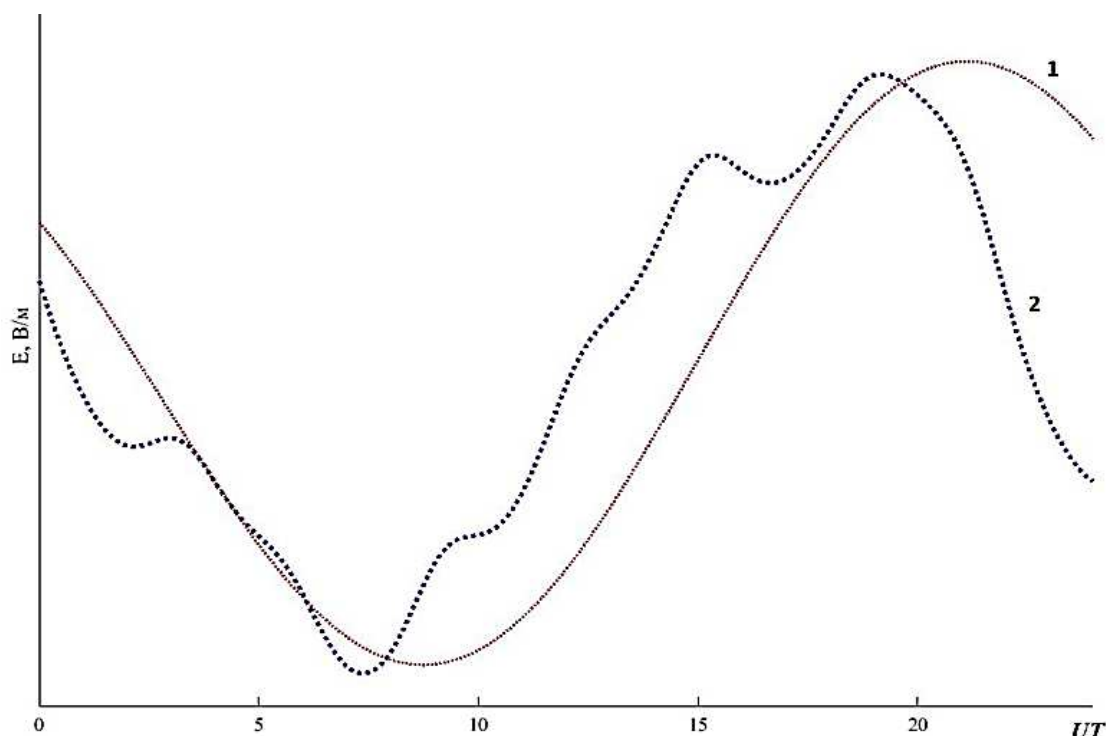


Рис. 1. Суточная вариация электрического поля на высоте 2 м: 1 – кривая Карнеги; 2 – расчетная вариация электрического поля / Fig. 1. Daily variation of the electric field at a height of 2 m: 1 - Carnegie curve; 2 - calculated variation of the electric field

Из рис. 1 видно, что учет нестационарного характера коэффициента турбулентной диффузии вызывает два эффекта: появление равных по амплитуде, но смещенных по времени (с 09 UT к 07 UT) утреннего минимума и вечернего максимума (с 21 UT к 19 UT) в суточной вариации электрического поля относительно унитарной вариации, а также дополнительных экстремумов.

2. Перейдем к анализу результатов моделирования для случая суточной вариации коэффициента турбулентной диффузии в соответствии с соотношением (4). Этот случай является обобщением соотношения (24), поскольку параметры, входящие в выражение для коэффициента турбулентной диффузии (4), как показано в [3, 13], принимают различные значения в разных пунктах наблюдения, поэтому профиль напряженности электрического поля также будет меняться в зависимости от места наблюдений.

Далее рассмотрим пример суточных вариаций электрического поля по формуле (4) со следующими значениями параметров: $D_0 = 0,053$, $A = -0,028$, $B = -0,043$.

Дополнительно заметим, что высокогорным условиям соответствуют большие значения напряженности электрического поля вблизи поверхности наблюдения, поэтому рассмотрим значения E_0 в диапазоне от 200 до 500 В/м. На рис. 2 приведены локальные суточные вариации напряженности электрического поля и кривая Карнеги.

Анализ построенных локальных суточных вариаций электрического поля показывает усиление отмеченных ранее эффектов: смещения по времени утреннего минимума и вечернего максимума, а также увеличение по амплитуде возникших дополнительных экстремумов. С увеличением значений напряженности электрического поля описанные эффекты также возрастают.

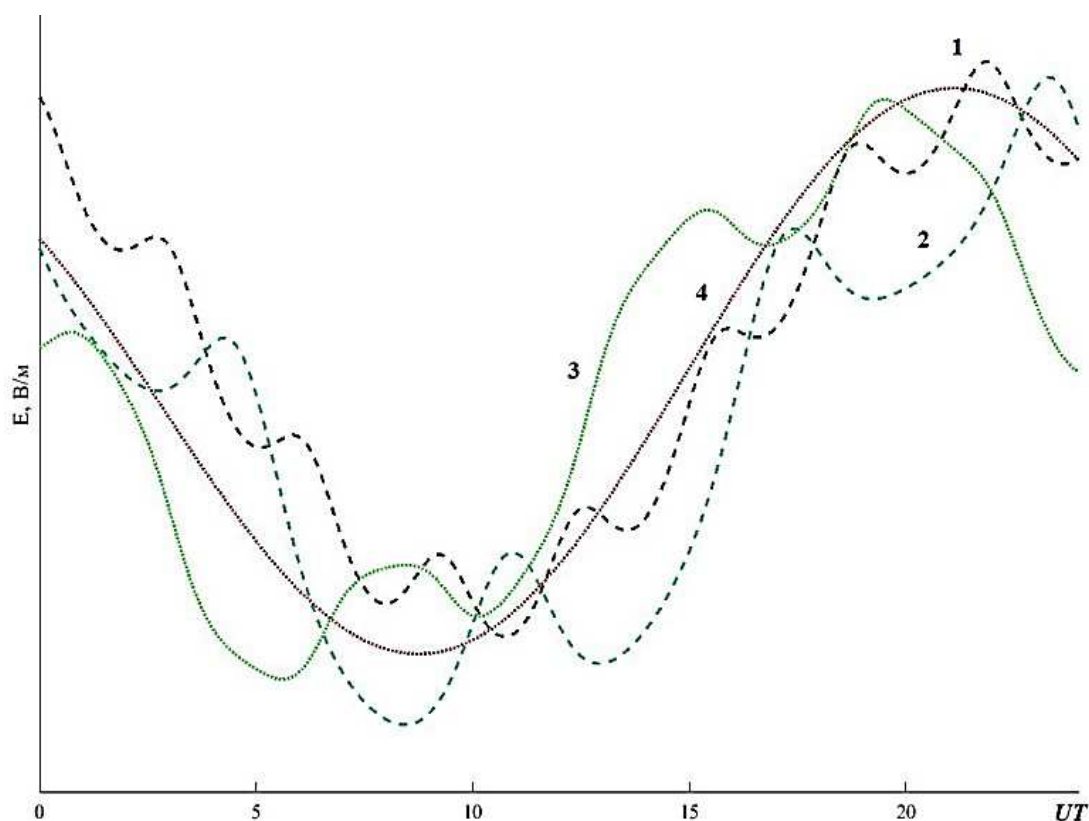


Рис. 2. Суточные вариации электрического поля на высоте 2 м в соответствии с (4):
1 – $E_0 = -200$ В/м; 2 – $E_0 = -300$ В/м; 3 – $E_0 = -500$ В/м; 4 – кривая Карнеги
/ Fig. 2. Daily variations of the electric field at a height of 2 m in accordance with (4):
1 - $E_0 = -200$ V/m; 2 - $E_0 = -300$ V/m; 3 - $E_0 = -500$ V/m; 4 - Carnegie curve

Заключение

Проведенные исследования показывают, что нестационарный характер локального фактора – турбулентного переноса в приземном слое – создает возмущение суточного хода напряженности электрического поля, сопоставимое по величине с глобальной унитарной вариацией, а также приводит к появлению дополнительных экстремумов в течение суток. Установленное относительное смещение глобальных и локальных экстремумов электрического поля объясняется разными физическими механизмами их генерации.

Список источников

1. Орленко Л.Р. Строение планетарного пограничного слоя атмосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1979. 270 с.
2. Морозов В.Н., Куповых Г.В. Математическое моделирование глобальной атмосферной электрической цепи и электричества приземного слоя. СПб.: Астерион, 2017. 307 с.

3. Зайнетдинов Б.Г., Клово А.Г., Кудринская Т.В., Куповых Г.В., Тимошенко Д.В. Формирование суточных вариаций атмосферного электрического поля вблизи поверхности Земли в различных метеорологических условиях // Тр. Военно-космической академии им А.Ф. Можайского. 2020. Вып. 674: Проблемы военно-прикладной геофизики и контроля состояния природной среды. С. 176–180.
4. Клово А.Г., Куповых Г.В., Свидельский С.С., Тимошенко Д.В. Моделирование глобальных вариаций электрического поля в приземной атмосфере // Тр. Военно-космической академии им А.Ф. Можайского. 2018. Вып. 662: Проблемы военно-прикладной геофизики и контроля состояния природной среды. С. 37–41.
5. Kupovykh G., Klovo A., Timoshenko D. The Atmospheric Electric Field Variations in The Surface Layer // Russ. Open Conf. on Radio Wave Propagation (RWP). IEEE, 2019. P. 580–583.
6. 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.
7. 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.
8. Liu C., Williams E.R., Zipser E.J., Burns G. Diurnal variation of global thunderstorms and electrified shower clouds and their contribution to the global electrical circuit // J. Atmos. Sci. 2010. Vol. 67, № 2. P. 309–323.
9. Harrison R.G. The Carnegie curve // Surveys in Geophysics. 2013. Vol. 34, № 2. P. 209–232.
10. Куповых Г.В. Электродинамические процессы в приземном слое атмосферы. Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2009. 114 с.
11. Аджиев А.Х., Куповых Г.В. Измерения электрического поля атмосферы в высокогорных условиях Приэльбрусья // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2015. Т. 51, № 6. С. 710–715.
12. Аджиев А.Х., Куповых Г.В. Вариации атмосферного электрического поля на высокогорных пунктах наблюдений // Докл. АН. Геофизика. 2015. Т. 462, № 2. С. 213–216.
13. Куповых Г.В., Белоусова О.В., Тимошенко Д.В., Клово А.Г., Кудринская Т.В. Локальные вариации электрического поля в турбулентном приземном слое // Материалы IX Всерос. науч. конф. по атмосферному электричеству. СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2023. С. 488–496.
14. 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.
15. Тихонов А.Н., Самарский А.А. Уравнения математической физики. М.: Изд-во МГУ, 1999. 799 с.
16. Михлин С.Г. Вариационные методы в математической физике. М.: Наука, 1970. 512 с.

References

1. Orlenko L. R. *Structure of the planetary boundary layer of the atmosphere*. Leningrad: Gidrometeoizdat Publ.; 1979. 270 p. (In Russ.).
2. Morozov V. N., Kupovykh G. V. *Mathematical modeling of the global atmospheric electrical circuit and electricity of the ground layer*. St. Petersburg: Asterion Publ.; 2017. 307 p. (In Russ.).
3. Zainetdinov B.G., Klovo A.G., Kudrinskaya T.V., Kupovykh G.V., Timoshenko D.V. Formation of daily variations of the atmospheric electric field near the Earth's surface in various meteorological conditions. *Proceedings of the Mozhaisky Military Space Academy*. Vol. 674: Problems of military-applied geophysics and monitoring of the state of the natural environment. 2020:176-180. (In Russ.).
4. Klovo A.G., Kupovykh G.V., Svidelsky S.S., Timoshenko D.V. Modeling of global variations of the electric field in the surface atmosphere. *Proceedings of the Mozhaisky Military Space Academy*. Vol. 662: Problems of military-applied geophysics and monitoring of the state of the natural environment. 2018:37-41. (In Russ.).
5. Kupovykh G., Klovo A., Timoshenko D. The Atmospheric Electric Field Variations in The Surface Layer. *Russian Open Conference on Radio Wave Propagation (RWP)*. July 1-6, 2019. IEEE, 2019:580-583.
6. Adzhiev A.Kh., Klovo A.G., Kudrinskaya T.V., Kupovykh G.V., Timoshenko D.V. Daily variations of the electric field in the surface layer of the atmosphere. *Izv. RAN. Fizika atmosfery i okeana = Proceedings of the Russian Academy of Science. Physics of the Atmosphere and Ocean*. 2021;57(4):452-461. (In Russ.).
7. 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 Press; 1926;(175):385-424.
8. Liu C., Williams E.R., Zipser E.J., Burns G. Diurnal variation of global thunderstorms and electrified shower clouds and their contribution to the global electrical circuit. *J. Atmos. Sci.* 2010;67(2):309-323.
9. Harrison R.G. The Carnegie curve. *Surveys in Geophysics*. 2013;34(2):209-232.

10. Kupovykh G.V. *Electrodynamic processes in the surface layer of the atmosphere*. Taganrog: Taganrog Institute of Technology Publishing House, Southern Federal University; 2009. 114 p. (In Russ.).
11. Adzhiev A.Kh., Kupovykh G.V. Measurements of the electric field of the atmosphere in the high mountain conditions of the Elbrus region. *Izv. RAN. Fizika atmosfery i okeana = Proceedings of the Russian Academy of Science. Physics of the Atmosphere and Ocean*. 2015;51(6):710-715. (In Russ.).
12. Adzhiev A.Kh., Kupovykh G.V. Variations of the atmospheric electric field at high-mountain observation points. *Dokl. AN. Geofizika = Reports of the Academy of Sciences. Geophysics*. 2015;462(2):213-216. (In Russ.).
13. Kupovykh G.V., Belousova O.V., Timoshenko D.V., Klovo A.G., Kudrinskaya T.V. Local variations of the electric field in the turbulent surface layer. *Materials of the 9th All-Russian Scientific Conference on Atmospheric Electricity*. St. Petersburg: Mozhaisky Military Space Academy Press; 2023:488-496. (In Russ.).
14. 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 = Atmosphere and Ocean Optics*. 2023;36(10):834-838. (In Russ.).
15. Tikhonov A.N., Samarsky A.A. *Equations of mathematical physics*. Moscow: Moscow State University Publishing House; 1999. 799 p. (In Russ.).
16. Mikhlin S.G. *Variational methods in mathematical physics*. Moscow: Nauka Publ.; 1970. 512 p. (In Russ.).

Информация об авторе

Д.В. Тимошенко – кандидат физико-математических наук, доцент, Инженерно-технологическая академия.

Information about the author

D.V. Timoshenko - Candidate of Science (Physics and Mathematics), Associate Professor, Academy for Engineering and Technologies.

Статья поступила в редакцию 17.01.2024; одобрена после рецензирования 02.02.2024; принята к публикации 04.07.2024.
The article was submitted 17.01.2024; approved after reviewing 02.02.2024; accepted for publication 04.07.2024.

Научная статья

УДК 504.064.+543.31

doi: 10.18522/1026-2237-2024-3-117-131

МЕТАНО- И СУЛЬФИДОГЕНЕЗ В ОЗЕРАХ ПОЛУОСТРОВА АБРАУ (КРАСНОДАРСКИЙ КРАЙ)

Ю.А. Федоров^{1✉}, Д.Н. Гарькуша², И.В. Доценко³, Ю.В. Попов⁴, Н.В. Доценко⁵,
А.В. Михайленко⁶

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

¹ fedorov@sfedu.ru ✉

² gardim@sfedu.ru

³ dotsenko@sfedu.ru

⁴ popov@sfedu.ru

⁵ nikdocenko@sfedu.ru

⁶ avmihaylenko@sfedu.ru

Аннотация. Описано географическое положение, тектоническое и геолого-гидрогеологическое строение бассейна озер Малый Лиман и Абрау, их ландшафтные особенности как памятников природы регионального значения, расположенных на территории Абрауского полуострова Краснодарского края. На примере аквальных ландшафтов озер Малый Лиман и Абрау и одноименной реки была исследована вода и донные отложения. Изучались гидрохимические показатели, концентрации метана и сульфидной серы в донных отложениях и воде. Результаты определения концентраций сульфидной серы ($S_{\text{сульфид}}$), а также характерный запах и цвет донных отложений указывают на присутствие в них свободного H_2S и гидротроилита ($FeS \cdot nH_2O$). С помощью электронной микроскопии установлено присутствие в донных отложениях полых сфер, что говорит об их возможной газонасыщенности. Под электронным микроскопом были найдены микровключения биогенного пирита (FeS_2), который образовался на фрагментах растительных и органических остатков. В аэробно-анаэробных условиях верхнего слоя донных отложений озер образование пирита происходит как напрямую путем одностадийного процесса пиритизации реакционноспособного железа, так и посредством многостадийного процесса образования пирита из моносulfида железа. Установлено, что озера подвергаются антропогенному воздействию, которое может многократно возрасти во время курортного сезона. Это приводит к их эвтрофированию и усилению метаногенеза, который, в свою очередь, способствует активизации эмиссии метана в атмосферу. Определены удельные потоки метана с водной поверхности озер Малый Лиман и Абрау.

Ключевые слова: донные отложения, вода, озера, Малый Лиман, Абрау, образование, метан, сульфиды, удельный поток

Для цитирования: Федоров Ю.А., Гарькуша Д.Н., Доценко И.В., Попов Ю.В., Доценко Н.В., Михайленко А.В. Метано- и сульфидогенез в озерах полуострова Абрау (Краснодарский край) // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2024. № 3. С. 117–131.

Благодарности: исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-17-00038, <https://rscf.ru/project/24-17-00038/>, в Южном федеральном университете.

Выражаем благодарность сотрудникам лаборатории методов и технических средств анализа вод Гидрохимического института за определение содержания метана и $S_{\text{сульфид}}$, проведенное по заданию авторов.

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

Original article

METHANO- AND SULFIDOGENESIS IN THE LAKES OF THE ABRAU PENINSULA (KRASNODAR TERRITORY)

Yuri A. Fedorov¹, **Dmitry N. Garkusha²**, **Irina V. Dotsenko³**, **Yuri V. Popov⁴**,
Nikolay V. Dotsenko⁵, **Anna V. Mikhailenko⁶**

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

¹ fedorov@sfedu.ru

² gardim@sfedu.ru

³ dotsenko@sfedu.ru

⁴ popov@sfedu.ru

⁵ nikdocenko@sfedu.ru

⁶ avmihaylenko@sfedu.ru

Abstract. The geographical position, tectonic and geological-hydrogeological structure of the basin of the Malyy Liman and Abrau lakes, their landscape features as natural monuments of regional importance located on the territory of the Abrau peninsula of the Krasnodar Territory are described. Using the example of the aquatic landscapes of the Malyy Liman and Abrau lakes and the river of the same name, water and bottom sediments were studied. Hydrochemical parameters, the content of methane and sulfide sulfur in bottom sediments and methane in water as components of aquatic landscapes were studied. The results of the determination of sulfides, as well as the characteristic odor and color of bottom sediments, indicate the presence of free H_2S and hydrotroilite ($FeS \cdot nH_2O$) in them. Electron microscopy revealed the presence of hollow spheres in the bottom sediments, which indicates their possible gas saturation. Microinclusions of biogenic pyrite (FeS_2), which was formed on fragments of plant and organism residues, were found under an electron microscope. In aerobic-anaerobic conditions of the upper layer of bottom sediments of lakes, pyrite formation occurs both directly through a one-stage process of pyritization of reactive iron, but also through a multi-stage process of pyrite formation from iron monosulfide. It has been established that lakes are exposed to anthropogenic influences, which can increase many times during the holiday season. This leads to their eutrophication and increased meanogenesis, which in turn contributes to the activation of methane emissions into the atmosphere. Specific methane fluxes from the water surface of the Malyy Liman and Abrau lakes have been determined.

Keywords: bottom sediments, water, lakes, Malyy Liman, Abrau, formation, methane, sulfides, specific flow

For citation: Fedorov Yu.A., Garkusha D.N., Dotsenko I.V., Popov Yu.V., Dotsenko N.V., Mikhailenko A.V. Methano- and Sulfidogenesis in the Lakes of the Abrau Peninsula (Krasnodar Territory). *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2024;(3):117-131. (In Russ.).

Acknowledgments: the research was supported by the Russian Science Foundation grant No. 24-17-00038, <https://rscf.ru/project/24-17-00038/>, 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).

Введение

Метан (CH_4) является парниковым газом, который образуется как в болотах, морях и океанах, так и в небольших водоемах и водотоках с различной минерализацией [1–3]. Представляет интерес изучение образования метана не только как газа, эмиссия которого из водоемов и водотоков

способствует усилению парникового эффекта в атмосфере Земли, но и как возможного интегрального показателя загрязнения воды и донных отложений, а также их экологического состояния [1, 2]. Отметим также, что сопряженное образование метана и сероводорода в донных отложениях водных объектов рыбохозяйственного назначения может приводить к гибели гидробионтов [1, 4]. Несмотря на важность этой проблемы, метаногенез в природных и искусственных континентальных водных объектах исследован недостаточно полно, как и идущий сочетанно во времени и пространстве с ним сульфидогенез. Особенно большой интерес вызывает изучение образования CH_4 и сульфидной серы ($\text{S}_{\text{сульфид}}$) в воде и донных отложениях пресных горных озер, находящихся под влиянием техногенеза. В статье изучены особенности распределения содержания и образования CH_4 в воде, а также его сульфидов в донных отложениях двух горных озер Абраусского полуострова – Малого Лимана и Абрау, которые, по мнению [5], представляют собой единую природно-техногенную систему.

В работе основное внимание будет уделено донным отложениям. Донные отложения – это квазиоткрытая экосистема, обширная поверхность раздела которой с водой отделяет гидросферу от верхнего тонкого слоя литосферы. Они являются хранителями как абиотических, так и биотических веществ (грибы, бактерии, растительность, гидробионты, остатки продуктов жизнедеятельности деятельности человека и других организменных сообществ). Наряду с третьей (дискретной) границей раздела вода – взвешенное вещество – биота, донные отложения имеют колоссальное значение в процессах переноса вещества и энергии [6]. Донные отложения – неотъемлемый компонент аквального ландшафта, который особенно активно участвует в круговороте вещества и энергии в мелководных объектах. Обладая высокой емкостью аккумуляции, взвешенные дисперсные частицы вещества способны к захвату поллютантов и выводу их из воды в процессе седиментации. По мере образования новых слоев осадков происходит сопряженное депонирование дисперсных частиц и поллютантов [6]. Как правило, синхронно с осадконакоплением в них происходит образование восстановленных газов. Аккумулируя загрязняющие вещества, поступающие с водосборов в течение длительного промежутка времени, донные осадки служат индикатором экологического состояния территории, своеобразным интегральным показателем уровня загрязненности. Донные отложения при смене физико-химической и гидродинамической обстановки могут выступать вторичным источником загрязнения водной толщи, а также эмиссии метана. Уровень содержания и распределения метана, а также свободного сероводорода и кислородорастворимых сульфидов (сульфидной серы) напрямую или опосредованно оказывает влияние на экологическое состояние воды и донных отложений водных объектов рыбохозяйственного культурно-бытового назначения [1, 2].

Целью настоящего исследования является изучение в донных отложениях двух горных пресноводных озер сопряженного образования CH_4 , сульфидной серы и дисульфидов железа с использованием комплекса современных методов (газовая хроматография, электронная микроскопия, фотометрия).

Объекты исследования

Экосистемы средиземноморского типа на Северо-Западном Кавказе, особенно на полуострове Абрау, до настоящего времени остаются относительно мало нарушенными по сравнению с прибрежными экосистемами на территории других стран Черного и Средиземного морей, подвергшихся сильной антропогенной трансформации с давних времен [7]. В работах [5, 6] показано, что оз. Малый Лиман и Абрау и их водосборные бассейны в настоящее время подвергаются глубокому антропогенному воздействию. В качестве примера отметим немаловажный факт – экспоненциальный рост численности населения во время туристического сезона. Численность постоянного населения в пос. Абрау-Дюрсо на 1 мая 2024 г. составляла всего 4511 чел. В то же время поток туристов в этот курортный поселок в 2023 г. достигал около 500 тыс. чел. (expertsouth.ru), причем такая тенденция сохраняется на протяжении нескольких лет, а до 2030 г. может увеличиться до 1 млн чел. в связи с принятым советом директоров корпорации «Туризм.РФ» в конце 2022 г. мастер-планом развития Абрау-Дюрсо (rbc.ru). Нет сомнений, что это способствует загрязнению и ухудшению экологического со-

стояния окружающей среды на полуострове Абрау. В настоящее время это выражается в увеличении поступления в водные экосистемы биогенных соединений фосфора, азота, активизирующих рост прежде всего синезеленых водорослей, отмирание которых способствует генерации метана и сульфидов и провоцирует эвтрофирование водоемов [8].

Малый Лиман лежит на юге полуострова Абрау, непосредственно у берега Черного моря, в 1,5 км на юг от озера Абрау. Оно отгорожено от моря каменной перемычкой шириной около 35 м, возвышающейся над его уровнем на 3 м. Озеро представляет собой пресноводный водоем, хотя за тонкой перемычкой находится море с соленостью воды около 18 г/дм³. Морская вода не проникает в озеро [5]. Согласно [9, 10], оно образовалось 5–7 тыс. лет назад вследствие сильного землетрясения. Малый Лиман окружают горы, сложенные породами четвертичного (Q), палеогенового (Pg₁) и верхнемелового возраста (K₂). Породы четвертичного периода представлены делювиально-пролювиальными гравийно-галечниковыми, песчаными отложениями с подчиненными прослоями глин и суглинков, общая мощность которых достигает 15 м, палеогена – мергелистыми породами, а также окварцованными трещиноватыми аргиллитами, верхнего мела – серыми мергелями с прослоями известняков, алевролитов и глин. Междуречные поверхности сложены мощными толщами (250–350 м) нижнепалеогеновых черных и зеленых известковистых аргиллитов с частыми прослоями желтовато-серых песчаников и алевролитов. В бассейне озера Малый Лиман местами вскрываются нижележащие верхнемеловые темно-серые мергели с прослоями известняков, алевролитов и глин [9, 10].

Озеро Абрау расположено гипсометрически выше Малого Лимана и представляет интерес не только с точки зрения его влияния на водный баланс нижнего водоема, но и как объект социального, геологического и экологического туризма. Озеро является самым большим природным водоемом Краснодарского края. На его берегах находится одноименный поселок и известный завод. Наполняется Абрау за счет впадающих в него вод реки Абрау и склонового стока, а также разгрузки на его дне подземных вод. С гидрологической точки зрения озеро Абрау является бессточным. Борта озера сложены флишевыми толщами мелового возраста. Они представлены ритмичным переслаиванием тонких серых мелкозернистых песчаников, алевролитов, глинистых сланцев, мергелей и темно-серых алевролитовых известняков [9–11].

Малый Лиман и Абрау являются пресными горными озерами, минерализация которых изменяется в диапазоне 319,0–764,0 мг/дм³. Они, находясь в рекреационной зоне и испытывая антропогенную нагрузку, чрезвычайно интересны для изучения внутриводоемных процессов в пресных водных объектах Юга России. Эти генетически связанные между собой озера не охвачены систематическими гидрохимическими и гидробиологическими наблюдениями. Имеются лишь отрывочные сведения о концентрациях главных ионов, составляющих минерализацию воды. Состав воды Абрау и Малого Лимана приведен и описан по результатам работ [3, 12–16]. Вода оз. Абрау в 1929 и 1995–1996 гг. относилась к С_{II}^{Ca} (гидрокарбонатный класс, группа кальция, тип II), так же как и вода оз. Малый Лиман в 1996, 2006 и 2007 гг. – к С_{II}^{Ca} (гидрокарбонатный класс, группа кальция, тип II) по О.А. Алекину [17]. В 2008 г. при снижении уровня воды и росте минерализации её химический состав изменился в сторону повышения хлоридных и сульфатных ионов (С^{Na}_{II}), что обусловлено увеличением содержания солей морского происхождения. Однако при этом тип вод не изменился. Он относился к типу II – «пресные и солоноватые, жесткие воды». При этом следует отметить возрастание жесткости воды с 3,78 мг-экв/дм³ в 2006 г. до 6,20 в 2008 г.

Материалы и методы

Экспедиция в октябре 2023 г. была проведена с целью отбора проб воды и донных отложений в оз. Малый Лиман и Абрау и р. Абрау (рис. 1).

Длина маршрута от пересохшего русла р. Абрау до берега Черного моря составляет около 7,5 км. Координаты станций отбора проб представлены в табл. 1.

Отбор, транспортировка, хранение проб и последующее определение метана и сульфидной серы проведены согласно аттестованным методикам (РД 52.24.511-2013; РД 52.24.512-2012; РД 52.24.525-2011). Измерение СН₄ выполнено на газовом хроматографе «Хроматэк-Кристалл 5000.2» с дозатором равновесного пара на пламенно-ионизационном детекторе.

