

ИЗВЕСТИЯ
ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

*Северо-Кавказский
регион*

ЕСТЕСТВЕННЫЕ

НАУКИ

2025

2

Журнал основан в 1972 г. Ю.А. Ждановым

Главная редакция:

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

Редакционная коллегия:

М.А. Боровская – главный редактор, академик 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. Фатгаль – 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, Academician, 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: 10.18522/1026-2237-2025-2

Свидетельство о регистрации
ПИ № ФС 77 – 77252 от 25.11.2019,
выдано Федеральной службой по надзору
в сфере связи, информационных технологий
и массовых коммуникаций
Научный журнал
Издается с 1973 г.
Периодичность серии 4 номера в год
№ 2 (226) 2025 г.

Registration certificate
PI No. FS 77 - 77252 dated 25.11.2019
issued Federal Service for Supervision
of Communications, Information Technology,
and Mass Media
Science magazine
Published since 1973.
4 issues per a year
No. 2 (226) 2025

ЕСТЕСТВЕННЫЕ НАУКИ

NATURAL SCIENCE

СОДЕРЖАНИЕ

CONTENTS

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ

PHYSICAL AND MATHEMATICAL SCIENCES

- Бабешко В.А., Евдокимова О.В., Бабешко О.М., Евдокимов В.С.* О контактной задаче на анизотропном композите со штампом в форме тупогольного клина 4
- Сумбатьян М.А., Титаренко Е.А.* Эффективный метод расчета собственных частот для волнового уравнения внутри трапецевидной области 13
- Хопёрский А.Н., Надолинский А.М., Конеев Р.В., Толкунова Ю.Н.* О дипольном приближении в теории атома 23
- Шармин В.Г., Шармин Д.В., Шармина Т.Н.* О некоторых свойствах k -поверхности без кручения в $(n+k)$ -мерном евклидовом пространстве 29

- Babeshko V.A., Evdokimova O.V., Babeshko O.M., Evdokimov V.S.* On the Contact Problem on an Anisotropic Composite Layer with a Stamp in the Shape of an Obtuse Wedge 4
- Sumbatyan M.A., Titarenko E.A.* An Efficient Method for Calculation of Natural Frequencies for Wave Equation Inside a Trapezoid Region 13
- Hopersky A.N., Nadolinsky A.M., Koneev R.V., Tolkunova J.N.* On the Dipole Approximation in the Theory of the Atom 23
- Sharmin V.G., Sharmin D.V., Sharmina T.N.* On Some Properties of k -surface without Torsion in $(n+k)$ -dimensional Euclidean Space 29

НАУКИ О ЗЕМЛЕ

SCIENCES OF EARTH

- Гарькуша Д.Н., Федоров Ю.А., Попов Ю.В., Андреев Ю.А., Мьякинников И.О., Тамбиева Н.С., Талпа Б.В., Назаренко О.В.* Подземные источники западной прибрежной зоны гиперсоленого озера Баскунчак: гидрохимические особенности и эмиссия парниковых газов 36
- Джумаян Н.Р.* Особенности формирования, состав, качество и технологические свойства углей Мугунского месторождения (Иркутский угольный бассейн) 56

- Gar'kusha D.N., Fedorov Yu.A., Popov Yu.V., Andreev Yu.A., Myakinnikov I.O., Tambieva N.S., Talpa B.V., Nazarenko O.V.* Underground Sources of the Western Coastal Zone of the Hypersalted Lake Baskunchak: Hydrochemical Features and Greenhouse Gas Emissions 36
- Dzhumayan N.R.* Conditions of Formation, Composition, Quality and Technological Properties of Coals of the Mugun Deposit (Irkutsk Coal Basin) 56

Зорин Д.А. Особенности изменения агроклиматических показателей Удмуртской Республики	63	Zorin D.A. Features of Changes in Agroclimatic Indicators of the Udmurt Republic.....	63
Комаров Р.С. Региональные особенности сезонной изменчивости ионного стока в бассейне реки Кубани	74	Komarov R.S. Regional Features of Seasonal Variability of Ion Flux in the Kuban River Basin	74
Ревуцкая И.Л., Ревуцкая О.Л., Позднякова Т.М., Суриц О.В. Количественный анализ распределения железа и марганца в поверхностных водах Еврейской автономной области.....	83	Revutskaya I.L., Revutskaya O.L., Pozdnyakova T.M., Surits O.V. Quantitative Analysis of Iron and Manganese Distribution in Surface Waters of the Jewish Autonomous Region	83
Тимошенко Д.В., Куповых Г.В. Суточная динамика атмосферного электрического поля в турбулентно-конвективном приземном слое.....	95	Timoshenko D.V., Kupovykh G.V. Diurnal Dynamics of the Atmospheric Electric Field in a Turbulent-Convective Surface Layer	95
Федоров Ю.А., Доценко Н.В., Костенко Д.Ф., Головкин И.В., Станиславский К.С. О содержании ртути в поверхностных водах бассейна озера Байкал по результатам экспедиционных исследований.....	104	Fedorov Yu.A., Dotsenko N.V., Kostenko D.F., Golovkov I.V., Stanislavsky K.S. On the Mercury Content in Surface Waters of the Lake Baikal Basin Based on the Results of Expeditionary Research	104
Хаванский А.Д., Богачев И.В., Эртель А.Б., Меринова Ю.Ю. Современные природно-антропогенные ландшафты и территориальные комплексы Ростовской области	114	Khavanskii A.D., Bogachev I.V., Ertel A.B., Merinova Yu.Yu. Modern Natural-Anthropogenic Landscapes and Territorial Complexes of the Rostov Region.....	114
Щербина В.Г. Загрязнение атмосферного воздуха выбросами автотранспорта в пригородной зоне Сочинского Причерноморья.....	124	Scherbina V.G. Air Pollution by Vehicle Emissions in the Suburban Area of the Sochi Black Sea Region	124

БИОЛОГИЧЕСКИЕ НАУКИ

Аухадиева Э.А., Даукаев Р.А., Мусабилов Д.Э., Аллаярова Г.Р., Афонькина С.Р., Зеленковская Е.Е. Оценка уровня содержания нитратов в плодово-овощной продукции	133
Лиджиева Н.Ц., Бадмаева Г.Д., Очирова А.С. Полихромные ценопопуляции <i>Tulipa suaveolens</i> Roth (Liliaceae): структура морфологической изменчивости и виталитетная структура	141
Сидоренко М.Л., Нестерова О.В. Вклад микроорганизмов в углеродный баланс: эмиссия и секвестрация CO ₂ почв.....	152

BIOLOGICAL SCIENCES

Aukhadieva E.A., Daukaev R.A., Musabirov D.E., Allayarova G.R., Afonkina S.R., Zelenkovskaya E.E. Estimation of the Nitrate Content in Fruit and Vegetable Products	133
Lidzhiyeva N.Ts., Badmaeva G.D., Ochirova A.S. Polychrome Coenopopulations of <i>Tulipa suaveolens</i> Roth (Liliaceae): Structure of Morphological Variability and Vitality Structure	141
Sidorenko M.L., Nesterova O.V. Microbial Contribution to the Carbon Balance: Soils CO ₂ Emission and Sequestration.....	152

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ

PHYSICAL AND MATHEMATICAL SCIENCES

Научная статья

УДК 539.3

<https://doi.org/10.18522/1026-2237-2025-2-4-12>

О КОНТАКТНОЙ ЗАДАЧЕ НА АНИЗОТРОПНОМ КОМПОЗИТНОМ СЛОЕ СО ШТАМПОМ В ФОРМЕ ТУПОУГОЛЬНОГО КЛИНА

**Владимир Андреевич Бабешко^{1✉}, Ольга Владимировна Евдокимова²,
Ольга Мефодиевна Бабешко³, Владимир Сергеевич Евдокимов⁴**

^{1, 3, 4} Кубанский государственный университет, Краснодар, Россия

² Южный научный центр Российской академии наук, Ростов-на-Дону, Россия

¹ babeshko41@mail.ru ✉ <https://orcid.org/0000-0002-6663-6357>

² evdokimova.olga@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1869-5413>

³ babeshko49@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1283-3870>

⁴ evdok_yova@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7824-6164>

Аннотация. Впервые построено точное решение контактной задачи о действии жесткого клиновидного, с тупым углом, штампа на слой композитного материала, имеющего произвольную анизотропию. Исследование основано на применении построенного ранее методом блочного элемента точного решения двумерного интегрального уравнения Винера – Хопфа для клиновидного штампа с прямым углом. Это открыло возможность, благодаря гомеоморфизму носителей штампов как топологических пространств, строить точные решения контактных задач для клиновидных, с тупым углом, штампов. По сравнению с полосовыми штампами решение содержит аддитивно дополнительный член, описывающий концентрацию контактных напряжений в угловой точке, т.е. в вершине штампа. Расчет показателя особенности концентрации контактных напряжений в этой точке близок к значениям, полученным приближенно численными методами в ряде работ. В зоне, рассматриваемой вдали от вершины штампа, точное решение переходит в решение для случая полубесконечного штампа. Разработанный метод применим для композитов произвольных анизотропий, возникающих в линейно-упругих материалах и кристаллах любых сечений. Он может быть полезен в инженерной практике и в сейсмологии при оценке концентраций контактных напряжений в зонах литосферных плит, имеющих подобные углы.

Ключевые слова: контактные задачи, тупоугольный штамп, анизотропия, уравнение Винера – Хопфа, концентрация напряжений

Для цитирования: Бабешко В.А., Евдокимова О.В., Бабешко О.М., Евдокимов В.С. О контактной задаче на анизотропном композитном слое со штампом в форме тупоугольного клина // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2025. № 2. С. 4–12. <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2025-2-4-12>

Благодарности: исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда и Кубанского научного фонда, региональный проект 24-11-20006.

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

Original article

ON THE CONTACT PROBLEM ON AN ANISOTROPIC COMPOSITE LAYER WITH A STAMP IN THE SHAPE OF AN OBTUSE WEDGE

Vladimir A. Babeshko¹, Olga V. Evdokimova², Olga M. Babeshko³, Vladimir S. Evdokimov⁴

^{1, 3, 4} Kuban State University, Krasnodar, Russia

² Southern Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Rostov-on-Don, Russia

¹ babeshko41@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6663-6357>

² evdokimova.olga@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1869-5413>

³ babeshko49@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1283-3870>

⁴ evdok_yova@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7824-6164>

Abstract. In this paper, for the first time, an exact solution is constructed to the contact problem of the action of a rigid wedge-shaped die with an obtuse angle on a layer of composite material having arbitrary anisotropy. The study is based on the application of the exact solution of the two-dimensional Wiener-Hopf integral equation for a wedge-shaped die with a right angle, previously constructed by the block element method. This made it possible, thanks to the homeomorphism of stamp carriers as topological spaces, to construct exact solutions to contact problems for wedge-shaped, obtuse-angled stamps. In comparison with strip stamps, the solution contains an additively additional term describing the concentration of contact stresses at the corner point, that is, at the top of the stamp. The calculation of the characteristic of the contact stress concentration at this point is close to the values obtained by approximate numerical methods in a number of studies. In the area considered away from the top of the stamp, the exact solution becomes the solution for the case of a semi-infinite stamp. The developed method is applicable to composites of arbitrary anisotropies occurring in linearly elastic materials and crystals of any cross-section. It can be useful in engineering practice and in seismology in assessing contact stress concentrations in zones of lithospheric plates having similar angles.

Keywords: contact problems, blunt-angle stamp, anisotropy, Wiener-Hopf equation, stress concentration

For citation: Babeshko V.A., Evdokimova O.V., Babeshko O.M., Evdokimov V.S. On the Contact Problem on an Anisotropic Composite Layer with a Stamp in the Shape of an Obtuse Wedge. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2025;(2):4-12. (In Russ.). <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2025-2-4-12>

Acknowledgements: the research was carried out with the financial support of the Russian Science Foundation and Kuban Science Foundation, regional project 24-11-20006.

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

Введение

Контактные задачи играют важную роль в самых разных областях практики. Они возникают в проблемах прочности и разрушения [1], при распространении волн в упругих телах [2], в акустике [3], неразрушающих методах контроля [4], теории рассеивания электромагнитных волн и при создании элементной базы электроники [5], в теории волн в жидкости [6, 7], геофизике [8], трибологии [9, 10]. Исследования анизотропных задач, в том числе для композитов и контактных задач, выполнялись как аналитическими, так и численными методами в работах [9–21].

Следует отметить, что переход в пространственных задачах к анизотропным средам и тем более к композитам сопряжен со значительными трудностями в связи с усложнением дифференциальных уравнений, описывающих такие среды. Для иллюстрации этого ниже для ортотропного слоя толщиной h приводится вид интегрального уравнения контактной задачи. Предполагается, что слой без трения лежит на жестком основании и жесткий штамп без трения действует на слой [15]. Ортотропный слой характеризуется матрицей состояния

$$C = \begin{pmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{pmatrix}.$$

Интегральное уравнение для одной компоненты представимо в форме

$$Kq = \iint_{\Omega} k(x - \xi, y - \eta)q(\xi, \eta)d\xi d\eta = f(x, y), \quad x, y \in \Omega,$$

$$k(x, y) = \frac{1}{4\pi^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} K(\alpha, \beta)e^{-i(\alpha x + \beta y)} d\alpha d\beta, \quad K(\alpha, \beta) = G_1(\alpha, \beta)G_2^{-1}(\alpha, \beta),$$

$$G_k(\alpha, \beta) = \det \|g_{mn}(k, \alpha, \beta)\|, \quad g_{1n}(1, \alpha, \beta) = g_{1n}(2, \alpha, \beta) = i\alpha\gamma_5(v_n^2 B_n^{(1)} - B_n^{(3)})sh v_n,$$

$$g_{2n}(1, \alpha, \beta) = g_{2n}(2, \alpha, \beta) = i\beta\gamma_4(v_n^2 B_n^{(2)} - B_n^{(3)})sh v_n,$$

$$g_{3n}(1, \alpha, \beta) = B_n^{(3)}sh v_n, \quad g_{3n}(2, \alpha, \beta) = v_n(B_n^{(3)} + \gamma_7\alpha^2 B_n^{(1)} + \gamma_8\beta^2 B_n^{(2)})ch v_n,$$

$$\gamma_4 = \frac{C_{44}}{C_{33}}, \quad \gamma_5 = \frac{C_{55}}{C_{33}}, \quad \gamma_7 = \frac{C_{13}}{C_{33}}, \quad \gamma_8 = \frac{C_{23}}{C_{33}}.$$

Параметры v_n , три из которых берутся для описания ядра, являются корнями уравнения [15]
 $b_0 v^6 + b_2 v^4 + b_4 v^2 + b_6 = 0.$

Очевидно, что соотношения оказались крайне сложными. Использование ранее разработанных методов их решения с применением детальных свойств ядер интегральных уравнений [12–17] становится практически невозможным.

Однако создание новых конструкционных материалов, в том числе анизотропных композитов, а также проблема описания моделей анизотропных материалов коры Земли заставляет решать контактные задачи в неклассических областях. Применение численных методов, аппроксимация решений сплайнами, граничными элементами, собственными функциями, к сожалению, приводят к утрате в приближенных решениях некоторых важных свойств для контактных напряжений. В ряде случаев они не описывают концентрацию контактных напряжений на границе штампа, особенно в угловых точках. В работах [22, 23] построено точное решение контактной задачи в четверти плоскости. Такой подход оказался полезным для построения решения контактной задачи для клина с тупым углом, что открывает возможность управления возникающими неограниченными особенностями за счет формы штампа. Это предложено впервые. Результаты могут служить средством выявления концентрации контактных напряжений под фрагментами литосферных плит, содержащих подобные тупые углы и лежащих на базальтовом основании на границе Конрада (рис. 1).

Постановка задачи

Рассматриваются контактные задачи о действии абсолютно жесткого штампа на многослойную среду в области четверти плоскости (рис. 2) [22] и тупоугольном клине (рис. 3). Предполагается, что многослойная среда представляет собой анизотропный композит, для которого построена функция Грина. С ее помощью получается интегральное уравнение контактной задачи. Методы построения функций Грина для анизотропных сред достаточно детально изложены в [12–17]. Их особенностью является сложность ядер интегральных уравнений контактных задач, приводящая к значительным усложнениям методов решения. Это отражается и на характере напряженно-деформированного состояния среды на границе и во внутренней области. В работах [9–17] рассмотрено построение функций Грина для достаточно большого набора сред сложной реологии, в том числе анизотропных композитов. В [12–14] изучено поведение ряда поверхностных характеристик для различных слоистых сред, применяемых в инженерной практике.