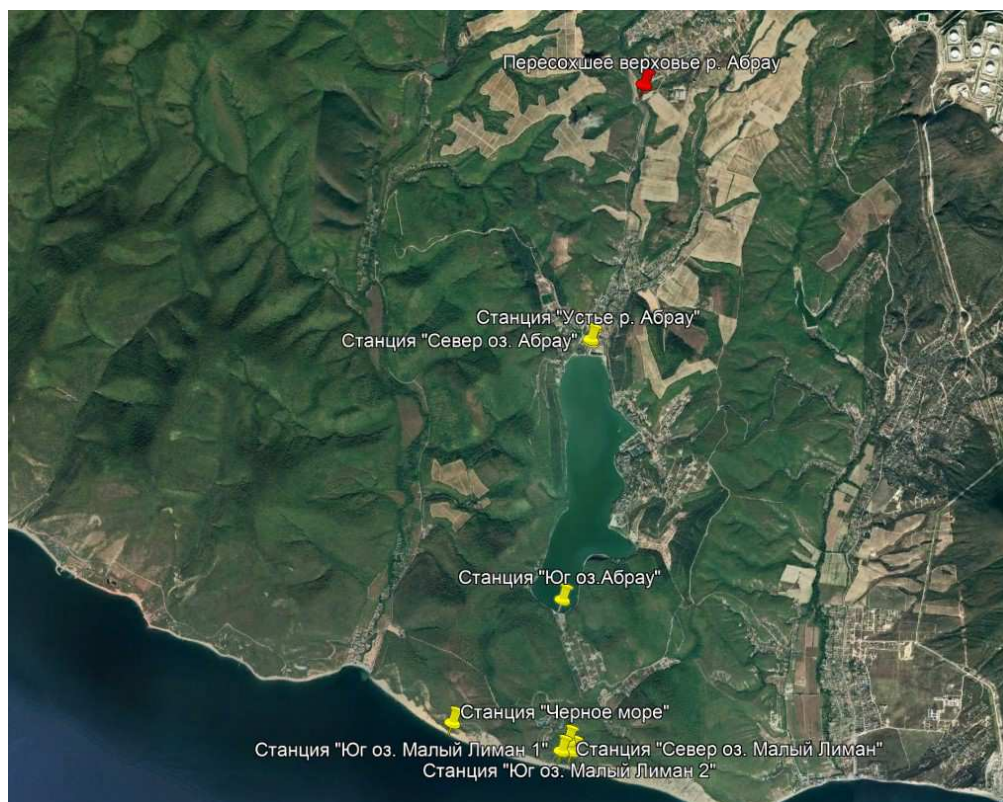


Рис. 1. Карта-схема местоположения станций отбора проб
 / Fig. 1. Schematic map of the location of sampling stations

Таблица 1 / Table 1

Координаты станций отбора проб / Coordinates of sampling stations

Станция отбора проб	Координаты точки отбора проб, с.ш / в.д.
Ст. 1, северный берег оз. Малый Лиман	44°40'15.40" / 37°35'28.51"
Ст. 2, южный берег оз. Малый Лиман 1	44°40'11.54" / 37°35'25.49"
Ст. 3, южный берег оз. Малый Лиман 2	44°40'11.82" / 37°35'30.95"
Ст. 4, Черноморское побережье	44°40'19.46" / 37°34'28.94"
Ст. 5, южный берег оз. Абрау	44°41'6.78" / 37°35'21.20"
Ст. 6, северный берег оз. Абрау	44°42'41.17" / 37°35'27.49"
Ст. 7, устье р. Абрау	44°42'42.07" / 37°35'27.42"
Ст. 8, пересохшее верховье р. Абрау	44°44'16.74" / 37°35'46.53"

Измерение массовой доли $S_{\text{сульфид}}$ основано на переводе сульфидов донных отложений в сероводород действием соляной кислоты и последующей отдувке сероводорода азотом особой чистоты в раствор гидроксида натрия и его определения фотометрическим методом с N,N-диметил-п-фенилендиамином (РД 52.24.525-2011). При этом в общее содержание $S_{\text{сульфид}}$ входят как растворенные в иловой воде свободный сероводород (сумма недиссоциированных молекул H_2S ,

ионов гидросульфида HS^- и ионов сульфида S^{2-}) и сульфиды щелочных металлов, так и сульфиды, содержащиеся в твердой фракции, которые представляют собой сульфиды железа и тяжелых металлов, нерастворимые в воде, но растворимые в кислоте.

Определение CH_4 и $\text{S}_{\text{сульфид}}$ проведено при естественной влажности отложений, при этом их концентрации выражены, соответственно, в мкг/г и мг/г влажного веса (вл. в.). Одновременно с отбором проб в заранее взвешенные и пронумерованные бюксы отобрана навеска отложений для определения их влажности и плотности. Величины Eh и pH измерены с помощью электродов портативного pH-метра-иономера «Экотест 2000» сразу после отбора проб. Минерализация воды и химический состав определены по стандартным методикам [18].

Исследование микроструктуры донных отложений и минеральных форм нахождения дисульфидов железа выполнено на растровом электронном микроскопе VEGA II LMU (фирма Tescan), интегрированном с системой энергодисперсионного микроанализа INCA ENERGY 450/XT (детектор Silicon Drift (ADD)). Изучались воздушно-сухие препараты, напыленные углеродом [19].

Обсуждение результатов

Первые исследования содержания метана и его распределения по разрезам донных отложений оз. Малый Лиман и Абрау выполнены в 2007 г. (табл. 2) [20]. В этот год уровень воды в озерах был существенно более низким, чем в предшествующие годы. Отбор проб в обоих озерах проводился с берега (глубина до 1,0 м), в оз. Абрау – дополнительно и в центральной части озера, с глубины порядка 6 м. Воду отбирали с поверхностного горизонта (0,1 м), донные отложения – в слоях 0–5, 5–10, 10–15 см и далее через каждые 5–10 см на всю длину отобранной колонки (до 90 см – в оз. Абрау). Присутствие свободного сероводорода в донных отложениях фиксировалось по запаху. Наиболее полный разрез донных отложений был получен для центральной части оз. Абрау. Отмечен слабый тренд возрастания содержания метана с глубиной, на общем фоне которого в интервале глубин 5–15 см проявляется пик, регистрирующий резкое снижение CH_4 . Распределение метана по вертикальному профилю донных отложений исследованных озер, как и в других водных объектах [1], характеризуется существенной неоднородностью, что обусловлено главным образом изменением окислительно-восстановительного потенциала и количества лабильного органического вещества в отложениях. Уровни содержания метана в воде и донных отложениях оз. Малый Лиман и Абрау не выходили за пределы варьирования, установленные для других озер различных географических зон России [1]. Максимальные концентрации метана (характерные для сильноэвтрофированных водоемов) зафиксированы в оз. Малый Лиман. Отмечалось снижение содержания метана в воде с увеличением глубины станций отбора проб, что в целом согласуется с данными наблюдений на других озерах. В донных отложениях оз. Малый Лиман и Абрау определены высокие концентрации метана [20]. В них также зафиксирован запах сероводорода, что свидетельствовало об интенсивно протекающих анаэробных процессах деструкции органического вещества в донных осадках, сопровождающихся процессами метаногенеза и сульфидогенеза.

Таблица 2 / Table 2

**Содержание метана в воде и донных отложениях оз. Абрау и Малый Лиман [по 20]
/ Methane content in the water and sediments of the Aбраu and Malyy Liman lakes [20]**

Местоположение станции отбора проб	Содержание CH_4	
	Вода, мкл/дм ³	Отложения, мкг/г в.в.
Абрау, возле берега, глубина до дна – 0,3 м	92,1	–
Абрау, середина озера, поверхностный слой (глубина до дна – 6,0 м)	26,3	<u>0,11–32,5</u> 14,97 (11)
Малый Лиман, возле берега, поверхностный слой, глубина до дна – 0,3 м	350,3	–
Малый Лиман, поверхностный слой, глубина до дна – 0,6 м	157,2	<u>3,29–16,3</u> 7,69 (5)

Примечание. В числителе приведены изменения, в знаменателе – средние значения, в скобках – количество определений.

С научной и прикладной точки зрения было интересно рассчитать удельные потоки метана из различных районов озер. Зная содержание метана в верхнем слое воды озер (табл. 2), для расчета удельных потоков метана мы воспользовались уравнением вида (1) из работы [21]:

$\lg F_{\text{CH}_4} = 0,882 \cdot \lg C_{\text{CH}_4} + 1,821$ ($r = 0,77$; $P < 0,01$), где $\lg F_{\text{CH}_4}$ – логарифм потока метана из воды, $\text{мкг}/\text{м}^2 \cdot \text{ч}$; $\lg C_{\text{CH}_4}$ – логарифм содержания метана в воде, $\text{мкл}/\text{л}$.

Были получены следующие результаты:

Удельный поток CH_4 из воды оз. Абрау составил: на ст. 1 – $83,2 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{сут}^{-1}$, на ст. 2 – $30,2$, оз. Малый Лиман: на ст. 3 – $275,6$, на ст. 4 – $138,1 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{сут}^{-1}$. В среднем удельный поток CH_4 из обоих озер – $131,8 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{сут}^{-1}$.

В пересчете на углеродный эквивалент (C- CH_4) результаты оказались такими: ст. 1 – $62,4 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{сут}^{-1}$, ст. 2 – $22,7$, оз. Малый Лиман: ст. 3 – $206,7$, ст. 4 – $103,6 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{сут}^{-1}$. В среднем удельный поток C- CH_4 – $98,9 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{сут}^{-1}$.

Сравнение этих данных с полученными ранее сведениями по удельным потокам CH_4 с поверхности акваторий озер и водохранилищ Ростовской области показало их сопоставимость [22].

В ходе экспедиционных работ 2023 г. было установлено, что наполняемость озер и их уровеньный режим были практически идентичны 2020 г. [5]. На рис. 2а отчетливо видно падение уровня воды и обсохший берег в оз. Абрау. Пруд-накопитель, из которого вода во время полноводных лет затем с подземным стоком поступала в оз. Малый Лиман, был также пуст. Здесь в это время проводились дноуглубительные работы.



Рис. 2. Озеро Абрау (а) и пруд-накопитель (б) / Fig. 2. Abrau Lake (a) and storage pond (b)

Все источники, включая и самый полноводный впадавший в оз. Малый Лиман, – недействующие (рис. 3а), а затопленная в 2021 г. часть акватории озера была осушена в 2023 г. (рис. 3б). Описываемое нами пересохшее верховье русла р. Абрау дополняло общую удручающую гидрологическую картину (рис. 4).



Рис. 3. Пересохший источник (а) и осушенные донные отложения озера (б)
/ Fig. 3. Dried-up spring (a) and drained bottom sediments of the lake (b)



Рис. 4. Пересохшее верховье русла р. Абрау
 / Fig. 4. The dried-up upper reaches of the riverbed of the Abrau River

Были отобраны колонки донных отложений в оз. Малый Лиман и устье р. Абрау. В табл. 3 и 4 приведены результаты определения физико-химических показателей и содержания CH_4 и $\text{S}_{\text{сульфид}}$ в донных отложениях.

Таблица 3 / Table 3

**Физико-химические показатели донных отложений озер
 / Physical and chemical parameters of lakes bottom sediments**

Станция	Слой, см	ρ , г/дм ³	pH	Eh, мВ	Влажность, %
ст. 1	0–2	1,516	7,49	–3,6	42,3
	2–5	1,549	7,4	–24	43,2
	5–10	1,373	7,41	–19,6	40,8
ст. 2	0–2	1,152	7,46	30,1	73,6
	02–5	1,264	7,49	22	68,4
	5–10	1,109	7,6	–5	69,8
	10–15	1,445	7,49	–61,2	72,5
	15–20	1,059	7,48	–18,5	74,9
ст. 7	0–2	1,823	7,62	53,8	36,3
	2–5	1,453	7,62	17,5	45,7
	5–10	1,057	7,6	2,4	45,2

Исследованные отложения представлены илом влажной консистенции черно–серого цвета, супесчаного состава, со слабым гнилостным запахом (рис. 5).

В устье р. Абрау (ст. 6) также были отобраны донные отложения, представленные серыми илами влажной консистенции со слабым гнилостным запахом (рис. 6).



а/а



б/б

Рис. 5. Донные отложения, отобранные в южной части оз. Малый Лиман (а – ст. 1; б – ст. 2)
/ Fig. 5. Bottom sediments selected in the southern part of the Malyy Liman Lake (a - st. 1; b - st. 2)



Рис. 6. Колонка донных отложений, отобранная в устье р. Абрау (ст. 6)
/ Fig. 6. Column of bottom sediments selected at the mouth of the Abrau River (st. 6)

Отметим, что в месте отбора отложений визуально была видна сильная загрязненность строительным и бытовым мусором (рис. 7).



а/а



б/б

Рис. 7. Загрязненность строительным (а) и бытовым мусором устья р. Абрау (б)
/ Fig. 7. Pollution by construction (a) and household garbage of the mouth of the Abrau River (b)

Плотность донных отложений в водных объектах изменялась в диапазоне 1,057–1,823 г/дм³ (в среднем – 1,345), влажность – 36,3–74,9 % (в среднем – 55,7 %), значения pH – от 7,4 до 7,62 (в среднем – 7,51), Eh – от –61,2 до +53,8 мВ (в среднем –0,55). В соответствии с представлениями [1] диапазон вариаций значений Eh в целом благоприятен для развития процессов метаногенеза и сульфидогенеза. Положительные значения Eh и отсутствие запаха сероводорода могут свидетельствовать о том, что исследованные донные отложения относились к редокс-слоям, т.е. переходным от окислительной до восстановительной обстановки. Во время экспедиции 2023 г. оз. Абрау было покрыто «пленкой» синезеленых водорослей, которые специальным устройством собирались и складировались на берегу (рис. 8). Отметим, что возможными причинами вспышки распространения синезеленых водорослей явились загрязнение озера биогенными компонентами и засуха, приведшая к снижению уровня воды и её объема в водоеме.



Рис. 8. Складирование синезеленых водорослей на северном берегу оз. Абрау в районе устья одноименной реки / Fig. 8. Storage of blue-green algae on the northern shore of the Abrau Lake near the mouth of the Abrau River

Содержание CH₄ (табл. 4) в кернах донных отложений оз. Малый Лиман, отобранных на двух станциях, изменялось в диапазоне 1,15 –19,0 мкг/г вл.в., в среднем составило 10,6 мкг/г вл.в. В донных отложениях устья р. Абрау оно было выше – от 9,59 до 21,2 (в среднем – 16,0 мкг/г вл.в.) и близко к содержанию CH₄, обнаруженного в донных отложениях озера в 2007 г. Подобные высокие концентрации содержания CH₄ в донных отложениях были, например, зарегистрированы нами в пелоидах озера Чембурское, которое находится под воздействием загрязнения агломерации г. Анапы [3].

Таблица 4 / Table 4

**Содержание метана и сульфидной серы в донных отложениях озер
 / The content of methane and sulfide sulfur in the lakes bottom sediments**

Станция	Слой, см	CH ₄ , мкг/г		S _{сульф.} , мг/г	
		вл.в.	с.в.	вл.в.	с.в.
ст. 1	0–2	15,7	27,2	0,378	0,655
	2–5	19	33,4	0,607	1,07
	5–10	15,8	26,8	0,237	0,4
ст. 2	0–2	1,3	4,91	0,166	0,629
	2–5	1,15	3,64	0,279	0,883
	5–10	–*	–	0,261	0,864
	10–15	–	–	0,505	1,84
	15–20	–	–	–	–
ст. 7	0–2	9,59	15	0,414	0,65
	2–5	21,2	38,8	0,273	0,503
	5–10	17,3	31,7	0,791	1,44

* – определение не проводилось.

При изучении структуры донных отложений с помощью электронной микроскопии были обнаружены обильные микропоры в органоминеральных агрегатах и полые шаровидные агрегаты (рис. 9а), присутствие которых можно рассматривать как свидетельство газонасыщенности донных отложений. Ранее в работах [1, 23] была установлена значимая корреляция между содержа-

нием частиц пелитовой размерности и метана. Это, по мнению авторов, указывало на то, что метан находился в глинистых частицах в сорбированном виде. Обнаруженное нами явление показало, что данный флюид, а возможно, и свободный сероводород могли находиться не только в сорбированном виде, но и в свободном и растворенном состоянии в межзерновом пространстве и полостях органоминеральных агрегатов.

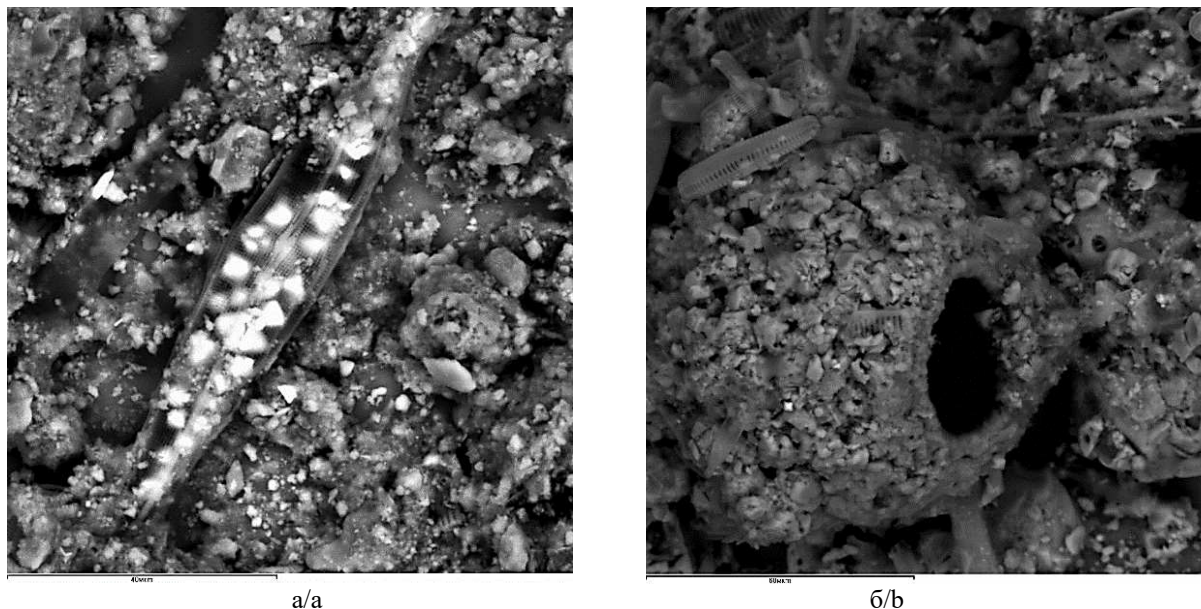


Рис. 9. Полые шаровидные агрегаты (а) и развитие аутигенного пирита путем замещения полости микроорганизма (б). Изображение в обратно рассеянных электронах (BSE) / Fig. 9. Hollow spherical aggregates (a) and the development of authigenic pyrite by replacing the cavity of a microorganism (b). Image in backscattered electrons (BSE)

В отличие от 2007 г., когда присутствие свободного H_2S фиксировалось только по запаху, в 2023 г. были произведены количественные определения $S_{\text{сульфид}}$. Концентрации $S_{\text{сульфид}}$ в оз. Малый Лиман варьировались в диапазоне 0,166–0,505 мг/г вл.в. (в среднем – 0,303 мг/г вл.в.), а в р. Абрау – от 0,273 до 0,791 мг/г вл.в. (в среднем – 0,49 мг/г вл.в.). В среднем содержание $S_{\text{сульфид}}$ в донных отложениях р. Абрау оказалось более высоким, чем в оз. Малый Лиман. Донные отложения обоих озер по содержанию $S_{\text{сульфид}}$ характеризуются как слабосульфидные. В них также обнаружено присутствие аутигенного дисульфида железа (пирит), нередко замещающего органические фрагменты (рис. 9б). Он представлен группой микронной размерности зерен пирита, что является обычным для раннедиагенетического пирита. Отметим, что в донных осадках обнаруживаются также рассеянные в них зерна пирита. В аэробно-анаэробных условиях верхнего слоя донных отложений озер образование FeS_2 может происходить как напрямую путем одностадийного процесса пиритизации реакционноспособного железа, как полагал И.И. Волков [24], так и посредством многостадийного процесса образования FeS_2 из моносulfида железа ($FeS \cdot nH_2O$). Впервые отметим, что процесс связывания свободного H_2S и ионов гидросульфида HS^- с реакционноспособным железом выполняет определенные экологические функции, приводя к образованию нетоксичных соединений серы и их депонированию в донных осадках.

Таким образом, можно сделать заключение, что в донных отложениях этих пресных озер протекают сопряженные во времени и пространстве циклы метаногенеза и сульфидогенеза. При этом установленная в ходе двух экспедиций достаточно высокая активность метаногенеза в донных отложениях изученных водоемов и водотока характерна для водных объектов с высоким уровнем эвтрофирования. Так, в соответствии с подходом к оценке уровня трофии в озерах и водохранилищах по содержанию в воде и донных отложениях метана [1] изученные водные объекты могут быть отнесены, в условиях низкого стояния уровня воды, к эвтрофным. Для сравнения отметим, что, например, содержание метана в воде оз. Байкал, которое отнесено нами к олиготрофному водоему, варьировалось в разные годы в пределах 0,44–3,41 (в среднем – 0,80 мкл/дм³) и 0,20–5,19 мкл/дм³ (в среднем – 1,22 мкл/дм³) [25, 26].

Содержание $S_{\text{сульфид}}$ в сухом осадке донных отложений (табл. 4) изменялось в диапазоне 0,40–1,84 мг/г сухого веса (в среднем – 0,79 мг/г с. в.), в то время как для донных отложений оз. Байкал этот же показатель [22] варьировался от 0,002 до 0,830 мг/г сухого осадка (в среднем – 0,042 мг/г). Это указывает на возможную роль количества сульфатных ионов в воде как субстрата для бактерий-утилитов, которое косвенно способствует усилению сульфидообразования в донных отложениях.

Обратим внимание, что в воде оз. Байкал содержание сульфатов составляет в среднем 5,5 мг/дм³ [27], а в оз. Малый Лиман и Абрау оно достигает 412,0 и 355,0 мг/дм³ соответственно, т.е. больше в 75 и 65 раз. Можно высказать предположение, что вероятность исчерпания сульфатов в результате сульфатредукции в донных отложениях оз. Байкал намного выше, а накопление сульфидной серы ниже, чем в оз. Малый Лиман и Абрау. Соответственно, отношение содержания сульфидной серы в донных отложениях в оз. Малый Лиман и р. Абрау к таковой в донных отложениях оз. Байкал оказалось выше в 8,3 и 12,0 раза.

Для всего массива данных были построены регрессионные зависимости между содержанием CH_4 и $S_{\text{сульфид}}$ (в пересчете на влажный вес) в донных отложениях оз. Малый Лиман и р. Абрау. Установлено, что между этими показателями имеет место значимая связь ($R=0,48$), которая свидетельствует о том, что CH_4 и $S_{\text{сульфид}}$ имеют генетическое родство и, по-видимому, тесно связаны с содержанием органического вещества, как и в донных осадках оз. Байкал [23].

Заключение

Визуально установлено загрязнение устья р. Абрау хозяйственно-бытовым и строительным мусором. По ретроспективным и современным данным по содержанию метана в воде и донных отложениях оз. Малый Лиман и Абрау однозначно отнесены к эвтрофным, в то время как, например, оз. Байкал по этому показателю – к олиготрофному. На основании сравнения данных по содержанию сульфатов в воде и сульфидов в донных отложениях оз. Малый Лиман, р. Абрау и оз. Байкал высказано предположение о косвенном влиянии количества сульфатных ионов на генерацию сульфидов. Были исследованы сопряженные циклы метана и сероводорода в донных отложениях, которые отнесены нами к переходному – редокс-слою, где происходит постоянная смена окислительных условий на восстановительные и обратно, о чем свидетельствуют значения Eh , которые изменяются от –61,2 до +53,8 мВ. С помощью электронной микроскопии установлено присутствие в донных отложениях полых сфер, что указывает на высокую вероятность их газонасыщенности CH_4 и, возможно, H_2S . Ранее органолептически в донных отложениях оз. Малый Лиман и Абрау был обнаружен запах сероводорода, который свойствен свободному H_2S и гидротроилиту. Электронно-зондовыми исследованиями установлено развитие аутигенного дисульфида железа, замещающего биогенные частицы (фоссилизация микроорганизмов, развитие пирита по фрагментам растительного детрита). Были построены регрессионные зависимости между содержанием CH_4 и $S_{\text{сульфид}}$ в донных отложениях оз. Малый Лиман и р. Абрау для всего массива данных. Показано, что между этими показателями имеет место значимая связь, свидетельствующая о том, что CH_4 и $S_{\text{сульфид}}$ имеют генетическое родство и, по-видимому, тесно связаны с содержанием органического вещества, как и в донных осадках оз. Байкал. Был выполнен расчет удельных потоков CH_4 и $C-CH_4$ с поверхности акваторий горных озер, которые в среднем, соответственно, составили 131,8 и 98,9 мг·м⁻²·сут⁻¹.

Список источников

1. Федоров Ю.А., Тамбиева Н.С., Гарькуша Д.Н., Хорошевская В.О. Метан в водных экосистемах. 2-е изд., перераб. и доп. Ростов н/Д.; М.: Росиздат, 2007. 330 с.
2. Трубник Р.Г., Федоров Ю.А. Оценка экологического состояния донных отложений по триаде хико-биологических показателей. Ростов н/Д.; М.: Бюро пропаганды худ. лит-ры Ростовской писательской организации, 2023. 120 с.
3. Федоров Ю.А., Гарькуша Д.Н., Потанов Е.Г., Трубник Р.Г. Газовый состав пелоидов Таманского полуострова // Курортная медицина. 2017. № 3. С. 26–33.
4. Figura L.O., Commenga H.K. Methan in wasser der Riddashänser Teiche // Braunsch. Naturkd. 1989. Schr. 3, Heft 2. P. 507–516.

5. Федоров Ю.А., Кузнецов А.Н., Савицкий В.А., Талпа Б.В., Головков И.В., Доценко Н.В., Станиславский К.С., Габова В.Н. Особенности образования и функционирования озера Малый Лиман как природно-техногенной системы // Инженерный вестн. Дона. 2022. № 4.
6. Fedorov Yu.A., Mikhailenko A.V., Dotsenko I.V., Kovalev E.A., Chepurnaya V.I., Dotsenko N.V., Gavrilova I. Yu., Bellinger O.Yu. Granulometric, elemental and isotopic composition of bottom sediments of lakes of mountainous areas as a reflection of transformations in their watersheds // E3S Web Conf. 2023. Vol. 407. P. 02009.
7. Алексеева Е.М. Греческая колонизация Северо-Западного Кавказа. М.: Наука, 1991. 143 с.
8. Федоров Ю.А., Беляев А.Г. Биогенные вещества в зоне смешения река Дон – Азовское море. Ростов н/Д.: РГУ, ИнфоСервис, 2004. 108 с.
9. Вязкова О.Е. Палеореконструкция геоморфологической обстановки античной эпохи в окрестностях мыса Малый Утриш // Ист.-археол. альманах Армавирского краеведческого музея. 1999. Вып. 5. С. 52–58.
10. Болдырев В.Л. Обвальнo-оползневой тип берега // Труды Ин-та океанологии. 1957. Т. XXI. С. 118–132.
11. Алексеев М.М., Ходырев Н.А. Оползневые процессы на морском побережье между Анапой и Новороссийском // Материалы Харьковского отделения Геогр. общ-ва Украины. 1973. Вып. XII. С. 86–88.
12. Лукьянченко А.Д., Шишкина Д.Ю. Комплексная учебная практика студентов-геоэкологов РГУ в СОЛ «Лиманчик»: опыт проведения и перспективы развития // Экологические проблемы. Взгляд в будущее: сб. тр. III науч.-практ. конф. Ростов н/Д., 2006. С. 136–137.
13. Лукьянченко А.Д., Чихачев А.С., Приваленко В.В. Гидрогеохимические особенности озер Абрау и Лиманчик // Экологические проблемы. Взгляд в будущее: сб. тр. науч.-практ. конф. Ростов н/Д., 2004. С. 93–94.
14. Лукьянченко А.Д., Предеина Л.М. Динамика солевого состава в озерах Абрауский Лиманчик и Абрау // Экологические проблемы. Взгляд в будущее: сб. тр. III науч.-практ. конф. Ростов н/Д., 2006. С. 131–133.
15. Шишкина Д.Ю., Ярославцева А.В. Геоэкологические исследования в районе СОЛ «Лиманчик» // Экологические проблемы. Взгляд в будущее: сб. тр. V науч.-практ. конф. Ростов н/Д.: Ростиздат, 2008. С. 527–531.
16. Доценко Н. В., Станиславский К. С., Савицкий В. А. Аналитический обзор ретроспективных исследований озер Малый Лиман и Абрау // Экологические проблемы. Взгляд в будущее. Ростов н/Д.; Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2020. С. 221–234.
17. Алекин О.А. Основы гидрохимии. Л.: Гидрометеиздат, 1970. 444 с.
18. Руководство по химическому анализу поверхностных вод суши / под ред. Л.В. Боевой. Ростов н/Д.: НОК, 2009. Ч. 1. 1037 с.
19. Fedorov Yu.A., Solodko D.F., Chepurnaya V.I., Dotsenko I.V., Talpa B.V., Levchenko S.V., Popov Yu.V., Dmitrik L.Y. Physical and chemical properties, elemental and material snow composition in Rostov-on-Don // E3S Web of Conferences. 2021. Vol. 265. P. 02003.
20. Гарькуша Д.Н., Федоров Ю.А., Летучая Ю.С., Назаренко Д.С. Первые данные об уровне содержания метана в воде и донных отложениях озер Абрау, Лиманчик и Малый Утриш // Экологические проблемы. Взгляд в будущее: сб. тр. VI науч.-практ. конф. Ростов н/Д.: Ростиздат, 2010. С. 76–79.
21. Fedorov Yu.A., Gar'kusha D.N., Shipkova G.V. Methane emission from peat deposits of raised bogs in Pskov oblast // Geography and Natural Resources. 2015. Vol. 36, № 1. P. 70–78.
22. Гарькуша Д.Н., Фёдоров Ю.А., Тамбиева Н.С., Крукиер М.Л., Калманович И.В. Оценка эмиссии метана водными объектами Ростовской области // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2015. № 3. С. 83–89.
23. Гарькуша Д.Н., Фёдоров Ю.А., Андреев Ю.А., Тамбиева Н.С., Михайленко О.А. Метан и сульфидная сера в донных отложениях озера Байкал // Геохимия. 2019. Т. 64, № 4. С. 427–439.
24. Волков И.И. Геохимия серы в осадках океана. М.: Наука, 1984. 272 с.
25. Федоров Ю.А., Никаноров А.М., Тамбиева Н.С. Первые данные о распределении содержания биогенного метана в воде и донных отложениях оз. Байкал // Докл. АН РАН. 1997. Т. 353, № 3. С. 394–397.
26. Гарькуша Д.Н., Фёдоров Ю.А., Тамбиева Н.С., Андреев Ю.А., Аджиев Р.А. Распределение метана в водах озера Байкал // Водные ресурсы. 2023. Т. 50, № 2. С. 308–323.
27. Федоров Ю.А. Стабильные изотопы и эволюция гидросферы. М.: Истина, 1999. 370 с.

References

1. Fedorov Yu.A., Tambieva N.S., Gar'kusha D.N., Khoroshevskaya V.O. *Methane in aquatic ecosystems*. 2nd ed., add. Rostov-on-Don; Moscow: Rosizdat Publ.; 2007. 330 p. (In Russ.).
2. Trubnik R.G., Fedorov Yu.A. *Assessment of the ecological state of bottom sediments according to the triad of chemical and biological indicators*. Rostov-on-Don, Moscow: Bureau of Propaganda of the Rostov Writers' Organization Press; 2023. 120 p. (In Russ.).
3. Fedorov Yu.A., Gar'kusha D.N., Potapov E.G., Trubnik R.G. Gas composition of peloids of the Taman Peninsula. *Kurortnaya meditsina = Spa Medicine*. 2017;(3):26-33. (In Russ.).

4. Figura L.O., Commenga H.K. Methan in wasser der Riddashänsler Teiche. *Braunschw. Naturkd.* 1989;3(2):507-516.
5. Fedorov Yu.A., Kuznetsov A.N., Savitsky V.A., Talpa B.V., Golovkov I.V., Dotsenko N.V., Stanislavsky K.S., Gabova V.N. Features of formation and functioning of Lake Maly Liman as a natural and man-made system. *Inzhenernyi vestn. Dona = Engineering Bulletin of the Don*. 2022;(5). (In Russ.).
6. Fedorov Yu.A., Mikhailenko A.V., Dotsenko I.V., Kovalev E.A., Chepurnaya V.I., Dotsenko N.V., Gavrilova I. Yu., Bellinger O.Yu. Granulometric, elemental and isotopic composition of bottom sediments of lakes of mountainous areas as a reflection of transformations in their watersheds. *E3S Web Conf.* 2023;407:02009. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202340702009>.
7. Alekseeva E.M. *Greek colonization of the North-Western Caucasus*. Moscow: Nauka Publ.; 1991. 143 p. (In Russ.).
8. Fedorov Yu.A., Belyaev A.G. *Biogenic substances in the mixing zone of the Don River – the Sea of Azov*. Rostov-on-Don: Rostov State University, Infoservice Publ.; 2004. 108 p. (In Russ.).
9. Vyazkova O.E. Paleoreconstruction of the geomorphological situation of the ancient era in the vicinity of Cape Maly Utrish. *Historical and archaeological almanac of the Armavir Museum of Local Lore*. 1999;(5):52-58. (In Russ.).
10. Boldyrev V. L. Landslide type of shore. *Proceedings of the Institute of Oceanology*. 1957;21:118-132. (In Russ.).
11. Alekseev M.M., Khodyrev N.A. Landslide processes on the seashore between Anapa and Novorossiysk. *Materials of the Kharkov Branch of the Geographical Society of Ukraine*. 1973;(12):86-88. (In Russ.).
12. Lukyanchenko A.D., Shishkina D.Y. Comprehensive educational practice of students of geoecology of the Russian State University in SOL Limanchik: experience and prospects of development. *Environmental problems. A look into the future*. Proceedings of the 3rd Scientific and Practical Conference. Rostov-on-Don, 2006:136-137. (In Russ.).
13. Lukyanchenko A.D., Chikhachev A.S., Privalenko V.V. Hydrogeochemical features of lakes Abrau and Limanchik. *Environmental problems. A look into the future*. Proceedings of the Scientific and Practical Conference. Rostov-on-Don, 2004:93-94. (In Russ.).
14. Lukyanchenko A.D., Predeina L.M. Dynamics of salt composition in lakes Abrausky Limanchik and Abrau. *Environmental problems. A look into the future*. Proceedings of the 3rd Scientific and Practical Conference. Rostov-on-Don, 2006:131-133. (In Russ.).
15. Shishkina D.Yu., Yaroslavtseva A.V. Geoecological studies in the Limanchik salt area. *Environmental problems. A look into the future*. Proceedings of the 5th Scientific and Practical Conference with international participation, September 7-10, 2008. Rostov-on-Don: Rostizdat Publ.; 2008:527-531. (In Russ.).
16. Dotsenko N. V., Stanislavsky K. S., Savitsky V. A. Analytical review of retrospective studies of lakes Maly Liman and Abrau. *Environmental problems. A look into the future*. Rostov-on-Don, Taganrog: Southern Federal University Press; 20206:221-234. (In Russ.).
17. Alekin O.A. *Fundamentals of hydrochemistry*. Leningrad: Gidrometeoizdat Publ.; 1970. 444 p. (In Russ.).
18. Boeva L.V., ed. *Guidelines for the chemical analysis of land surface waters*. Rostov-on-Don: NOK Publ.; 2009. Part 1. 1037 p. (In Russ.).
19. Fedorov Y.A., Solodko D.F., Chepurnaya V.I., Dotsenko I.V., Talpa B.V., Levchenko S.V., Popov Y.V., Dmitrik L.Y. Physical and chemical properties, elemental and material snow composition in Rostov-on-Don. *E3S Web of Conferences*. 2021;265:02003. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202126502003>.
20. Gar'kusha D.N., Fedorov Yu.A., Letuchaya Yu.S., Nazarenko D.S. The first data on the level of methane content in water and bottom sediments of lakes Abrau, Limanchik and Maly Utrish. *Environmental problems. A look into the future*. Proceedings of the 6th Scientific and Practical Conference with international participation, September 5-8, 2010. Rostov-on-Don: Rostizdat Publ.; 2010:76-79. (In Russ.).
21. Fedorov Yu.A., Gar'kusha D.N., Shipkova G.V. Methane emission from peat deposits of raised bogs in Pskov oblast. *Geography and Natural Resources*. 2015;36(1):70-78.
22. Gar'kusha D.N., Fedorov Yu.A., Tambieva N.S., Krukier M.L., Kalmanovich I.V. Assessment of methane emissions by water bodies of the Rostov region. *Izv. vuzov. Sev.-Kavk. region. Estestv. nauki = Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science*. 2015;(3):83-89. (In Russ.).
23. Gar'kusha D. N., Fedorov Yu.A., Andreev Yu. A., Tambieva N. S., Mikhailenko O. A. Methane and sulfide sulfur in bottom sediments of Lake Baikal. *Geokhimiya = Geochemistry*. 2019;64(4):427-439. (In Russ.).
24. Volkov I.I. *Geochemistry of sulfur in ocean sediments*. Moscow: Nauka Publ.; 1984. 272 p. (In Russ.).
25. Fedorov Yu.A., Nikanorov A.M., Tambieva N.S. The first data on the distribution of the content of biogenic methane in water and bottom sediments of the lake Baikal. *Dokl. RAN = Reports of the Russian Academy of Sciences*. 1997;353(3):394-397. (In Russ.).
26. Gar'kusha D.N., Fedorov Yu.A., Tambieva N.S., Andreev Yu.A., Adzhiev R.A. Distribution of methane in the waters of Lake Baikal. *Vodnye resursy = Water Resources*. 2023;50(2):308-323. (In Russ.).
27. Fedorov Yu.A. *Stable isotopes and the evolution of the hydrosphere*. Moscow: Istina Publ.; 1999. 370 p. (In Russ.).

Информация об авторах

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

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

Ирина Владимировна Доценко – кандидат географических наук, доцент, кафедра физической географии, экологии и охраны природы, Институт наук о Земле.

Юрий Витальевич Попов – кандидат геолого-минералогических наук, доцент, кафедра общей и инженерной геологии, Институт наук о Земле.

Николай Витальевич Доценко – магистрант, кафедра физической географии, экологии и охраны природы, Институт наук о Земле.

Анна Владимировна Михайленко – кандидат географических наук, доцент, кафедра физической географии, экологии и охраны природы, Институт наук о Земле.

Information about the authors

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

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

Irina V. Dotsenko - Candidate of Science (Geography), Associate Professor, Department of Physical Geography, Ecology and Environment Protection, Institute of Earth Sciences.

Yuri V. Popov - Candidate of Science (Geology and Mineralogy), Associate Professor, Department of General and Engineering Geology, Institute of Earth Sciences.

Nikolay V. Dotsenko - Master's Degree Student, Department of Physical Geography, Ecology and Environment Protection, Institute of Earth Sciences.

Anna V. Mikhailenko - Candidate of Science (Geography), Associate Professor, Department of Physical Geography, Ecology and Environment Protection, Institute of Earth Sciences.

Статья поступила в редакцию 10.04.2024; одобрена после рецензирования 14.04.2024; принята к публикации 04.07.2024.
The article was submitted 10.04.2024; approved after reviewing 14.04.2024; accepted for publication 04.07.2024.

Научная статья
УДК 556.541; 543.3
doi: 10.18522/1026-2237-2024-3-132-140

ВНУТРИГОДОВАЯ ДИНАМИКА ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ВОДЫ В УСТЬЕ РЕКИ БАКСАН

Марина Анатольевна Шамарина

Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова, Нальчик,
Кабардино-Балкарская Республика, Россия
shamarinam@mail.ru

Аннотация. Представлены результаты исследования внутригодовой динамики химического состава воды в устье реки Баксан в 2023 г. Изучена динамика прозрачности, водородного показателя, минерализации, жесткости, перманганатной окисляемости, содержания макрокомпонентов (гидрокарбонаты, хлориды, сульфаты), нитритов, нитратов и соединений железа. По среднегодовым значениям вода исследуемого объекта имеет среднюю жесткость и относится к гидрокарбонатным пресным водам рек средней минерализации. Обнаружено превышение ПДК сульфатов, нитритов и соединений железа. Показано, что гидрохимический режим изучаемого водного объекта взаимосвязан с уровнем и термическим режимами, подвержен влиянию антропогенных факторов. Полученные данные необходимы для выявления закономерностей распределения веществ в природных геосистемах, расположенных в бассейне реки Малка, притоком первого порядка которой является река Баксан.

Ключевые слова: река Баксан, уровень режим, минерализация, жесткость, карбонаты, хлориды, сульфаты, нитриты, нитраты, соединения железа

Для цитирования: Шамарина М.А. Внутригодовая динамика химического состава воды в устье реки Баксан // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2024. № 3. С. 132–140.

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

Original article

INTRA-ANNUAL DYNAMICS OF THE CHEMICAL COMPOSITION OF WATER AT THE MOUTH OF THE BAKSAN RIVER

Marina A. Shamarina

Berbekov Kabardino-Balkarian State University, Nalchik, Kabardino-Balkarian Republic, Russia
hamarinam@mail.ru

Abstract. The article presents the results of a study of the intra-annual dynamics of the chemical composition of water at the mouth of the Baksan River in 2023. The intra-annual dynamics of transparency, pH, mineralization, hardness, permanganate oxidizability, content of macrocomponents (bicarbonates, chlorides, sulfates, nitrites, nitrates) and iron compounds were studied. According to average annual values, the water of the studied object has average hardness and belongs to the hydrocarbonate, fresh waters of rivers of average mineralization. An excess of the maximum permissible concentration for sulfates, nitrates and iron compounds was detected. It is shown that the hydrochemical regime of the studied water body is interconnected with level and thermal regimes and is influenced by anthropogenic factors. The data obtained are necessary to identify patterns of distribution of substances in natural geosystems located in the Malka River basin, of which the Baksan River is a first-order tributary.

© Шамарина М.А., 2024

Keywords: Baksan River, level regime, mineralization, hardness, carbonates, chlorides, sulfates, nitrites, nitrates, iron compounds

For citation: Shamarina M.A. Intra-Annual Dynamics of the Chemical Composition of Water at the Mouth of the Baksan River. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2024;(3):132-140. (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

Химический состав природных вод формируется под воздействием прямых (почвы, горные породы, испарение) и косвенных (рельеф, климат) факторов, а также искусственных, или антропогенных, факторов, связанных с деятельностью человека [1]. Реки являются естественными аккумуляторами веществ как природного происхождения, так и загрязняющих, возникающих в результате хозяйственной деятельности. Они транспортируются водными артериями по длине водотока, влияя на их химический состав и экологическое состояние водных экосистем [2].

Известно также, что притоки оказывают неоднозначное воздействие на химический состав рек, в которые они впадают. Химический состав и гидрохимический сток большой реки не являются суммой вкладов отдельных источников [3].

Изучение гидрохимического режима рек, протекающих на территории Кабардино-Балкарской Республики, позволяет оценить влияние различных групп факторов на формирование стока растворенных веществ. Река Баксан – один из крупных водных объектов, расположенных на территории Кабардино-Балкарии. Ее протяжённость – 173 км, площадь водосбора – 6800 км². В научной литературе большое внимание уделено исследованию загрязнения реки тяжелыми металлами и неорганическими соединениями азота [4–7]. Предшествующие результаты указывают на возможное ухудшение гидрохимического состава воды р. Баксан и на необходимость систематического контроля за уровнем содержания токсичных ингредиентов [8]. Вместе с тем имеется недостаток сведений об особенностях ионно-солевого состава в устье. Определение специфики происходящих в настоящее время изменений состояния устьевых областей рек с учетом региональных особенностей их функционирования и характера антропогенного воздействия является весьма актуальным [9].

Объектом исследования в данной работе является р. Баксан в её устьевой части. На кафедре биологии, геоэкологии и молекулярно-генетических основ живых систем Кабардино-Балкарского государственного университета ведется работа по комплексному изучению ландшафтов бассейна р. Малка с 2015 г. [10, 11]. Баксан является ее наиболее крупным притоком первого порядка, поэтому оценка изменчивости состояния и гидрохимического состава устьевых вод р. Баксан важна при изучении ландшафтной организации территории бассейна р. Малка.

Цель работы – изучить динамику изменения химического состава р. Баксан в устьевой части в 2023 г.

Материалы и методы исследования

Для выявления особенностей формирования гидрохимического состава воды в устье р. Баксан в 2023 г. ежемесячно нами отбирались пробы воды в пункте отбора, обозначенном на карте (рис. 1).

Пробы для исследования химического состава воды отбирали в соответствии с нормами, установленными ГОСТ Р 59024-202. Измерение температуры и прозрачности воды проводили по РД 52.24.496-2018. Определение содержания растворённых веществ (сухой остаток) проводили по методике ПНДФ 14.1:2.110-97, жёсткости – по ГОСТ 31954-2012 (метод А), перманганатной окисляемости – по методике ПНДФ 14.1:2:4.154-99, массовых концентраций карбонатов и гидрокарбонатов – по ГОСТ 31957-2012 (метод А.2), содержание хлоридов – аргентометрическим методом по РД 52.24.407-2006, сульфат-ионов – по ГОСТ 31940-2012 (метод 1). Массовую концентрацию нитритного азота определяли по РД 52.24.381-2017, содержание нитратов – по ГОСТ 33045-2014 (метод Д), массовую концентрацию соединений железа – по ГОСТ 4011-72. Данные о среднем ежемесячном расходе воды р. Баксан (гидропост с. Заюково) в 2023 г. предоставлены отделом гидрологии Высокогорного геофизического института.

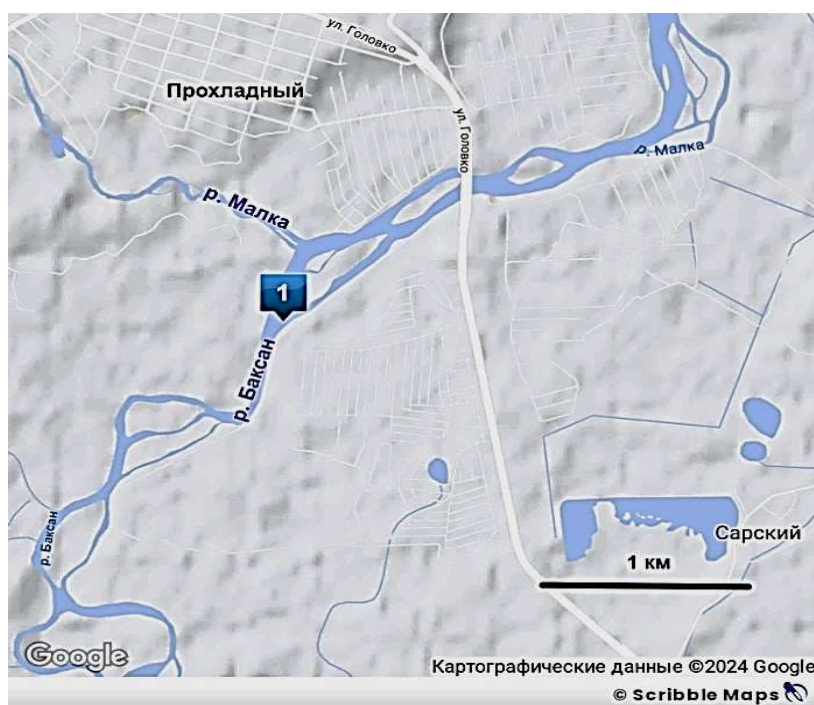


Рис. 1. Карта устьевое участка р. Баксан с указанием места отбора проб
 / Fig. 1. The map of the Baksan River section showing sampling location

Результаты исследования и их обсуждение

Баксан имеет смешанный тип питания, включающий грунтовую (35 %), снеговую (2 %), дождевую (29 %) и ледниковую (34 %) составляющие [12]. Водный режим р. Баксан характеризуется осенне-зимней меженью и продолжительным половодьем. В 2023 г. наибольший среднемесячный расход был в июле (76,3 м³/с), наименьший – в феврале (9,5 м³/с), среднегодовой расход составил 32,9 м³/с. Сравнение средних ежемесячных расходов за 2023 г. со средними ежемесячными расходами для среднего по водности года [12] показывает, что в 2023 г. ежемесячные расходы были несколько ниже средних значений (рис. 2). Наибольшие различия наблюдаются в период летнего половодья: в июле 2023 г. максимальный расход был на 16 % ниже, чем в аналогичный период среднего по водности года.

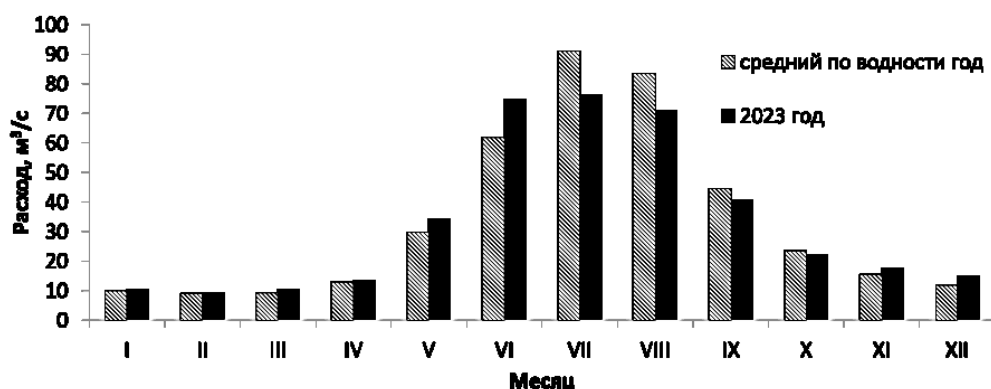


Рис. 2. Внутригодовая динамика среднего ежемесячного расхода р. Баксан
 / Fig. 2. Intra-annual dynamics of the average monthly flow of the Baksan River

В момент отбора проб измеряли температуру и прозрачность воды. Наивысших значений температура воды достигала в августе и составляла +20,1 °С (рис. 3а). Минимальные значения зафиксированы в декабре (+7,1 °С). Среднегодовая температура воды в устьевой части р. Баксан в 2023 г. составляла около +14,4 °С. В течение года наблюдаются устойчивые периоды нагревания или охлаждения речной воды. Сезонные изменения температуры воды в устьевой части р. Баксан соответствуют условиям умеренного климата территории, на которой она расположена.

Внутригодовая динамика изменения прозрачности речной воды зависит от количества поступающих в реку материалов эрозии, характера размывающей деятельности потока и его водного режима [13]. Резкое уменьшение прозрачности воды в устье р. Баксан началось в апреле вместе с подъемом уровня воды и началом дождевых паводков. Наименее прозрачной вода в исследуемом объекте была в августе (1,9 см). Повышение температуры воды, активизирующее развитие водных организмов, также способствовало снижению данного показателя. Мутной вода оставалась до сентября. Максимум прозрачности отмечался в период зимней межени: с октября по декабрь она превышала 35 см, наибольшее значение – на цилиндре Снеллена (рис. 3б).

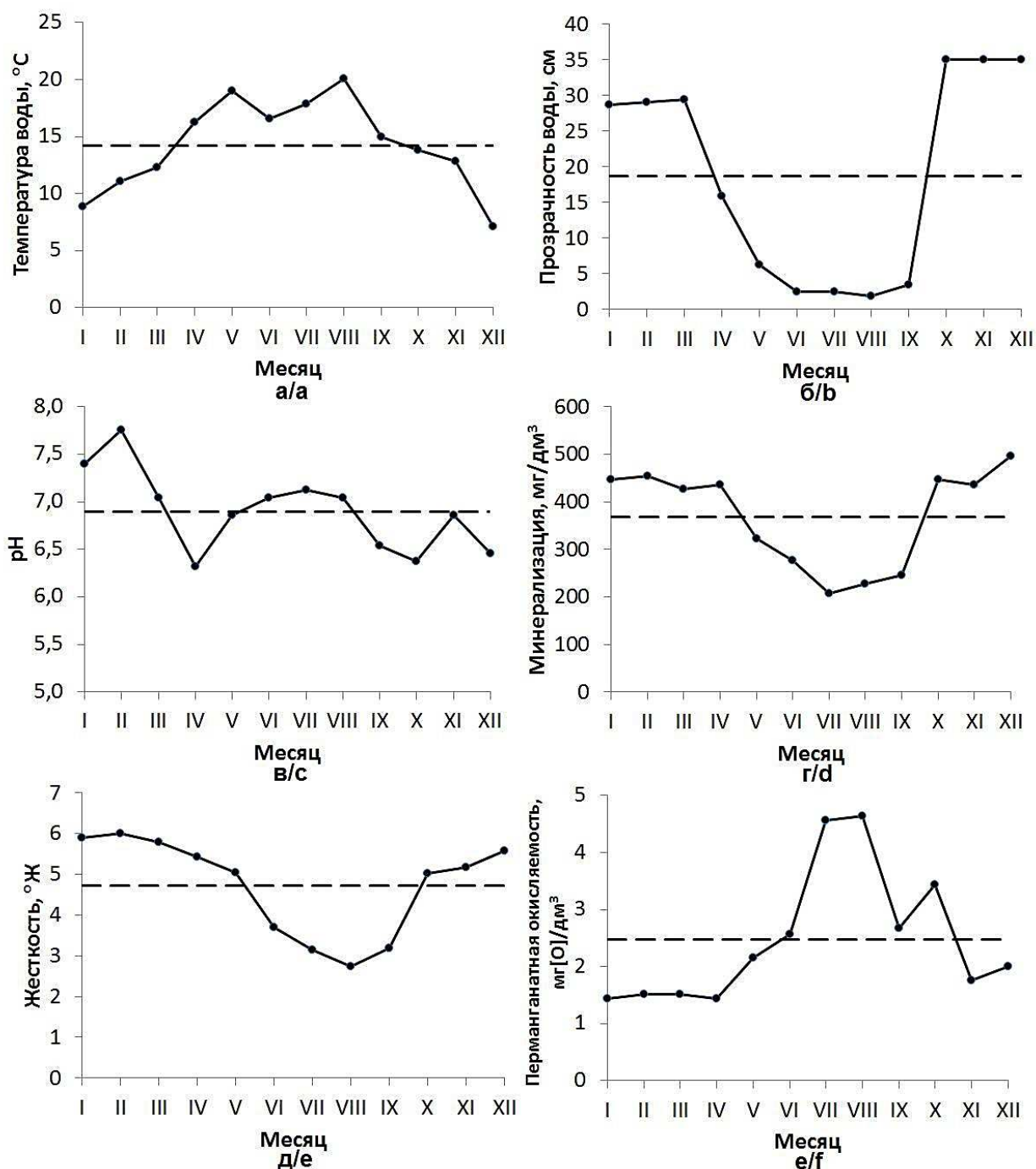


Рис. 3. Внутригодовая динамика температуры (а), прозрачности (б), водородного показателя (в), минерализации (г), жесткости (д), перманганатной окисляемости (е) воды в устье р. Баксан (пунктирная линия соответствует среднегодовому значению) / Fig. 3. Intra-annual dynamics of temperature (a), transparency (b), pH value (c), mineralization (d), hardness (e), permanganate oxidation (f) of water at the mouth of the Baksan River (the dotted line corresponds to the average annual value)

Измерение рН проводили в лабораторных условиях. В течение года водородный показатель воды в устье р. Баксан находился в диапазоне от 6,32 до 7,76 (рис. 3в). Наиболее кислой среда была в апреле в период половодья, максимум щелочности отмечается в феврале, в период зимней межени. Можно заметить, что внутригодовая динамика значений водородного показателя носит волнообразный характер. Среднегодовое значение рН составило 6,9. Результаты измерений позволяют отнести воду в устье р. Баксан по величине рН к нейтральным водам по классификации, приведённой в [1].

В течение года минерализация воды в устье р. Баксан подвергается существенным сезонным изменениям (рис. 3г). Она зависит в основном от типа питания реки и определяется суммарной концентрацией растворённых в воде веществ. Максимальное количество веществ, растворённых в воде исследуемого нами объекта, зафиксировано в период, когда питание реки осуществляется грунтовыми водами и расход один из наименьших, – в декабре (496 мг/дм^3), что соответствует водам повышенной минерализации. Меньше всего растворённых веществ обнаружено в пробе воды, взятой в июле, – 207 мг/дм^3 . Совпадение времени наступления минимума минерализации с максимумом расхода в реке и сравнительно большой амплитудой колебания растворённых солей позволяет отнести гидрохимический режим р. Баксан в устьевой части к восточноевропейскому типу. Среднегодовое значение минерализации воды составило 369 мг/дм^3 , что позволяет отнести её по классификации О.А. Алекина к группе рек со средней минерализацией [1].

Общая жёсткость воды обусловлена суммарным содержанием в ней ионов кальция и магния. По результатам исследований выявлены сезонные колебания этого показателя (рис. 3д). Общая жёсткость исследуемой воды достигала максимума в период зимней межени – в феврале ($6,0 \text{ }^\circ\text{Ж}$). Наиболее мягкой была вода проб, отобранных в период летнего половодья. Минимальное значение жесткости зафиксировано в августе ($2,74 \text{ }^\circ\text{Ж}$). Среднегодовое значение жесткости составило $4,73 \text{ }^\circ\text{Ж}$, что, согласно шкале, приведённой в [14], соответствует воде средней жесткости.