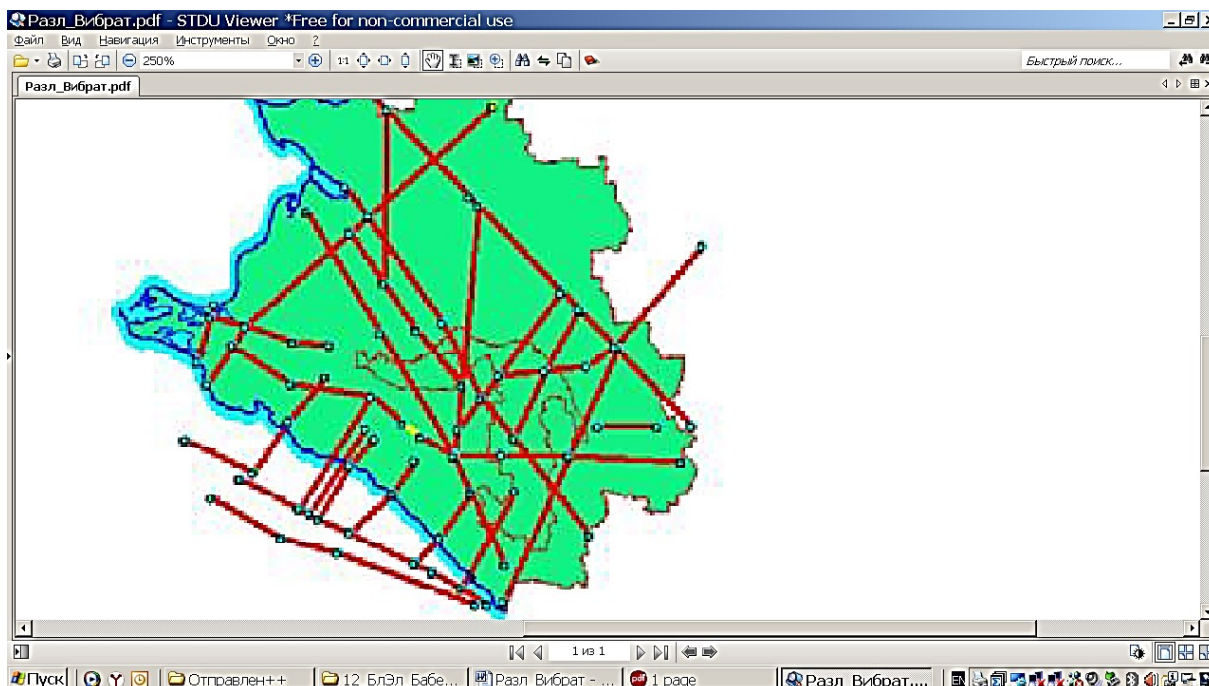


Рис. 1. Тектонические разломы литосферной плиты территории Краснодарского края, отсекающие ряд фрагментов, границы которых содержат тупые углы / Fig. 1. Tectonic faults of the lithospheric plate of the Krasnodar territory, a number of fragments are cut off, the boundaries of which contain obtuse angles

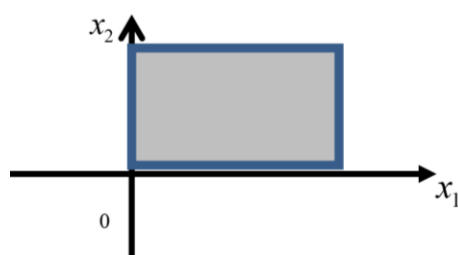


Рис. 2. Двумерное интегральное уравнение Винера – Хопфа, описывающее контактную задачу для штампа в форме первого квадранта / Fig. 2. The two-dimensional Wiener-Hopf integral equation that describes a contact problem for a stamp in the form of the first quadrant

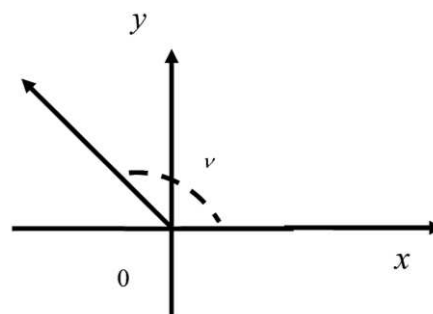


Рис. 3. Область, занятая штампом, с сектором тупого угла ν / Fig. 3. The area occupied by the stamp, with a sector of an obtuse angle ν

В ряде работ развиты приближенные методы решения смешанных задач для таких материалов. В то же время, как показывает практика, они не всегда улавливают все особенности решений контактных задач. В связи с этим построение точных решений позволяет развивать приближенные методы таким образом, чтобы они правильно отражали все стороны поведения напряженно-деформированного состояния контактной задачи. Особенно это важно в контактных задачах, рассматриваемых в неклассических областях, когда границы штампов содержат угловые точки. С учетом сказанного рассматривается интегральное уравнение, свойства ядра которого охватывают широкий спектр типов анизотропных композитов. Преобразования Фурье ядер интегральных уравнений являются всего лишь аналитическими функциями, обладающими определенным асимптотическим поведением на бесконечности и не имеющими особых точек на каждой из вещественных осей.

Рассматривается интегральное уравнение Винера – Хопфа, заданное в первом квадранте (рис. 2) [22]. Оно имеет вид

$$\mathbf{K}q = \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} k(x-\xi, y-\eta)q(\xi, \eta)d\xi d\eta = f(x, y), \quad 0 \leq x \leq \infty, \quad 0 \leq y \leq \infty, \quad (1)$$

$$k(x, y) = \frac{1}{4\pi^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} K(\alpha, \beta) e^{-i(\alpha x + \beta y)} d\alpha d\beta, \quad Q(\alpha, \beta) = \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} q(\xi, \eta) e^{i(\alpha \xi + \beta \eta)} d\xi d\eta,$$

$$F(\alpha, \beta) = \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} f(\xi, \eta) e^{i(\alpha \xi + \beta \eta)} d\xi d\eta.$$

Функция $K(\alpha, \beta)$, в общем случае комплекснозначная, порождается решением анизотропной граничной задачи в многослойной среде, является непрерывной и суммируемой на осях по обоим аргументам, с поведением на бесконечности

$$K(\alpha, \beta) = O(\alpha^{-1}), \quad \beta = \text{const}; \quad K(\alpha, \beta) = O(\beta^{-1}), \quad \alpha = \text{const}, \quad |\alpha|, |\beta| \rightarrow \infty. \quad (2)$$

Для интегрального уравнения (1) справедливы теоремы единственности [14].

Решение интегрального уравнения

Исследование, выполненное в работе [22], дало возможность методом факторизации и блочного элемента построить точное решение интегрального уравнения (1).

Теорема. В условиях единственности решение интегрального уравнения (1) для суммируемой на полуоси и имеющей непрерывную первую производную функции $f(x, y)$ дается формулой

$$q(x, y) = \frac{1}{4\pi^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} Q(\alpha, \beta) e^{-i(\alpha x + \beta y)} d\alpha d\beta, \quad (3)$$

где

$$Q(\alpha, \beta) = K^{-1}F - \frac{1}{2} \left[K_{+\alpha}^{-1} \{ K_{-\alpha}^{-1} F \}_{-\alpha} + K_{+\beta}^{-1} \{ K_{-\beta}^{-1} F \}_{-\beta} + K_{+\alpha+\beta}^{-1} \{ K_{+\alpha-\beta}^{-1} \{ K_{-\alpha}^{-1} F \}_{+\alpha} \}_{-\beta} + K_{+\beta+\alpha}^{-1} \{ K_{+\beta-\alpha}^{-1} \{ K_{-\beta}^{-1} F \}_{+\beta} \}_{-\alpha} \right]. \quad (4)$$

Операторы в фигурных скобках детально описаны в [14] и имеют вид

$$\{G(\alpha, \beta)\}_{+\alpha} = \frac{1}{2\pi i} \int_{\Gamma_1} \frac{G(\xi, \beta)}{\xi - \alpha} d\xi, \quad \alpha \in \Pi_{\alpha}^+, \quad \{G(\alpha, \beta)\}_{-\alpha} = -\frac{1}{2\pi i} \int_{\Gamma_1} \frac{G(\xi, \beta)}{\xi - \alpha} d\xi, \quad \alpha \in \Pi_{\alpha}^-, \quad (5)$$

$$\{G(\alpha, \beta)\}_{+\beta} = \frac{1}{2\pi i} \int_{\Gamma_2} \frac{G(\alpha, \eta)}{\eta - \beta} d\eta, \quad \beta \in \Pi_{\beta}^+, \quad \{G(\alpha, \beta)\}_{-\beta} = -\frac{1}{2\pi i} \int_{\Gamma_2} \frac{G(\alpha, \eta)}{\eta - \beta} d\eta, \quad \beta \in \Pi_{\beta}^-,$$

$$K_{+\alpha}(\alpha, \beta) = \exp \frac{1}{2\pi i} \int_{\Gamma_1} \frac{\ln K(\xi, \beta)}{\xi - \alpha} d\xi, \quad \alpha \in \Pi_{\alpha}^+, \quad K_{-\alpha}(\alpha, \beta) = \exp \left(-\frac{1}{2\pi i} \int_{\Gamma_1} \frac{\ln K(\xi, \beta)}{\xi - \alpha} d\xi \right), \quad \alpha \in \Pi_{\alpha}^-,$$

$$K_{+\beta}(\alpha, \beta) = \exp \frac{1}{2\pi i} \int_{\Gamma_2} \frac{\ln K(\alpha, \eta)}{\eta - \beta} d\eta, \quad \beta \in \Pi_{\beta}^+, \quad K_{-\beta}(\alpha, \beta) = \exp \left(-\frac{1}{2\pi i} \int_{\Gamma_2} \frac{\ln K(\alpha, \eta)}{\eta - \beta} d\eta \right), \quad \beta \in \Pi_{\beta}^-.$$

Здесь Π_{α}^+ (Π_{β}^+), Π_{α}^- (Π_{β}^-) – комплексные области выше (+), ниже (–) контура Γ_1 (Γ_2).

Доказательство. Покажем, что интегральное уравнение (1) точно удовлетворяется функцией $q(x, y)$ (3), (4). Внесем функцию (3) в интегральное уравнение (1), представленное в виде

$$\mathbf{K}q = \frac{1}{4\pi^2} \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} K(\alpha, \beta) e^{-i[\alpha(x-\xi) + \beta(y-\eta)]} q(\xi, \eta) d\xi d\eta d\alpha d\beta = f(x, y).$$

После использования обозначений (1) получим представление

$$\mathbf{K}q = \frac{1}{4\pi^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} K(\alpha, \beta) Q(\alpha, \beta) e^{-i(\alpha x + \beta y)} d\alpha d\beta = f(x, y).$$

Внесем в эту формулу $Q(\alpha, \beta)$ из (4) и исследуем интеграл слева. В результате несложного анализа и исключения членов, обращающих интеграл в ноль, убеждаемся, что получается соотношение

$$\mathbf{K}q = \frac{1}{4\pi^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(\alpha x + \beta y)} F(\alpha, \beta) d\alpha d\beta = f(x, y).$$

Это доказывает теорему.

Исследование свойств решения

В решении, представленном формулой (3), первый справа член формирует вырожденную составляющую решения, описывающую его в зоне, дальней от границ четверть плоскости. Поэтому оно не содержит концентраций напряжений. Заметим, что вырожденная составляющая формируется поровну каждой из осей.

Второй и третий члены содержат граничные концентрации напряжений, свойственные одномерным интегральным уравнениям Винера – Хопфа [14].

Подобно одномерному случаю [14] они дают на прямолинейных границах штампа особенности вида $x^{-1/2}$ и $y^{-1/2}$.

Для исследования оценок поведения решения $q(x,y)$ вблизи границ и в угловой точке штампа используются оценки поведения функции $Q(\alpha,\beta)$ и применяется изложенный ниже прием оценки интеграла Фурье.

Оценка интегралов Фурье с малым параметром x , вычисляемых от непрерывных функций со свойством $S(u) = O(u^{-1})$, $u \gg 1$, имеющих вид

$$\int_{-\infty}^{\infty} u^{\lambda} e^{-iux} S(u) du, \quad S(u) = O(u^{-1}), \quad u \gg 1, \quad x \rightarrow 0, \quad (6)$$

получается заменой параметра интегрирования $u = tx^{-1}$. Она дает значение

$$\int_{-\infty}^{\infty} (tx^{-1})^{\lambda} e^{-it} S(xt^{-1}) x^{-1} dt \sim x^{-\lambda} \int_{-\infty}^{\infty} t^{\lambda} e^{-it} O(t^{-1}) dt \sim O(x^{-\lambda}), \quad \text{Re } \lambda < 1, \quad x \rightarrow 0.$$

Четвертый и пятый члены описывают концентрацию напряжений в угловой точке штампа. Ниже приводятся примеры, раскрывающие неизвестные ранее свойства решений двумерного интегрального уравнения Винера – Хопфа.

Пример 1 показывает, что полученное решение (3) переходит в точное решение интегрального уравнения (1) для случая, когда оно распадается на одномерные уравнения, решаемые традиционным одномерным методом уравнений Винера – Хопфа [5]. Это происходит, когда в ядре интегрального уравнения (1) имеет место разделение переменных, т.е. $k(x,y) = k_1(x)k_2(y)$, которое случается при наличии у преобразования Фурье ядра $K(\alpha,\beta)$, называемого символом интегрального уравнения, со свойством $K(\alpha,\beta) = K_1(\alpha)K_2(\beta)$. Выполняя требуемые формулой (4) вычисления, находим $K_{+\alpha+\beta}(\alpha,\beta) = K_{1+\alpha+\beta}(\alpha)K_2(\beta) = K_1(\alpha)K_{2+\beta+\alpha}(\beta) = 0$. Таким образом, в формуле (4) последние два члена справа пропадают и остаются решения одномерных интегральных уравнений.

Пример 2. По формулам (3), (4) решение двумерного уравнения Винера – Хопфа может быть построено для достаточно общих анизотропных контактных задач в интегральном виде. Для выявления свойств решения двумерного интегрального уравнения Винера – Хопфа можно использовать подход, впервые введенный У. Койтером для одномерных интегральных уравнений Винера – Хопфа. В контактных задачах У. Койтер [14] аппроксимировал сложное ядро одномерного интегрального уравнения Винера – Хопфа более простой функцией. В рассматриваемом случае выберем аппроксимацию ядра функций

$$K(\alpha, \beta) \approx (\alpha^2 + B^2\beta^2 + A^2)^{-\frac{1}{2}} \equiv M(\alpha, \beta), \quad A, B > 0. \quad (7)$$

$M(\alpha,\beta)$ анизотропна и удовлетворяет условию (2).

Исследуем интегральное уравнение (1) с символом $M(\alpha,\beta)$.

Покажем правило формирования членов подынтегральной функции $Q(\alpha,\beta)$.

При осуществлении факторизации по какому-нибудь параметру остальные находятся на вещественной оси, хотя, для точности, также должны стремиться к бесконечности. Факторизовав функцию $M(\alpha, \beta)$ по параметру α на верхнюю полуплоскость, получаем

$$M_{+\alpha}(\alpha, \beta) = \left[\alpha + i(B^2\beta^2 + A^2)^{\frac{1}{2}} \right]^{-\frac{1}{2}} = O(\alpha^{-\frac{1}{2}}), \quad A > 0.$$

Факторизацию функции $M_{+\alpha}(\alpha,\beta)$ по параметру β на верхнюю комплексную полуплоскость можно выполнить точно, в интегральном виде, нормализовав $M_{+\alpha}(\alpha,\beta)$ по β на бесконечности.

Для этого рассмотрим функцию, стремящуюся к единице при $|\beta| \rightarrow \infty$. Имеем

$$G(\alpha, \beta) = \sqrt{i}(B^2\beta^2 + c^2)^{\frac{1}{4}} M_{+\alpha}(\alpha, \beta) \rightarrow 1, \quad |\beta| \rightarrow \infty, \quad c = \text{const}.$$

Отсюда $M_{+\alpha+\beta}(\alpha, \beta) = (B\beta + ic)^{-\frac{1}{4}} \exp \frac{1}{2\pi i} \int_{\Gamma_2} \frac{\ln G(\alpha, \eta)}{\eta - \beta} d\eta, \quad \beta \in \Pi_{\beta}^+$. Получаем оценку

$$M_{+\alpha+\beta}(\alpha, \beta) \rightarrow C(B\beta + ic)^{-\frac{1}{4}} = O(\beta^{-\frac{1}{4}}), \quad |\beta| \rightarrow \infty.$$

Совершенно аналогично оцениваются $M_{+\beta}(\alpha, \beta) = O(\beta^{-\frac{1}{2}}), \quad M_{+\beta+\alpha}(\alpha, \beta) = O(\alpha^{-\frac{1}{4}})$.

Внося эти оценки в виде $M_{+\beta}^{-1}(\alpha, \beta), M_{+\beta+\alpha}^{-1}(\alpha, \beta)$ в (6), получим в результате несложного анализа $q(x, y) = O(r^{-\frac{3}{4}}), \quad r = \sqrt{x^2 + y^2}$.

Этот результат позволяет на рассмотренном примере провести сравнение с ранее исследованным изотропным случаем. Приняв в формуле (7) $B=1$, переходим к изотропному случаю из [17, 24].

В [17, с. 129] приводится график особенностей в вершине клина для разных его растворов $2\theta, \quad 0 < \theta < \pi$. Нам необходимо рассмотреть случай $\theta/\pi = 0,25$, отвечающий варианту прямого угла. При $\varepsilon = 0$ трение штампа с основанием отсутствует. Для оценки в [17] использованы асимптотические приближения функций Бесселя. Полученное в настоящей работе значение $r^{-\frac{3}{4}}$ концентрации контактных напряжений в угловой точке близко к вычисленному приближенным методом значению в [17]. В приведенном ниже примере развит метод для клиновидных штампов с тупым углом раствора.

Пример 3. Описанный подход можно применить к клиновидным штампам, имеющим раствор $90^\circ \leq \nu \leq 180^\circ$ (рис. 3). Это удастся сделать построением гомеоморфного отображения топологического пространства тупоугольного клина на топологическое пространство первого квадранта и затем воспользоваться решением двумерного интегрального уравнения (3); в построенном решении возвратиться к исходным параметрам, описывающим координаты тупоугольного клина (таблица).

Все промежуточные значения близки к вычисленным приближенным методом в [17, с. 129].

Показатели особенностей λ контактных напряжений $q(x,y)=O(r^{-\lambda})$ в угловой точке клиновидного штампа для разных растворов угла клина ν / Indicators of the contact stress $q(x,y)=O(r^{-\lambda})$ characteristics λ at the angular point of a wedge-shaped stamp for different solutions of the wedge angle ν

$\nu, ^\circ$	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180
λ	0,75	0,7452	0,7313	0,7098	0,6822	0,6502	0,6150	0,5778	0,5392	0,5

Выводы

В работе впервые приведены общие свойства точного решения двумерного интегрального уравнения Винера – Хопфа, отвечающего контактной задаче для клиновидного штампа с прямым углом. Этот результат, благодаря топологическим преобразованиям, позволяет точно описывать решения контактных задач для штампов с тупым углом. Вид решения совпадает со случаем клина с прямым углом, отличается лишь функциями преобразования. Решение может быть использовано как в сейсмологии для выявления новых предвестников сейсмического роста в горных районах с анизотропными свойствами окружающей среды [24], так и в инженерной практике при проектировании изделий с использованием конструкционных материалов. В отличие от результата из [17] в полученном решении выделен член, несущий наибольшую концентрацию контактных напряжений. Это позволяет управлять максимальной концентрацией контактных напряжений подбором подошвы клиновидного штампа.

Список источников

1. Freund L. B. *Dynamic Fracture Mechanics*. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1998. 520 p.
2. Achenbach J.D. *Wave propagation in Elastic Solids. North-Holland Series in Applied Mathematics and Mechanics*. Amsterdam: North-Holland, 1973. 480 p.
3. Abrahams I.D., Wickham G.R. General Wiener-Hopf factorization matrix kernels with exponential phase factors // *J. of Applied Mathematics*. 1990. Vol. 50. P. 819–838.
4. Norris A.N., Achenbach J.D. Elastic wave diffraction by a semi infinite crack in a transversely isotropic material // *J. of Applied Mathematics and Mechanics*. 1984. Vol. 37. P. 565–580.
5. Нобл Б. Метод Винера – Хопфа. М.: Изд-во иностр. лит., 1962. 280 с.
6. Ткачева Л.А. Плоская задача о колебаниях плавающей упругой пластины под действием периодической внешней нагрузки // *ПМТФ*. 2004. Т. 45, № 5 (273). С. 136–145.
7. Chakrabarti A., George A.J. Solution of a singular integral equation involving two intervals arising in the theory of water waves // *Applied Mathematics Letters*. 1994. Vol. 7. P. 43–47.
8. Davis A.M.J. Continental shelf wave scattering by a semi-infinite coastline // *Geophysics, Astrophysics, Fluid Dynamics*. 1987. Vol. 39. P. 25–55.
9. Горячева И.Г. *Механика фрикционного взаимодействия* М.: Наука, 2001. 478 с.
10. Guo L.M., Cai J.W., Xie Z.Y., Li C. Mechanical responses of symmetric straight and curved composite microbeams // *J. Vib. Eng. Technol*. 2024. Vol. 12. P. 1537–1549. <https://doi.org/10.1007/s42417-023-00924-6>
11. Баженов В.Г., Игумнов Л.А. *Методы граничных интегральных уравнений и граничных элементов*. М.: Физматлит, 2008. 352 с.
12. Калинин В.В., Белянкова Т.И. *Динамика поверхности неоднородных сред*. М.: Физматлит, 2009. 312 с.
13. Калинин В.В., Белянкова Т.И. *Динамические контактные задачи для предварительно напряженных тел*. М.: Физматлит, 2002. 240 с.
14. Ворович И.И., Бабешко В.А. *Динамические смешанные задачи теории упругости для неклассических областей*. М.: Наука, 1979. 320 с.
15. Ватульян А.О. Контактные задачи со сцеплением для анизотропного слоя // *ПММ*. 1977. Т. 41, вып. 4. С. 727–734.
16. Колесников В.И., Беляк О.А. *Математические модели и экспериментальные исследования – основа конструирования гетерогенных антифрикционных материалов*. М.: Физматлит, 2021. 265 с.
17. Бабешко В.А., Глушков Е.В., Зинченко Ж.Ф. *Динамика неоднородных линейно-упругих сред*. М.: Наука, 1989. 344 с.
18. Кристенсен Р. *Введение в механику композитов*. М.: Мир, 1982. 335 с.
19. Kushch V.I. *Micromechanics of composites: multipole expansion approach*. Oxford; Waltham: Elsevier Butterworth-Heinemann, 2013. 489 p.
20. McLaughlin R. A study of the differential scheme for composite materials // *Int. J. of Engineering Science*. 1977. Vol. 15. P. 237–244.
21. Garces G., Bruno G., Wanner A. Load transfer in short fibre reinforced metal matrix composites // *Acta Materialia*. 2007. Vol. 55. P. 5389–5400.
22. Бабешко В.А., Евдокимова О.В., Бабешко О.М. Точное решение универсальным методом моделирования контактной задачи в четверти плоскости многослойной среды // *ПММ*. 2022. Т. 86, № 5. С. 628–637. EDN: KASRZW. <https://www.doi.org/10.31857/S0032823522050046>
23. Babeshko V.A., Evdokimova O.V., Uafa S.B., Evdokimov V.S., Babeshko O.M. On Nonstationary Contact Problems for Anisotropic Composites in Nonclassical Areas // *Mechanics of Solids*. 2024. Vol. 59, № 5. P. 2667–2673. <https://doi.org/10.1134/S0025654424603562>
24. Babeshko V.A., Evdokimova O.V., Babeshko O.M. On a mechanical approach to the prediction of earthquakes during horizontal motion of lithospheric plates // *Acta Mechanica*. 2018. Vol. 229, № 11. P. 4727–4739. <https://doi.org/10.1007/s00707-018-2255-7>

References

1. Freund L. B. *Dynamic Fracture Mechanics*. Cambridge, UK: Cambridge University Press; 1998. 520 p.
2. Achenbach J.D. *Wave propagation in Elastic Solids. North-Holland Series in Applied Mathematics and Mechanics*. Amsterdam: North-Holland; 1973. 480 p.
3. Abrahams I.D., Wickham G.R. General Wiener-Hopf factorization matrix kernels with exponential phase factors. *J. of Applied Mathematics*. 1990;50:819-838.
4. Norris A.N., Achenbach J.D. Elastic wave diffusion by a semi infinite crack in a transversely isotropic material. *J. of Applied Mathematics and Mechanics*. 1984;37:565-580.
5. Noble B. *Wiener-Hopf method*. Moscow: Publishing House of Foreign Literature; 1962. 280 p. (In Russ.).

6. Tkacheva L.A. The planar problem of vibrations of a floating elastic plate under the action of periodic external load. *J. of Applied Mechanics and Technical Physics*. 2004;45(5):136-145. (In Russ.).
7. Chakrabarti A, George A.J. Solution of a singular integral equation involving two intervals arising in the theory of water waves. *Applied Mathematics Letters*. 1994;7:43-47.
8. Davis A.M. J. Continental shelf wave scattering by a semi-infinite coastline. *Geophysics, Astrophysics, Fluid Dynamics*. 1987;39:25-55.
9. Goryacheva I.G. *Mechanics of frictional interaction*. Moscow: Science; 2001. 478 p. (In Russ.).
10. Guo L.M., Cai J.W., Xie Z.Y., Li C. Mechanical responses of symmetric straight and curved composite microbeams. *J. Vib. Eng. Technol*. 2024;12:1537-1549. <https://doi.org/10.1007/s42417-023-00924-6>
11. Bazhenov V.G., Igumnov L.A. *Methods of boundary integral equations and boundary elements*. Moscow: Physical and Mathematical Literature; 2008. 352 p. (In Russ.).
12. Kalinchuk V.V., Belyankova T.I. *Dynamics of the surface of inhomogeneous media*. Moscow: Physical and Mathematical Literature; 2009. 312 p. (In Russ.).
13. Kalinchuk V.V., Belyankova T.I. *Dynamic contact problems for prestressed bodies*. Moscow: Physical and Mathematical Literature; 2002. 240 p. (In Russ.).
14. Vorovich I.I., Babeshko V.A. *Dynamic mixed problems of elasticity theory for non-classical domains*. Moscow: Science; 1979. 320 p. (In Russ.).
15. Vatulyan A.O. Contact problems with coupling for an anisotropic layer. *J. of Applied Mathematics and Mechanics*. 1977;41(4):727-734. (In Russ.).
16. Kolesnikov V.I., Belyak O.A. *Mathematical models and experimental studies – the basis for the design of heterogeneous antifriction materials*. Moscow: Physical and Mathematical Literature; 2021. 265 p. (In Russ.).
17. Babeshko V.A., Glushkov E.V., Zinchenko J.F. *Dynamics of inhomogeneous linear elastic media*. Moscow: Science; 1989. 344 p. (In Russ.).
18. Christensen R. *Introduction to the mechanics of composites*. Moscow: World; 1982. 335 p. (In Russ.).
19. Kushch V.I. *Micromechanics of composites: multipole expansion approach*. Oxford; Waltham: Elsevier Butterworth-Heinemann; 2013. 489 p.
20. McLaughlin R. A study of the differential scheme for composite materials. *Int. J. of Engineering Science*. 1977;15:237-244.
21. Garces G., Bruno G., Wanner A. Load transfer in short fibre reinforced metal matrix composites. *Acta Materialia*. 2007;55:5389-5400.
22. Babeshko V.A., Evdokimova O.V., Babeshko O.M. The exact solution by a universal method of modeling a contact problem in a quarter plane of a multilayer medium. *J. of Applied Mathematics and Mechanics*. 2022;86(5):628-637. (In Russ.). EDN: KASRZW. <https://doi.org/10.31857/S0032823522050046>
23. Babeshko V.A., Evdokimova O.V., Uafa S. B., Evdokimov V.S, Babeshko O.M. On Nonstationary Contact Problems for Anisotropic Composites in Nonclassical Areas. *Mechanics of Solids*. 2024;59(5):2667-2673. <https://doi.org/10.1134/S0025654424603562>
24. Babeshko V.A., Evdokimova O.V., Babeshko O.M. On a mechanical approach to the prediction of earthquakes during horizontal motion of lithospheric plates. *Acta Mechanica*. 2018;229(11):4727-4739. <https://doi.org/10.1007/s00707-018-2255-7>

Информация об авторах

В.А. Бабешко – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой математического моделирования КубГУ.

О.В. Евдокимова – доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник ЮНЦ РАН.

О.М. Бабешко – доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник КубГУ.

В.С. Евдокимов – аспирант КубГУ.

Information about the authors

V.A. Babeshko – Doctor of Science (Physics and Mathematics), Professor, Head of the Mathematical Modeling Department, KubSU.

O.V. Evdokimova – Doctor of Science (Physics and Mathematics), Main Researcher, SSC RAS.

O.M. Babeshko – Doctor of Science (Physics and Mathematics), Main Researcher, KubSU.

V.S. Evdokimov – Postgraduate Student, KubSU.

*Статья поступила в редакцию 26.02.2025; одобрена после рецензирования 14.03.2025; принята к публикации 23.04.2025.
The article was submitted 26.02.2025; approved after reviewing 14.03.2025; accepted for publication 23.04.2025.*

Научная статья

УДК 534.2

<https://doi.org/10.18522/1026-2237-2025-2-13-22>

ЭФФЕКТИВНЫЙ МЕТОД РАСЧЕТА СОБСТВЕННЫХ ЧАСТОТ ДЛЯ ВОЛНОВОГО УРАВНЕНИЯ ВНУТРИ ТРАПЕЦЕВИДНОЙ ОБЛАСТИ

Межлум Альбертович Сумбатян^{1✉}, Евгений Александрович Титаренко²

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

¹ masumbatyan@sfned.ru[✉], <https://orcid.org/0000-0003-3653-4867>

² evtitarenko@sfned.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0422-1041>

Аннотация. В классической задаче волновой динамики изучается внутренняя задача для двумерной трапецевидной области. Специфика волновых задач в таких областях заключается в том, что любой численный алгоритм теряет устойчивость вблизи нерегулярных точек граничной кривой – вблизи резких углов, щелей и т. д. Предлагается метод, позволяющий преодолеть это препятствие и прийти к устойчивым вычислениям. Он основан на том, что неустойчивость алгоритма связана с ситуацией, когда и точка наблюдения, и точка интегрирования одновременно приближаются к какому-либо углу, т. е. когда расстояние между ними становится малым. Именно в этом случае применяется асимптотическое разложение ядра при малом аргументе функции Грина, в настоящей задаче – функции Ханкеля. Тогда интеграл на интервале, прилегающем к углу, можно вычислить аналитически в явном виде, что приводит к устойчивому алгоритму. Предлагаемый алгоритм тестируется на примере, взятом из акустики помещений, при расчете низких собственных частот (ниже 200 Гц) в случае небольшой студии трапецевидной геометрии.

Ключевые слова: волновое уравнение, граничное интегральное уравнение, собственные частоты, метод коллокации, ускорение сходимости, акустика помещений

Для цитирования: Сумбатян М.А., Титаренко Е.А. Эффективный метод расчета собственных частот для волнового уравнения внутри трапецевидной области // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2025. № 2. С. 13–22. <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2025-2-13-22>

Благодарности: работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (РНФ), проект № 25-21-00139, в Южном федеральном университете.

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

Original article

AN EFFICIENT METHOD FOR CALCULATION OF NATURAL FREQUENCIES FOR WAVE EQUATION INSIDE A TRAPEZOID REGION

Mezhlum A. Sumbatyan^{1✉}, Evgeniy A. Titarenko

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

¹ masumbatyan@sfned.ru[✉], <https://orcid.org/0000-0003-3653-4867>

² evtitarenko@sfned.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0422-1041>

Abstract. In the classical problem of wave dynamics, we study the internal problem inside a two-dimensional trapezoid region. The specific property of wave problems in such domains is that any numerical algorithm loses its stability near irregular points of the boundary curve – near corners, sharp angles, slits, and so on. In the present work we propose a method which allows us to overcome this obstacle, to come to stable computations. The method is based on the fact that the instability of the algorithm is connected with the situation when both the point of observation and the point of integration approach simultaneously any corner, i.e. when the distance between them

© Сумбатян М.А., Титаренко Е.А., 2025

becomes small. Just in this case we apply an asymptotic expansion of the kernel for small argument, which is the argument of the Green's function, being the Hankel function in the present problem. Then the integral on the interval adjacent to the corner can be calculated analytically in an explicit form that leads to a stable algorithm. The proposed algorithm is tested by an example taken from the Room acoustics, in calculation of low natural frequencies, below 200 Hz, in the case of a small studio of a trapezoid geometry.

Keywords: wave equation, boundary integral equation, natural frequencies, collocation technique, acceleration of convergence, room acoustics

For citation: Sumbatyan M.A., Titarenko E.A. An Efficient Method for Calculation of Natural Frequencies for Wave Equation Inside a Trapezoid Region. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2025;(2):13-22. (In Russ.). <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2025-2-13-22>

Acknowledgements: the work was carried out with the financial support of the Russian Science Foundation (RSF), project No. 25-21-00139, 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

Метод граничных элементов (МГЭ, BEM) широко распространен в математической физике, в частности в волновой динамике и акустике [1, 2]. В непрерывной версии он обычно называется методом граничных интегральных уравнений (ГИУ, BIE) [3]. В сравнении с прямыми численными (DNS) методами, такими как метод конечных элементов (МКЭ, FEM) [4] и другие схожие, он имеет существенное преимущество (уменьшает размерность (d) задачи на единицу). Так, в трехмерных задачах он сводится к двумерному ГИУ, а в двумерных – к одномерному ГИУ по граничному контуру рассматриваемой задачи. Такой подход легко реализуется в линейных задачах, когда граничная поверхность или граничная кривая не имеет изломов (граница гладкая). Если на границе имеются углы, то стандартный метод коллокации, применяемый к возникающему ГИУ, становится менее эффективным из-за определенной неустойчивости.