Показателем, характеризующим интегральную загрязненность воды, обусловленную содержанием органических веществ, является перманганатная окисляемость. Минимальные ее значения зафиксированы в январе и апреле ($1,44 \text{ мг[O]/дм}^3$). В мае – августе, с началом интенсивного подъема уровня воды в реке, переходом реки на поверхностное питание и постепенным прогревом речной воды, способствующим развитию микроорганизмов, продуцирующих органические вещества, значения перманганатной окисляемости росли, достигнув максимума в августе ($4,64 \text{ мг[O]/дм}^3$) (рис. 3е). Её среднегодовое значение составило $2,48 \text{ мг[O]/дм}^3$, что не превышает максимальных значений, установленных для питьевой воды.

Одним из главных компонентов ионно-солевого состава природных вод являются карбонат- и гидрокарбонат-ионы. Для расчета их содержания было проведено определение значений свободной и общей щелочности. Установлено, что свободная щелочность всех анализируемых проб воды равна нулю, что свидетельствует о том, что в составе исследуемой воды карбонаты отсутствуют или их количество меньше предела обнаружения используемой нами методики. На основании значений общей щелочности рассчитаны ежемесячные массовые концентрации гидрокарбонатов (рис. 4а). Наибольшими концентрациями гидрокарбонатных ионов были в период зимней и весенней межени, что объясняется невысоким расходом воды и преимущественно грунтовым питанием реки. Максимальное значение концентрации ионов HCO_3^- зафиксировано в феврале (194 мг/дм^3). В период половодья с переходом реки на поверхностное питание содержание кислых солей угольной кислоты в воде исследуемого объекта снижалось, достигнув минимума в сентябре (111 мг/дм^3). Смещение минимума концентраций с периода летнего половодья на сентябрь, вероятно, связано с обильными дождями, которые были в конце августа 2023 г.

К главным ионам химического состава природных вод относятся ионы хлора, источниками которых в природных водах являются магматические породы, содержащие хлористые минералы и соленосные отложения. Установлено, что концентрация хлоридов в анализируемых пробах невысока и подвержена сезонной изменчивости (рис. 4б). Наибольшее содержание ионов хлора обнаружено в меженные периоды. Максимальных значений концентрация ионов Cl^- достигла в мае ($21,09 \text{ мг/дм}^3$). В период с июня по сентябрь, во время половодья, содержание Cl^- уменьшилось, достигнув минимума в июле и августе ($5,36 \text{ мг/дм}^3$). Среднегодовая массовая концентрация Cl^- в 2023 г. составила $12,18 \text{ мг/дм}^3$. Содержание хлоридов в исследуемой воде значительно ниже ПДК для водных объектов рыбохозяйственного назначения.

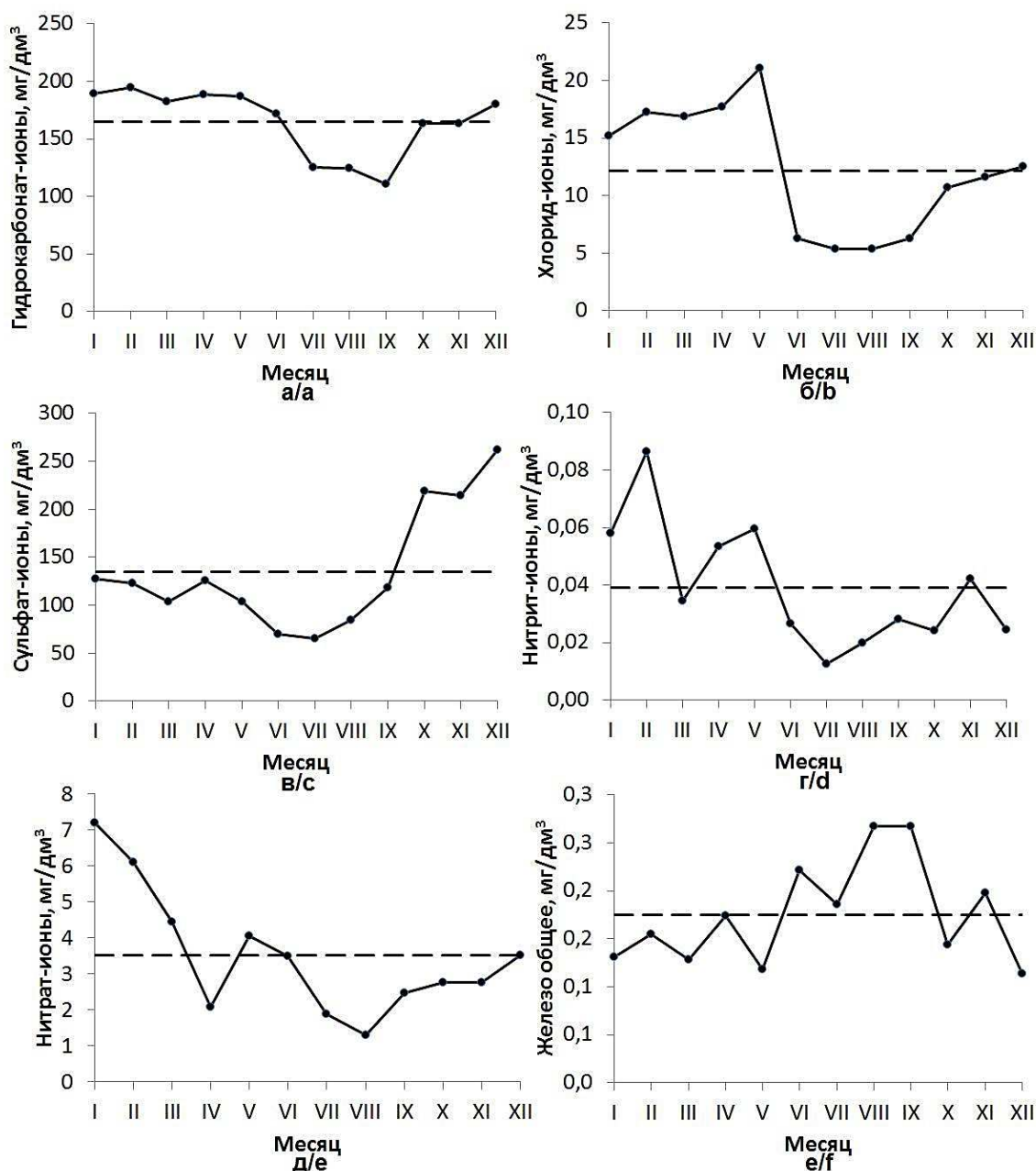


Рис. 4. Внутригодовая динамика концентрации гидрокарбонат-ионов (а), хлорид-ионов (б), сульфат-ионов (в), нитрит-ионов (г), нитрат-ионов (д), железа общего (е) в воде в устье р. Баксан (пунктирная линия соответствует среднегодовому значению) / Fig. 4. Intra-annual dynamics of the concentration of bicarbonate ions (a), chloride ions (b), sulfate ions (c), nitrite ions (d), nitrate ions (e), total iron (f) in water at the mouth of the Baksan River (the dotted line corresponds to the annual average)

Сульфат-ионы являются важнейшими анионами природной воды. Их появление в природных водах обусловлено контактом с гипсом, входящим в состав осадочных горных пород, процессами окисления самородной серы и сульфидов. Значительные количества сульфатов поступают в водные объекты в процессе отмирания организмов и окисления веществ растительного и животного происхождения, а также со сточными водами промышленных предприятий коммунально-бытового хозяйства и сельскохозяйственного производства [14]. Наибольшего значения концентрация сульфат-ионов в воде после стремительного роста, начавшегося в октябре, достигла в декабре (262 мг/дм^3) (рис. 4в), наименьшего – в июле (65 мг/дм^3). Среднегодовая концентрация сульфатов – 135 мг/дм^3 , что составляет 1,35 ПДК для водоемов, используемых для рыбохозяйственных целей.

Индикатором чистоты природных вод является концентрация соединений азота. Нитриты и нитраты относятся к биогенным веществам. Основным источником их появления в природной воде считаются сложные органические вещества, в основном белковой структуры, животного и растительного происхождения. Вместе с тем нитраты и нитриты могут появляться в природных водах и неорганическим путем. Значительное количество соединений азота может попадать в водные объекты с бытовыми, сельскохозяйственными и промышленными сточными водами [14].

Нитриты неустойчивы и в поверхностных водах под воздействием кислорода воздуха достаточно быстро окисляются до нитратов. Установлено, что наибольшего значения концентрация нитритов в воде исследуемого объекта достигла в феврале и составила $0,0863 \text{ мг/дм}^3$ (рис. 4г), наименьшего – в июле ($0,0127 \text{ мг/дм}^3$). Анализ полученных данных показывает, что концентрация ионов NO_2^- не зависит от расхода воды и может претерпевать изменения внутри периодов межени или половодья. Среднегодовая концентрация нитритного азота в исследуемой воде – $0,0392 \text{ мг/дм}^3$, что составляет 1,96 ПДК нитритов (в пересчете на азот) для водных объектов рыбохозяйственного значения.

Наибольшая концентрация нитратов в воде в устье р. Баксан зафиксирована в январе ($7,22 \text{ мг/дм}^3$) (рис. 4д). Минимальные значения отмечены в августе ($1,30 \text{ мг/дм}^3$). Среднегодовая концентрация нитратов составила $3,51 \text{ мг/дм}^3$, что значительно ниже ПДК, установленной для водоемов рыбохозяйственного назначения.

Некоторая неравномерность внутригодового распределения концентрации нитритов и нитратов обусловлена влиянием различных природных и антропогенных факторов [14]. Повышение содержания нитритов в зимний период указывает на усиление процессов биохимического разложения органических остатков в условиях дефицита кислорода. С августа наблюдался рост концентрации нитрит-ионов, связанный с протеканием процессов отмирания водных организмов и разложением органических остатков, а также с увеличением интенсивности процесса восстановления нитритов бактериями-денитрификаторами. Для нитратов наблюдалось уменьшение содержания в период с июня по август за счёт потребления водными растениями. Увеличение концентрации нитратов с сентября по декабрь обусловлено отмиранием водных организмов и распадом органических веществ. Максимальное содержание нитратов наблюдалось в зимний период. Повышение концентрации нитратов и нитритов в мае было связано со смывом минеральных азотсодержащих удобрений, внесенных в почву в этот период, в процессе сельскохозяйственной деятельности.

Наряду с соединениями азота к биогенным веществам относятся соединения железа. Основная масса неорганических соединений железа поступает в поверхностные воды в результате процессов эрозии горных пород и за счет поверхностного стока. В речной воде железо может находиться в ионной форме, а также в виде комплексных соединений, образованных с неорганическими и органическими веществами. Наибольшее содержание соединений железа зафиксировано в сентябре ($0,268 \text{ мг/дм}^3$), минимума концентрация ионов Fe^{2+} и Fe^{3+} достигла в мае ($0,118 \text{ мг/дм}^3$) (рис. 4е). Среднегодовая концентрация соединений железа составила $0,175 \text{ мг/дм}^3$, что соответствует 1,75 ПДК, установленной для водоемов рыбохозяйственного назначения.

Заключение

Проведенное исследование позволяет сделать вывод, что гидрохимический режим в устье р. Баксан имеет свои особенности формирования. Внутригодовая динамика ионного состава и основных физических показателей речной воды зависит от комплекса воздействующих факторов, таких как геохимические условия, водный режим, термический режим, жизнедеятельность водных организмов, антропогенная нагрузка. Установлено, что вода в устье р. Баксан относится к нейтральным водам средней минерализации и средней жесткости. Перманганатная окисляемость воды исследуемого объекта не превышает максимальных значений, установленных для питьевой воды. Наибольшие среднегодовые концентрации выявлены для гидрокарбонат- и сульфат-ионов. Содержание хлоридов в течение года остается невысоким. Содержание нитрит- и нитрат-ионов не имеет прямой взаимосвязи с водным режимом, зависит в большей степени от процессов жизнедеятельности водных организмов и антропогенных факторов, при этом концентрация нитрат-ионов не превышала установленных значений ПДК. Выявлено превышение

ПДК для водоемов, используемых для рыбохозяйственных целей, в среднем для сульфат-ионов – 1,35 ПДК, нитритов – 1,96 ПДК и для соединений железа – 1,75 ПДК.

Полученные результаты могут быть использованы для оценки качества воды в устье р. Баксан и выявления возможной трансформации её химического состава в будущем под воздействием различных факторов.

Список источников

1. Никаноров А.М. Гидрохимия. СПб.: Гидрометеиздат, 2001. 444 с.
2. Никаноров А.М., Брызгалов В.А., Решетняк О.С., Косменко Л.С., Кондакова М.Ю. Антропогенная трансформация экологического состояния и транспорт загрязняющих веществ по длине реки Кубани // Водное хозяйство России. 2013. № 2. С. 108–118.
3. Савичев О.Г. Влияние крупных притоков на химический состав вод средней Оби // Вестн. Томского гос. ун-та. 2010. № 340. С. 222–227.
4. Жинжакова Л.З., Чередник Е.А. Исследование воды реки Баксан, протекающей вблизи территории, подверженной техногенному влиянию многолетних отходов горного производства // Modern Science. 2022. № 10. С. 15–19.
5. Гурбанов А.Г., Винокуров С.Ф., Богатиков О.А., Лексин А.Б., Цуканова Л.Е., Шевченко А.В., Дударов З.И., Гурбанова О.А. Новые данные о геохимических особенностях вод реки Баксан района деятельности Тырныаузского вольфрамо-молибденового комбината (Кабардино-Балкарская Республика) // Вестн. Владикавказского науч. центра. 2017. № 1. С. 46–57.
6. Дреева Ф.Р., Реутова Н.В., Реутова Т.В. Оценка загрязненности реки Баксан (Центральный Кавказ) и ее притоков микроэлементами // Изв. Кабардино-Балкарского науч. центра РАН. 2019. № 5 (91). С. 38–46.
7. Атабиева Ф.А., Геккиева С.О. Уровни содержания и сезонная изменчивость соединений тяжелых металлов в реках Терек, Малка и Баксан // Современные проблемы геологии, геофизики и геоэкологии Северного Кавказа (ГЕОКАВКАЗ 2021): материалы XI Всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием М.: Ин-т истории естествознания и техники им. С.И. Вавилова, 2021. С. 289–293.
8. Воробьева Т.И., Жинжакова Л.З., Чередник Е.А. Динамика содержания токсичных загрязняющих веществ в водах рек Баксан и Черек // Изв. Кабардино-Балкарского науч. центра РАН. 2011. № 5 (43). С. 49–56.
9. Брызгалов В.А., Никаноров А.М., Косменко Л.С., Решетняк О.С. Устьевые экосистемы крупных рек России: антропогенная нагрузка и экологическое состояние. Ростов н/Д.: Изд-во ЮФУ, 2015. 164 с.
10. Шагин С.И., Шамарина М.А., Татаренко Н.В. Геоэкологическая характеристика участка реки Малка от города Прохладный до устья // Вестн. Воронежского гос. ун-та. Серия: География. Геоэкология. 2020. № 3. С. 72–77.
11. Шамарина М.А., Квашин В.А., Акаев А.Р. Изучение водного и уровенного режимов реки Малка в период 2018–2022 гг. // Водные ресурсы в условиях глобальных вызовов: экологические проблемы, управление, мониторинг. Новочеркасск: Лик, 2023. Т. 2. С. 164–170.
12. Шелестова Н.А., Сарсоматьян С.М. Гидрологический режим реки Баксан на участке ремонта берегоукрепительного сооружения // Мелиорация и водное хозяйство: материалы Всерос. науч.-практ. конф., посвящённой 110-летию первого выпуска инженеров-мелиораторов в России. Новочеркасск: Лик, 2023. С. 148–154.
13. Давыдов Л.К., Дмитриева А.А., Конкина Н.Г. Общая гидрология. Л.: Гидрометеиздат, 1973. 465 с.
14. Никаноров А.М., Иваник В.М. Словарь-справочник по гидрохимии и качеству вод суши (понятия и определения). Ростов н/Д.: Ин-т водных проблем РАН, 2014. 548 с.

References

1. Nikanorov A.M. *Hydrochemistry*. Saint Petersburg: Gidrometeoizdat Publ.; 2001. 444 p. (In Russ.).
2. Nikanorov A.M., Bryzgalo V.A., Reshetnyak O.S., Kosmenko L.S., Kondakova M.Yu. Anthropogenic transformation of the ecological state and transport of pollutants along the length of the Kuban River. *Vodnoe khozyaistvo Rossii = The Water Industry of Russia*. 2013;(2):108-118. (In Russ.).
3. Savichev O.G. The influence of large tributaries on the chemical composition of the waters of the Middle Ob. *Vestn. Tomskogo gos. un-ta = Bulletin of Tomsk State University*. 2010;(340):222-227. (In Russ.).
4. Zhinzhakova L.Z., Cherednik E.A. Study of the water of the Baksan River, flowing near an area subject to the technogenic influence of long-term mining waste. *Modern Science*. 2022;(10):15-19. (In Russ.).
5. Gurbanov A.G., Vinokurov S.F., Bogatnikov O.A., Leksin A.B., Tsukanova L.E., Shevchenko A.V., Dudarov Z.I., Gurbanova O.A. New data on the geochemical features of the waters of the Baksan River in the

area of activity of the Tyrnauz tungsten-molybdenum plant. *Vestn. Vladikavkazskogo nauch. tsentra = Bulletin of the Vladikavkaz Scientific Center*. 2017;(1):46-57. (In Russ.).

6. Dreeva F.R., Reutova N.V., Reutova T.V. Assessment of pollution of the Baksan River (Central Caucasus) and its tributaries with microelements. *Izv. Kabardino-Balkarskogo nauch. tsentra RAN = News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2019;(5):38-46. (In Russ.).

7. Atabieva F.A., Gekkieva S.O. Levels of content and seasonal variability of heavy metal compounds in the Terek, Malka and Baksan rivers. *Modern problems of geology, geophysics and geoecology of the North Caucasus (GEOCAUCAZ 2021)*. Materials of the XI All-Russian Scientific and Technical Conference with international participation. Moscow: Vavilov Institute of History of Natural Sciences and Technology Press; 2021:289-293. (In Russ.).

8. Vorobyova T.I., Zhinzhakova L.Z., Cherednik E.A. Dynamics of the content of toxic pollutants in the waters of the Baksan and Cherek rivers. *Izv. Kabardino-Balkarskogo nauch. tsentra RAN = News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2011;(5):49-56. (In Russ.).

9. Bryzgalov V.A., Nikanorov A.M., Kosmenko L.S., Reshetnyak O.S. *Estuarine ecosystems of large rivers of Russia: anthropogenic load and environmental condition*. Rostov-on-Don: Southern Federal University Press; 2015. 164 p. (In Russ.).

10. Shagin S.I., Shamarina M.A., Tatarenko N.V. Geoecological characteristics of the section of the Malka River from the city of Prokhladny to the mouth. *Vestn. Voronezhskogo gos. un-ta. Seriya: Geografiya. Geoekologiya = Bulletin of Voronezh State University. Series: Geography. Geoecology*. 2020;(3):72-77. (In Russ.).

11. Shamarina M.A., Kvashin V.A., Akaev A.R. Study of water and level regimes of the Malka River in the period 2018 - 2022. *Water resources in the context of global challenges: environmental problems, management, monitoring*. Novochoerkassk: Lik Publ.; 2023;2:164-170. (In Russ.).

12. Shelestova N.A., Sarsomatyán S.M. Hydrological regime of the Baksan River at the site of repair of bank protection structures. *Land reclamation and water management*. Materials of the All-Russian Scientific and Practical Conference. Novochoerkassk: Lik Publ.; 2023:148-154. (In Russ.).

13. Davydov L.K., Dmitrieva A.A., Konkina N.G. *General hydrology*. Leningrad: Gidrometeoizdat Publ.; 1973. 465 p. (In Russ.).

14. Nikanorov A.M., Ivanik V.M. *Dictionary of hydrochemistry and quality of land waters (concepts and definitions)*. Rostov-on-Don: Institute of Water Problems of the Russian Academy of Sciences Press; 2014. 548 p. (In Russ.).

Информация об авторе

М.А. Шамарина – аспирант кафедры биологии, геоэкологии и молекулярно-генетических основ живых систем.

Information about the author

M.A. Shamarina - Postgraduate Student, Department of Biology, Geoecology and Molecular-Genetic Foundations of Living Systems.

*Статья поступила в редакцию 27.02.2024; одобрена после рецензирования 24.06.2024; принята к публикации 04.07.2024.
The article was submitted 27.02.2024; approved after reviewing 24.06.2024; accepted for publication 04.07.2024.*

БИОЛОГИЧЕСКИЕ НАУКИ

BIOLOGICAL SCIENCES

Научная статья

УДК 584.394(479.2224)

doi: 10.18522/1026-2237-2024-3-141-150

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ВИДОВ РАСТЕНИЙ ПО ФЛОРИСТИЧЕСКИМ РАЙОНАМ БАСЕЙНА РЕКИ АРГУН

Эльза Шарановна Дудагова¹, Муса Анасович Тайсумов^{2✉};

Маржан Абул-Межидовна Астамирова³, Элина Руслановна Байбатырова⁴

^{2, 3, 4} Академия наук Чеченской Республики, Грозный, Чеченская Республика, Россия

^{1, 2, 3, 4} Чеченский государственный педагогический университет, Грозный, Чеченская Республика, Россия

^{2, 3} Комплексный научно-исследовательский институт им. Х.И. Ибрагимова РАН, Грозный,

Чеченская Республика, Россия

¹ dudagova@mail.ru

² musa_taisumov@mail.ru✉

³ astamirova@bk.ru

⁴ elina-76-76@mail.ru

Аннотация. Рассматривается флора бассейна реки Аргун в пределах Чеченской Республики. Одним из числа важных направлений флористических исследований является решение вопроса о положении исследуемой флоры в системах ботанико-географического районирования, разработанных для территории республик Восточного и Северного Кавказа.

Ботанико-географическое районирование основывается не только на количественных показателях, но и на составе флористических комплексов той или иной территории, большей частью – на локализации ареалов эндемичных и реликтовых видов, придающих тому или иному комплексу оригинальность.

В результате анализа впервые проведено детальное районирование территории, занятой различными фитоценозами, с выделением 6 ботанико-географических районов.

Ключевые слова: флора, флористические районы, бассейн реки Аргун

Для цитирования: Дудагова Э.Ш., Тайсумов М.А., Астамирова М.А.-М., Байбатырова Э.Р. Распределение видов растений по флористическим районам бассейна реки Аргун // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2024. № 3. С. 141–150.

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

Original article

DISTRIBUTION OF PLANT SPECIES BY FLORISTIC REGIONS OF THE ARGUN RIVER BASIN

Elza Sh. Dudagova¹, Musa A. Taisumov^{2✉}, Marzhan A.-M. Astamirova³, Elina R. Baibatyrova⁴

^{2, 3, 4} Academy of Sciences of the Chechen Republic, Grozny, Chechen Republic, Russia

^{1, 2, 3, 4} Chechen State Pedagogical University, Grozny, Chechen Republic, Russia

^{2, 3} Ibragimov Complex Institute of the Russian Academy of Sciences, Grozny, Chechen Republic, Russia

© Дудагова Э.Ш., Тайсумов М.А., Астамирова М.А.-М., Байбатырова Э.Р., 2024

¹ dudagova@mail.ru

² musa_taisumov@mail.ru✉

³ astamirova@bk.ru

⁴ elina-76-76@mail.ru

Abstract. The article is devoted to the flora of the Argun River basin within the Chechen Republic. One of the important areas of floristic research is solving the issue of the position of the flora under study in botanical-geographical zoning systems developed for a particular territory, in particular, for the territory of the republics of the Eastern Caucasus and the Northern Caucasus.

Botanical-geographical zoning is based not only on quantitative indicators, but also on the composition of floristic complexes of a given territory, mostly on the localization of habitats of endemic and relict species, which give this or that complex originality.

As a result of the analysis, a fractional zoning of the territory occupied by various phytocenoses was carried out for the first time, identifying 6 botanical-geographical regions.

Keywords: flora, floristic regions, Argun River basin

For citation: Dudagova E.Sh., Taisumov M.A., Astamirova M.A.-M., Baibatyrova E.R. Distribution of Plant Species by Floristic Regions of the Argun River Basin. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2024;(3):141-150. (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

Региональные естественные флоры, занимающие территории, ограниченные природными физико-географическими границами, входят в число основных объектов сравнительной флористики. К таким территориям относятся в том числе бассейны рек, водоразделы которых служат природными барьерами, затрудняющими во многих случаях обмен генетическим материалом между изолированными популяциями видов, что способствует видообразовательным процессам.

Изучению региональных флор бассейнов рек на территории российского Кавказа посвящено достаточно много работ [1–7]. Эта проблема остается весьма актуальной, поскольку каждая такая флора имеет свою историю, связанную с миграционными и видообразовательными процессами, познание которых позволяет внести существенный вклад в моделирование флорогенеза более крупных территорий, в частности Большого Кавказа. С другой стороны, подобные исследования вносят свой вклад в решение более глобальной проблемы современности – изучения и сохранения биоразнообразия.

Флора бассейна реки Аргун имеет черты оригинальности, выражающиеся в наличии локальных эндемиков и субэндемиков, становление которых связано с этой территорией, гляциальных и ксеротермических реликтов, свидетельствующих о миграционных процессах, происходивших в историческом развитии флоры. Получение аналитических данных о таксономическом составе флоры, соотношении флороценоэлементов, биоморф и геоэлементов позволяет внести существенный вклад в проблему познания региональных флор, что актуально для сравнительной флористики. В прикладном аспекте результаты исследования послужат основой для рационального использования растительных ресурсов и организации охраны эндемичных и реликтовых видов.

Цель работы – определение видового состава, его детальный анализ и изучение территориального расположения флористических комплексов и элементов флоры бассейна реки Аргун.

Материалы и методы

Река Аргун является самой крупной в бассейне Сунжи. Она берёт начало на Главном Кавказском хребте, у вершины Чокисмта-Матура (3189,7 м) на территории Грузии (историческая область Хевсуретия). Перед пересечением Бокового хребта принимает крупный правый приток р. Андаки (протяженность – 31 км), истоки которой находятся также на Главном хребте, у вершины Мал. Барбало (3136 м). Длина р. Аргун – 148 км, общая площадь бассейна – 3390 км². Она впадает в р. Сунжа (правый приток р. Терек) (рис. 1).

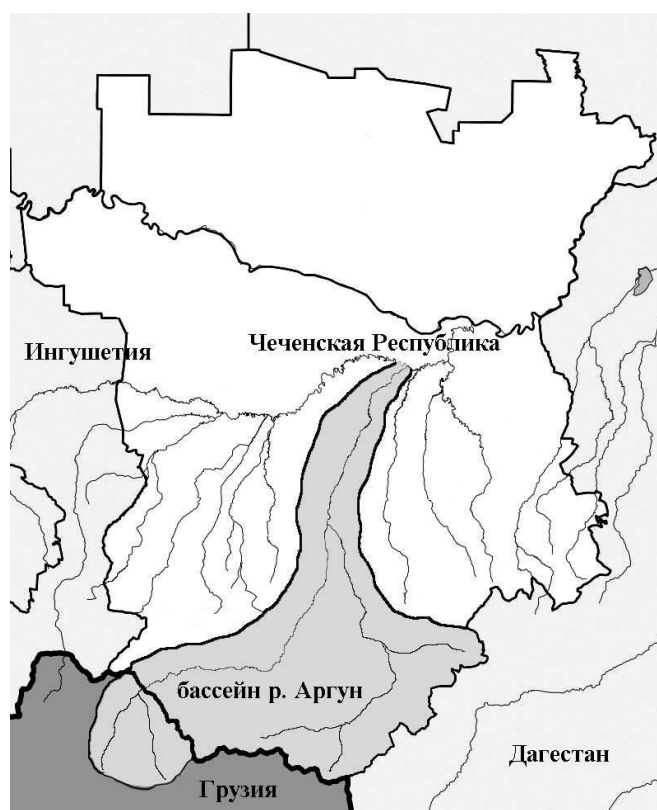


Рис. 1. Положение бассейна реки Аргун на территории Чеченской Республики и Грузии
/ Fig. 1. The position of the Argun River basin on the territory of the Chechen Republic and Georgia

Объект исследования – флора бассейна реки Аргун (рис. 2). Предмет исследования – таксономический, ценотический, биоморфологический и хорологический состав флоры, флористические комплексы как основа флористического районирования, фитосозологическая и утилитарная составляющие флоры. Проведены экспедиционные исследования по выявлению видового состава, сбор гербарного материала (собрано более 2000 экземпляров) в различных флористических районах исследуемой территории в период с 2015 по 2023 г., анализ гербарных фондов и литературных источников. Обработаны гербарные фонды Ботанического института им. В.Л. Комарова РАН (LE), Чеченского государственного университета, личный гербарий проф. Тайсумова. Аналитические параметры устанавливались путём стандартного флористического анализа – систематического, эколого-ценотического, биоморфологического и хорологического. Флористическое районирование бассейна реки Аргун основано на секторальном разделении территории по растительным поясам с последующей обработкой флористических списков методом математической статистики с определением коэффициентов сходства и построением дендритов. Латинские названия приводятся в соответствии с [8] и базой данных International Plant Name Index (IPNI), кроме названий таксонов в ранге рода (*Apterigia*, *Dolichorrhiza*, *Tithymalus* и др.) [9].