В литературе обсуждались различные идеи для преодоления этой сложности. Например, в 2d-задачах, когда границей является некоторая кривая, известный классический результат состоит в том, что предельное граничное значение потенциала двойного слоя приводит к появлению вне интеграла неизвестной функции с множителем $A = 1/2$. Однако для граничного контура с углом, если узел дискретной сетки попадает прямо в угол, этот множитель A зависит от значения угла в точке излома границы [1, 2].

С практической точки зрения использование этого свойства напрямую приводит к неустойчивости вычислений. В самом деле, для плотной сетки узлов можно разместить все узлы сетки лишь на гладких участках границы; тогда все члены диагональных элементов в матрице системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) при дискретизации будут равны $1/2$. После этого небольшой сдвиг узла, ближайшего к точке излома границы, прямо в эту угловую точку сразу же изменяет коэффициент A при соответствующем члене на значение, зависящее от раствора угла. В результате получается, что малое изменение расположения одного узла сетки существенно изменяет матрицу СЛАУ, что и приводит к неустойчивости. Авторы данной статьи не смогли найти в литературе какого-либо подхода, который бы преодолевал эту трудность тем или иным надежным методом. Так, в работе [5] при анализе ячеек, локализованных вблизи углов области, основные усилия направлены на корректное упорядочение узлов вблизи такого угла. Методы преодоления неустойчивости решения в окрестности угла не рассматриваются. В [6] для ГИУ в области, имеющей форму многогранника, предлагается метод преодоления потери устойчивости вблизи собственных частот, но не вблизи углов границы. Также упомянем методы, предложенные для препятствий с углами и импедансными границами, для задач дифракции в высокочастотном режиме [7–9].

В настоящей работе для повышения устойчивости численного решения на основе метода ГИУ с трапецевидными границами, содержащими углы, используется подход из [10–12]. В [10, 11] в 2d-задаче о дифракции волны на бесконечном клине учитывается асимптотическое поведение ядра ГИУ в окрестности угла, что позволяет получить явное точное решение для волнового дав-

ления в угловой точке клина. Эта идея перенесена на дифракцию волны на ограниченном препятствии с углами [12]. В нашей работе этот подход распространен на внутренние задачи волновой динамики внутри трапеции, которая, очевидно, содержит изломы границы. Применительно к акустике помещений трапеция подразумевает малую музыкальную студию со скосом стен (в плане).

Формулировка задачи и ее сведение к ГИУ

Рассмотрим двумерный волновой процесс, гармонический во времени, внутри трапеции (рис. 1).

В практическом плане данная задача связана с оценкой качества звука в помещениях малого и среднего размера с непараллельными стенами. Физически, если бы геометрия была стандартной, т.е. прямоугольной в плане, это привело бы к крайне нерегулярному распределению собственных частот [13]. Для того чтобы организовать более регулярное распределение низких (басовых) частот, обычно применяется некоторый скос стен, что устраняет осевые моды.

Если границу области в первом приближении считать абсолютно твердой, то определяющим является уравнение Гельмгольца с однородным граничным условием Неймана:

$$\Delta p + k^2 p = 0, \quad \left(\Delta = \frac{\partial^2}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2}{\partial x_2^2} \right), \quad \frac{\partial p}{\partial n} \Big|_l = 0, \quad (1)$$

где p – волновое давление; $k = \omega/c$ – волновое число; c – скорость звука; l – замкнутый контур, определяющий границу области. Зависимость от времени задается множителем $e^{-i\omega t}$, где ω – угловая частота колебаний. Любая точка в двумерной декартовой системе координат определяется своими двумя компонентами: $x = (x_1, x_2)$, $y = (y_1, y_2)$ и т.д.

Если ω не является собственной частотой (eigenvalue) рассматриваемой трапеции, решение граничной задачи (1) эквивалентно ГИУ

$$\frac{p(x)}{2} - \int_l \frac{\partial G(y,x)}{\partial n_y} p(y) dl_y = p_0(x), \quad x \in l, \quad (2)$$

где $G(y, x) = \frac{i}{4} H_0^{(1)}(kr)$, $r = |y - x| = [(y_1 - x_1)^2 + (y_2 - x_2)^2]^{1/2}$; $H_0^{(1)}$ – функция Ханкеля первого рода нулевого порядка [14].

Решение ГИУ (2) существует, единственно и дает единственное решение краевой задачи (1) в виде

$$p^{sc}(x) = \int_l \frac{\partial G(y,x)}{\partial n_y} p(y) dl_y, \quad x \in l, \quad (3)$$

где единичная нормаль \mathbf{n}_y к граничному контуру в точке $y \in l$ направлена внутрь физической среды, в нашем случае – внутрь трапеции; dl_y – элементарный элемент дуги l в точке $y \in l$. Также очевидно, что правая часть в ГИУ (3) определяется волной, генерируемой точечным источником $x_0 = (x_1^0, x_2^0)$. С точностью до несущественного множителя она равна

$$p_0(x) = H_0^{(1)}(kr_0), \quad r_0 = |x - x_0| = [(x_1 - x_1^0)^2 + (x_2 - x_2^0)^2]^{1/2}. \quad (4)$$

В формулах (1)–(3) $p(x)$ – полное волновое давление, т.е. сумма давления волнового поля $p_0(x)$, создаваемого точечным источником, и рассеянной составляющей давления $p^{sc}(x)$: $p = p_0 + p^{sc}$.

Следует также отметить, что коэффициент при свободном члене уравнения (2) равен 1/2 только в том случае, если точка x попадает на гладкую часть границы. Если x совпадает с одним из углов граничного контура, то вместо 1/2 должен стоять коэффициент, зависящий от величины внутреннего угла граничного контура в данной точке излома. Это свойство может негативно сказаться на устойчивости численной реализации решения ГИУ (2), поскольку небольшой сдвиг точки коллокации в угол контура может привести к существенному изменению диагональных членов соответствующей матрицы СЛАУ, возникающей при дискретизации на густой сетке.

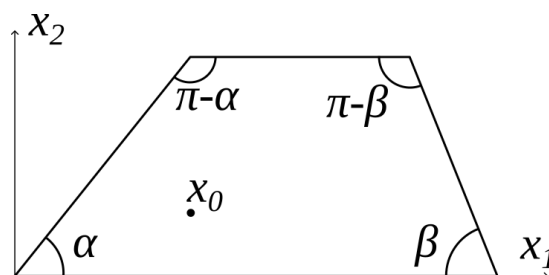


Рис. 1. Гармонический во времени волновой процесс внутри трапецевидной области: $x_0 = (x_1^0, x_2^0)$ – точечный источник волны / Fig.1. Wave process harmonic in time inside a trapezoid region: $x_0 = (x_1^0, x_2^0)$ is a point wave source

Именно по этой причине в [15] для области в виде параллелепипеда со скосом граничных граней к краевой задаче (1) был применен метод Галёркина, но в 3d-случае, когда использование базисных функций известной качественной структуры приводит к эффективному расчету распределения собственных (модальных) частот для заданной геометрии. Более точно, в [15] был выбран метод Галёркина с базисными функциями, имеющими необходимое качественное поведение вблизи углов. Такой подход оказывается успешным, с разумным временем расчета (в пределах часа на одном ядре персонального компьютера, без распараллеливания).

Основная цель данной статьи – разработка альтернативного подхода, основанного на реализации устойчивого решения ГИУ (2).

Дискретизация ГИУ (2) и базовый численный алгоритм

Будем обозначать l как сам граничный контур, так и его длину, т.е. периметр трапеции. Пусть l_q , ($q = 1, \dots, 4$) – одновременно и сторона трапеции, и её длина: $l = \sum_{q=1}^4 l_q$. В рамках стандартного метода коллокации [16] предположим для простоты, что некоторый малый постоянный шаг h может быть выбран так, что сторона l_q разбивается на N_q равных малых отрезков длиной h , $l_q = hN_q$, ($q = 1, \dots, 4$). Тогда полное число малых отрезков длины h равно $N = \sum_{q=1}^4 N_q$. Если каждый узел дискретной сетки $y_j = (y_1^j, y_2^j)$, ($j = 1, \dots, N$) разместить в середине каждого отрезка, то естественным образом образуется сетка узлов размерностью N . При этом узлы сетки равномерно распределены по граничному контуру трапеции, так что ни один узел не попадает ни в один из её углов. Более того, легко видеть, что крайние (первый и последний) узлы на каждой стороне находятся ровно на полшага ($h/2$) от соответствующего угла трапеции. С такой сеткой ГИУ (2) сохраняет свой вид с коэффициентом $1/2$ вне интеграла.

Перепишем уравнение (2) в более явном виде

$$\frac{p(x)}{2} + \int_l K(y, x)p(y)dl_y = F(x), \quad x \in l, \quad (5)$$

$$K(y, x) = \frac{ik}{4} H_1^{(1)}(kr) \frac{(\mathbf{r} \cdot \mathbf{n}_y)}{r}, \quad F(x) = p_0(x), \quad \mathbf{r} = \mathbf{y} - \mathbf{x}, \quad \text{поскольку}$$

$$\frac{\partial G}{\partial n_y} = \frac{\partial G}{\partial r} \frac{\partial r}{\partial n_y}, \quad \frac{\partial G}{\partial r} = -\frac{ik}{4} H_1^{(1)}(kr), \quad \frac{\partial r}{\partial n_y} = \frac{(\mathbf{r} \cdot \mathbf{n}_y)}{r}. \quad (6)$$

Положим в (5) $x = y_m \in l$ ($m = 1, \dots, N$) и представим интеграл вдоль контура l как сумму интегралов, каждый из которых берется по малому интервалу длиной h :

$$\int_l K(y, y_m)p(y)dl_y = \sum_{j=1}^N \int_{a_j}^{b_j} K(y, y_m)p(y)dl_y \approx \sum_{j=1}^N b_{mj}p(y_j), \quad (7)$$

$$b_{mj} = \int_{a_j}^{b_j} K(y, y_m)dl_y,$$

где a_j и b_j – концы интервала длиной h с центральным узлом y_j . В (7) принято, что неизвестная функция $p(y)$ приблизительно постоянна на каждом малом интервале. Заметим, что последовательность точек a_j, y_j, b_j всегда принадлежит одной и той же стороне трапеции, поэтому геометрически отрезок a_j, b_j действительно является прямолинейным длиной h с центральной точкой y_j .

Последний интеграл в формуле (7) можно вычислить, используя любой тип квадратурной формулы. Например, в случае формулы Симпсона интеграл во второй строке (7) принимает вид

$$b_{mj} \approx \frac{h}{6} [K(a_j, y_m) + 4K(y_j, y_m) + K(b_j, y_m)]. \quad (8)$$

Элементы b_{mj} отличны от нуля только в том случае, если узлы y_m и y_j принадлежат разным сторонам многоугольника. Если же эти два узла принадлежат одной и той же стороне, то это автоматически обращает скалярное произведение $(\mathbf{r} \cdot \mathbf{n}_y)$ в (5) в нуль. Поэтому на практике выражение (7) для элементов матрицы b_{mj} в СЛАУ, возникающей после дискретизации, следует применять для вычисления только недиагональных членов этой матрицы, т.е. при $j \neq m$, а диагональные элементы – нулевые: $b_{mm} = 0$.

В результате дискретная версия ГИУ (7) может быть представлена в матричной форме:

$$\mathbf{AP} = \mathbf{F}, \quad \mathbf{A} = (a_{mj}), \quad a_{mj} = \frac{\delta_{mj}}{2} + (1 - \delta_{mj})b_{mj}, \quad \mathbf{P} = [p(y_j)], \quad \mathbf{F} = [F(y_m)], \quad (9)$$

где δ_{mj} – символ Кронекера.

Как описано ниже, наиболее интересной характеристикой в акустике помещений является распределение собственных частот в низкочастотном диапазоне. Предлагаемый здесь алгоритм для вычисления собственных частот работает следующим образом. Когда волновое число k отлично от любого собственного значения, краевая задача (1) эквивалентна ГИУ (5), в дискретной форме – СЛАУ (9). Поскольку для конечномерной СЛАУ существование и единственность ее решения имеют место тогда и только тогда, когда ее матрица невырождена, то собственные частоты соответствуют только тем случаям, когда эта матрица вырождена, т.е. когда ее число обусловленности теоретически бесконечно, а практически – предельно велико. Поэтому достаточно пройти по всем значениям волнового числа k в области низких частот (ниже 200 Гц) с малым шагом (0,1 Гц), вычисляя каждый раз число обусловленности CN (Condition Number) и выбирая значения частоты, для которых CN имеет резкий максимум. Для грубой оценки на первом проходе можно выбрать очень редкую сетку узлов по периметру трапеции, что обеспечивает более быстрый расчет. Для уточнения критических значений параметра k – более плотную сетку узлов с меньшим шагом по частоте в Гц в некоторых коротких частотных интервалах, где приближенно уже вычислены грубые предварительные значения с более грубой сеткой. Многочисленные расчеты показывают, что такой алгоритм работает в течение нескольких минут на одном ядре персонального компьютера без распараллеливания, с авторским программным кодом, написанным на языке C++. При этом параметр CN вычисляется в рамках метода исключения Гаусса [17].

Приложение к акустике помещений и тестовый пример

Важными физическими величинами в рассматриваемой задаче являются собственные частоты. Фактически хорошее звучание в небольших и средних студиях может быть достигнуто путем обеспечения достаточно равномерного распределения собственных частот в низкочастотном диапазоне. В 50-е гг. XX в. было признано, что этого можно достичь путем организации определенного скоса некоторых граничных плоскостей, что гарантирует отсутствие осевых и тангенциальных мод [15, 18].

Наиболее негативное влияние на восприятие звука в случае небольших параллелепипедных помещений связано с осевыми модами, которые в больших помещениях слышны как порхающее эхо – явление периодически повторяющегося отражения звука между двумя параллельными стенами, воспринимаемое слушателем в определенном фиксированном положении [15]. В ряде классических справочников и монографий, а также во многих журнальных статьях подчеркивается, что скос стен может уменьшить порхающее эхо. Подробное исследование этого явления было проведено О. Бонелло [19], который установил два критерия хорошего звучания в помещениях малого и среднего размера:

I. При прохождении по последовательным третьоктавным полосам частот, которые равны [13], Гц: (1) – (14, 16, 18); (2) – (18, 20, 22,4); (3) – (22,4, 25, 28); (4) – (28, 31,5, 35,5); (5) – (35,5, 40, 45); (6) – (45, 50, 56); (7) – (56, 63, 71); (8) – (71, 80, 90); (9) – (90, 100, 112); (10) – (112, 125, 140); (11) – (140, 160, 180) (каждая тройка чисел означает левый и правый концы соответствующего интервала и его центральную частоту), число собственных частот на каждом таком интервале должно быть монотонно возрастающей (по крайней мере, неубывающей) последовательностью некоторых чисел. При этом частота f в Гц связана с круговой частотой ω : $\omega = 2\pi f$.

II. На этом низкочастотном интервале (ниже 200 Гц) не должно быть совпадающих собственных частот.

Следует отметить, что в акустически плохих помещениях первый критерий обеспечить сложнее, чем второй. На практике любой скос границ автоматически обеспечивает выполнение второго критерия Бонелло. Следовательно, если удастся выполнить первый критерий путем скоса стен, используя наш алгоритм, то это автоматически обеспечивает второй критерий. Поэтому, хотя наш алгоритм не может контролировать второй критерий, так как он не различает совпадающие собственные частоты, но если первый критерий удовлетворяется, то можно быть уверенным, что акустика студии улучшилась.

Протестируем работу алгоритма на помещении, имеющем в плане форму трапеции следующей геометрии: нижнее основание – 11 м, верхнее – 5 м, трапеция – равнобедренная с боковой стороной 5 м. Очевидно, при этом внутренние углы при нижнем основании равны $\alpha = \beta = \arccos(3/5)$.

Площадь трапеции 32 м², полный периметр области 26 м. При выборе сетки размером $N = 260$ единый постоянный шаг сетки на всех сторонах равен 0,1 м, причем на нижнем основании $N_1 = 110$ узлов, на верхнем – $N_3 = 50$, на боковых – $N_2 = N_4 = 50$ узлов. Поскольку в этой задаче неизвестны точные значения собственных частот, будем производить сравнение изложенного выше метода, осуществленного «напрямую», с улучшенным, который ускоряет сходимость численного алгоритма и описан ниже. В таблице дано сравнение этих двух методов, если скорость звука 340 м/с.

Первые собственные частоты f_n (до 200 Гц) для выбранной трапеции и соответствующие значения $\ln(CN)$ / Low eigenfrequencies f_n (below 200 Hz) for the chosen trapeze and respective value of $\ln(CN)$

n	f_n , Гц	$\ln(CN)$	f_n , Гц (улучшенное)	$\ln(CN)$ (улучшенное)
1	20,412	6,598	20,314	10,009
2	34,851	6,894	34,715	9,954
3	45,234	5,852	45,111	9,501
4	46,708	7,362	46,699	9,731
5	60,621	8,680	60,564	9,215
6	–	–	60,835	9,687
7	75,435	7,059	75,281	9,764
8	76,540	5,998	76,473	9,450
9	84,598	7,163	84,579	9,177
10	90,889	7,448	90,768	9,231
11	–	–	91,138	9,522
12	96,470	6,549	96,416	9,090
13	102,966	6,168	102,775	9,327
14	105,230	6,717	105,176	9,421
15	115,142	7,616	115,076	9,425
16	116,815	5,534	116,623	9,096
17	119,408	7,546	119,405	7,983
18	127,333	5,837	127,313	6,976
19	128,747	6,527	128,649	9,655
20	131,962	6,446	131,780	9,460
21	135,666	6,905	135,657	7,531
22	137,885	5,707	137,781	9,038
23	140,048	6,687	140,026	7,300
24	145,758	5,900	145,550	9,136
25	149,173	7,686	149,173	7,814
26	154,001	5,781	153,835	9,015
27	156,312	7,459	156,305	7,766
28	160,833	6,468	160,702	8,808
29	162,012	5,612	162,011	6,849
30	167,777	6,421	167,763	6,937
31	170,180	5,047	169,861	8,834
32	173,095	7,741	173,093	8,326
33	175,048	6,312	175,033	7,011
34	176,532	4,230	176,530	7,736
35	177,275	6,300	177,248	7,855
36	182,795	6,495	182,645	8,967
37	184,448	6,525	184,421	7,951
38	189,792	7,090	189,687	8,709
39	190,794	5,543	190,714	7,433
40	194,026	7,174	194,022	7,268
41	196,251	6,280	196,117	8,351
42	198,059	6,451	198,005	8,340

Улучшенный метод ГИУ и результаты расчетов

Улучшенный метод состоит в следующем. Очевидно, наихудшая для устойчивости алгоритма комбинация получается, когда точки наблюдения (y_m) и интегрирования (y_j) находятся вблизи одного угла. Однако в этой комбинации расстояние $r = |y_j - y_m|$ между этими точками в (5) мало. Используя поведение функции Ханкеля, интегрирование в интеграле (7) для коэффициента b_{mj} можно выполнить точно в явном виде.

Асимптотика функции Ханкеля в (5) при малом положительном аргументе имеет вид [14]

$$H_1^{(1)}(z) = -\frac{2i}{\pi z} + \frac{i}{\pi} z \ln z + \left[\frac{\pi}{2} + \left(\gamma - \ln 2 - \frac{1}{2} \right) i \right] \frac{z}{\pi} + O(z^3 \ln(z)), \quad (10)$$

где $\gamma = 0,57722$ – число Эйлера.

Кроме того, скалярное произведение выражается в элементарном виде, если переменная y_j не фиксирована, а непрерывно изменяется на интервале длиной h , который на рис. 2 выделен штриховой линией, примыкающей к углу:

$$\mathbf{r} = \{y_1^j - y_1^m, y_2^j - y_2^m\} = \{y_1, -y_2^m\}, \quad y_1 \in (0, h), \quad (11)$$

$$r = \sqrt{y_1^2 + (y_2^m)^2}, \quad (\mathbf{r} \cdot \mathbf{n}_y) = r_1 n_1 + r_2 n_2 = r_2 = -y_2^m, \quad (y_2^m = \frac{h}{2} \sin \alpha).$$

Тогда интеграл для b_{mj} в формуле (7) асимптотически равен [20]:

$$\begin{aligned} b_c^\alpha &= \int_0^h \frac{ik}{4} H_1^{(1)}(kr) \frac{(\mathbf{r} \cdot \mathbf{n}_y)}{r} dy_1 = \\ &= \int_0^h \frac{(\mathbf{r} \cdot \mathbf{n}_y) ik}{4r} \left(-\frac{2i}{\pi kr} + \frac{i}{\pi} kr \ln kr + \frac{\pi + (\gamma - \ln 2 - \frac{1}{2})i}{\pi} kr \right) dy_1 = \\ &= \frac{k^2 (\mathbf{r} \cdot \mathbf{n}_y)}{8\pi} \left(\frac{4}{k^2} \int_0^h \frac{dy_1}{r^2} - 2h \ln k - 2 \int_0^h \ln r dy_1 + ih\pi - 2h \left(\gamma - \ln 2 - \frac{1}{2} \right) \right), \\ \mathbf{r} &= \begin{pmatrix} y_1 - \frac{h \cos \alpha}{2} \\ -\frac{h \sin \alpha}{2} \end{pmatrix}, \quad r = |\mathbf{r}| = \sqrt{\frac{h^2}{4} + y_1^2 - h y_1 \cos \alpha}, \quad (\mathbf{r} \cdot \mathbf{n}_y) = -\frac{h \sin \alpha}{2}, \\ \int_0^h \frac{dy_1}{r^2} &= \frac{\pi - 2\alpha - 2 \arctan\left(\frac{\cos \alpha - 2}{\sin \alpha}\right)}{h \sin \alpha}, \quad \int_0^h \ln r dy_1 = \left(\frac{\pi}{2} - \alpha \right) \frac{h \sin \alpha}{2} - \frac{h \sin \alpha \arctan\left(\frac{\cos \alpha - 2}{\sin \alpha}\right)}{2} - \\ &- \frac{h \cos \alpha \ln(5 - 4 \cos \alpha)}{4} - h \ln h/2 + \frac{h \ln(5 - 4 \cos \alpha)}{2} - h. \end{aligned} \quad (12)$$

В формуле (12) выписаны соотношения лишь для внутреннего угла α . В случае, когда внутренний угол равен β , $\pi - \alpha$ или $\pi - \beta$, соответствующее значение угла нужно подставить в формулу (11) вместо величины α .

При этом восемь элементов в матрице СЛАУ (вместо общего представления (7)) следует взять в виде

$$b_{1,N} = b_{N,1} = b_c^\alpha, \quad b_{N_1+1,N_1} = b_{N_1,N_1+1} = b_c^\beta, \quad (13)$$

$$b_{N_1+N_2+1,N_1+N_2} = b_{N_1+N_2,N_1+N_2+1} = b_c^{\pi-\beta}, \quad b_{N_1+N_2+N_3+1,N_1+N_2+N_3} = b_{N_1+N_2+N_3,N_1+N_2+N_3+1} = b_c^{\pi-\alpha}.$$

На рис. 3 значения собственных частот из таблицы соответствуют острым пикам в зависимости числа обусловленности от частоты.

При оценке эффективности основного и улучшенного алгоритмов, а также акустического качества выбранного трапецевидного помещения учтем, что попадание в точное значение какой-либо собственной частоты давало бы бесконечно большое число обусловленности CN. На практике имеем конечное, но большое значение этого параметра. Чем больше CN в какой-либо собственной частоте, тем ближе найденное значение частоты к точному. В этом смысле таблица подтверждает явное превосходство улучшенного метода над прямой трактовкой ГИУ, так как число обусловленности для улучшенного алгоритма всегда больше, чем для обычного.

Оценим акустические свойства, рассмотрев малую прямоугольную студию размером 8×5 м, площадью 40 м^2 . Поскольку для прямоугольной геометрии собственные частоты выражаются в явном виде [13], легко определить их распределение по третьоктавным частотным полосам: (1) – 0; (2) – 1; (3) – 0; (4) – 1; (5) – 2; (6) – 1; (7) – 2; (8) – 4; (9) – 8; (10) – 7; (11) – 14. Очевидно, первый

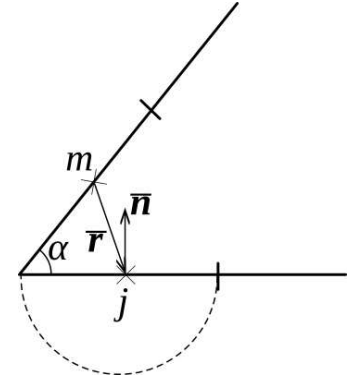


Рис. 2. Узлы сетки в окрестности угла граничного контура раствором α / Fig. 2. Grid's nodes near an angle of opening α on the boundary contour

критерий Бонелло нарушается здесь 3 раза – между (2) и (3), (5) и (6), (9) и (10). В случае трапеции, взятой достаточно произвольно, с характерным свойством наличия скоса стен, для трапецевидной геометрии площадью 32 м² имеем: (1) – 0; (2) – 1; (3) – 0; (4) – 1; (5) – 0; (6) – 2; (7) – 2; (8) – 3; (9) – 5; (10) – 8; (11) – 13. Здесь первый критерий Бонелло нарушается 2 раза: между (2) и (3), (4) и (5). То есть акустика трапецевидной комнаты лучше, чем прямоугольной.

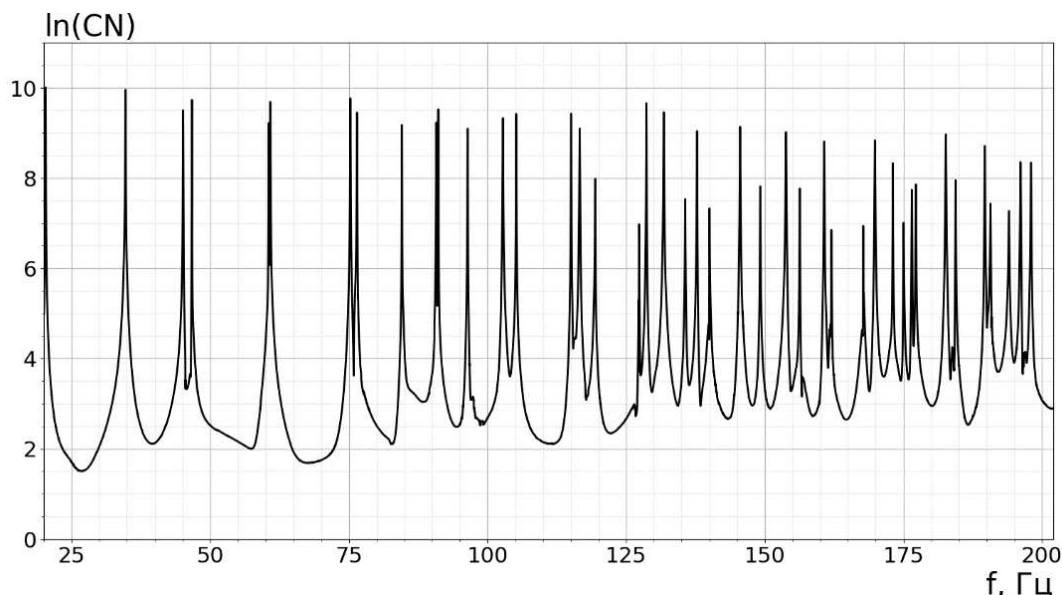


Рис. 3. Число обусловленности СЛАУ (параметр CN) для низких частот в логарифмической шкале как функция частоты: улучшенный метод. Острые пики соответствуют предельно большим значениям параметра CN , связанным с наличием собственных частот / Fig. 3. Condition number of SLAE (parameter CN) for low frequencies in a logarithmic scale, as a function of frequency: improved method. Sharp peaks correspond to extremely large values of parameter CN , associated with the presence of natural frequencies

Заключение

1. Метод, предложенный для решения проблемы собственных частот внутри трапецевидной области на основе ГИУ, работает стабильно, если применить улучшенный алгоритм.

2. В задаче расчета низких собственных частот с приложениями к акустике помещений улучшенный алгоритм не может определить, есть ли какие-либо кратные собственные значения, что является сутью второго критерия Бонелло [19]. Однако первый его критерий более строгий, поскольку на практике, если он выполняется, как правило, автоматически выполняется и второй критерий. На тестовом примере показано улучшение акустических свойств помещения за счет скоса стен путём сопоставления трапецевидной геометрии с прямоугольной по первому критерию.

3. При наличии двух близко расположенных собственных частот возникают случаи, для которых базовый алгоритм без улучшения не может их различить. В таблице такие случаи имеют место для двух частот, близких к 60,5 и 91 Гц. Алгоритм с улучшением легко различает эти частоты.

4. Величина острых пиков на рис. 3 уменьшается с ростом частоты. Таким образом, идентификация собственных значений становится менее надежной для более высоких частот. Однако для помещений малого и среднего размера в выбранном интервале ниже 200 Гц проблем с идентификацией не возникает, что наглядно видно из рис. 3.

Список источников

1. Бенерджи П., Баттерфилд Р. Методы граничных элементов в прикладных науках. М.: Мир, 1984. 496 с.
2. Бреббия К., Теллес Ж., Врубел Л. Методы граничных элементов. М.: Мир, 1987. 526 с.
3. Колтон Д., Кресс Р. Методы интегральных уравнений в теории рассеяния. М.: Мир, 1987. 312 с.

4. Zienkiewicz O.C., Taylor R.L., Zhu J.Z. *The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals*. 7th ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2013. 756 p.
5. Yan Z.Y. Treatment of sharp edges and corners in the acoustic Boundary Element Method under Neumann boundary condition // *Computer Modeling in Engineering and Sciences*. 2006. Vol. 13, № 2. P. 81–90. EDN: MJMQKF. <https://doi.org/10.3970/cmcs.2006.013.081>
6. Zagorodnov I.A. Numerical solution of integral equations of first and second kind in scalar and vector problems of diffraction on a cube // *Computational Mathematics and Modeling*. 1999. Vol. 10. P. 28–36. <https://doi.org/10.1007/BF02358919>
7. Budaev B.V., Bogy D.B. Diffraction by a convex polygon with side-wise constant impedance // *Wave Motion*. 2006. Vol. 43, iss. 8. P. 631–645. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wavemoti.2006.05.007>
8. Bernard J. A spectral approach for scattering by impedance polygons // *Quarterly J. of Mechanics and Applied Mathematics*. 2006. Vol. 59, iss. 4. P. 517–550. <http://dx.doi.org/10.1093/qjmam/hbl014>
9. Lyalinov M.A., Zhu N.Y. Scattering of a surface wave in a polygonal domain with impedance boundary // *St. Petersburg Mathematical J.* 2022. Vol. 33, № 2. P. 255–282. EDN: RZCOLA. <http://dx.doi.org/10.1090/spmj/1700>
10. Sumbatyan M.A., Martynova T.S., Musatova N.K. Boundary element methods in diffraction of a point-source acoustic wave by a rigid infinite wedge // *Engineering Analysis with Boundary Elements*. 2021. Vol. 125. P. 157–167. EDN: QSSWKE. <https://doi.org/10.1016/j.enganabound.2021.01.017>
11. Сумбатян М.А., Мартынова Т.С., Мусатова Н.К. К дифракции точечного источника звука на бесконечном клине // *Акуст. журн.* 2022. Т. 68, № 4. С. 351–360. EDN: KRXVIZ. <https://doi.org/10.31857/S0320791922030145>
12. Sumbatyan M.A., Musatova N.K. An efficient treatment of sound diffraction by arbitrary obstacles with angles // *Solid Mechanics, Theory of Elasticity and Creep. Advanced Structured Materials*. Cham: Springer, 2023. Vol. 185. P. 347–359. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-031-18564-9_25
13. Pierce A.P. *Acoustics: an introduction to its physical principles and applications*. New York: ASA, 1991. 678 p.
14. Абрамовиц М., Стиган И. *Справочник по специальным функциям*. М.: Наука, 1979. 830 с.
15. Sumbatyan M., Lannie M., Zampoli V. A fast Galerkin-based method for eigenfrequencies in acoustics of small rooms with slanted boundary planes // *J. of Sound and Vibration*. 2016. Vol. 367. P. 101–113. EDN: WWIJZD. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2016.01.001>
16. Сумбатян М.А., Скалия А. *Основы теории дифракции с приложениями в механике и акустике*. М.: Физматлит, 2013. 328 с. EDN: UGPDSH.
17. Press W.H., Teukolsky S.A., Vetterling W.T., Flannery B.P. *Numerical recipes in C*. Cambridge: Cambridge University Press, 2002. 994 p.
18. Everest F.A. *The master handbook of acoustics*. London: McGraw-Hill, 2001. 641 p.
19. Bonello O.J. A new criterion for the distribution of normal room modes // *J. of Audio Engineering Society*. 1981. Vol. 29. P. 597–606.
20. Прудников А.П., Брычков Ю.А., Маричев О.И. *Интегралы и ряды: элементарные функции*. М.: Наука, 1981. 800 с.