Для сравнительной характеристики флористических списков районов бассейна реки Аргун нами найдены коэффициенты флористического сходства Жаккара и Сёренсена – Чекановского. По этим коэффициентам рассчитаны алгоритмы максимального корреляционного пути и построены дендриты с корреляционными плеядами разных уровней (рис. 3, 4).

Коэффициенты сходства Жаккара и Сёренсена – Чекановского вычисляются по формулам: $K_j = c/(d-c)$, $K_{sc} = 2c/d$, где c – число видов, общих для двух флор; $d = a+b$ – суммарное число видов флор двух районов (a – число видов одного района; b – число видов другого района).

Растительный покров лесного пояса (экологическая группа) мало изучен. Вся имеющаяся информация содержится в работах фитоценологического и флористического характера. Указаны типичные представители лесного пояса, среди которых широко представлены реликты: *Huperzia selago*, *Lycopodium annotinum*, *Selaginella helvetica*, *Equisetum hyemale*, *Polystichum braunii*, *Phyllitis scolopendrium*, *Taxus baccata*, *Actaea spicata*, *Polystichum aculeatum*, *Helleborus caucasicus*, *Oberna multifida*, *Acer laetum*, *Hedera pastuchovii* и др.

Результаты и их обсуждение

Наличие на изучаемой территории флористических комплексов с разным набором флорцено-нотипов, вертикальной поясности, показывающей закономерные изменения состава флоры с увеличением высоты над уровнем моря, а также проявление эндемизма ставят вопросы о проведении флористического районирования территории с целью выделения фитохорионов ранга района, показывающих особенности флористического состава.

При проведении флористического районирования необходимо определить положение исследуемой флоры в системе фитохорионов земного шара. Для этого нами использованы схемы, разработанные глобально до подобластей в работе [10], а для территории Российской Федерации – в [11]. Выделение округов в пределах Кавказа принято по А.А. Гроссгейму [12]. Положение исследуемой флоры в системе флористического районирования земного шара определено следующим образом: Голарктическое царство, Древнесредиземноморское подцарство, Макаронезийско-Средиземноморская область, Северо-Средиземноморская подобласть, Кавказская провинция, Терский округ.

В системах дробного районирования Кавказа положение изучаемой территории оценивается по-разному. На карте районов флоры Кавказа [13] вся изучаемая территория находится в пределах Ассо-Аргунского района. В схеме флорогенетических районов Северного Кавказа [9] проходят границы трёх из них – Чечено-Осетинского, Чеченского и Верхне-Сунженского. Нами на исследуемой территории выделено 6 районов (рис. 2).

Нижне-Аргунский район (Н-А). Здесь встречаются 560 видов, из которых 392 характерны только для этого района (*Alcea rugosa* Alef., *Achillea nobilis* L., *Alyssum tortuosum* Waldst. & Kit. ex Willd. C.A. Mey., *Artemisia vulgaris* L., *Chondrilla juncea* L., *Clematis lathyrifolia* Besser ex Rchb., *Dipsacus laciniatus* L., *Equisetum telmateia* Ehrh., *Lathyrus aphaca* L., *Melandrium album* (Mill.) Garcke, *Paeonia tenuifolia* L., *Phalaroides arundinacea* (L.) Rauschert, *Typha minima* Funck, *Scrochloa dura* (L.) P. Beauv., *Stipa lessingiana* Trin. & Rupr., *Thalictrum flavum* L., *Ulmus glabra* Huds., *Viscum album* L., *Xeranthemum annuum* L. и многие другие). Также широко распространены плюрирегиональные виды (*Abutilon theophrasti* Medik., *Amaranthus retroflexus* L., *Capsella bursa-pastoris* (L.) Medik., *Chenopodium glaucum* (L.) S. Fuentes, Uotila & Borsch, *Echinochloa crusgalli* (L.) P. Beauv., *Lemna minor* L., *Myosurus minimus* L., *Setaria viridis* (L.) P. Beauv., *Vaccaria hispanica* (Mill.) Rauschert, *Verbena officinalis* L. и др.) и адвентивные (*Chamaesice humifusa* Willd., *Commelina communis* L., *Galinsoga parviflora* Cav., *Negundo aceroides* L., *Oenothera biennis* L., *Solidago canadensis* L., *Xanthium spinosum* L. и др.). Эндемичных видов нет. На территории района находятся реликтовые участки ареалов двух гляциальных реликтов (*Equisetum fluviatile* L. и *Hel-leborus caucasicus* A. Braun) [14].

Хайлазамский район (Хайл) насчитывает 436 видов, среди которых специфичных, встречающихся только в этом районе – 55 (*Phegopteris connectilis* (Michx.) Watt, *Phyllitis scolopendrium* (L.) Newman, *Taxus baccata* L., *Milium effusum* L., *Glyceria nemoralis* (R. Uechtr.) R. Uechtr. & Korn., *Melica picta* K. Koch, *Scirpus sylvaticus* L., *Scilla siberica* Haw., *Polygonatum multiflorum* (L.) All., *Convallaria transcaucasica* L., *Tamus communis* L., *Moehringia trinervia* (L.) Clairv., *Scutellaria altissima* L. и др.). Эндемичных видов нет, из реликтовых – три гляциальных (*Hablitzia tamnoides* M. Bieb., *Hordelymus europaeus* (L.) Harz, *Hypopitys monotropa* Crantz) и один ксеротермический (*Ostrya carpinifolia* Scop.) [14].

Итум-Калинский район (Ит-Кал) занимает территорию одноимённой аридной котловины. Флора района насчитывает 286 видов, из которых только в этом районе встречаются 69, значительная часть которых представлена ксерофитами. Среди них – *Astracantha denudata* Steven, *Botriochloa ischaetum* (L.) Keng, *Clematis integrifolia* L., *Cotynus coggygria* Scop., *Dianthus daghestanicus* Kharadze, *Ephedra procera* Fisch. & C.A. Mey., *Gypsiphila acutifolia* Fisch. ex Spreng., *Hedysarum biebersteinii* Zertova, *Hyssopus angustifolius* M. Bieb., *Linum alexeenkoanum* E. Wulff, *Paliurus spina-christi* Mill., *Polygala sosnowskyi* Kem.-Nath., *Potentilla arenaria* P. Gaertn., B. Mey. & Scherb., *Psephellus prokhanovii* (Galushko) Czerep., *Rhamnus tortuosa* Sommier & Levier, *Scleranthus uncinatus* Schur, *Spiraea hypericifolia* L., *Stipa caucasica* Schmalh., *Teucrium nuchense* K. Koch, *Thymus daghestanicus* Klovov & Des.-Shost., *Vincetoxicum funebre* Boiss. & Kotschy, *Zosima orientalis* (Vent.) Link и др. Один стеноэндемик – *Sedum argunense* Galushko и один суб-эндемик – *Jurinea marjanae* Taisumov et Astamirova. Реликтовых видов – 10, из них обитающих

только на территории района – 8: *Celtis glabrata* Steven ex Planch., *Cerasus incana* (Pall.) Spach, *Colutea orientalis* Mill., *Fumana procumbens* (Dunal) Gren. & Godr., *Medicago daghestanica* Rupr. ex Boiss., *Notholaena maranthae* (L.) K. H. Shing, *Omphalodes rupestris* Rupr. ex Boiss., *Xanthobrychys majorovii* (Grossh.) Galushko, ещё два вида – общих с Кенхийским районом – *Juniperus oblonga* M. Bieb. и *Scabiosa rotata* (M. Bieb.) Greuter & Burdet [14].

Кенхийский район (Кенх). Здесь насчитывается 465 видов, из которых специфичных – 60 (*Agrostis vinealis* Schreb., *Allium kunthianum* Vved., *Asperula albovi* Manden., *Campanula andina* Rupr., *Cephalaria media* Litv., *Dianthus awaricus* Kharadze, *Draba scabra* C.A. Mey., *Erodium fumarioides* Steven, *Festuca daghestanica* (Tzvelev) E.B. Alexeev, *Hypericum asperuloides* Gzern.Turcz., *Orchis simia* Lam., *Pedicularis daghestanica* Bonati, *Petrocoma hoefftiana* (Fisch. ex C.A. Mey.) Rupr., *Polystichum aculeatum* (L.) Roth, *Potentilla ghalgana* Juz., *Pyrethrum daghestanicum* Rupr. ex Boiss., Flerov, *Rhamnus depressa* Grubov, *Scutellaria oreophila* Grossh., *Sedum stoloniferum* S.G. Gmel., *Stipa daghestanica* Grossh., *Valeriana daghestanica* Rupr. ex Boiss., *Vincetoxicum hirundinaria* Medik., *Woodisia fragilis* (C.A. Mey.) J. Sm. и др.). Стеноэндемиков нет, субэндемиков – 4 вида (*Alyssum andinum* Rupr., *Campanula fedorovii* Kharadze, *Psephellus andinus* Galushko & Alieva, *Sympyandra galushkoi* Taisumov et Teimurov). Один гляциальный реликт (*Drosera rotundifolia* L.), два ксеротермических, уже упоминавшихся ранее, общих с Итум-Калинским районом (*Juniperus oblonga* M. Bieb. и *Scabiosa rotata* (M. Bieb.) Greuter & Burdet) [14].

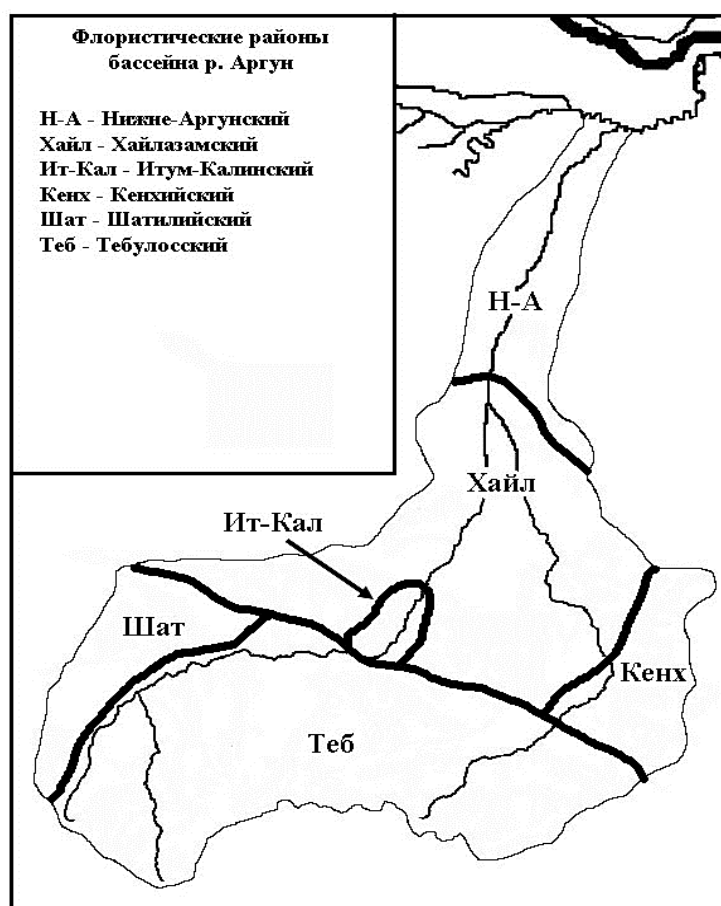


Рис. 2. Флористические районы бассейна реки Аргун / Fig. 2. Floristic areas of the Argun River basin

Шатлийский район (Шат). Общее количество видов – 596, специфичных – 85 (*Alopecurus tiflisiensis* (G. Westb.) Tzvelev, *Betonica ossetica* (Bornm.) Chinth., *Cerinthe caucasica* ssp. *Caucasica* Hadac, *Colpodium versicolor* (Steven) Schmalh., *Draba mollissima* Steven, *Dryopteris assimilis* S. Walker, *Fritillaria latifolia* Willd., *Galeopsis bifida* Boenn., *Helianthemum nitidum* Clementi, *Hermannium monorchis* (L.) R. Br., *Luzula multiflora* (Ehrh.) Lej., *Oberna wallichiana* (L.) Ikonn., *Peucedanum pschawicum* Boiss., *Popygala amoenissima* Jacq., *Polystichum lonchitis* (L.) Roth,

Potentilla nivea L., *Primula auriculata* Lam., *Ranunculus oxyspermus* Willd., *Sagina procumbens* L., *Saxifraga adenophora* K. Koch, *Stellaria persica* Boiss., *Thesium alpinum* L. и др.). Один стеноэндемик (*Tragopogon otschiaurii* Kuth) и четыре субэндемика (*Campanula charadzeae* Grossh., *Festuca primae* E.B. Alexeev, *Gentianella poretzkyi* Tzvelev, *Scrophularia charadzeae* Kem.-Nath., *Scutellaria leptostegia* Juz.). Ареалы первых трёх видов заходят и в Тебулосский район [14].

Тебулосский район (Теб). Флора включает 604 вида, из которых 83 характерны только для него (*Agrostis lazica* Balansa, *Alchemilla chlorosericea* (Buser) Juz., *Alopecurus tuscheticus* Trautv., *Astragalus supinus* C.A. Mey. ex Bunge, *Atropa caucasica* Kreyer, *Botrychium lunaria* (L.) Sw., *Dianthus imereticus* (Rupr.) Schischk., *Draba bruniifolia* Steven, *Dryopteris oreades* Fomin, *Geranium kemulariae* Kharadze, *Isatis caucasica* (Rupr.) N. Busch, *Juncus alpino-articulatus* Chaix, *Potentilla foliosa* Sommier & Levier ex R. Keller, *Primula bayernii* Rupr., *Pseudobetckea caucasica* (Boiss.) Lincz., *Ranunculus brachylobus* Boiss. & Hohen., *Saxifraga subverticillata* Boiss., *Scrophularia minima* M. Bieb., *Silene pygmaea* Adams, *Symphyoloma graveolens* C.A. Mey., *Vavilovia formosa* (Steven) Fed., *Viola oreades* M. Bieb. и др.). В районе – три стеноэндемика (*Erysimum subnivale* Prima, *Podospermum grigorashvili* Sosn., *Ranunculus tebulosicus* Prima). Из субэндемиков характерны *Veronica bogosensis* Tumadz. и *Poa primae* Tzvelev. Заходят в Шатилийский район *Campanula charadzeae* Grossh., *Festuca primae* E.B. Alexeev, *Gentianella poretzkyi* Tzvelev. Имеются также три ксеротермических реликта (*Sorbus graeca* (Spach) Lodd. ex Schauer, *S. torminalis* (L.) Crantz, *Vaccinium arctostaphylos* L.) [14].

Соотношение количества видов флористических районов, в том числе специфических, эндемичных и реликтовых, приведено в табл. 1. Из неё следует, что больше всего видов в высокогорных районах Тебулосском и Шатилийском. Они же и самые оригинальные по наличию эндемичных видов. Менее оригинальными являются равнинные и низкогорные районы (Нижне-Аргунский и Хайлазанский), где нет эндемичных видов. Особое место в этом ряду занимает Итум-Калинский район, флора которого наиболее насыщена ксерофитами, в том числе имеется один суккулент-стеноэндемик. Количество видов, распространённых во всех районах, – 40.

Таблица 1 / Table 1

Сравнительные данные по флористическим районам бассейна реки Аргун
/ Comparative data on floristic regions of the Argun River basin

Район	Количество видов					Не выходящие за пределы района
	Всего	Стеноэндемики	Субэндемики	Реликты		
				Rg	Rx	
Н-А	560	–	–	2	–	392
Хайл	436	–	–	3	1	55
Ит-Кал	286	1	1	–	10	69
Кенх	465	–	4	1	2	60
Шат	596	1	5	–	–	85
Теб	604	3	5	–	3	83
Количество видов, общих для всех районов, – 40						

Количественный состав, характеризующий богатство флоры каждого района, неоднороден. Число общих и специфических видов разное. Для выяснения степени сходства или различия флор разных районов нами проведена статистическая обработка флористических списков. Проблема сравнительного флористического анализа занимает значительное место в проведении флористических исследований. Ботаническая наука накопила много методов математической обработки количественного флористического состава. Среди них наиболее часто применяются коэффициенты сходства Жаккара и Сёренсена – Чекановского [15].

Для сравнительной характеристики флористических списков районов бассейна реки Аргун нами определены исходные данные *c* и *d* (табл. 2). На их основе рассчитаны коэффициенты флористического сходства Жаккара и Сёренсена – Чекановского (табл. 3). По этим коэффициентам построены алгоритмы максимального корреляционного пути (табл. 4, 5) и дендриты с корреляционными плеядами разных уровней (рис. 3, 4).

Таблица 2 / Table 2

Количество общих видов (c) и общая сумма видов (d) флористических районов бассейна реки Аргун/ Number of total species (c) and total species (d) floristic regions of the Argun River basin

Данные	d(a+b)						
	Район	Н-А	Хайл	Ит-Кал	Кенх	Шат	Теб
c	Н-А	560	996	846	1025	1156	1164
	Хайл	139	436	722	901	1032	1040
	Ит-Кал	103	127	286	751	882	890
	Кенх	99	324	165	465	1061	1069
	Шат	42	172	75	186	596	1200
	Теб	41	175	66	198	490	604

Примечание. По диагонали – число видов в каждом из районов; над диагональю – суммарное число видов в двух районах d(a+b); под диагональю – общее число видов в двух районах (c).

Таблица 3 / Table 3

Коэффициенты сходства Жаккара (K_j) и Сёренсена – Чекановского (K_{sc}) для флористических районов бассейна реки Аргун / Jaccard similarity coefficients (K_j) and Sørensen-Czekanovsky (K_{sc}), obtained for floristic regions of the Argun River basin

Коэффициент	K _j						
	Район	Н-А	Хайл	Ит-Кал	Кенх	Шат	Теб
K _{sc}	Н-А	–	0,162	0,122	0,106	0,037	0,036
	Хайл	0,279	–	0,166	0,561	0,207	0,202
	Ит-Кал	0,243	0,352	–	0,282	0,092	0,080
	Кенх	0,193	0,719	0,439	–	0,212	0,225
	Шат	0,072	0,333	0,170	0,351	–	0,690
	Теб	0,070	0,336	0,148	0,370	0,818	–

Таблица 4 / Table 4

Алгоритм построения максимального корреляционного пути на основе коэффициента сходства Жаккара (K_j) для флористических районов бассейна реки Аргун / Algorithm for constructing the maximum correlation path based on Jaccard similarity coefficient (K_j) for floristic regions of the Argun River basin

Район	Н-А	Хайл	Ит-Кал	Кенх	Шат	Теб
Шат	Н-А	Хайл	Ит-Кал	Кенх	–	Теб
	0,037	0,207	0,092	0,212		0,690
	Шат	Шат	Шат	Шат		Шат
Теб	Н-А	Хайл	Ит-Кал	Кенх	–	–
	0,037	0,207	0,092	0,225		
	Шат	Шат	Шат	Теб		
Кенх	Н-А	Хайл	Ит-Кал	–	–	–
	0,106	0,561	0,282			
	Кенх	Кенх	Кенх			
Хайл	Н-А	–	Ит-Кал	–	–	–
	0,162		0,282			
	Хайл		Кенх			
Ит-Кал	Н-А	–	–	–	–	–
	0,162					
	Хайл					

Такое же графическое изображение имеет и дендрит, построенный на основе коэффициента флористического сходства Сёренсена – Чекановского (рис. 3, табл. 5). Его расщепление происходит так же, отличаются только значения коэффициентов.

В дендрите, построенном на основе коэффициента сходства Жаккара (рис. 2), на уровне минимальной связи (0,162) формируется общая корреляционная плеяда. При повышении уровня связи от наименьшего к наибольшему в дендрите происходит отделение районов и выделение корреляционных плеяд более низких уровней. Первым от общей плеяды отделяется Нижне-Аргунский район, в составе которого равнинные и предгорные флористические комплексы, и значительное количество адвентивных видов. Оставшаяся плеяда распадается на низкогорные, среднегорные (Хайл-Кенх-Ит-Кал) и высокогорные районы (Теб-Шат). Затем отделяется Итум-Калинский, в составе флоры которого значительное количество ксерофильных видов. Оставшиеся пары районов (Хайл-Кенх и Теб-Шат) обладают наибольшей степенью сходства флористических списков (более 50 %).

Таблица 5 / Table 5

Алгоритм построения максимального корреляционного пути на основе коэффициента сходства Сёренсена – Чекановского (K_{sc}) для флористических районов бассейна реки Аргун / Algorithm for constructing the maximum correlation path based on the Sørensen-Czekanovsky similarity coefficient (K_{sc}) for floristic regions of the Argun River basin

Район	Н-А	Хайл	Ит-Кал	Кенх	Шат	Теб
Шат	Н-А 0,072	Хайл 0,333	Ит-Кал 0,170	Кенх 0,351	–	Теб 0,818 Шат
	Шат	Шат	Шат	Шат		
Теб	Н-А 0,072	Хайл 0,336	Ит-Кал 0,170	Кенх 0,370	–	–
	Шат	Теб	Шат	Теб		
Кенх	Н-А 0,193	Хайл 0,719	Ит-Кал 0,439	–	–	–
	Кенх	Кенх	Кенх			
Хайл	Н-А 0,279	–	Ит-Кал 0,439	–	–	–
	Хайл		Кенх			
Ит-Кал	Н-А 0,279 Хайл	–	–	–	–	–

Таким образом, сравнительный анализ флористических списков районов флоры бассейна реки Аргун, проведённый методом математической обработки, а также ход расщепления корреляционных плеяд свидетельствуют о правильности проведённого флористического районирования.

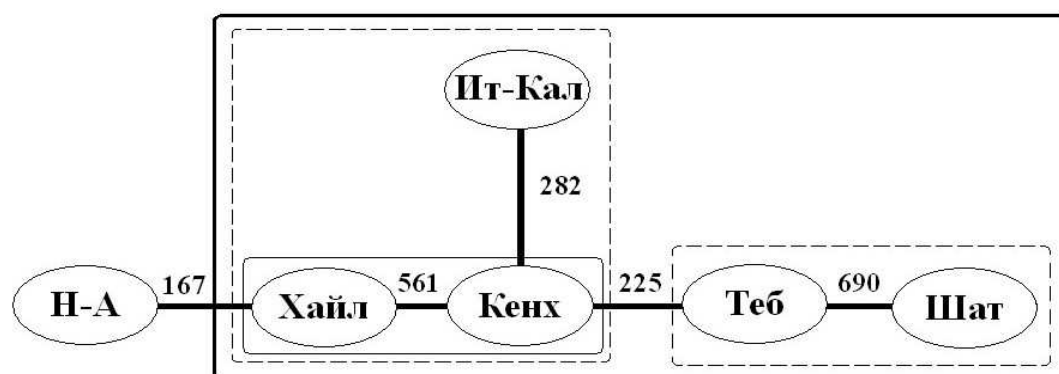


Рис. 3. Дендрит, построенный на основе алгоритма максимального корреляционного пути по коэффициенту сходства Жаккара, и корреляционные плеяды разных уровней / Fig. 3. Dendrite built based on an algorithm maximum correlation path according to the Jaccard similarity coefficient and correlation galaxies of different levels

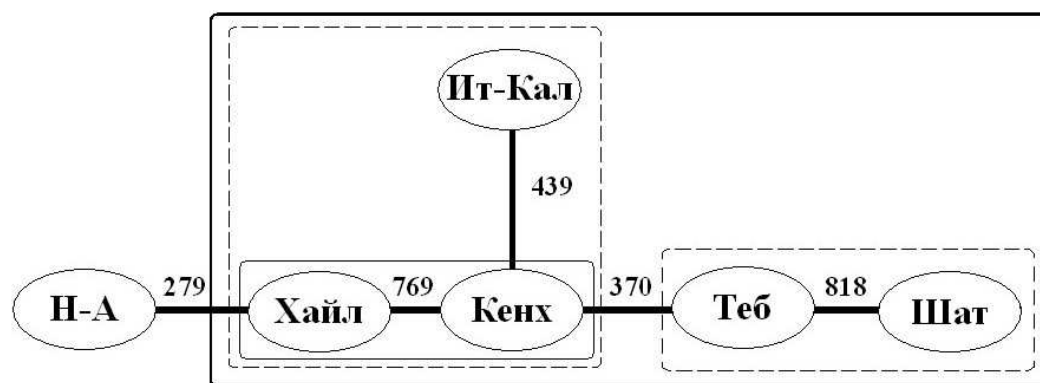


Рис. 4. Дендрит, построенный на основе алгоритма максимального корреляционного пути по коэффициенту сходства Сёренсена – Чекановского, и корреляционные плеяды разных уровней / Fig. 4. Dendrite built based on an algorithm the maximum correlation path according to the Sørensen-Czekanovsky similarity coefficient and correlation galaxies of different levels

Приходим к выводу, что на исследуемой территории выделяются три группы флоры: равнинная и предгорная (Нижне-Аргунский район), среднегорная (Хайлазамский, Итум-Калинский и Кенхийский районы) и высокогорная (Шатилийский и Тебулосский районы).

Список источников

1. *Портениер Н.Н.* Географический анализ флоры бассейна реки Черек Безенгийский (Центральный Кавказ). I. Природные условия района и общая характеристика его флоры и растительности // Бот. журн. 1993. Т. 78, № 10. С. 16–22.
2. *Портениер Н.Н.* Географический анализ флоры бассейна реки Черек Безенгийский (Центральный Кавказ). II. Географические элементы // Бот. журн. 1993. Т. 78, № 11. С. 1–17.
3. *Бондаренко С.В.* Флора бассейна р. Афипис Западного Кавказа: автореф. дис. ... канд. биол. наук. СПб., 2002. 20 с.
4. *Шильников Д.С.* Флора бассейна реки Большая Лаба и её анализ: автореф. дис. ... канд. биол. наук. СПб., 2008. 21 с.
5. *Чотчаева Р.Р.* Флора бассейна реки Теберды (Западный Кавказ) и её анализ: автореф. дис. ... канд. биол. наук. Ставрополь, 2011. 22 с.
6. *Гузиев Х.Ю.* Эколого-биологический и географический анализы флоры ущелья р. Баксан (Центральный Кавказ): автореф. дис. ... канд. биол. наук. Махачкала, 2005. 17 с.
7. *Хизриева А.И.* Флора бассейна реки Казикумухское Койсу (Горный Дагестан): дис. ... канд. биол. наук. Махачкала, 2017. 60 с.
8. *Черепанов С.К.* Сосудистые растения России и сопредельных государств. СПб.: Мир и семья – 95, 1995. 990 с.
9. *Галушко А.И.* Флора Северного Кавказа. Ростов н/Д.: РГУ, 1978–1980. Т. 1. 1978. 317 с.; Т. 2. 1980. 350 с.; Т. 3. 1980. 327 с.
10. *Тахтаджян А.Л.* Флористическое деление суши // Жизнь растений. М.: Просвещение, 1974. Т. 1. С. 117–153.
11. *Камелин Р.В.* Растительный мир // Большая советская энциклопедия. Россия. М.: БРЭ, 2004. С. 84–88.
12. *Гроссгейм А.А.* Карта растительных округов Кавказа // Флора Кавказа. 2-е изд. Баку: Изд-во Азерб. ФАН СССР, 1939. Т. 1. С. 9.
13. *Меницкий Ю.Л.* Проект «Конспект флоры Кавказа». Карта районов флоры // Бот. журн. 1991. Т. 76, № 11. С. 1513–1521.
14. *Тайсумов М.А., Дудагова Э.Ш., Астамирова М.А.-М.* Анализ флоры бассейна реки Аргун (Восточный Кавказ). Грозный: ЧГПУ, АЛЕФ, 2023. 242 с.
15. *Шмидт В.М.* Математические методы в ботанике. Л.: Изд-во Ленинградского ун-та, 1984. 86 с.

References

1. Portenier N.N. Geographical analysis of the flora of the Cherek Bezengi river basin (Central Caucasus). I. Natural conditions of the area and general characteristics of its flora and vegetation. *Bot. zhurn. = Botanical Journal*. 1993;78(10):16-22. (In Russ.).