References

1. Banerjee P., Butterfield R. *Boundary element methods in engineering science*. Moscow: World; 1984. 496 p. (In Russ.).
2. Brebbia C., Telles J., Wrobel L. *Boundary element techniques*. Moscow: World; 1987. 526 p. (In Russ.).
3. Colton D., Kress R. *Integral equation methods in scattering theory*. Moscow: World; 1987. 312 p. (In Russ.).
4. Zienkiewicz O.C., Taylor R.L., Zhu J.Z. *The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals*. 7th ed. Oxford: Butterworth-Heinemann; 2013. 756 p.
5. Yan Z.Y. Treatment of sharp edges and corners in the acoustic Boundary Element Method under Neumann boundary condition. *Computer Modeling in Engineering and Sciences*. 2006;13(2):81-90. EDN: MJMQKF. <https://doi.org/10.3970/cmcs.2006.013.081>
6. Zagorodnov I.A. Numerical solution of integral equations of first and second kind in scalar and vector problems of diffraction on a cube. *Computational Mathematics and Modeling*. 1999;10:28-36. <https://doi.org/10.1007/BF02358919>
7. Budaev B.V., Bogy D.B. Diffraction by a convex polygon with side-wise constant impedance. *Wave Motion*. 2006;43(8):631-645. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wavemoti.2006.05.007>
8. Bernard J. A spectral approach for scattering by impedance polygons. *Quarterly J. of Mechanics and Applied Mathematics*. 2006;59(4):517-550. <http://dx.doi.org/10.1093/qjmam/hbl014>
9. Lyalinov M.A., Zhu N.Y. Scattering of a surface wave in a polygonal domain with impedance boundary. *St. Petersburg Math. J.* 2022;33(2):255-282. EDN: RZCOLA. <http://dx.doi.org/10.1090/spmj/1700>

10. Sumbatyan M.A., Martynova T.S., Musatova N.K. Boundary element methods in diffraction of a point-source acoustic wave by a rigid infinite wedge. *Engineering Analysis with Boundary Elements*. 2021;125:157-167. EDN: QSSWKE. <https://doi.org/10.1016/j.enganabound.2021.01.017>
11. Sumbatyan M.A., Martynova T.S., Musatova N.K. On diffraction of a point sound source by an infinite wedge. *Acoustical Physics*. 2022;68(4):307-315. EDN: CXCAZB. <https://doi.org/10.1134/s1063771022030149>
12. Sumbatyan M.A., Musatova N.K. An efficient treatment of sound diffraction by arbitrary obstacles with angles. *Solid Mechanics, Theory of Elasticity and Creep. Advanced Structured Materials*. Cham: Springer; 2023;185:347-359. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-031-18564-9_25
13. Pierce A.P. *Acoustics: an introduction to its physical principles and applications*. New York: ASA; 1991. 678 p.
14. Abramowitz M., Stegun I. *Handbook of mathematical functions*. Moscow: Science; 1979. 830 p. (In Russ.).
15. Sumbatyan M., Lannie M., Zampoli V. A fast Galerkin-based method for eigenfrequencies in acoustics of small rooms with slanted boundary planes. *J. of Sound and Vibration*. 2016;367:101-113. EDN: WWIJZD. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2016.01.001>
16. Sumbatyan M.A., Scalia A. *Fundamentals of diffraction theory with applications in mechanics and acoustics*. Moscow: Physical And Mathematical Literature; 2013. 328 p. EDN: UGPDSH. (In Russ.).
17. Press W.H., Teukolsky S.A., Vetterling W.T., Flannery B.P. *Numerical recipes in C*. Cambridge: Cambridge University Press; 2002. 994 p.
18. Everest F.A. *The master handbook of acoustics*. London: McGraw-Hill; 2001. 641 p.
19. Bonello O.J. A new criterion for the distribution of normal room modes. *J. of Audio Engineering Society*. 1981;29:597-606.
20. Prudnikov A.P., Brychkov Yu.A., Marichev O.I. *Integrals and series: elementary functions*. Moscow: Science; 1981. 800 p. (In Russ.).

Информация об авторах

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

Е.А. Титаренко – магистр, кафедра теоретической и компьютерной гидроаэродинамики Института математики, механики и компьютерных наук им. И.И. Воровича ЮФУ.

Information about the authors

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

E.A. Titarenko – Master, Department of Theoretical and Computational Hydroaerodynamics, Vorovich Institute of Mathematics, Mechanics and Computer Science, SFedU.

*Статья поступила в редакцию 26.02.2025; одобрена после рецензирования 12.03.2025; принята к публикации 23.04.2025.
The article was submitted 26.02.2024; approved after reviewing 12.03.2025; accepted for publication 23.04.2025.*

Научная статья
УДК 517.983.24
<https://doi.org/10.18522/1026-2237-2025-2-23-28>

О ДИПОЛЬНОМ ПРИБЛИЖЕНИИ В ТЕОРИИ АТОМА

**Алексей Николаевич Хопёрский¹, Алексей Михайлович Надолинский²,
Рустам Викторович Конеев³, Юлия Николаевна Толкунова⁴**

^{1, 2, 3, 4}Ростовский государственный университет путей сообщения, Ростов-на-Дону, Россия

¹hopersky_vm_1@rgups.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3230-6018>

²amnrnd@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9133-9832>

³koneev@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-3580-9240>

⁴juli_tn@mail.ru

Аннотация. В нерелятивистском приближении теории атома в формализме вторичного квантования и теории неприводимых тензорных операторов установлены аналитические структуры для оператора квадрупольного перехода и его матричного элемента. Для получения указанных структур использовано интегральное представление Лоудона для нерелятивистского оператора взаимодействия электрического поля с атомом и разложение плоских волн в бесконечные знакопередающиеся степенные ряды. Сформулирован новый критерий применимости дипольного приближения как отношение сечений однократной фотоионизации атома по каналам дипольного и квадрупольного переходов. На примере расчета сечений однократной ионизации глубокой оболочки неоподобного иона атома железа рентгеновским фотоном показано, что новый критерий применимости обнаруживает лидирующую роль оператора дипольного перехода и вне рамок длинноволнового режима излучения. Полученные результаты носят предсказательный характер.

Ключевые слова: дипольное приближение, тензорный оператор, поля мультиполей, квадрупольный переход, амплитуда вероятности, критерий применимости

Для цитирования: Хопёрский А.Н., Надолинский А.М., Конеев Р.В., Толкунова Ю.Н. О дипольном приближении в теории атома // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2025. № 2. С. 23–28. <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2025-2-23-28>.

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

Original article

ON THE DIPOLE APPROXIMATION IN THE THEORY OF THE ATOM

Alexey N. Hopersky¹, Alexey M. Nadolinsky², Rustam V. Koneev³, Julia N. Tolkunova⁴

^{1, 2, 3, 4}Rostov State Transport University, Rostov-on-Don, Russia

¹hopersky_vm_1@rgups.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3230-6018>

²amnrnd@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9133-9832>

³koneev@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-3580-9240>

⁴juli_tn@mail.ru

Abstract. In the nonrelativistic many-electron approximation of the theory of the atom in the formalism of secondary quantization and the theory of irreducible tensor operators, analytical structures for the quadrupole transition operator and its matrix element are established. To obtain these structures, the integral Loudoun representation for the nonrelativistic operator of the interaction of an electric field with an atom and the decomposition of plane waves into infinite alternating power series are used. A new criterion for the applicability of the

© Хопёрский А.Н., Надолинский А.М., Конеев Р.В., Толкунова Ю.Н., 2025

dipole approximation is formulated as the ratio of the cross sections of single photoionization of an atom via the channels of dipole and quadrupole transitions. On the example of calculating the cross-sections of a single ionization of a deep shell of a neon-like ion of an iron atom by an X-ray photon, it is shown that the new applicability criterion reveals the leading role of the dipole transition operator even outside the long-wave radiation regime. The results obtained are predictive in nature.

Keywords: dipole approximation, tensor operator, multipole fields, quadrupole transition, probability amplitude, applicability criterion

For citation: Hopersky A.N., Nadolinsky A.M., Koneev R.V., Tolkunova J.N. On the Dipole Approximation in the Theory of the Atom. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2025;(2):23-28. (In Russ.). <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2025-2-23-28>

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

Введение

Один из фундаментальных операторов нерелятивистской квантовой механики – оператор взаимодействия электромагнитного поля с атомом [1]

$$\hat{R} = -\frac{e}{m_e c} \sum_{n=1}^N (\hat{p}_n \cdot \hat{A}_n). \quad (1)$$

Линейный (по полю) оператор (1) даёт описание фундаментального в микромире процесса однократной фотоионизации атома. Возникает математическая проблема конкретизации и учёта полной аналитической структуры оператора (1) в формализме вторичного квантования и неприводимых тензорных операторов. В (1) оператор поля можно представить в формализме вторичного квантования [2–4] в виде как разложения по плоским волнам

$$\hat{A}_n = \sum_{\mathbf{k}} \sum_{p=1,2} \mathbf{e}_{\mathbf{k}p} (\hat{a}_{\mathbf{k}p}^+ e^{-i\eta_n} + \hat{a}_{\mathbf{k}p}^- e^{i\eta_n}), \quad (2)$$

так и суперпозиции мультиполей путём разложения плоских волн по векторным сферическим функциям [5, 6]. В (1), (2) $e(m_e)$ – заряд (масса) электрона; c – скорость света в вакууме; N – число электронов в атоме; \hat{A}_n – оператор электромагнитного поля $\eta_n = (\mathbf{k} \cdot \mathbf{r}_n)$; $\mathbf{k}(\mathbf{e}_{\mathbf{k}p})$ – волновой вектор (вектор поляризации) фотона; p – индекс поляризации, $(\mathbf{k} \cdot \mathbf{e}_{\mathbf{k}p}) = 0$; $\hat{p}_n(\mathbf{r}_n)$ – оператор импульса (радиус-вектор) n -электрона атома; $\hat{a}_{\mathbf{k}p}^+$ ($\hat{a}_{\mathbf{k}p}^-$) – операторы рождения (уничтожения) фотона. Для нашей цели математически более компактным для реализации методов теории неприводимых тензорных операторов (квантовая теория углового момента) [7–10] представляется разложение плоской волны в формуле (2) в степенной ряд (α – целое)

$$\exp(i\eta_n) = \sum_{\alpha=0}^{\infty} \frac{1}{\alpha!} (i\eta_n)^\alpha. \quad (3)$$

В длинноволновом приближении ($\eta_n \ll 1$) в (3) достаточно ограничиться значениями $\alpha = 0, 1$ – и оператор (1) принимает вид $\hat{R} = \hat{R}_D + \hat{R}_Q$, где \hat{R}_D и \hat{R}_Q – операторы дипольного (D ; $\alpha = 0$) и квадрупольного (Q ; $\alpha = 1$) переходов. Тогда для полного (вероятность исчезновения фотона без регистрации фотоэлектрона) сечения однократной фотоионизации атома имеем

$$\sigma \sim \sum_{\lambda=D,Q} |\langle i | \hat{R}_\lambda | f(\lambda) \rangle|^2, \quad (4)$$

где $|i\rangle$ ($|f(\lambda)\rangle$) – полная волновая функция начального (конечного) состояния системы «атом \oplus фотон». Получение аналитических структур \hat{R}_Q , $\langle i | \hat{R}_Q | f(Q) \rangle$, σ в формализме вторичного квантования и теории неприводимых тензорных операторов и, как результат, критерия применимости дипольного приближения при теоретическом описании процесса однократной фотоионизации атома составило содержание данной статьи.

Результаты

Рассмотрим эквивалентное (1) интегральное представление Лоудона [11] для многоэлектронного оператора взаимодействия электрического поля с атомом

$$\hat{R} = e \sum_{n=1}^N \int (\mathbf{r}_n \cdot \hat{E}(\lambda \mathbf{r}_n)) d\lambda. \quad (5)$$

В силу связи $\hat{E}(\mathbf{r}, t) = (-1/c) \partial \hat{A}(\mathbf{r}, t) / \partial t$ (t – время) [12] оператор поля в (5) при $t = 0$ имеет вид

$$\hat{E}(\lambda \mathbf{r}_n) = \frac{1}{c} \cdot i \sum_{\mathbf{k}p} \omega_k \mathbf{e}_{\mathbf{k}p} (\hat{a}_{\mathbf{k}p}^+ e^{-i\lambda \eta_n} - \hat{a}_{\mathbf{k}p}^- e^{i\lambda \eta_n}), \quad (6)$$

где круговая частота фотона $\omega_k = kc$ ($k = |\mathbf{k}|$). Подставляя (6) в (5), получаем

$$\hat{R} = i \frac{e}{c} \cdot \sum_{n=1}^N \sum_{\mathbf{k}p} \omega_k (\mathbf{e}_{\mathbf{k}p} \cdot \mathbf{r}_n) \int_0^1 (\hat{a}_{\mathbf{k}p}^+ e^{-i\lambda \eta_n} - \hat{a}_{\mathbf{k}p}^- e^{i\lambda \eta_n}) d\lambda. \quad (7)$$

Теперь сформулируем и докажем два утверждения.

Утверждение 1. Многоэлектронный оператор электрического квадрупольного перехода имеет вид

$$\hat{R}_Q = \frac{4\pi}{15} \left(\frac{2\pi}{3} \right)^{1/2} \cdot \frac{e}{c^2} \sum_{\mathbf{k}p} \omega_k^2 (\hat{a}_{\mathbf{k}p}^+ + \hat{a}_{\mathbf{k}p}^-) \cdot \Phi, \quad (8)$$

$$\Phi = \sum_{p=-1}^1 \sum_{p'=-1}^1 Y_{1p}^*(\mathbf{e}_{\mathbf{k}p}) Y_{1p'}^*(\mathbf{e}_k) \chi_{pp'},$$

$$\chi_{pp'} = \sum_{m=-2}^2 (-1)^m \begin{pmatrix} 1 & 1 & 2 \\ p & p' & -m \end{pmatrix} \sum_{n=1}^N r_n^2 Y_{2m}(\mathbf{e}_n), \quad (9)$$

где определены единичные векторы $\mathbf{e}_k = \mathbf{k}/k$ и $\mathbf{e}_n = \mathbf{r}_n/r_n$; Y_{ab} – сферическая (шаровая) функция (* – символ комплексного сопряжения); $3j$ – символ Вигнера.

Доказательство. В длинноволновом приближении из (7) получаем

$$\hat{R}_Q = \frac{1}{2} \cdot \frac{e}{c^2} \sum_{\mathbf{k}p} \omega_k^2 (\hat{a}_{\mathbf{k}p}^+ + \hat{a}_{\mathbf{k}p}^-) \cdot \Lambda, \quad \Lambda = \sum_{n=1}^N (\mathbf{e}_{\mathbf{k}p} \cdot \mathbf{r}_n) (\mathbf{e}_k \cdot \mathbf{r}_n). \quad (10)$$

Учтём математические факты квантовой теории углового момента:

$$1. (\mathbf{e} \cdot \mathbf{r}_n) = \frac{4\pi}{3} \sum_{p=-1}^1 (-1)^p \cdot r_n \cdot Y_{1,-p}(\mathbf{e}) Y_{1p}(\mathbf{e}_n). \quad (11)$$

2. Разложение Клебша – Гордана:

$$Y_{l_1 m_1}(\mathbf{e}_n) Y_{l_2 m_2}(\mathbf{e}_n) = \sum_{LM} \left(\frac{[l_1][l_2]}{4\pi[L]} \right)^{1/2} \cdot C_{l_1 0 l_2 0}^{L 0} \cdot C_{l_1 m_1 l_2 m_2}^{L M} \cdot Y_{L M}(\mathbf{e}_n), \quad (12)$$

где $[x] \equiv 2x + 1$ и определены коэффициенты Клебша – Гордана векторного сложения:

$$C_{l_1 m_1 l_2 m_2}^{L M} = (-1)^{l_1 - l_2 + M} \cdot \sqrt{[L]} \cdot \begin{pmatrix} l_1 & l_2 & L \\ m_1 & m_2 & -M \end{pmatrix}. \quad (13)$$

Тогда, подставляя (11) в (10), учитывая (12), (13) и правила отбора (для верхней строки $3j$ -символа Вигнера) $l_1 + l_2 + L = 2g$, g – целое, $L \geq |l_1 - l_2|$, $L \leq l_1 + l_2$, получаем (8). В силу правил отбора при $l_1 = l_2 = 1$ квантовое число L в (12) принимает лишь значения $L = 0, 2$. Однако значение $L = 0$ оставляет ненулевой лишь сферическую функцию $Y_{00}(\mathbf{e}_n) = 1/\sqrt{4\pi}$. Как результат, соответствующий матричный элемент $\langle i | \hat{R}_Q | f(Q) \rangle = 0$ в силу ортогональности сферических частей волновых функций $|i\rangle$ - и $|f(Q)\rangle$ -состояний. Утверждение 1 доказано.

Выражение (8) – общий аналитический результат для вычисления амплитуд вероятности квадрупольных переходов типа $nl \rightarrow \varepsilon(l+2)$, $n \leq F$ (уровень Ферми). В данной статье, во избежание общих и громоздких построений, конкретизируем матричный элемент $\langle i | \hat{R}_Q | f(Q) \rangle$ для квадрупольного перехода из $1s^2$ -оболочки атома с 1S_0 -термом основного состояния: $1s^2(^1S_0) \rightarrow 1s\varepsilon d(^1D_2)$, $n = 1$, $l = 0$; ε – энергия фотоэлектрона непрерывного спектра.

Утверждение 2. Матричный элемент \hat{R}_Q -оператора (8) по состояниям квадрупольного перехода $|i\rangle = |1s^2(^1S_0)\rangle \otimes \hat{a}_\omega^+ |O_q\rangle$ и $|f(Q)\rangle = |1s\epsilon d(^1D_2)\rangle \otimes |O_q\rangle$ ($|O_q\rangle$ – волновая функция фотонного вакуума квантовой электродинамики [4]) имеет вид

$$\langle i | \hat{R}_Q | f(Q) \rangle = \beta(\omega) \sum_{p=-1}^1 \sum_{p'=-1}^1 \begin{pmatrix} 1 & 1 & 2 \\ p & p' & M \end{pmatrix} Y_{1p}^*(\mathbf{e}_\omega) Y_{1p'}^*(\mathbf{e}_\omega), \quad (14)$$

$$\beta(\omega) = \frac{8}{15} \cdot \frac{e}{c} \cdot \left(\frac{\hbar}{V}\right)^{1/2} \cdot (\pi\omega)^{3/2} \cdot \langle 1s | r^2 | \epsilon d \rangle, \quad (15)$$

$$\langle 1s | r^2 | \epsilon d \rangle = \int_0^{+\infty} P_{1s}(r) \cdot r^2 \cdot P_{\epsilon d}(r) dr. \quad (16)$$

В (14) $M = 0, \pm 1, \pm 2$ (проекция полного момента $J = 2$ конечного $|1s\epsilon d(^1D_2)\rangle$ -состояния атома). В (15), (16) \hbar – постоянная Планка; V – объём квантования электромагнитного поля; ω – круговая частота поглощаемого фотона; $\epsilon = \hbar\omega - I_{1s}$, I_{1s} – энергия порога ионизации $1s^2$ -оболочки; $P_{1s}(P_{\epsilon d})$ – радиальная часть волновой функции $1s(\epsilon d)$ -электрона.

Доказательство. В (11) введём обозначение:

$$\left(\frac{4\pi}{5}\right)^{1/2} \cdot \sum_{n=1}^N r_n^2 \cdot Y_{2m}(\mathbf{e}_n) = Q_m^{(2)}. \quad (17)$$

В приближении LS -связи (L и S – полные орбитальный момент и спин состояния атома) учтём результат реализации теоремы Вигнера – Экарта для матричного элемента оператора (17):

$$\langle 1s^2(^1S_0) | Q_m^{(2)} | 1s\epsilon d(^1D_2, M) \rangle = \begin{pmatrix} 0 & 2 & 2 \\ 0 & m & M \end{pmatrix} \langle 1s^2, ^1S_0 || Q^{(2)} || 1s\epsilon d, ^1D_2 \rangle. \quad (18)$$

В (18) учтём значения $3j$ -символа Вигнера (δ_{ab} – символ Кронекера – Вейерштрасса):

$$\begin{pmatrix} 0 & 2 & 2 \\ 0 & m & M \end{pmatrix} = \frac{1}{\sqrt{5}} \cdot (-1)^M \cdot \delta_{m, -M} \quad (19)$$

и приведённого матричного элемента [13]: $\langle 1s^2, ^1S_0 || Q^{(2)} || 1s\epsilon d, ^1D_2 \rangle = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \langle 1s | r^2 | \epsilon d \rangle$.

Учтём также матричные элементы операторов рождения (уничтожения) фотонов в (8) [1]:

$$\langle \omega | \hat{a}_{\mathbf{k}p}^+ | O_q \rangle = \left(\frac{2\pi c^2 \cdot \hbar}{\omega V}\right)^{1/2} \cdot \delta_{\omega\omega_k}, \quad (20)$$

$$\langle \omega | \hat{a}_{\mathbf{k}p}^- | O_q \rangle = 0, \quad (21)$$

$$|\omega\rangle = \hat{a}_\omega^+ | O_q \rangle. \quad (22)$$

Тогда, подставляя (18) в матричный элемент оператора $\chi_{pp'}$ из (9) и учитывая (20)–(22), для искомого матричного элемента \hat{R}_Q -оператора получаем (14). Утверждение 2 доказано.

Завершим статью построением новой формы критерия применимости дипольного приближения. Традиционно этот критерий определяют в виде (длинноволновое приближение) [10]

$$\eta = r_{1s} / \lambda_\omega \ll 1, \quad (23)$$

где λ_ω – длина волны поглощаемого фотона; r_{1s} – средний радиус $1s^2$ -оболочки атома. Форма критерия (23) некорректна по двум причинам. Величина η содержит ненаблюдаемый в эксперименте параметр r_{1s} и не содержит наблюдаемых амплитуд вероятности (матричные элементы операторов) мультипольных переходов. При требовании наблюдаемости некорректность исчезает, если критерий применимости дипольного приближения, используя (14), определить отношением сечений фотоионизации по каналам дипольного и квадрупольного переходов $\zeta = \sigma_Q / \sigma_D$.

С учётом (4), (14), золотого правила Ферми [11, 14] формулы суммирования произведений двух $3j$ -символов Вигнера [15] и формулы для сечения фотоионизации $1s^2$ -оболочки атома в

дипольном приближении (α – постоянная тонкой структуры) [1]: $\sigma_D = \frac{4}{3} \pi^2 \cdot \alpha \cdot \hbar \omega \cdot \langle 1s | r | \mathcal{E} \rangle^2$,
для ξ получаем

$$\xi = 1,7 \cdot 10^{-6} \cdot \left(\hbar \omega \cdot \frac{\langle 1s | r^2 | \mathcal{E} \rangle}{\langle 1s | r | \mathcal{E} \rangle} \right)^2. \quad (24)$$

В (24) энергия фотона, энергия электрона сплошного спектра и радиальные интегралы вычисляются в атомной системе единиц [10]. Например, для неоноподобного иона атома железа (Fe^{16+}) при $\hbar \omega = 10$ кэВ ($\lambda_\omega = 1,240 \text{ \AA}$), $I_{1s} = 7,70$ кэВ и $r_{1s} = 0,031 \text{ \AA}$ получаем $\xi = 1,4 \cdot 10^{-6}$, тогда как $\eta \approx 2,5 \cdot 10^{-2}$. Результат для ξ показывает лидирующую роль дипольного перехода при фотоионизации $1s^2$ -оболочки иона Fe^{16+} . Более того, для иона Fe^{16+} в коротковолновом режиме излучения, в частности, при $\hbar \omega = 200$ кэВ ($\lambda_\omega = 0,062 \text{ \AA}$) имеем $\xi = 10^{-6}$, тогда как $\eta \approx 0,5$ не удовлетворяет двойному неравенству (23). Таким образом, новая форма критерия применимости дипольного приближения (24) применима и вне режима длинноволнового излучения.

Замечание

Полученные результаты впервые конкретизируют нерелятивистские аналитические структуры \hat{R}_Q , $\langle i | \hat{R}_Q | f(Q) \rangle$ и ξ в формализме вторичного квантования и теории неприводимых тензорных операторов, «закодированные» в результатах нерелятивистской теории мультиполей [5, 10]. «Закодированные» результаты, в свою очередь, следуют из релятивистской теории мультиполей [5, 16–20] при замене сферических функций Бесселя в операторах мультипольных переходов их длинноволновыми пределами.

Список источников

1. Каразия Р. Введение в теорию рентгеновских и электронных спектров свободных атомов. Вильнюс: Мокслас, 1987. 276 с.
2. Dirac P.A.M. The Quantum Theory of the Emission and Absorption of Radiation // Proceeding of the Royal Society A. 1927. Vol. 114. P. 243–265.
3. Джадд Б. Вторичное квантование и атомная спектроскопия. М.: Мир, 1970. 136 с.
4. Берестецкий В.Б., Лифшиц Е.М., Питаевский Л.Л. Квантовая электродинамика. М.: Наука, 1980. 704 с.
5. Роуз М. Поля мультиполей. М.: Изд-во иностр. лит., 1957. 132 с.
6. Ахиезер А.И., Берестецкий В.Б. Квантовая электродинамика. М.: Наука, 1969. 624 с.
7. Варшалович Д.А., Москалёв А.Н., Херсонский В.К. Квантовая теория углового момента. Л.: Наука, 1975. 439 с.
8. Edmonds A.R. Angular Momentum in Quantum Mechanics. Princeton: Princeton University Press, 1974. 146 p.
9. Biedenharn L.C., Louck J.D. Angular Momentum in Quantum Physics. Theory and Application. Addison-Wesley: Publishing Company Reading, 1981. 716 p.
10. Собельман И.И. Введение в теорию атомных спектров. М.: Наука, 1977. 320 с.
11. Loudon R. Quantum Theory of Light. Oxford: Oxford Science Publications, Clarendon Press, 1983. 393 p.
12. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теория поля. М.: Наука, 1988. 512 с.
13. Юцис А.П., Савукина А.Ю. Математические основы теории атома. Вильнюс: Минтис, 1973. 480 с.
14. Ферми Э. Квантовая механика: конспект лекций. М.: Мир, 1968. 367 с.
15. Хопёрский А.Н., Конеев Р.В. О суммировании $3j$ -символов Вигнера // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2023. № 1. С. 24–28. <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2023-1-24-28>
16. Blatt J.M., Weisskopf V.F. Theoretical Nuclear Physics. New York: John Wiley and Sons, 1952. 896 p.
17. Biedenharn L.C., Rose M.E. Theory of Angular Correlation of Nuclear Radiations // Rev. Mod. Phys. 1953. Vol. 25. P. 729–769.
18. Pratt R.H., Ron A., Tseng H.K. Atomic Photoelectric Effect Above 10 keV // Rev. Mod. Phys. 1973. Vol. 45. P. 273–325.
19. Scofield J.H. Theoretical Photoionization Cross Section from 1 to 1500 keV // Lawrence Livermore Lab. Rep. No. UCRL-51326. Livermore, California, 1973. 192 p.

20. Scofield J.H. Angular and polarization correlations in photoionization and radiative recombination // Phys. Rev. A. 1989. Vol. 40. P. 3054–3060.

References

1. Karasia R. *An introduction to the theory of X-ray and electron spectra of free atoms*. Vilnius: Mokslas; 1987. 276 p. (In Russ.).
2. Dirac P.A.M. The Quantum Theory of the Emission and Absorption of Radiation. *Proceeding of the Royal Society A*. 1927;114;243-265.
3. Judd B. *Secondary quantization and atomic spectroscopy*. Moscow: World; 1970. 136 p. (In Russ.).
4. Berestetsky V.B., Lifshits E.M., Pitaevsky L.L. *Quantum electrodynamics*. Moscow: Science; 1980. 704 p. (In Russ.).
5. Rose M. *Multipole fields*. Moscow: Publishing House of Foreign Literature; 1957. 132 p. (In Russ.).
6. Akhiezer A.I., Berestetsky V.B. *Quantum electrodynamics*. Moscow: Science; 1969. 624 p. (In Russ.).
7. Varshalovich D.A., Moskalev A.N., Khersonsky V.K. *Quantum theory of angular momentum*. Leningrad: Science; 1975. 439 p. (In Russ.).
8. Edmonds A.R. *Angular Momentum in Quantum Mechanics*. Princeton: Princeton University Press; 1974. 146 p.
9. Biedenharn L.C., Louck J.D. *Angular Momentum in Quantum Physics*. Addison-Wesley: Publishing Company Reading; 1981. 716 p.
10. Sobelman I.I. *Introduction to the theory of atomic spectra*. Moscow: Science; 1977. 320 p. (In Russ.).
11. Loudon R. *Quantum Theory of Light*. Oxford: Oxford Science Publications, Clarendon Press; 1983. 393 p.
12. Landau L.D., Lifshits E.M. *Field theory*. Moscow: Science; 1988. 512 p. (In Russ.).
13. Jucys A. P., Savukynas A. J. *Mathematical Foundations of the Atomic Theory*. Vilnius: Mintis; 1973. 480 p. (In Russ.).
14. Fermi E. *Quantum mechanics: lecture notes*. Moscow: World, 1968. 367 p. (In Russ.).
15. Hopersky A.N., Koneev R.V. On Summation of 3j-Wigner Symbols. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science*. 2023;(1):24-28. (In Russ.). <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2023-1-24-28>
16. Blatt J.M., Weisskopf V.F. *Theoretical Nuclear Physics*. New York: John Wiley and Sons; 1952. 896 p.
17. Biedenharn L.C., Rose M.E. Theory of Angular Correlation of Nuclear Radiations. *Rev. Mod. Phys.* 1953;25:729-769.
18. Pratt R.H., Ron A., Tseng H.K. Atomic Photoelectric Effect Above 10 keV. *Rev. Mod. Phys.* 1973;45:273-325.
19. Scofield J.H. Theoretical Photoionization Cross Section from 1 to 1500 keV. *Lawrence Livermore Lab. Rep. No. UCRL-51326*. Livermore, California, 1973. 192 p.
20. Scofield J.H. Angular and polarization correlations in photoionization and radiative recombination. *Phys. Rev. A*. 1989;40:3054-3060.

Информация об авторах

А.Н. Хопёрский – доктор физико-математических наук, профессор кафедры высшей математики РГУПС.

А.М. Надолинский – доктор физико-математических наук, профессор кафедры физики РГУПС.

Р.В. Конеев – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры высшей математики РГУПС.

Ю.Н. Толкунова – кандидат технических наук, доцент кафедры высшей математики РГУПС.

Information about the authors

A.N. Hopersky – Doctor of Science (Physics and Mathematics), Professor, Department of Higher Mathematics, RSTU.

A.M. Nadolinsky – Doctor of Science (Physics and Mathematics), Professor, Department of Physics, RSTU.

R.V. Koneev – Candidate of Science (Physics and Mathematics), Associate Professor, Department of Higher Mathematics, RSTU.

J.N. Tolkunova – Candidate of Science (Technical), Associate Professor, Department of Higher Mathematics, RSTU.

Статья поступила в редакцию 14.02.2025; одобрена после рецензирования 10.03.2025; принята к публикации 23.04.2025.
The article was submitted 14.02.2025; approved after reviewing 10.03.2025; accepted for publication 23.04.2025.

Научная статья

УДК 514.752

<https://doi.org/10.18522/1026-2237-2025-2-29-35>

О НЕКОТОРЫХ СВОЙСТВАХ k -ПОВЕРХНОСТИ БЕЗ КРУЧЕНИЯ В $(n+k)$ -МЕРНОМ ЕВКЛИДОВОМ ПРОСТРАНСТВЕ

Валентин Геннадьевич Шармин¹, Дмитрий Валентинович Шармин^{2✉},
Тамара Николаевна Шармина³

^{1, 2, 3} Тюменский государственный университет, Тюмень, Россия

¹v.g.sharmin@utmn.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5672-9795>

²d.v.sharmin@utmn.ru[✉], <https://orcid.org/0000-0001-7772-6019>

³t.n.sharmina@utmn.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3408-6581>

Аннотация. В многомерных евклидовых пространствах рассматриваются коэффициенты нормального кручения для k -поверхностей, определяемые через нормальные расслоения этих поверхностей. Основная цель данной работы заключается в изучении свойств k -поверхностей в пространстве E^{n+k} , имеющих коразмерность больше единицы и коэффициенты кручения которых в каноническом базисе нормального пространства равны нулю. При этом используются методы дифференциальной и римановой геометрии, а также инструменты тензорного анализа для исследования n -поверхностей с коразмерностью, отличной от единицы. Исследуется взаимосвязь свойств n -поверхностей и соответствующих им двумерных поверхностей, принадлежащих $(n+2)$ -мерному евклидову пространству. Также рассматриваются n -поверхности, не обладающие кручением в $(n+k)$ -мерном евклидовом пространстве, для которых доказано, что в окрестности любой аксиальной точки M можно найти такую область, где единственной аксиальной точкой будет именно эта точка M .

Ключевые слова: евклидово пространство, n -поверхность, коразмерность, коэффициенты кручения поверхности, аксиальная точка, канонический базис, ассоциированные поверхности

Для цитирования: Шармин В.Г., Шармин Д.В., Шармина Т.Н. О некоторых свойствах k -поверхности без кручения в $(n+k)$ -мерном евклидовом пространстве // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2025. № 2. С. 29–35. <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2025-2-29-35>

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

Original article

ON SOME PROPERTIES OF k -SURFACE WITHOUT TORSION IN $(n+k)$ -DIMENSIONAL EUCLIDEAN SPACE

Valentin G. Sharmin¹, Dmitrii V. Sharmin^{2✉}, Tamara N. Sharmina³

^{1, 2, 3} Tyumen State University, Tyumen, Russia

¹v.g.sharmin@utmn.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5672-9795>

²d.v.sharmin@utmn.ru[✉], <https://orcid.org/0000-0001-7772-6019>

³t.n.sharmina@utmn.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3408-6581>

© Шармин В.Г., Шармин Д.В., Шармина Т.Н., 2025

Abstract. In multidimensional Euclidean spaces, normal torsion coefficients for k -surfaces are considered, which are determined through the normal bundles of these surfaces. The main goal of this article is to study the properties of k -surfaces in the space E^{n+k} , which have a codimension greater than 1, and whose torsion coefficients in the canonical basis of normal space are equal to zero. The article uses methods of differential and Riemannian geometry, as well as tensor analysis tools to study n -surfaces with codimension different from unity. Explores the relationship between the properties of n -surfaces and the corresponding two-dimensional surfaces that belong to $(n+2)$ -dimensional Euclidean space. We also consider n -surfaces that do not have torsion in $(n+k)$ -dimensional Euclidean space, for which it is proven that in the neighborhood of any axial point M one can find a region where the only axial point is precisely this point M .