2. Portenier N.N. Geographical analysis of the flora of the Cherek Bezengi river basin (Central Caucasus). II. Geographical elements. *Bot. zhurn. = Botanical Journal*. 1993;78(11):1-17. (In Russ.).
3. Bondarenko S.V. *Flora of the river basin Afips of the Western Caucasus*. Dissertation Thesis. St. Petersburg, 2002. 20 p. (In Russ.).
4. Shilnikov D.S. *Flora of the Bolshaya Laba River basin and its analysis*. Dissertation Thesis. St. Petersburg, 2008. 21 p. (In Russ.).
5. Chotchaeva R.R. *Flora of the Teberda River Basin (Western Caucasus) and its analysis*. Dissertation Thesis. Stavropol, 2011. 22 p. (In Russ.).
6. Guziev Kh.Yu. *Ecological, biological and geographical analyzes of the flora of the Baksan river gorge (Central Caucasus)*. Dissertation Thesis. Makhachkala, 2005. 17 p. (In Russ.).
7. Khizrieva A.I. *Flora of the Kazikumukhskoe Koisu river basin (Mountain Dagestan)*. Dissertation. Makhachkala, 2017. 160 p. (In Russ.).
8. Cherepanov S.K. *Vascular plants of Russia and neighboring countries*. St. Petersburg: Mir i sem'ya – 95 Publ.; 1995. 990 p. (In Russ.).
9. Galushko A.I. *Flora of the North Caucasus*. Rostov-on-Don: Rostov State University Press; 1978-1980. Vol. 1, 1978. 317 p.; Vol. 2, 1980. 350 p.; Vol. 3, 1980. 327 p. (In Russ.).
10. Takhtadzhyan A.L. Floristic division of land. *Life of plants*. Moscow: Prosveshchenie Publ.; 1974;1:117-153. (In Russ.).
11. Kamelin R.V. *Flora. Great Soviet Encyclopedia*. Russia. Moscow: BSE Publ.; 2004:84-88. (In Russ.).
12. Grossgeim A.A. Map of plant districts of the Caucasus. *Flora of the Caucasus*. 2nd ed. Baku: Azerbaijan Academy of Sciences of the USSR Publishing House; 1939;1:9. (In Russ.).
13. Menitsky Yu.L. Project “Synopsis of the Flora of the Caucasus.” Map of flora areas. *Bot. zhurn. = Botanical Journal*. 1991;76(11):1513-1521. (In Russ.).
14. Taisumov M.A., Dudagova E.Sh., Astamirova M.A.-M. Analysis of the flora of the Argun River basin (Eastern Caucasus). Grozny: Chechen State Pedagogical University Press, ALEF Publ.; 242 p. (In Russ.).
15. Schmidt V.M. *Mathematical methods in botany*. Leningrad: Leningrad University Publishing House; 1984. 286 p. (In Russ.).

Информация об авторах

Э.Ш. Дудагова – старший преподаватель, кафедра методики преподавания биологии, естественный факультет, ЧГПУ.

М.А. Тайсумов – доктор биологических наук, профессор, кафедра экологии, естественный факультет, ЧГПУ; вице-президент Академии наук Чеченской Республики; главный научный сотрудник, лаборатория экологии, КНИИ им. Х.И. Ибрагимова РАН.

М.А.-М. Астамирова – доктор географических наук, доцент, кафедра методики преподавания биологии, естественный факультет, ЧГПУ; заведующая отделом биологических ресурсов, АН ЧР; главный научный сотрудник, лаборатория экологии, КНИИ им. Х.И. Ибрагимова РАН.

Э.Р. Байбатырова – старший преподаватель, кафедра методики преподавания биологии, естественный факультет, ЧГПУ; научный сотрудник отдела биологических ресурсов, АН ЧР.

Information about the authors

E.Sh. Dudagova - Senior Lecturer, Department of Biology Teaching Methods, Faculty of Natural Sciences, ChSPU.

M.A. Taisumov - Doctor of Science (Biology), Professor, Department of Ecology, Faculty of Natural Sciences, ChSPU; Vice President of the Academy of Sciences of the Chechen Republic; Chief Researcher, Laboratory of Ecology, Ibragimov CI of the Russian Academy of Sciences.

M.A.-M. Astamirova - Doctor of Science (Geography), Associate Professor, Department of Biology Teaching Methods, Faculty of Natural Sciences, ChSPU; Head of the Department of Biological Resources, Academy of Sciences of the Chechen Republic; Chief Researcher, Laboratory of Ecology, Ibragimov CI of the Russian Academy of Sciences.

E.R. Baybatyrova - Senior Lecturer, Department of Biology Teaching Methods, Faculty of Natural Sciences, ChSPU; Researcher, Department of Biological Resources, Academy of Sciences of the Chechen Republic.

Статья поступила в редакцию 14.02.2024; одобрена после рецензирования 24.03.2024; принята к публикации 04.07.2024.
The article was submitted 14.02.2024; approved after reviewing 24.03.2024; accepted for publication 04.07.2024.

Научная статья
УДК 582.26 /.27(571.16)
doi: 10.18522/1026-2237-2024-3-151-158

ГИДРОХИМИЧЕСКАЯ И АЛЬГОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА МИНЕРАЛЬНОГО ИСТОЧНИКА УСТУУ-СЕНЕК (РЕСПУБЛИКА ТЫВА, РОССИЯ)

**Юрий Витальевич Науменко¹, Чечекмаа Дембиреловна Назын², Елена Сергеевна Кашкак^{3✉},
Урана Спартакновна Ооржак⁴**

¹ Центральный сибирский ботанический сад СО РАН, Новосибирск, Россия

² Центр биосферных исследований, Кызыл, Республика Тыва, Россия

^{2, 3, 4} Тувинский государственный университет, Кызыл, Республика Тыва, Россия

¹ Naumenko-y55@yandex.ru

² nazynch@mail.ru

³ klslena@yandex.ru✉

⁴ oorzhakus@mail.ru

Аннотация. Впервые приводятся сведения о водорослях и гидрохимическом составе минерального источника Устуу-Сенек, расположенного в Улуг-Хемском районе Республики Тыва. Согласно классификации лечебных минеральных вод, по температурным показателям аржаан относится к холодной группе, а по общей жесткости – к средней. Вода аржаана Сенек имеет хлоридно-сульфатный кальциево-натриевый состав. По органолептическим и физико-химическим показателям исследуемые воды соответствуют нормативам качества питьевых вод. Выявленный видовой состав водорослей минерального источника представлен 69 видами водорослей из 4 отделов: Суапрокарыота – 8, Bacillariophyta – 47, Chlorophyta – 2 и Charophyta – 12. Основа таксономического состава – диатомовые и харовые (85,5 % от общего числа видов), на долю синезеленых и зеленых водорослей приходится 14,5 %. Выявлено 6 доминантов, из которых особо выделяются *Diatoma hiemale* и *Diatoma mesodon*. Проведен эколого-географический анализ, согласно которому альгофлора представлена бентосными видами с преобладанием индифферентных форм по отношению к галобности и активной реакции среды. В исследуемых водотоках выявлено 52 вида показателей сапробности вод. Отмечено преобладание ксено-, олигобионтов и бетамезосапробионтов. В географическом отношении господствовали космополиты и бореальные виды.

Ключевые слова: гидрохимический состав, таксономический состав, минеральный источник, водоросли, Суапрокарыота, Bacillariophyta, Сенек, Республика Тыва

Для цитирования: Науменко Ю.В., Назын Ч.Д., Кашкак Е.С., Ооржак У.С. Гидрохимическая и альгологическая характеристика минерального источника Устуу-Сенек (Республика Тыва, Россия) // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2024. № 3. С. 151–158.

Благодарности: исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-24-10026.

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

Original article

HYDROCHEMICAL AND ALGOLOGICAL CHARACTERISTICS OF THE USTUU-SENEK MINERAL SPRING (TUVA REPUBLIC, RUSSIA)

Yury V. Naumenko¹, Chechekmaa D. Nazyn², Elena S. Kashkak^{3✉}, Urana S. Oorzhak⁴

¹ Central Siberian Botanical Garden SB RAS, Novosibirsk, Russia

² Center of Biosphere Research, Kyzyl, Tuva Republic, Russia

^{2, 3, 4} Tuvan State University, Kyzyl, Tuva Republic, Russia

© Науменко Ю.В., Назын Ч.Д., Кашкак Е.С., Ооржак У.С., 2024

¹ Naumenko-y55@yandex.ru

² nazynch@mail.ru

³ klslena@yandex.ru

⁴ oorzhakus@mail.ru

Abstract. The information on algae and the hydrochemical composition of the mineral spring of Ustuu-Senek, located in the Ulug-Khem district of the Republic of Tuva is provided for the first time. According to the classification of medicinal mineral waters for its temperature indicators, arzhaan (mineral spring) belongs to the cold group, and in terms of its general hardness, it belongs to waters of medium hardness. The waters of Senek Arzhaan have a chloride-sulfate calcium-sodium composition. In terms of organoleptic and physicochemical indicators, the studied waters correspond to drinking water quality standards. The identified species composition of algae of the mineral spring is represented by 69 species of algae from 4 divisions: Cyanoprokaryota - 8, Bacillariophyta - 47, Chlorophyta - 2 and Charophyta - 12. The basis of the taxonomic composition is diatoms and characeae (85.5% of the total number of species), including blue-green and green algae account for 14.5%. There were identified 6 dominants, among which the special attention is paid by *Diatoma hiemale* and *Diatoma mesodon*. According to the ecological-geographical analysis, which was carried out, the algal flora is represented by benthic species with a predominance of indifferent forms in relation to the salinity and active reaction of the environment. In the watercourses studied, 52 species, indicators of water saprobity, were identified. The predominance of xeno-, oligobionts and betamezosaprobionts was revealed. In terms of geography, cosmopolitan and boreal species dominated.

Keywords: hydrochemical composition, taxonomic composition, mineral spring, algae, Cyanoprokaryota, Bacillariophyta, Senek, Tuva Republic

For citation: Naumenko Yu.V., Nazyn Ch.D., Kashkak E.S., Oorzhak U.S. Hydrochemical and Algological Characteristics of the Ustuu-Senek Mineral Spring (Tuva Republic, Russia). *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2024;(3):151-158. (In Russ.).

Acknowledgments: the study was supported by the Russian Science Foundation grant No. 23-24-10026.

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

Введение

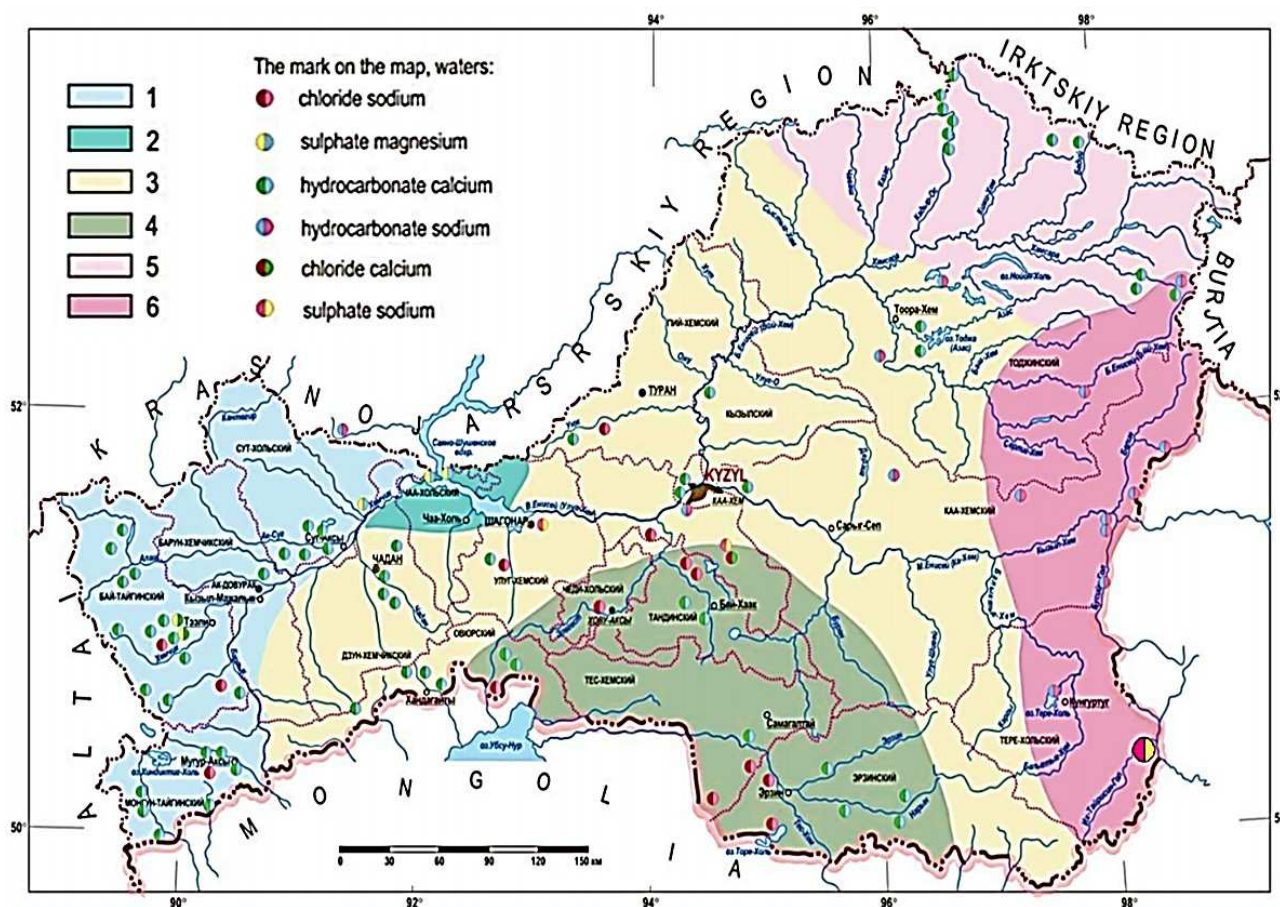
Своеобразное геологическое строение, рельеф, климатические особенности и гидрологические условия являются причиной распространения в Республике Тыва минеральных вод. Природные водные лечебные ресурсы представлены на территории солеными и грязевыми озерами и минеральными источниками. Лечебные источники на тувинском языке называются аржаанами. Слово «аржаан» (у монголов и бурят – «аршан», у киргизов – «арашан») уходит корнями в санскрит и означает «святая или целебная вода». Население активно пользуется аржаанами в лечебных и профилактических целях. Для бальнеологической характеристики необходимо постоянно проводить наблюдения за этими минеральными источниками, так как изменение гидрохимической обстановки может привести к негативным последствиям. В настоящее время обследовано 50 проявлений гидроминеральных ресурсов, из которых 37 источников являются лечебными [1]. Минеральные источники обладают целебными свойствами, поэтому знание видового состава водорослей, закономерностей их вегетации и некоторых биологических особенностей имеет важное значение. Сведения о водорослях источников республики немногочисленны [2–6].

Цель настоящего исследования – изучение гидрохимического состава и видового разнообразия водорослей, определение комплекса доминирующих видов и проведение эколого-географического анализа выявленного состава источника Сенек (Устуу-Сенек).

Материалы и методы исследования

Объект исследования – физико-химические параметры и альгологическая характеристика воды источника Сенек, который находится в 14 км к востоку от села Хайыракан. Он расположен в Улуг-Хемском районе Республики Тыва на высоте 645 м над уровнем моря (рисунок). В северной части холма воды выходят на поверхность шестью небольшими ручьями. Для удобства сбора

воды установлены деревянные желоба и кабинки для принятия душа. Гидрографическая сеть части района, где расположен источник, определяется системой р. Верхний Енисей. Выход источника на поверхность обусловлен тектоническими нарушениями в горных породах.



Карта минеральных источников Тувы / Map of mineral springs of Tuva

Пробы воды на физико-химический анализ отбирались в соответствии с ГОСТ 17.1.5.04-81 [7] в августе 2023 г. Химический и физико-химический анализ исследуемых вод получен сразу после отбора проб по общепринятым методикам, согласно нормативным документам, на базе лаборатории физико-химических методов исследования ФГБОУ ВО «Тувинский государственный университет». Анализ проб воды на содержание тяжелых металлов проводился в аналитической лаборатории ФГБУ «Государственная станция агрохимической службы «Тувинская»».

Для альгологических исследований отобрано 25 проб в указанные сроки. Налеты и пленки водорослей снимали с деревянного и железного желобов, получали выжимки из мхов, растущих в потоке. Водоросли исследовали с помощью светового микроскопа Amplival Carl Zeiss Jena при увеличении от 640 до 1600 раз. В работе принята система диатомовых водорослей [8]. Обработку проводили по общепринятой методике альгологических исследований [9]. При идентификации таксонов использовались зарубежные таксономические и флористические сводки [10, 11]. Номенклатурные комбинации ряда видов соответствуют приводимым в электронной базе данных [12]. Для эколого-географической характеристики видов использованы материалы определителей и данные о видах из работ, обобщенных в сборниках [13, 14].

Результаты и их обсуждение

Проведенные исследования физико-химического состава воды аржаана Сенек показали, что она имеет низкую температуру (от 5 до 9 °C), нейтральную реакцию (pH 7,3±1,2), без запаха и вкуса. По цветности (0,37 градуса) и мутности (1,2 ЕМФ) воды относятся к прозрачным. Сухой остаток – 256 мг/дм³. По органолептическим и физическим показателям исследуемые воды соответствовали

нормативам качества питьевых вод [15]. По величине общей жесткости вода источника Сенек относится к водам средней жесткости ($6,1 \pm 1,3$ °Ж). Содержание углекислого газа – $13,2$ мг/дм³. Перманганатная окисляемость (содержание окисленных неорганических и органических веществ в воде) – $0,72$ мг/дм³, в пределах нормы. Содержание тяжелых металлов ($Fe_{\text{общ}}$, $0,020 \pm 0,007$, Cu $0,005 \pm 0,002$, Mn $0,005 \pm 0,002$, Zn $0,012 \pm 0,004$) не превышало ПДК [15] для питьевых вод.

Ведущую роль в водах источника играют ионы натрия и кальция – $56,11$ и $54,40$ мг/дм³ соответственно. Катионов магния значительно меньше ($24,70$ мг/дм³), как и калия ($6,20$ мг/дм³). В анионном составе преобладают сульфаты ($104,4$ мг/дм³). Содержание хлорид-ионов – $80,83$ мг/дм³, гидрокарбонат-ионов – $65,64$ мг/дм³. Концентрация нитрат-ионов – $5,22$ мг/дм³, нитрит-ионов – менее $0,02$ мг/дм³. Вода аржаана Сенек имеет хлоридно-сульфатный кальциево-натриевый состав.

Видовой состав водорослей источника представлен 69 видами, относящимися к 36 родам, 23 семействам, 6 классам и 4 отделам. Распределение по отделам: *Bacillariophyta* – 47 (68,1 %), *Charophyta* – 12 (17,4 %), *Cyanoprokaryota* – 8 (11,6 %), *Chlorophyta* – 2 (2,9 %). Основу таксономического состава составляют диатомовые и харовые (85,5 % от общего числа видов), на долю синезеленых и зеленых водорослей приходится 14,5 %.

В отдел диатомовых водорослей входят два класса (*Fragilariophyceae* и *Bacillariophyceae*), которые содержат, соответственно, 9 и 38 видов. Первый представлен 5 родами и двумя семействами, из которых 3 вида принадлежат роду *Diatoma*, по два вида – *Fragilaria* и *Fragilariforma*. Наиболее разнообразен класс *Bacillariophyceae*, представленный 11 семействами и 19 родами. Диатомовые водоросли господствуют как по таксономическому разнообразию, так и по количественному развитию.

На втором месте по разнообразию находятся харовые водоросли *Charophyta* (12 видов). Отдел представлен 2 классами, 3 родами и 3 семействами. Наиболее многочисленными были роды *Closterium* (6 видов) и *Cosmarium* (5 видов), но они встречались спорадически и не во всех ручьях.

Третье место по разнообразию занимали синезеленые водоросли *Cyanoprokaryota* – 8 видов. Принадлежат они к одному классу – *Cyanophyceae*, 5 семействам и 7 родам. Наиболее часто встречались *Oscillatoria limosa* Ag. и *Microcoleus amoenus* (Gomont) Strunecky, Komarek & J.R. Johansen.

Отдел *Chlorophyta* (2 вида) представлен одним классом (*Ulvophyceae*), двумя семействами и двумя родами.

Наиболее крупные 6 семейств принадлежат отделам диатомовых и харовых: *Symbellaceae* (10 видов), *Fragilariaceae* (8), *Achnanthidiaceae* (7), *Closteriaceae* и *Bacillariaceae* (по 6 видов) и *Desmidiaceae* (5). Данные семейства включают 42 вида, что составляет 60,8 % от всего состава. Семейства, занимающие ведущее положение в альгофлоре региона, играют важную роль и в структуре альгоценозов. На остальные 17 семейств приходится 27 видов (39,2 %).

В период исследования выявлено всего 6 доминантов: из отдела диатомовых – *Diatoma hiemale* (Lyngb.) Heib., *Diatoma mesodon* Kütz., *Encyonema ventricosum* (C. Ag.) Grun., из синезеленых – *Oscillatoria limosa* C. Ag. ex Gom., из зеленых – *Cladophora glomerata* (L.) Kütz. харовых – *Klebsormidium subtile* (Kütz.) Mikhailyuk, Glaser, Holzinger & Karsten.

В обрастаниях, взятых с деревянных желобов, в выжимках мхов и из железного желоба встречаются темно-зеленые, зеленые, бурые скопления водорослей. Состав их относительно разнообразен. В выжимках мха отмечено до 47 видов из трех отделов, среди которых доминировали *Diatoma hiemale*, *Diatoma mesodon* и *Encyonema ventricosum*. В значительном количестве встречались *Cocconeis placentula* Ehr., *C. euglypta* Ehr. Разнообразно представлены роды: *Achnanthidium* (*A. Affine* (Grunow) Czarnecki, *A. Minutissimum* (Kütz.) Czarnecki, *A. Nodosum* (Cleve) Tseplik & Chudaev) и *Nitzschia* (*N. communis* Rabenh., *N. linearis* W. Sm., *N. palea* (Kütz.) W. Sm.). Из семейства *Closteriaceae* часто находили *Closterium acerosum* (Schrank) Ehr., *Closterium littorale* Gay и *Closterium lanceolatum* Kütz., а из семейства *Desmidiaceae* – *Cosmarium hornavanense* Gutw. и *Cosmarium undulatum* Corda.

Менее разнообразны обрастания с древесного субстрата (желобов). Здесь отмечено 37 видов из четырех отделов. Синезеленые водоросли представлены 5 видами, зеленые – 2, харовые – 4; 26 видов из отдела диатомовых водорослей. Господствовали *Diatoma hiemale*, *Diatoma mesodon* и *Oscillatoria limosa*. Наиболее часто отмечали из диатомовых водорослей *Fragilaria capucina* Desm., *Fragilariforma virescens* (Ralfs) D.M. Willims et Round, *Ulnaria ulna* (Nitzsch) Compere,

Planothidium lanceolatum (Breb.) Lange-Bertalot и представителей рода *Cymbella* (*C. laevis* Naeg., *C. cistula* (Ehr.) Kirchner, *C. cymbiformis* (Ag. ? Kütz.) V.H.). Единично встречались из синезеленых водорослей *Chroococcus minor* (Kützing) Nägeli, *Microcoleus amoenus*, *Phormidium granulatum* (N.L. Gardner) Anagnostidis, из диатомей – *Navicula cincta* (Ehr.) Ralfs, *N. cryptocephala* Kütz., *N. tripunctata* (O. Müll.) Bory, из десмидиевых – *Cosmarium ornatum* Ralfs, *Cosmarium humile* (Gay) Nordst. Отмечены большие скопления *Klebsormidium subtile* и *Ulothrix zonata* (Web. et Mohr) Kütz. на разных желобах. В луже, образовавшейся в результате падения воды из желоба, интенсивно вегетировала *Cladophora glomerata* (L.) Kützing.

В железной трубе было определено 19 видов водорослей. Это представители трех отделов: *Bacillariophyta* – 14, *Суанопрокариота* – 3 и *Charophyta* – 2. Доминантами являлись те же виды, что и господствовали в выжимках мха. В данном биотопе в значительных количествах вегетировали *Fragilaria capucina* и *Ulnaria ulna*. Единично встречались *Microcoleus amoenus*, *Oscillatoria limosa*, *Gomphonema intricatum* Kütz., *Sellaphora pupula* (Kützing) Mereschkovsky, *Closterium lanceolatum*, *Cosmarium undulatum*. Следует отметить, что только здесь находили *Spirulina major* Kützing ex Gomont и *Meridion circulare* Ag.

Сведения о приуроченности водорослей к определенному местообитанию представлены для 61 вида (88,4 % общего состава). Экологический анализ показал, что большая часть организмов в мелководном водотоке – перифитонные (44,9 %) и донные (26,1 %) формы. Это такие представители родов, как *Diatoma*, *Achnanthydium*, *Planothidium*, *Gomphonema*. Роль планктонных организмов невелика.

Все встреченные виды по отношению к солености воды являются олигогалолами с преобладанием индифферентов (69,6 %). На долю галофобов и галофилов приходится 8,7 и 11,6 % соответственно (таблица).

Данные по отношению к pH среды известны для 61 вида. Ведущее положение занимают индифференты – 56,5 %. В эту группу входят такие массовые виды, как *Ulothrix zonata* и *Achnanthydium minutissima*. Значительное количество видов – алкалифилы (26,1 %), причем выделяются *Diatoma hiemale*, *D. mesodon*. Ацидофилов выявлено всего 4 вида.

По географическому местоположению максимальная доля принадлежит широко распространенным видам (42,0 %), из них значительна доля бореальных организмов.

Среди способов биологической индикации качества поверхностных вод видное место занимают методы оценки степени загрязнения воды по показательным организмам (сапробиологический анализ). В источнике найдено 52 вида водорослей-сапробионтов всех зон сапробности, кроме полисапробной (таблица). Вегетация 23 видов, которые развиваются в очень чистых (ксеносапробионты) и чистых (олигосапробионты) водах, а также господство определенной части доминантов, относящихся к данным группам, свидетельствуют о благополучном состоянии водной среды. Следует отметить 20 видов β-мезосапробов.

Эколого-географическая характеристика водорослей аржаана Сенек / Ecological and geographical characteristics of algae arzhaana Senek

Эколого-географическая группа	Число видов	% от выявленных видов
Местообитание		
Планктон	12	17,4
Обрастание	31	44,9
Дно	18	26,1
Таксон, мало изученный	8	11,6
Отношение к NaCl (галобность)		
Галофоб	6	8,7
Индифферент	48	69,6
Галофил	8	11,6
Таксон, мало изученный	7	10,1
Отношение к pH (ацидофильность)		
Ацидофил	4	5,8
Индифферент	39	56,5
Алкалифил	18	26,1
Таксон, мало изученный	8	11,6

Окончание таблицы

Эколого-географическая группа	Число видов	% от выявленных видов
Географическая характеристика (биогеографическое распространение)		
Космополит	29	42,0
Бореальный	28	40,6
Арктоальпийский	7	10,2
Таксон, мало изученный	5	7,2
Сапробность		
Ксеносапроб	3	4,3
Ксеноолигосапроб	4	5,8
Олигосапроб	8	11,6
Олиго-β-мезосапроб	8	11,6
Бета-олиго-мезосапроб	1	1,5
β-Мезосапроб	20	29,0
α-β-Мезосапроб	3	4,4
α-Мезосапроб	5	7,2
Таксон, мало изученный	17	24,6

Таким образом, основу видового состава аржаана составляют диатомовые водоросли (68,1 %), что свойственно голарктическим водным объектам (реки, мелкие водотоки, озера) [16]. Представленность отдела – это показатель, который может отражать как степень альгофлористической изученности, так и особенности географического положения водоема или региона (например, горный, таежный характер).

Из шести крупных семейств 4 также принадлежит к диатомеям. Из числа доминантов половина относится к отделу *Bacillariophyta*. Из литературы известно, что в арктических водоемах моховой биотоп, как правило, обладает самым богатым составом [17].

На незначительное количество солей (256 мг/дм³) указывает и преобладание индифферентных форм водорослей по отношению к галобности. Значения активной реакции вод хорошо согласуются с данными по преобладанию индифферентов, встречаемых в источнике. Очень низкие значения нитрат- и нитрит-ионов подтверждают преобладание ксено- и олигобионтных организмов.

Заключение

Источник Сенек согласно классификации лечебных минеральных вод [18], по температурным показателям относится к холодной группе (температура воды от 4 до 20 °С).

Видовой состав представлен 69 видами водорослей из 4 отделов: *Cyanoprokaryota* – 8, *Bacillariophyta* – 47, *Chlorophyta* – 2, *Charophyta* – 12. Выявлены доминанты, из которых особо выделяются *Diatoma hiemale* и *Diatoma mesodon*. Основная часть доминирующих видов – типичные реофилы, свойственные рекам горного типа. Экологический анализ показал преимущество бентосных форм с преобладанием обрастателей, индифферентов по отношению к солёности и активной реакции воды. Географический анализ указывает на господство космополитов и бореальных видов. Отмечено преобладание ксено-, олигобионтов и β-мезосапробионтов.

Список источников

1. Аракчаа К.Д. Слово об аржаанах Тыва. М.: ПолиКом, 1995. 24 с.
2. Науменко Ю.В. О водорослях радонового источника Тывы (Россия) // Альгология. 1998. Т. 8, № 3. С. 242–247.
3. Науменко Ю.В. Альгофлора двух минеральных источников Тувы // Сиб. экол. журн. 2001. № 1. С. 397–400.
4. Аракчаа К.Д., Копылова Ю.Г., Назын Ч.Д., Наксыл М.К., Смирнова И.Н. Природный аржаанный комплекс «Чойганские минеральные воды» и аржаан Борзу-Холь: результаты комплексных исследований и перспективы освоения // Природные системы и экономика приграничных территорий Тувы и Монголии: фундаментальные проблемы, перспективы рационального использования: материалы молодежной науч. конф. с междунар. участием. Кызыл: ТувИКОПР СО РАН, 2012. С. 98–112.

5. Назын Ч.Д., Аракчаа К.Д. Таксономический состав альгофлоры отдельных источников природного аржанного комплекса «Чойганские минеральные воды» // Вестн. Тувинского гос. ун-та. 2013. № 2. С. 47–54.
6. Науменко Ю.В., Назын Ч.Д. Водоросли минерального источника Ногаан-Хол (Тыва, Россия) // Растительный мир Азиатской России: Вестн. Центр. Сиб. бот. сада СО РАН. 2021. Т. 14, № 1. С. 28–33.
7. ГОСТ 17.1.5.04-81. Охрана природы. Гидросфера. Приборы и устройства для отбора, первичной обработки и хранения проб природных вод. Общие технические условия. М.: Изд-во стандартов, 2002.
8. Куликовский М.С., Глущенко А.М., Генкал С.И., Кузнецова И.В. Определитель диатомовых водорослей России. Ярославль: Филигрань, 2016. 803 с.
9. Водоросли: справочник / С.П. Вассер, Н.В. Кондратьева, Н.П. Масюк [и др.]. Киев: Наукова думка, 1989. 608 с.
10. Krammer K. Cymbella // *Diatoms of Europe, Diatoms of the European Inland waters and comparable habitats*. H. Lange-Bertalot (ed.), A.R.G. Gantner Verlag K.G., 2002. Vol. 3. 584 p.
11. Komarek J., Anagnostidis K. Cyanoprokaryota. 2 Oscillatoriales // *Süßwasserflora von Mitteleuropa*. Büdel B., Krienitz L., Gärtner G. & Schagerl M. (eds.). München: Elsevier, 2005. Bd. (2). 759 p.
12. AlgaeBase. URL: <http://www.algaebase.org> (дата обращения: 17.01.2024).
13. Баранова С.С., Медведева Л.А., Анисимова О.В. Водоросли-индикаторы в оценке качества окружающей среды. М.: ВНИИ природы, 2000. 150 с.
14. Баранова С.С., Медведева Л.А., Анисимова О.В. Биоразнообразие водорослей – индикаторов окружающей среды. Тель-Авив, 2006. 500 с.
15. СанПиН 2.1.3684-21. Санитарно-эпидемиологические требования к содержанию территорий городских и сельских поселений, к водным объектам, питьевой воде и питьевому водоснабжению, атмосферному воздуху, почвам, жилым помещениям, эксплуатации производственных, общественных помещений, организации и проведению санитарно-противоэпидемических (профилактических) мероприятий. М., 2021.
16. Гецен М.В. Водоросли в экосистемах Крайнего Севера / под ред. М.М. Голлербах. Л.: Наука, Ленингр. отд-ние, 1985. 165 с.
17. Ширшов П.П. Планктон арктических вод. М.: Наука, 1982. 256 с.
18. Куликов Г.В., Жевлаков А.В., Бондаренко С.С. Минеральные лечебные воды СССР: справочник. М.: Недра, 1991. 398 с.

References

1. Arakchaa K.D. *A word about the Arzhaans of Tyva*. Moscow: PoliKom Publ.; 1995. 24 p. (In Russ.).
2. Naumenko Yu.V. About algae of the radon source of Tyva (Russia). *Al'gologiya = Algology*. 1998;8(3):242-247. (In Russ.).
3. Naumenko Yu.V. Algal flora of two mineral springs of Tuva. *Sib. ekol. zhurn. = Siberian Ecological Journal*. 2001;(1):397-400. (In Russ.).
4. Arakchaa K.D., Kopylova Yu.G., Nazyn Ch.D., Naksyl M.K., Smirnova I.N. Natural arzhaan complex “Choygan Mineral Waters” and arzhaan Borzu-Khol: results of comprehensive research and development prospects. *Natural systems and economics of border areas of Tuva and Mongolia: fundamental problems, prospects for rational use*. Materials of a Youth Scientific Conference with international participation. Kyzyl: Tuvan Institute of Integrated Development of Natural Resources, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences Press; 2012:98-112. (In Russ.).
5. Nazyn Ch.D., Arakchaa K.D. Taxonomic composition of the algal flora of individual sources of the natural argentine complex “Choygan Mineral Waters”. *Vestn. Tuvinskogo gos. un-ta = Bulletin of the Tuvan State University*. 2013;(2):47-54. (In Russ.).
6. Naumenko Yu.V., Nazyn Ch.D. Algae of the mineral spring Nogaan-Khol (Tyva, Russia). *Rastitel'nyi mir Aziatskoi Rossii: Vestn. Tsent. Sib. bot. sada SO RAN = Flora of Asian Russia: Bulletin of the Central Siberian Botanical Garden SB RAS*. 2021;14(1):28-33. (In Russ.).
7. GOST 17.1.5.04-81. *Protection of Nature. Hydrosphere. Instruments and devices for sampling, primary processing and storage of natural water samples. General technical conditions*. Moscow: Publishing House of Standards, 2002. (In Russ.).
8. Kulikovskiy M.S., Glushchenko A.M., Genkal S.I., Kuznetsova I.V. *Key to diatoms of Russia*. Yaroslavl: Filigran' Publ.; 2016. 803 p. (In Russ.).
9. Wasser S.P., Kondratyeva N.V., Masyuk N.P. et al. *Seaweed. Directory*. Kiev: Naukova dumka Publ.; 1989. 608 p. (In Russ.).
10. Krammer K. Cymbella. *Diatoms of Europe, Diatoms of the European Inland waters and comparable habitats*. H. Lange-Bertalot (ed.). A.R.G. Gantner Verlag K.G. Pubc.; 2002. Vol. 3. 584 p.
11. Komarek J., Anagnostidis K. Cyanoprokaryota. 2 Oscillatoriales. *Süßwasserflora von Mitteleuropa*. B. Büdel, L. Krienitz, G. Gärtner, Schagerl M. (eds.). München: Elsevier GmbH; 2005. Bd. 2. 759 p.
12. *AlgaeBase*. Available from: <http://www.algaebase.org> [Accessed 17th January 2024].

13. Barinova S.S., Medvedev L.A., Anisimova O.V. *Algae-indicators in the assessment of environmental quality*. Moscow: Russian Research and Development Institute of Environmental Protection Press; 2000. 150 p. (In Russ.).

14. Barinova S.S., Medvedev L.A., Anisimova O.V. *Biodiversity of algae - indicators of the environment*. Tel-Aviv, 2006. 500 p. (In Russ.).

15. SanPiN 2.1.3684-21. *Sanitary and epidemiological requirements for the maintenance of territories of urban and rural settlements, for water bodies, drinking water and drinking water supply, atmospheric air, soil, residential premises, operation of industrial and public premises, organization and implementation of sanitary and anti-epidemic (preventive) measures*. Moscow, 2021. (In Russ.).

16. Getsen M.V. *Algae in the ecosystems of the Far North*. M.M. Hollerbach (ed.). Leningrad: Nauka Publ., Leningrad department; 1985. 165 p. (In Russ.).

17. Shirshov P.P. *Plankton of Arctic waters*. Moscow: Nauka Publ.; 1982. 256 p. (In Russ.).

18. Kulikov G.V., Zhevlakov A.V., Bondarenko S.S. *Mineral medicinal waters of the USSR*: reference book. Moscow: Nedra Publ.; 1991. 398 p. (In Russ.).

Информация об авторах

Ю.В. Науменко – доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник.

Ч.Д. Назын – кандидат биологических наук, доцент кафедры биологии и экологии, ТувГУ; заместитель директора по науке, ГБНУ РТ «Центр биосферных исследований».

Е.С. Кашкак – кандидат биологических наук, доцент кафедры химии.

У.С. Ооржак – кандидат биологических наук, доцент, заведующая кафедрой химии.

Information about the authors

Yu.V. Naumenko - Doctor of Science (Biology), Leading Researcher.

Ch.D. Nazyn - Candidate of Science (Biology), Associate Professor of Biology and Ecology Department. TuvSU; Deputy Director for Science, Center of Biosphere Research.

E.S. Kashkak - Candidate of Science (Biology), Associate Professor of Chemistry Department.

U.S. Oorzhak - Candidate of Science (Biology), Associate Professor, Head of Chemistry Department.

Статья поступила в редакцию 05.03.2024; одобрена после рецензирования 25.04.2024; принята к публикации 04.07.2024.
The article was submitted 05.03.2024; approved after reviewing 25.04.2024; accepted for publication 04.07.2024.

Научная статья

УДК 58.006:58.085 (470.67)

doi: 10.18522/1026-2237-2024-3-159-167

ОСОБЕННОСТИ ЕСТЕСТВЕННОГО И КЛОНАЛЬНОГО ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ *MATTHIOLA DAGHESTANICA* (BRASSICACEAE)

Руслан Маликович Османов^{1✉}, Зарина Магомедрасуловна Алиева²
Мадина Вайсулкараниевна Салихова³

¹ Горный ботанический сад – обособленное подразделение Дагестанского федерального исследовательского центра РАН, Махачкала, Республика Дагестан, Россия

^{2, 3} Дагестанский государственный университет, Махачкала, Республика Дагестан, Россия

¹ ru.osmanov@mail.ru✉

² zalieva@mail.ru

³ s.madina.v@mail.ru

Аннотация. Представлены предварительные результаты полевых, лабораторных и биотехнологических методов оценки семенного и вегетативного микроразмножения левкоя дагестанского (*Matthiola daghestanica* (Conti) N. Visch) – эндемичного и редкого вида Восточного Кавказа, занесенного в Красную книгу Республики Дагестан. Для семян левкоя дагестанского характерны различия по всхожести в полевых (оценены с использованием УНУ «Система экспериментальных баз, расположенных вдоль высотного градиента» и коллекции живых растений открытого грунта Горного ботанического сада ДФИЦ РАН) и лабораторных (для четырех различающихся по окраске фракции семян) условиях и *in vitro*. Определены условия введения левкоя дагестанского в культуру *in vitro* и его микроразмножения с использованием разных типов эксплантов.

Ключевые слова: *Matthiola daghestanica*, всхожесть семян, экспериментальные базы, экспланты, *in vitro*, клональное микроразмножение

Для цитирования: Османов Р.М., Алиева З.М., Салихова М.В. Особенности естественного и клонального воспроизведения *Matthiola daghestanica* (Brassicaceae) // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2024. № 3. С. 159–167.

Благодарности: исследование выполнено по теме госзадания Горного ботанического сада «Экспериментальное изучение адаптивных механизмов внутривидовой изменчивости растений» № 122032300230-8 с использованием УНУ «Система экспериментальных баз, расположенных вдоль высотного градиента» и коллекции живых растений открытого грунта Горного ботанического сада ДФИЦ РАН.

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

Original article

FEATURES OF NATURAL AND CLONAL REPRODUCTION OF *MATTHIOLA DAGHESTANICA* (BRASSICACEAE)

Ruslan M. Osmanov^{1✉}, Zarina M. Alieva², Madina V. Salikhova³

¹ Mountain Botanical Garden – Separate Division of the Dagestan Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, Makhachkala, Republic of Dagestan, Russia

^{2, 3} Dagestan State University, Makhachkala, Republic of Dagestan, Russia

¹ ru.osmanov@mail.ru✉

² zalieva@mail.ru

³ s.madina.v@mail.ru

© Османов Р.М., Алиева З.М., Салихова М.В., 2024

Abstract. The article presents preliminary results of field, laboratory and biotechnological methods, assessment of seed and vegetative micropropagation (*Matthiola daghestanica* (Conti) N. Busch) – an endemic and rare species of the Eastern Caucasus, listed in the Red Book of the Republic of Dagestan. Seeds of the *Matthiola daghestanica* are characterized by differences in germination in field (assessed using the USI “System of experimental bases located along an altitudinal gradient” and Collection of living open ground plants of the Mountain Botanical Garden of the Dagestan Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences) and laboratory (for four seed fractions differing in color) conditions and *in vitro*. The conditions for introducing *Matthiola daghestanica* into *in vitro* culture and its micropropagation using different types of explants have been determined.

Keywords: *Matthiola daghestanica*, seed germination, experimental bases, explants, *in vitro*, clonal micropropagation

For citation: Osmanov R.M., Alieva Z.M., Salikhova M.V. Features of Natural and Clonal Reproduction of *Matthiola Daghestanica* (Brassicaceae). *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2024;(3):159-167. (In Russ.).

Acknowledgments: the study was carried out on the topic of the State Assignment of the Mountain Botanical Garden “Experimental study of adaptive mechanisms of intraspecific plant variability” No. 122032300230-8 using the USI “System of experimental bases located along the altitudinal gradient” and Collection of living open ground plants of the Mountain Botanical Garden DFRC RAS.

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

Введение

Некоторые виды рода левкой (*Matthiola* Ait.) представляют научный интерес в связи с их ограниченными репродуктивными качествами в природных ценопопуляциях, редкостью и уязвимостью. Левкой дагестанский (*Matthiola daghestanica* (Conti) N. Busch) – редкий и эндемичный вид Восточного Кавказа. Ареал *M. daghestanica* приходится на Предгорный и Внутригорный Дагестан, где вид произрастает на сухих глинистых и каменистых склонах, локализован единичными экземплярами в пределах высот от 300 до 800 м над уровнем моря [1–4].

По имеющимся данным и изученным эксикатам (LE, DAG, TBI, MW, LENUD, KW, YALT) выявлено более 30 местонахождений *M. daghestanica*. За последние 3 года нами обнаружены новые локации в Ботлихском (окр. с. Кванхидатли), Унцукульском (окр. с. Ашильта) и Магарамкентском (окр. с. Чах-Чах) районах [5].

Общая численность *M. daghestanica* в Дагестане составляет примерно 5–7 тыс. экземпляров. Лимитирующими факторами выступают разрушение местообитаний, низкая численность популяций, антропогенное воздействие, выпас скота, изменение условий обитания, особенности биологии. Эндемичный вид *M. daghestanica* испытывается в Горном ботаническом саду ДФИЦ РАН, обладает декоративными качествами [2, 6].

Цель работы – оценка популяции (нового местонахождения в Унцукульском районе (окр. с. Ашильта)) редкого и эндемичного для Дагестана вида (*M. daghestanica*) с позиций семенного и вегетативного размножения. Ввиду того что в естественных условиях *M. daghestanica* размножается исключительно семенами, а при этом встречаются сведения о слабой приживаемости проростков и ювенильных растений, представляется актуальной оценка возможности введения его в культуру *in vitro* для дальнейшего клонального микроразмножения. Биотехнологические методы сегодня широко применяются для сохранения и воспроизведения редких видов растений. Они открывают путь для дальнейшего перевода растений в условия *ex vitro* в открытый грунт для коллекций и расширяют перспективы их реинтродукции в естественные условия. Некоторые редкие виды находятся в коллекциях ботанических садов не только в открытом грунте или в виде семян, но и *in vitro* [7–10]. В литературе встречаются сведения и о культивировании в стерильных условиях некоторых видов рода *Matthiola* Ait., но *M. daghestanica* среди них нет [11–16]. В связи с этим в цели нашей работы входила и конкретизация возможности клонального воспроизведения *M. daghestanica* (его начальных этапов).

Материал и методы исследований

Для изучения полевой всхожести в 2022 г. произведен осенний посев (октябрь) семенного материала *M. daghestanica* (окр. с. Ашильта, Унцукульский район, 480–530 м над уровнем моря, новое местонахождение) на двух экспериментальных базах Горного ботанического сада ДФИЦ РАН – Цудахарской (ЦЭБ, 1100 м) и Гунибской (ГЭБ, 1750–1800 м). Посев проводился в метровые делянки с междурядьями 35 см и глубиной заделки 2 см. В апреле 2023 г. произведен учет всходов. В целях изучения влияния экспозиций склонов на всхожесть *M. daghestanica* в условиях ГЭБ также осуществлен посев на южном, северном и восточном склонах. Опыт проводился в трехкратной повторности, по 100 семян в каждой.

Метеорологические значения (температура воздуха, относительная влажность и количество выпавших осадков) на экспериментальных базах Горного ботанического сада приводятся в табл. 1.

Таблица 1 / Table 1

Метеорологические значения на экспериментальных базах Горного ботанического сада (октябрь 2022 г. – апрель 2023 г.) [17] / Meteorological values at the experimental bases of the Mountain Botanical Garden (from October 2022 - April 2023) [17]

Параметр			Год, месяц							
			2022			2023				
			X	XI	XII	I	II	III	IV	
Температура воздуха, °С	Средняя	ЦЭБ	11,4	6,0	-0,5	-1,5	-1,5	9,2	11,8	
		ГЭБ	10,2	5,5	-0,6	-1,9	-2,1	7,7	10,2	
	Минимальная	ЦЭБ	1,7	-1,6	-6,4	-13,0	-9,6	-2,0	-2,5	
		ГЭБ	-0,6	-2,2	-8,5	-13,8	-12,5	-3,7	-4,0	
	Максимальная	ЦЭБ	25,4	14,6	8,9	9,3	16,6	24,0	26,1	
		ГЭБ	25,3	16,0	11,1	11,5	15,2	21,2	24,0	
Средняя относительная влажность, %		ЦЭБ	63,0	59,0	63,0	53,0	61,0	54,0	58,0	
		ГЭБ	75,0	70,0	74,0	64,0	69,0	70,0	72,0	
Количество выпавших осадков, мм		ЦЭБ	14,0	16,0	2,5	1,5	6,2	9,6	27,0	
		ГЭБ	25,0	20,0	3,0	1,4	12,0	33,0	34,0	

Для оценки лабораторной всхожести были использованы полноценные (темно-коричневые) семена *M. daghestanica* и семена различной окраски, разделенные на четыре фракции: темно-коричневую, зеленую, коричневую, светло-коричневую. Учет всхожих семян проводился в течение двух недель, проращивание – по ГОСТу [18] в чашках Петри, на увлажненной фильтровальной бумаге с предварительной обработкой семян 1%-м раствором калия перманганата при комнатной температуре 19–22 °С, трехкратной повторности, по 100 семян в каждой. Молодые растения после оценивания лабораторной всхожести высаживали в горшки с почвой, а затем – в открытый грунт в условиях экспериментальных баз Горного ботанического сада.

Исследования по микроклональному размножению выполнены на базе научно-исследовательской лаборатории физиологии и биотехнологии растений им. проф. А.Г. Юсуфова ФГБОУ ВО «Дагестанский государственный университет» (биологический факультет).

Работы по приготовлению питательных сред, обеспечению асептики и введению *M. daghestanica* в культуру *in vitro* проводились по общепринятым методикам [19, 20]. Двухнедельные проростки, полученные из семян, стерилизованных перекисью водорода (H₂O₂, 10 %, 10 мин), делили в условиях бокса на три части. Верхняя часть гипокотилия с верхушечной меристемой далее обозначена как апикальный, средняя – как гипокотильный, а нижняя – как базальный экспланты. Их культивирование проводилось на агаризованной питательной среде Мурасиге – Скуга (МС), содержащей 0,1 или 1 мг/л индолилмасляной кислоты (ИМК) и 0,5 или 2,5 мг/л бензиламинопурина (БАП), в условиях климатической камеры SANYO MLR-

352Н, где поддерживали освещение 2500–3000 лк, 16-часовой фотопериод, температуру +23–25 °С и относительную влажность воздуха 70 %. В качестве показателей оценки состояния эксплантов использовали их выживаемость, размеры и количество сформировавшихся побегов, количество листьев на побег, частоту корнеобразования. Выживаемость определяли как количество выживших эксплантов, выраженное в процентах от общего их числа в варианте, частоту корнеобразования – как количество эксплантов, сформировавших корни, выраженное в процентах от общего их числа в варианте.

Результаты исследования

В обнаруженной ценопопуляции *M. daghestanica* (окр. с. Ашильта) семенное возобновление не ежегодное. В возрастном спектре преобладают иматурные, виргинильные и генеративные особи.

Известно, что в лабораторных условиях обычно наблюдается более высокая всхожесть семян, чем в полевых. Данный факт подтвердился и в наших опытах по проращиванию семян *M. daghestanica*, где лабораторная всхожесть составила 81 %, тогда как полевая по базам и склонам экспозиции варьировала в диапазоне 10–62 %. Это может быть связано с экстремальными условиями в осенне-зимний период (октябрь – февраль) и неблагоприятными погодными условиями (оттепелями), наблюдаемыми весной на экспериментальных базах (табл. 1).

Наиболее низкий процент полевой всхожести семян (10–35 %) зафиксирован на склонах северной, восточной и юго-западной экспозиций в условиях ГЭБ, в условиях ЦЭБ он достигал 65 % (табл. 2). Однако на южном склоне ГЭБ (62 %) был почти такой же, как и на ЦЭБ. Процент всхожести семян *M. daghestanica* на ЦЭБ и ГЭБ (южный склон) был ниже лабораторного почти в 2,5 раза.

Таблица 2 / Table 2

Всхожесть семян *Matthiola daghestanica* / Germination of *Matthiola daghestanica* seeds

Всхожесть		%
Лабораторная		81
Полевая, ЦЭБ		65
Полевая, ГЭБ, склон	Южный	62
	Юго-западный	35
	Восточный	14
	Северный	10

Оценка всхожести семян различных фракций по окраске и энергии прорастания позволяет определять качественные семена и использовать их для дальнейшего выращивания и размножения (табл. 3). Изучение динамики прорастания показало, что наибольшая энергия прорастания в первые сутки характерна для темно-коричневых семян (за исключением 12–14 дней), низкая и средняя – для семян коричневой и светло-коричневой фракций, которые были в 2 раза меньше по массе (79–84 мг) по сравнению с темно-коричневыми семенами (156 мг).

Различия во всхожести семян для фракций, отличающихся по окраске, отмечены для близкородственного вида Дагестана, занесенного также в Красную книгу Дагестана, – *M. caspica* (N. Busch.) Grossh [21]. Процент прорастания *M. caspica* в лабораторных условиях составил 84,0 и 98,1 % для светлой и темной фракций соответственно. Данный факт подтвержден и для *M. daghestanica* (табл. 3), где семена темно-коричневой и зеленой окраски (73,0 и 58,1 %) имели всхожесть выше, чем семена коричневой и светло-коричневой фракций по окраске (43,4 и 53,4 %).

Оценка всхожести по дням характеризуется в целом высоким ($CV = 31–40\%$) и очень высоким ($CV > 40\%$) уровнем изменчивости. В некоторых случаях выборки варьируют на повышенном ($CV = 21–30\%$) и среднем ($CV = 31–40\%$) уровнях.

Таблица 3 / Table 3

**Динамика прорастания семян *Matthiola daghestanica* различной окраски (n=12)
 / Dynamics of germination of *Matthiola daghestanica* seeds of different colors (n=12)**

Сутки	Фракция семян (окраска / масса 100 семян, мг)							
	Темно-коричневая / 156		Зеленая / 92		Коричневая / 79		Светло-коричневая / 84	
	X±Sx	CV, %	X±Sx	CV, %	X±Sx	CV, %	X±Sx	CV, %
3	2,7±0,33	21,7	1,7±0,33	34,6	2,0±0,58	50,0	2,7±0,33	33,5
4	3,7±0,88	41,7	4,3±0,88	35,2	3,3±0,33	17,3	2,3±0,33	24,7
5	9,0±0,57	11,1	6,0±1,15	33,3	4,0±1,00	43,3	4,0±0,57	25,0
6	7,0±0,57	14,2	6,3±0,66	18,2	3,6±0,88	41,7	3,6±0,33	15,7
7	6,6±0,88	23,0	5,0±0,57	20,0	3,0±0,57	33,3	5,0±1,15	40,0
8	9,0±0,57	11,1	4,6±0,88	32,8	5,0±0,57	20,0	5,3±1,20	39,0
9	8,3±0,88	18,3	7,6±0,88	19,9	6,0±1,15	33,3	5,0±0,57	20,0
10	6,0±0,57	16,6	4,0±1,52	66,4	1,6±0,66	69,2	5,0±0,57	20,0
11	6,0±1,15	33,3	5,0±0,57	20,0	2,3±0,88	65,4	5,6±0,88	26,9
12	4,6±0,66	24,7	4,0±1,00	43,3	2,3±0,88	65,4	5,6±1,45	44,4
13	3,6±1,20	56,7	3,6±1,20	56,7	5,0±1,15	40,0	4,3±0,66	26,6
14	2,6±0,66	43,3	3,0±1,15	66,6	3,0±1,15	66,6	2,0±0,57	50,0
15	4,0±0,57	25,0	3,0±0,57	33,3	2,3±0,33	24,7	3,0±0,57	33,3
Всхожесть*	73,0		58,1		43,4		53,4	

Примечание. * – среднее значение по всхожести (%), трехкратная повторность опыта (n=3).

Учтенный фактор «сутки» существенно, с высокой степенью достоверности, влияет на изменчивость темно-коричневых и зеленых семян ($P < 0,01$ и $P < 0,001$), а для коричневых и светло-коричневых семян – на уровне $P < 0,05$ (табл. 4).

Таблица 4 / Table 4

Результаты однофакторного дисперсионного анализа по фракциям семян по группирующей переменной «сутки» / Results of one-way analysis of variance for seed fractions by the grouping variable “day”

Фракция	MS фактора	MS ошибки	F	P
Темно-коричневая	15,52564	1,794872	8,65***	0,000003
Зеленая	7,478632	2,615385	2,86**	0,012091
Коричневая	5,247863	2,076923	2,53*	0,023270
Светло-коричневая	4,974359	1,871795	2,66*	0,017951

Примечание. F – критерий Фишера; P – уровень достоверности: * – $P < 0,05$; ** – $P < 0,01$; *** – $P < 0,001$.

Корреляционный анализ, проведенный по всхожести семян различных фракций *M. daghestanica* в лабораторных условиях, выявил наличие отрицательной, значимой на уровне $P < 0,05$, корреляционной связи для 5-го, 6-го и 9-го дней (табл. 5).

В условиях *in vitro* всхожесть семян *M. daghestanica* достигала 60–70 %, что сопоставимо с лабораторной и полевой всхожестью в условиях ЦЭБ и ГЭБ (южный склон), и превысила полевую в условиях ГЭБ на других выбранных склонах экспозиций.

Экспланты *M. daghestanica* характеризовались высокими показателями жизнеспособности в культуре *in vitro*. Так, выживаемость и побегообразование верхушечных эксплантов достигали 100 % как на контрольной, безгормональной среде, так и на средах с добавлением ИМК и БАП (2,5:0,5 и 1,0:0,1 мг/л). Корнеобразование у этого типа эксплантов в среде, дополненной 1 мг/л БАП и 0,1 мг/л ИМК, достигало только 20 % (табл. 6). В других средах на всем протяжении опыта появления корней не наблюдали.

Таблица 5 / Table 5

**Корреляция между сутками и фракциями семян *Matthiola daghestanica* по окраске
 / Correlation between days and fractions of *Matthiola daghestanica* seeds by color**

Сутки	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Фракции	05	-47	-79*	-79*	-44	-56	-71*	-28	-21	07	22	-16	-42

Примечание. * – уровень достоверности на $P < 0,05$; корреляции представлены в целых числах до сотого значения без нуля и запятой.

Гипокотильные экспланты *M. daghestanica* также имели высокие показатели выживаемости и более интенсивное, по сравнению с апикальными, корнеобразование. Укореняемость этих типов эксплантов в среде, содержащей 2,5 мг/л БАП и 0,5 мг/л ИМК, где корни у апикальных не формировались, составляла 20 %. В варианте с 1,0 мг/л БАП и 0,1 мг/л ИМК на начальных этапах культивирования корнеобразование гипокотильных эксплантов, как и апикальных, – 20 %. На более поздние сроки у гипокотильных эксплантов оно повышалось до 60 %, тогда как у апикальных оставалось на уровне 20 %. В целом более высокие значения показателей корнеобразования у апикальных и гипокотильных эксплантов отмечены на среде БАП 1 + ИМК 0,1 мг/л. Побеги сформировались у всех эксплантов этого типа, но темпы их развития уступали таковым у апикальных эксплантов. Так, на 14-е сутки культивирования побегообразование было отмечено у 100 % апикальных эксплантов и у 60–80 % (в зависимости от гормонального состава среды) гипокотильных.

Особенностью базальных эксплантов, также имеющих высокие показатели выживаемости, являлось формирование корней даже на контрольной, безгормональной среде. При этом более интенсивное корнеобразование (число эксплантов, давших корни, и число корней на эксплант на 36-е сутки опыта) у них отмечено на среде с 2,5 мг/л БАП и 0,5 мг/л ИМК, тогда как у апикальных и базальных – при другом уровне фитогормонов (1,0 и 0,1 мг/л). По темпам побегообразования они уступали как апикальным, так и гипокотильным эксплантам, но через месяц культивирования побеги были сформированы на 100 % эксплантов и этого типа.

Таблица 6 / Table 6

**Показатели эффективности микроразмножения эксплантов *Matthiola daghestanica*, %
 / Indicators of micropropagation efficiency of *Matthiola daghestanica* explants, %**

БАП:ИМК, мг/л	Выживаемость эксплантов			Корнеобразование			Побегообразование		
	Сроки культивирования, сут								
	14	24	36	14	24	36	14	24	36
Апикальные экспланты									
0 : 0	100	100	100	0	0	0	100	100	100
2,5 : 0,5	100	100	100	0	0	0	100	100	100
1,0 : 0,1	100	100	100	20	20	20	100	100	100
Гипокотильные экспланты									
2,5 : 0,5	100	100	100	0	20	20	80	100	100
1,0 : 0,1	100	100	100	20	60	60	60	80	100
Базальные экспланты									
0 : 0	100	100	100	0	20	20	40	60	100
2,5 : 0,5	100	100	100	20	40	60	40	60	100
1,0 : 0,1	100	100	100	20	40	40	80	80	100

Важным показателем, характеризующим успех клонального микроразмножения, является количество побегов, сформированных на одном экспланте. Наиболее высоким оно было для апикальных эксплантов, где на 36-е сутки опыта достигало 11,2 шт. на безгормональной среде и 10,4 – на среде с 1,0 мг/л БАП + 0, 1 мг/л ИМК. Отметим, что на среде с увеличенными дозами этих гормонов (2,5 и 0,5 мг/л соответственно) число сформированных на экспланте побегов существенно снижалось до 3,4 шт. Число листьев, сформированных на одном побеге, было наиболее высоким в варианте с 1,0 мг/л БАП + 0,1 мг/л ИМК. Здесь оно достигало 10,4 шт.,

превышая показатели безгормональной среды (5,6 шт/эксплант) в 1,9, в варианте с 2,5 мг/л БАП + 0,5 мг/л ИМК (7,8 шт/эксплант) – в 1,3 раза. У гипокотильных и базальных эксплантов также наибольшее число листьев формировалось у регенерантов в этом варианте. Таким образом, на среде, содержащей 1 мг/л БАП и 0,1 мг/л ИМК, отмечено более высокое, чем в других вариантах, количество побегов и листьев на них (табл. 7).

Рост новообразованных побегов варьировал в диапазоне 5,8–11,2 мм. У апикальных эксплантов он существенно не зависел от варианта, а у гипокотильных и базальных был более выраженным в варианте 1,0 мг/л БАП и 0,1 мг/л ИМК.

Таблица 7 / Table 7

**Морфометрические показатели эксплантов *Matthiola daghestanica*
 / Morphometric parameters of *Matthiola daghestanica* explants**

БАП:ИМК, мг/л	Количество корней на эксплант, шт.			Высота побегов, мм			Количество листьев на побег, шт.			Количество побегов на эксплант, шт.		
	Срок культивирования, сут											
	14	24	36	14	24	36	14	24	36	14	24	36
Апикальные экспланты												
0	0	0	0	4,0	5,2	6,0	3,8	4,0	5,6	2,6	2,6	3,0
2,5 : 0,5	0	0	0	4,6	5,6	6,0	3,6	3,8	7,8	1,4	1,6	4,6
1,0 : 0,1	2	2	3	4,2	5,4	5,8	4,2	4,6	10,4	3,0	4,0	5,4
Гипокотильные экспланты												
2,5 : 0,5	0	6	6	3,4	5,0	5,8	2,0	2,2	5,4	2,3	2,3	3,4
1,0 : 0,1	4	7	12	2,8	5,2	11,2	2,2	2,8	7,0	2,3	2,3	3,6
Базальные экспланты												
0	0	1	1	2,0	2,8	7,6	3,3	2,8	14,6	2,5	2,0	11,2
2,5 : 0,5	1	2	6	2,6	5,0	7,4	1,8	2,8	7,4	1,5	1,3	3,4
1,0 : 0,1	2	3	3	3,2	4,8	9,8	3,8	4,5	16,4	2,5	2,8	10,4

Результаты исследований позволили получить ценные данные о росте и развитии растений *M. daghestanica*, а также о возможности использования эксплантов *in vitro* для получения большого количества однородных растений, что важно для создания генетического банка семян *M. daghestanica* и коллекции *in vitro*.

Заключение

Впервые в условиях экспериментальных баз Горного ботанического сада ДФИЦ РАН оценена всхожесть семян *Matthiola daghestanica*, которая составляет 10–65 %. Сравнительно низкая полевая всхожесть, в частности в ЦЭБ и на склонах различной экспозиции на ГЭБ (юго-восточный, восточный, северный), объясняется, возможно, экстремальными условиями осенне-зимнего периода и неблагоприятными погодными условиями, наблюдаемыми особенно весной. Лабораторная всхожесть *M. daghestanica* составляет 81 %, при этом наибольшая всхожесть энергии прорастания семян отмечена у темно-коричневых семян (наиболее полноценных). Определены условия введения *M. daghestanica* в культуру *in vitro* и перспективы его клонального микроразмножения, проведены начальные этапы. Полученные результаты дают основу и возможность для создания генетического банка семян *M. daghestanica* и генетической коллекции *in vitro* и *ex situ*.

Список источников

1. Дорофеев В.И. Крестоцветные (Cruciferae Juss.) российского Кавказа // Turczaninowia. 2003. Т. 6 (3). С. 5–137.
2. Муртазалиев Р.А., Теймуров А.А. Левкой дагестанский – *Matthiola daghestanica* (Conti) N. Busch. // Красная книга Республики Дагестан. Махачкала, 2009. С. 167–168.
3. Муртазалиев Р.А. Конспект флоры Дагестана (Lycorodiaceae–Urticaceae) / отв. ред. Р.В. Камелин. Махачкала: Эпоха, 2009. Т. 1. 319 с.

4. Литвинская С.А., Муртазалиев Р.А. Кавказский элемент во флоре российского Кавказа: география, созология, экология. Краснодар: Куб. гос. ун-т, 2009. 439 с.
5. Османов Р.М. Распространение редкого и эндемичного вида *Matthiola daghestanica* в Дагестане // Изв. Оренбургского гос. аграр. ун-та. 2022. № 3 (95). С. 86–90. <https://doi.org/10.37670/2073-0853-2022-95-3-86-90>
6. Муртазалиев Р.А. Левкой дагестанский – *Matthiola daghestanica* (Conti) N. Busch // Красная книга Республики Дагестан. Махачкала: ИП Джамалудинов М.А., 2020. С. 277–278.
7. Новикова Т.И. Использование биотехнологий для размножения декоративных растений // Изв. Иркутского гос. ун-та. Биология. Экология. 2011. Т. 4, № 2. С. 74–80.
8. Жолобова О.О. Сохранение редких и исчезающих видов растений в культуре *in vitro* и оценка уровня их внутривидового полиморфизма: автореф. дис. ... канд. биол. наук. Белгород, 2012. 23 с.
9. Ветчинкина Е.М., Ширнина И.В., Ширнин С.Ю., Молканова О.И. Сохранение редких видов растений в генетических коллекциях *in vitro* // Вестн. Балтийского фед. ун-та им. И. Канта. 2012. № 7. С. 109–118.
10. Алиева З.М., Зубаирова Ш.М., Мартемьянова В.К., Юсуфов А.Г. Особенности естественного воспроизведения и реализации процессов регенерации у популяций *Hedysarum daghestanicum* // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2016. № 4. С. 42–46. <https://doi.org/0.18522/0321-3005-2016-4-40-44>.
11. Магомедалиева В.К., Алиева З.М. Перспективы размножения редких и исчезающих видов растений *in vitro* // Вестн. Даг. гос. ун-та. 2012. № 6. С. 167–171.
12. Алиева З.М. Эколого-физиологические аспекты воспроизведения и устойчивости к абиотическим стрессорам ресурсных видов растений Дагестана: автореф. дис. ... д-ра биол. наук. Владикавказ, 2017. 49 с.
13. Алиева З.М. Воспроизведение редких растений Дагестана *in vitro* // Труды XIV съезда Русского ботанического общества: материалы конф. «Ботаника в современном мире» (г. Махачкала, 18–23 июня 2018 г.). Махачкала: АЛЕФ, 2018. С. 233–234.
14. Торустанов П.С., Масленников А.В. Особенности микроклонального размножения редкого и охраняемого вида – левкой душистого (*Matthiola fragrans* Bunge) // Фундаментальные и прикладные исследования по приоритетным направлениям биоэкологии и биотехнологии: материалы V Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием (г. Ульяновск, 20 мая 2022 г.). Чебоксары: Среда, 2022. С. 38–40.
15. Golub N.O., Cherednichenko M.Yu. *In vitro* introduction of two *Matthiola* species // The 3rd International Symposium on Euroasian biodiversity. Abstract e-Book. Minsk, 2017. 413. URL: <https://elib.bsu.by/bitstream/123456789/181058/1/p448.pdf> (дата обращения: 10.10.2023).
16. Behzad K.L., Afshin A.H., Ardashir Kh.-M. *In vitro* propagation of *Matthiola incana* (Brassicaceae) – an ornamental plant // Plant Omics Journal. 2011. Vol. 4 (7). P. 435–440.
17. Архив погоды. URL: <https://tr5.ru/> (дата обращения: 20.03.2024).
18. ГОСТ 24933.2-81. Семена цветочных культур. Методы определения всхожести и энергии прорастания. М., 1982. С. 84–89.
19. Бутенко Р.Г. Культура клеток растений. М.: Наука, 1991. 166 с.
20. Калинин Ф.Л., Кушнир Г.П., Сарнацкая В.В. Технология микроклонального размножения растений. Киев: Наукова думка, 1992. 232 с.
21. Магомедова М.А., Алимурадова Г.Ф. Успешность семенного размножения левкой каспийского в лабораторных условиях // Вестн. Соц.-пед. ин-та. 2019. № 1 (29). С. 18–23.

References

1. Dorofeev V.I. Cruciferae (Cruciferae Juss.) of the Russian Caucasus. *Turczaninowia*. 2003;6(3):5-137. (In Russ.).
2. Murtazaliev R.A., Teymurov A.A. *Matthiola daghestanica* (Conti) N. Busch. *Red Book of the Republic of Dagestan*. Makhachkala, 2009:167-168. (In Russ.).
3. Murtazaliev R.A. *Abstract of the flora of Dagestan (Lycopodiaceae – Urticaceae)*. R.V. Kamelin (rep. ed.). Makhachkala: Epokha Publ.; 2009. Vol. 1. 319 p. (In Russ.).
4. Litvinskaya S.A., Murtazaliev R.A. *Caucasian element in the flora of the Russian Caucasus: geography, zoology, ecology*. Krasnodar: Kuban State University Press; 2009. 439 p. (In Russ.).
5. Osmanov R.M. Distribution of the rare and endemic species *Matthiola daghestanica* in Dagestan. *Izvestiya Orenburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta = News of the Orenburg State Agrarian University*. 2022;(3):86-90. <https://doi.org/10.37670/2073-0853-2022-95-3-86-90>. (In Russ.).
6. Murtazaliev R.A. *Matthiola daghestanica* (Conti) N. Busch. *Red Book of the Republic of Dagestan*. Makhachkala: IP Dzhamaludinov M.A., 2020:277-278. (In Russ.).
7. Novikova T.I. The use of biotechnologies for the propagation of ornamental plants. *Izvestiya Irkutskogo gosudarstvennogo universiteta. Biologiya. Ekologiya = News of Irkutsk State University. Biology. Ecology*. 2011;4(2):74-80. (In Russ.).
8. Zholobova O.O. *Preservation of rare and endangered plant species in in vitro culture and assessment of the level of their intraspecific polymorphism*. Dissertation Thesis. Belgorod, 2012. 23 p. (In Russ.).

9. Vetchinkina E.M., Shirmina I.V., Shirmin S.Yu., Molkanova O.I. Preservation of rare plant species in genetic collections *in vitro*. *Vestn. Baltijskogo fed. un-ta im. I. Kanta* = *Bulletin of the Kant Baltic Federal University*. 2012;(7):109-118. (In Russ.).
10. Alieva Z.M., Zubairova Sh.M., Martemyanova V.K., Yusufov A.G. Features of natural reproduction and implementation of regeneration processes in populations of *Hedysarum daghestanicum*. *Izv. vuzov. Sev.-Kavk. region. Estestv. nauki* = *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science*. 2016;(4):42-46. <https://doi.org/0.18522/0321-3005-2016-4-40-44>. (In Russ.).
11. Magomedalieva V.K., Alieva Z.M. Prospects for the propagation of rare and endangered plant species *in vitro*. *Vestn. Dag. gos. un-ta* = *Bulletin of the Dagestan State University*. 2012;(6):167-171. (In Russ.).
12. Alieva Z.M. *Ecological and physiological aspects of reproduction and resistance to abiotic stressors of resource plant species in Dagestan*. Dissertation Thesis. Vladikavkaz, 2017. 49 p. (In Russ.).
13. Alieva Z.M. Reproduction of rare plants of Dagestan *in vitro*. *Proceedings of the XIV Congress of the Russian Botanical Society: materials of the conference "Botany in the modern world"* (Makhachkala, June 18-23, 2018). Makhachkala: ALEF Publ.; 2018:233-234. (In Russ.).
14. Torutanov P.S., Maslennikov A.V. Features of microclonal propagation of a rare and protected species – fragrant gilliflower (*Matthiola fragrans* Bunge). *Fundamental and applied research in priority areas of bioecology and biotechnology: materials of the V All-Russian Scientific-Practical Conference with international participation* (Ulyanovsk, May 20, 2022). Cheboksary: Sreda Publ.; 2022:38-40. (In Russ.).
15. Golub N.O., Cherednichenko M.Yu. *In vitro* introduction of two *Matthiola* species. *The 3rd International Symposium on Euroasian biodiversity*. Abstract e-Book. 2017. 413 p. Available from: <https://elib.bsu.by/bitstream/123456789/181058/1/p448.pdf>. [Accessed 10th October 2023].
16. Behzad K.L., Afshin A-H., Ardashir Kh.-M. *In vitro* propagation of *Matthiola incana* (Brassicaceae) – an ornamental plant. *Plant Omics Journal*. 2011;4(7):435-440.
17. *Weather archive*. Available from: <https://rp5.ru/> [Accessed 20th March 2024]. (In Russ.).
18. *GOST 24933.2-81. Flower seeds. Methods for determining germination and germination energy*. Moscow, 1982:84-89. (In Russ.).
19. Butenko R.G. *Plant cell culture*. Moscow: Nauka Publ.; 1991. 166 p. (In Russ.).
20. Kalinin F.L., Kushnir G.P., Sarnatskaya V.V. *Technology of microclonal propagation of plants*. Kiev: Naukova dumka Publ.; 1992. 232 p. (In Russ.).
21. Magomedova M.A., Alimuradova G.F. Success of seed propagation of Caspian gilliflower in laboratory conditions. *Vestn. Sotsial'no-pedagogicheskogo in-ta* = *Bulletin of the Social Pedagogical Institute*. 2019;(1):18-23. (In Russ.).

Информация об авторах

Р.М. Османов – кандидат биологических наук, младший научный сотрудник лаборатории флоры и растительных ресурсов.

З.М. Алиева – доктор биологических наук, профессор кафедры физиологии растений и биотехнологии.

М.В. Салихова – студент.

Information about the authors

R.M. Osmanov - Candidate of Science (Biology), Junior Researcher at the Laboratory of Flora and Plant Resources.

Z.M. Alieva - Doctor of Science (Biology), Professor of the Department of Plant Physiology and Biotechnology.

M.V. Salikhova – Student.

*Статья поступила в редакцию 02.04.2024; одобрена после рецензирования 24.05.2024; принята к публикации 04.07.2024.
The article was submitted 02.04.2024; approved after reviewing 24.05.2024; accepted for publication 04.07.2024.*

НАШИ ЮБИЛЯРЫ

OUR PERSONS

Юрий Иванович Рябухин
(75 лет со дня рождения)

Yury Ivanovich Ryabukhin
(to the 75 th Anniversary)



Юрий Иванович Рябухин родился 2 августа 1949 г. в станице Обливской Ростовской области, в семье учителей. В 1971 г. окончил химический факультет Ростовского государственного университета (ныне – Южный федеральный университет) по специальности «химия» со специализацией по кафедре химии природных и высокомолекулярных соединений, в 1974 г. – аспирантуру при той же кафедре, где его учителями стали профессора Ю.А. Жданов, Г.Н. Дорофеенко, В.И. Минкин. Защитил на диссертационном совете при РГУ кандидатскую (1975) и докторскую (1991) диссертации по органической химии. Звание профессора получил в 1997 г. Является академиком Российской академии медико-технических наук (1993) и Международной академии наук экологии и безопасности жизнедеятельности (2003), членом-корреспондентом Российской академии естествознания (РАЕ) (2020) и членом Российского химического общества им. Д.И. Менделеева.

С 1974 г. – младший и старший научный сотрудник, заведующий лабораторией азотистых гетероциклов отдела химии гетероциклических соединений и организованной по его инициативе химико-фармацевтической лаборатории НИИ физической и органической химии РГУ, одновременно с 1991 г. – профессор кафедры химии Ростовского педагогического института; в 1995 г. по приглашению ректора Волгоградского государственного технического университета И.А. Новакова становится заведующим кафедрой химии, экологии и биотехнологии Волжского политехнического института и по совместительству профессором кафедры экологии и природопользования Волжского гуманитарного института этого же университета; также читал лекции по органической химии студентам государственного университета Джексона (США); в 2001 г. по приглашению проф. Н.Т. Берберовой и ректора Астраханского государственного технического университета (АГТУ) Ю.Н. Кагакова становится заведующим кафедрой общей, неорганической и аналитической химии; с 2017 г. – профессор кафедры химии Института нефти и газа АГТУ.

Ю.И. Рябухин создал научное направление «химия гетероциклических катионов оксазолония, оксазинония, их бензо-, нафто-, тиа- и азааналогов», которое включено в соответствующий реестр. Высокая, за счёт положительного заряда, и полифункциональная, за счёт структуры, реакционная способность этих соединений обогатила органическую химию уникальными синтонами

для эффективного получения многих типов труднодоступных соединений. Способность оксазинония замещать атом кислорода на азот явилась основой принципиально нового синтеза низко-токсичных с широким спектром биологической активности пиримидинов – монокарбонильных аналогов азотистых оснований нуклеиновых кислот.

На основе открытых реакций рециклизации бензоксазинония под действием бинуклеофилов разработан методический подход к синтезу *сим.*-триазинов, различного типа 1,2,4-триазолов и оксадиазолов с моно- и дигидроксифенильными квазиароматическими, за счёт сильной водородной связи, фрагментами, которые придают этим гетероциклам координационные и важные физико-химические свойства.

Ю.И. Рябухин – автор создания на основе бензоксазинония широко изучаемых химиками ЮФУ и ЮНЦ РАН термо- и фотохромных спиропиранов, способных обратимо менять окраску под действием света определённой длины волны – эффект, используемый, в частности, в очках-хамелеонах и оптической записи информации.

В рамках творческого содружества с клиническими фармакологами Ростовского медицинского института по заданию Госкомитета по науке и технике СССР разработан нейропсихотропный препарат «Триметидон», оригинальный по структуре и физиологическому действию транквилизатор с антидепрессивным эффектом. Профессор Ю.И. Рябухин консультировал при создании в США на основе разработанных им методов синтеза дигидроксифенилоксадиазолов и их взаимодействия с металлами жизни эффективного железоснижающего лекарственного средства; продемонстрировал принципиальную возможность прямого получения с высоким, до 100 %, выходом внутрикомплексных (хелатных) соединений стехиометрическим взаимодействием различного типа неагрессивных соединений – потенциальных лигандов, в частности α -аминокислот, – основы белков, с переходными элементами в двух- и трёхкомпонентных системах: металлорганическое соединение – органический сольватирующий растворитель; металлорганическое соединение (в момент его плавления).

Юрий Иванович был научным руководителем 7 кандидатов химических, биологических и фармацевтических наук по органической, физической и фармацевтической химии, фармакологии и физиологии человека и животных; являлся консультантом докторской и 5 кандидатских диссертаций, исследования по химии на степень Ph.D., а также сопредседателем экспертного совета и заместителем председателя научно-технического совета программы Министерства образования и науки РФ «Новые лекарственные препараты», представителем Центра по биоактивным веществам фирмы Sintest по Северному Кавказу; сотрудничал с канадской фирмой Uniroyal Chemical и Национальным институтом рака (США). Был членом оргкомитетов всесоюзных и региональных конференций, редколлегии журнала «Химия и компьютерное моделирование. Бултеровские сообщения» и диссертационных советов по органической химии и химической технологии при РГУ и АГТУ; назначался рецензентом конкурса молодых учёных от Клуба российских членов Европейской академии; являлся рецензентом журнала «Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки», нескольких монографий и учебных пособий, председателем и членом жюри Международной олимпиады студентов Ассоциации университетов Прикаспийских государств и Калмыкии, Олимпиады вузов Федерального агентства по рыболовству, зонального (Юга России) и регионального этапов Всероссийской олимпиады школьников, организатором конкурсов «Знатоки химии» среди студентов стран Азии, Африки и Латинской Америки, астраханских вузов и городских конкурсов «Юные исследователи в решении химических, биологических и экологических проблем»; преподавал химию в колледже, классах школьников – призёров олимпиад и в химико-биологическом классе Лицея-интерната АГТУ, подарил комплекты своих учебных пособий 6 сельским школам; как эксперт Федеральной службы по надзору в сфере природопользования осуществлял химико-технологическую и экологическую экспертизу разработанного Краснодарским проектным институтом расширения Астраханского газоперерабатывающего завода; руководил сертификационными курсами повышения квалификации работников лабораторий анализа воды; является членом советов экспертного и экспортного контроля АГТУ.

Ю.И. Рябухин – автор свыше 400 научно-педагогических трудов; 39 авторских свидетельств и патентов на изобретения и базы данных, закрепляющих приоритет справочника «Биотехнологические термины» и одноимённого русско-английского словаря-справочника; 16 технических условий на производство реактивов и продуктов малотоннажной химии; 10 обзоров; свыше

100 статей в академических, центральных ведомственных и зарубежных журналах (Англия, Белоруссия, Бельгия, Бурундия, Латвия, Сербия, Швейцария); 100 книг объёмом около 9 тыс. страниц, включая 15 монографий, словарей и справочников, 85 учебных пособий (10 – с грифом учебно-методических объединений) для высшего и среднего профессионального образования по истории химии, общей, неорганической, органической, физической, аналитической, биоорганической, строительной и полимерной химии, геохимии, химии топлива и смазочных материалов, электронной спектроскопии, коррозии и защите металлов. Некоторые книги, выпущенные в издательствах Academic Press (США), Elsevier (Амстердам), «Лань» (Санкт-Петербург), Южного федерального университета, Астраханского, Волгоградского, Дагестанского и Тверского технических университетов, Астраханского и Череповецкого университетов, Астраханских медицинского и архитектурно-строительного университетов, отмечены на Московском международном салоне «Неделя образования» (2020, золотая медаль и диплом), Юбилейной международной выставке-презентации научных и учебно-методических изданий (2020, золотая медаль «Европейское качество» и орден «Первый среди равных»), Международной книжной ярмарке во Франкфурте-на-Майне (2020, диплом), Лондонской книжной выставке (2021, золотая медаль).

Профессор Ю.И. Рябухин – автор очерков о выдающихся химиках А.Н. Бахе, К. Венкатарамане, Л. Полинге, В.И. Вернадском, М.В. Ломоносове, Н.А. Несмеянове, отце и сыне Б.А. и В.Б. Казанских; научно-популярных докладов о российских учёных и женщинах-химиках, лауреатах Нобелевской премии, молодых выдающихся учёных-химиках и современных проблемах химии и экологии.

Юрий Иванович – ветеран труда, почётный работник высшего профессионального образования РФ и заслуженный деятель науки и образования РАЕ. За вклад в науку и образование награждён золотыми медалями им. М.В. Ломоносова и В.И. Вернадского, дипломами Евросоюза и имени древнегреческого философа Платона, грамотами и благодарностями Министерства образования и науки РФ, Федерального агентства по рыболовству, СКНЦ ВШ, губернатора, думы и минобразования и науки Астраханской области, Волгоградского областного комитета по охране природы, мэра Астрахани, администрации и городского совета народных депутатов Волжского; за патриотическое воспитание и учебно-научную работу со школьниками и студентами, помощь в компенсирующем образовании детей-сирот и как директор школы «Юный исследователь» награждён грамотами Министерства экономики РФ, Российского молодёжного политехнического общества, Выставки некоммерческих объединений России, Областного центра развития творчества, юбилейным знаком Российской научно-социальной программы для молодёжи и школьников «Шаг в будущее» и памятными медалями ЦК КПРФ «100 лет Красной Армии», «В ознаменование 140-летия со дня рождения И.В. Сталина» и «75 лет Великой Победы».

Ю.И. Рябухин признавался лучшим изобретателем РГУ, был лауреатом конкурса «Молодые учёные-химики Северного Кавказа» и конкурса на лучшую научно-исследовательскую работу в номинации «Высшая школа Северного Кавказа – медицине», персоналия о нём помещена в энциклопедию «Известные учёные России» и справочник «Кто есть кто в российской химии». Кафедра под его руководством награждена медалью «100 лет высшему рыбохозяйственному образованию России».

В.И. Минкин

Сердечно поздравляем Юрия Ивановича со знаменательной датой – 75-летием со дня рождения, желаем ему здоровья, счастья, внимания близких, а также дальнейших творческих успехов на ниве российского просвещения!

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

Подписано в печать 27.09.2024. Выход в свет 30.09.2024. Формат 60×84 1/8. Бумага офсетная.
Шрифт Times. Усл. печ. л. 19,76. Уч.-изд. л. 22,21. Тираж 250 экз. Заказ № 9656.

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

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

Отпечатано в отделе полиграфической, корпоративной и сувенирной продукции
Издательско-полиграфического комплекса КИБИ МЕДИА ЦЕНТРА ЮФУ,
344090, г. Ростов-на-Дону, пр. Стачки, 200/1, корп. 1, к 104, тел. +7 (863) 243-41-66

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

Signed print September 27, 2024. The publication September 30, 2024. Format 60×84 1/8. Offset paper. Font Times.
Conv. print. sheets 19.76. Publ. sign. 22.21. Edition 250 copies. Order number 9656.

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

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

Printed in the printing department, and corporate souvenirs,
Publishing and printing complex KIBI MEDIA CENTER, SFU,
344090, Rostov-on-Don, Stachki Ave, 200/1, build. 1, room 104, phone (863) 243-41-66

**НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
«ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ.
СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ РЕГИОН. ЕСТЕСТВЕННЫЕ НАУКИ»**

Рецензируемый журнал «Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки» продолжает приём работ. Он имеет статус центрального издания и включён в перечень ВАК по следующим отраслям:

- физико-математические науки (математика, механика);
- науки о Земле.

Принимаются работы и по другим отраслям науки. Также печатаются материалы в разделах «Заметки о книгах», «Научная жизнь», «Штрихи к портрету».

Журнал издается с периодичностью 4 номера в год. С электронной версией можно ознакомиться на сайте Научной электронной библиотеки http://elibrary.ru/title_about.asp?id=7362. Опубликованные статьи индексируются в российских и международных электронных библиотеках и наукометрических базах данных: РИНЦ (RSCI), РУКОНТ, «Киберленинка», ЭБС «Университетская библиотека онлайн», ИВИС, Ulrich, EBSCO, Chemical Abstracts. Журнал включен в Russian Science Citation Index на платформе Web of Science.

Авторы, сохраняя за собой авторские права на работу и передавая журналу «Известия вузов. Северо-Кавказский регион» право первой публикации, автоматически принимают на себя обязательство не печатать её ни полностью, ни частично в каком-либо издании без указания ссылки на оригинальную публикацию в этом журнале.

Издательские услуги оплачиваются организацией или автором после утверждения статьи на редколлегии.

Оформление работ осуществляется согласно правилам:

1. Представляется статья в электронном виде. Перед заголовком указать индекс УДК.
2. Статья оформляется в формате .doc или .docx (MS Word) через 1,5 интервала, шрифтом Times New Roman размером 14 пт, страницы пронумерованы.
3. Сведения об авторах с указанием автора, ответственного за переписку, на русском и английском языках. Экспертное заключение.
4. Полное название организации на русском и английском языках.
5. Название статьи и фамилии авторов на русском и английском языках.
6. Аннотация на русском и английском языках (1000–1500 знаков / 150–200 слов).
7. Ключевые слова на русском и английском языках (8–10 слов).

Журнал распространяется по подписке через объединённый каталог «Пресса России», интернет-каталог «Пресса по подписке». Подписной индекс – 70415 (подписка на полугодие).

Адрес для переписки: 344006, г. Ростов-на-Дону, ул. Б. Садовая, 105/42, ЮФУ, редакция журнала «Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки».

Тел./факс главной редакции (863) 218-40-00, добавочный 11-093, 11-094.

Е-mail: izvestiya@sfedu.ru

Адрес в Интернете: www.izvestiya.sfedu.ru