Keywords: Euclidean space, n -surface, codimension, surface torsion coefficients, axial point, canonical basis, associated surfaces

For citation: Sharmin V.G., Sharmin D.V., Sharmina T.N. On Some Properties of k -surface without Torsion in $(n+k)$ -dimensional Euclidean Space. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2025;(2):29-35. (In Russ.). <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2025-2-29-35>

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

Введение

Одной из важнейших характеристик k -поверхностей ($k \geq 1$) в n -мерном евклидовом пространстве является кручение. В геометрии дифференциальных многообразий понятие кручения играет важную роль, характеризуя «скрученность» поверхности в пространстве. Для кривых в трёхмерном пространстве определение кручения естественно вытекает из классических геометрических представлений. Однако при переходе к k -поверхностям ($k \geq 2$) в многомерном евклидовом пространстве ситуация усложняется, требуя другого подхода. Для двумерных поверхностей в E^4 рассматривается гауссово кручение, а для поверхностей, имеющих коразмерность больше единицы, в E^n вводится кручение как мера «скрученности» нормального расслоения поверхности. Это кручение часто также называется нормальным.

Рассмотрим некоторые результаты исследований в области дифференциальной геометрии, связанные с кручением.

Работа [1] посвящена исследованию полного кручения замкнутых линий кривизны на поверхности в E^3 . В частности, в ней показано, что если полное кручение замкнутой кривой равно $2kn$, то эта кривая может выглядеть как линия кривизны на замкнутой ориентированной поверхности рода 1.

А.Н. Зубков и В.Т. Фоменко ввели понятия векторов нормальной и эйлеровой кривизны, нормального и эйлерова кручения, изучили их свойства [2]. Ю.А. Аминов, опираясь на геометрические свойства эллипса нормальной кривизны, ввел понятие кручения двумерной поверхности в E^4 [3]. И.И. Бодренко исследовала некоторые свойства поверхностей, обладающих постоянным гауссовым кручением в четырехмерном евклидовом пространстве [4].

В классической дифференциальной геометрии известен факт: равенство нулю кручения кривой в трехмерном пространстве равносильно наличию двумерной плоскости, на которой эта кривая располагается.

Аналогичные проблемы, касающиеся поверхностей четырехмерного евклидова пространства, обсуждаются в ряде работ по дифференциальной геометрии многомерных пространств. В.Т. Фоменко доказал, что равенство нулю как нормального, так и гауссова кручения является достаточным, но не необходимым условием для существования 3-плоскости, содержащей поверхность [5]. Работа [6] является обобщением [5] для пространств постоянной кривизны. А.И. Фирсов изучал локальные характеристики поверхностей без кручения в канонических нормалях и выявил их связь с классом поверхностей Бонне [7].

В настоящей статье для n -поверхности F^n в E^{n+k} построена система канонических нормалей, а также исследуются связи между свойствами n -поверхности F^n и ассоциированных с ней двумерных поверхностей, доказываются некоторые локальные свойства рассматриваемых поверхностей.

Основные понятия

Пусть задана C^3 -регулярная n -поверхность F^n в E^{n+k}

$$\mathbf{r} = \mathbf{r}(u_1, u_2, \dots, u_n). \quad (1)$$

Рассмотрим на F^n векторные поля $(\mathbf{n}_1, \mathbf{n}_2, \dots, \mathbf{n}_k)$ класса C^2 . Векторы $(\mathbf{n}_1, \mathbf{n}_2, \dots, \mathbf{n}_k)$, заданные в некоторой точке M , – это базис нормального пространства в точке M .

Построим квадратичные формы

$$\varphi_s = (\mathbf{r}_{ij}, \mathbf{n}_s) du^i du^j = b_{ij,s} du^i du^j \quad (2)$$

и величины

$$K_{iqkj,s} = \begin{vmatrix} b_{ik,s} & b_{ij,s} \\ b_{qk,s} & b_{qj,s} \end{vmatrix}. \quad (3)$$

Теорема 1. При переходе от одного базиса нормального пространства к другому в любой точке F^n величина $\sum_{s=1}^k K_{iqkj,s}$ не изменяется [8].

Определение 1. Скалярные произведения $\alpha_{q,s}^p = \left(\frac{\partial \mathbf{n}_s}{\partial u^q}, \mathbf{n}_p \right)$ называются коэффициентами кручения n -поверхности F^n , вычисленными в нормалях $(\mathbf{n}_1, \mathbf{n}_2, \dots, \mathbf{n}_k)$.

Из определения 1 следует, что $\alpha_{q,s}^p = \alpha_{q,p}^s$ и $\alpha_{q,s}^s = 0$.

Определение 2. Базис нормальной плоскости $(\mathbf{n}_1, \mathbf{n}_2, \dots, \mathbf{n}_k)$, в котором коэффициенты кручения тождественно равны нулю, называется системой нормалей без кручения [7].

Теорема 2. Если все $\alpha_{q,s}^p = 0$, то $R_{iqjp} = \sum_{s=1}^k K_{iqjp,s}$.

Определение 3. Точка на поверхности F^n называется аксиальной, если размерность линейной оболочки векторов $\mathbf{b}_i = (b_{11,i}, b_{12,i}, b_{22,i})$, $i = 1, \dots, k$, равна единице [9].

Составим матрицу из коэффициентов вторых квадратичных форм n -поверхности (1)

$$\begin{pmatrix} b_{11,1} & b_{12,1} & \dots & b_{ii,1} & \dots & b_{ij,1} & \dots & b_{jj,1} & \dots & b_{nn,1} \\ b_{11,2} & b_{12,2} & \dots & b_{ii,2} & \dots & b_{ij,2} & \dots & b_{jj,2} & \dots & b_{nn,2} \\ \vdots & & & & & & & & & \vdots \\ b_{11,k} & b_{12,k} & \dots & b_{ii,k} & \dots & b_{ij,k} & \dots & b_{jj,k} & \dots & b_{nn,k} \end{pmatrix}. \quad (4)$$

Рассмотрим величины

$$h_{ij,pq} = b_{ii,p} b_{jj,q} - 2b_{ij,p} b_{ij,q} + b_{jj,p} b_{ii,q}, \quad i \neq j, \quad i, j = 1, \dots, n, \quad p \neq q, \quad p, q = 1, \dots, k. \quad (5)$$

Определение 4. Зафиксируем индексы i и j . Пусть для выбранных индексов $h_{ij,pq} = 0$, $i \neq j$. Тогда базис $(\mathbf{n}_1, \mathbf{n}_2, \dots, \mathbf{n}_k)$ будем называть каноническим по координатам u_i и u_j .

Определение 5. Базис $(\mathbf{n}_1, \mathbf{n}_2, \dots, \mathbf{n}_k)$ будем называть каноническим по всем координатам (u_1, u_2, \dots, u_n) , если для любой пары координат u_i и u_j он является каноническим при условии $i \neq j$.

Определение 6. Если все $\alpha_{q,s}^p = 0$ в каноническом по всем координатам базисе $(\mathbf{n}_1, \mathbf{n}_2, \dots, \mathbf{n}_k)$, то F^n будем называть n -поверхностью без кручения.

Положим $u_s = a_s = \text{const}$ при $s = 1, 2, \dots, i-1, i+1, \dots, j-1, j+1, \dots, n$.

Тогда вектор-функция $\mathbf{r}_{ij}(u_i, u_j) = \mathbf{r}(a_1, a_2, \dots, a_{i-1}, u_i, a_{i+1}, \dots, a_{j-1}, u_j, a_{j+1}, \dots, a_n)$ представляет собой координатную 2-поверхность n -поверхности (1).

Предположим, что F^n -поверхность (1) удовлетворяет условию: для каждой координатной 2-поверхности $\mathbf{r}_{ij}(u_i, u_j)$ существует $(k+2)$ -мерное евклидово пространство $E^{k+2} \subset E^{n+k}$, в которое вложена $\mathbf{r}_{ij}(u_i, u_j)$, причем нормальная k -плоскость с базисом $(\mathbf{n}_1, \mathbf{n}_2, \dots, \mathbf{n}_k)$ n -поверхности F^n в каждой точке $\mathbf{r}_{ij}(u_i, u_j)$ принадлежит E^{k+2} .

Построим $(n-2)$ -параметрическое семейство поверхностей F_T^2 в $(k+2)$ -мерном евклидовом пространстве:

$$\mathbf{R}(T) = \mathbf{r}_{ij}(u_i, u_j, T_{ij}) = \mathbf{r}(a_1, a_2, \dots, a_{i-1}, u_i, a_{i+1}, \dots, a_{j-1}, u_j, a_{j+1}, \dots, a_n), \quad (6)$$

где $T_{ij} = (a_1, a_2, \dots, a_{i-1}, a_{i+1}, \dots, a_{j-1}, a_{j+1}, \dots, a_n)$ принадлежит множеству

$$T = (u_1, u_2, \dots, u_{i-1}, u_{i+1}, \dots, u_{j-1}, u_{j+1}, \dots, u_n).$$

Легко видеть, что для 2-поверхности (6) базисом нормальной плоскости могут служить векторы $(\mathbf{n}_1, \mathbf{n}_2, \dots, \mathbf{n}_k)$, построенные в точках $(a_1, a_2, \dots, a_{i-1}, u_i, a_{i+1}, \dots, a_{j-1}, u_j, a_{j+1}, \dots, a_n)$ n -поверхности (1).

Определение 7. Поверхности (6) будем называть поверхностями, ассоциированными с n -поверхностью (1).

Замечание 1. Ассоциированные поверхности для F^n можно построить с помощью другой пары внутренних координат исходной n -поверхности. Таким образом, для каждой n -поверхности можно построить $\frac{(n-1) \cdot n}{2}$ классов $(n-2)$ -параметрических семейств ассоциированных поверхностей.

Примерами 4-поверхностей F^4 в E^{4+k} , $k \geq 4$, удовлетворяющих сформулированному выше условию, являются n -поверхности, для которых среди $(4+k)$ -параметрических уравнений для каждой пары внутренних координат найдется хотя бы четыре уравнения, зависящих только от выбранных координат. Для данных F^4 все координатные 2-поверхности, определяемые этими внутренними координатами, лежат в параллельных E^{k+2} вместе с нормальными k -плоскостями. Аналогичные рассуждения можно провести для любого $n > 4$.

Примером n -поверхности F^n без кручения является четырехмерная поверхность в E^8 $\mathbf{r}(u_1, u_2, u_3, u_4) = \mathbf{r}(\cos u_1, \sin u_1, \cos u_2, \sin u_2, \cos u_3, \sin u_3, \cos u_4, \sin u_4)$ в восьмимерном евклидовом пространстве. На этой 4-поверхности можно выбрать нормали так, что вторые квадратичные формы в направлении этих нормалей будут иметь канонический вид в любой точке поверхности. Эта 4-поверхность является топологическим произведением двух плоских двумерных торов (Клиффорда). В этом случае ассоциированные поверхности – двумерные торы Клиффорда в E^4 . При этом существует E^6 , которое содержит ассоциированные поверхности вместе с нормальными 4-плоскостями.

Свойства n -поверхности и поверхностей F_T^2

Теорема 3. Между точками n -поверхности F^n и одного из $(n-2)$ -параметрических семейств поверхностей F_T^2 в $(k+2)$ -мерном евклидовом пространстве можно установить биекцию.

Замечание 2. Утверждение справедливо для любого из $\frac{(n-1) \cdot n}{2}$ классов $(n-2)$ -параметрических семейств поверхностей.

Теорема 4. Для поверхности F^n касательные векторы $\mathbf{r}_i, \mathbf{r}_j$ и векторы нормалей $(\mathbf{n}_1, \mathbf{n}_2, \dots, \mathbf{n}_k)$, вычисленные в точке $(a_1, a_2, \dots, a_{i-1}, a_i, a_{i+1}, \dots, a_{j-1}, a_j, a_{j+1}, \dots, a_n)$, совпадают с касательными векторами $\mathbf{r}_i, \mathbf{r}_j$ и векторами нормалей $(\mathbf{n}_1, \mathbf{n}_2, \dots, \mathbf{n}_k)$ для некоторой поверхности одного из семейств ассоциированных поверхностей, вычисленными в той же точке.

Доказательство теорем 3 и 4 следует из определения ассоциированных поверхностей.

Поскольку целый ряд геометрических характеристик как исходной n -поверхности, так и ассоциированных поверхностей вычисляется с помощью касательных и нормальных векторов, то легко видеть, что значения коэффициентов кручения в соответствующих точках n -поверхности F^n и точках одного из $(n-2)$ -параметрических семейств поверхностей F_T^2 равны.

Можно доказать следующие следствия.

Следствие 1. Точка является аксиальной на n -поверхности (1) тогда и только тогда, когда в каждом классе ассоциированных поверхностей (6) найдется единственная поверхность, на которой соответствующая ей точка будет тоже аксиальной.

Следствие 2. Базис $(\mathbf{n}_1, \mathbf{n}_2, \dots, \mathbf{n}_k)$ n -поверхности F^n является каноническим тогда и только тогда, когда для любой ассоциированной поверхности он будет каноническим.

Рассмотрим одну из ассоциированных поверхностей (6) и величины (5), определенные на этой поверхности.

В [7] доказано, что базис $(\mathbf{n}_1, \mathbf{n}_2, \dots, \mathbf{n}_k)$ поверхности (6) является каноническим тогда и только тогда, когда векторы являются собственными векторами симметричного двухвалентного тензора (5). Итак, с учетом следствия 2 справедлива

Теорема 5. Сужение канонического базиса $(\mathbf{n}_1, \mathbf{n}_2, \dots, \mathbf{n}_k)$ n -поверхности F^n на любую координатную 2-поверхность состоит из собственных векторов симметричного двухвалентного тензора $h_{ij,pq}$, определенного для соответствующей ассоциированной поверхности.

Локальные координаты n -поверхности F^n

Справедливы следующие утверждения.

Следствие 3. При переходе от одной локальной системы координат к другой на n -поверхности F^n тождества $\alpha_{q,s}^p = \left(\frac{\partial \mathbf{n}_s}{\partial u^q}, \mathbf{n}_p\right) = 0$ сохраняются.

Следствие 4. Ранг матрицы (4) при переходе от одной локальной системы координат к другой на n -поверхности F^n сохраняется.

Следствие 5. При переходе от одной локальной системы координат к другой на n -поверхности F^n сохраняется свойство точки быть аксиальной.

Следствие 6. При переходе от одной локальной системы координат к другой на n -поверхности F^n тождества $h_{ij,pq} = 0$ сохраняются.

Доказательство. Вычислим выражение $h_{ij,pq}$ в новой системе координат. Поскольку вторые квадратичные формы (2) образуют двухвалентные тензоры, то при переходе от локальной системы координат (u_1, u_2, \dots, u_n) к $(u'_1, u'_2, \dots, u'_n)$ координаты этого тензора преобразуются по формуле

$$b'_{i'j',s} = \sum_{i,j=1}^n \frac{\partial u_i}{\partial u_{i'}} \frac{\partial u_j}{\partial u_{j'}} b_{ij,s}. \quad (7)$$

С учетом (7) легко показать, что

$$b'_{i'j',p} \cdot b'_{j'j',q} - 2b'_{i'j',p} \cdot b'_{i'j',q} + b'_{i'j',q} \cdot b'_{j'j',p} = 0.$$

Следствие 7. При переходе от одной локальной системы координат к другой на n -поверхности справедлива формула

$$K'_{pqrs} = \sum_{i,k=1}^n \left(\frac{\partial u_i}{\partial u_{p'}} \frac{\partial u_k}{\partial u_{q'}} + \frac{\partial u_k}{\partial u_{p'}} \frac{\partial u_i}{\partial u_{q'}} \right)^2 K_{ikik,s}, \quad i \neq k, p \neq q. \quad (8)$$

Доказательство формулы (8) заключается в вычислении определителя (3) с учетом выражения (7).

Свойства n -поверхностей без кручения в E^{n+k}

Предположим, что n -поверхность (1) удовлетворяет условию: любую регулярную кривую на ней можно считать координатной линией для некоторой локальной системы координат.

Определение 8. Будем называть n -поверхность F^n в E^{n+k} $(n+1)$ -мерной, если существует $(n+1)$ -плоскость Π^{n+1} такая, что $F^n \subset \Pi^{n+1}$.

Легко видеть, что если n -поверхность F^n в E^{n+k} не является $(n+1)$ -мерной, то не существует такой $(s+1)$ -плоскости Π^{s+1} , $2 \leq s \leq n$, что $\Pi^{s+1} \cap F^n$ не является s -поверхностью.

Теорема 6. Если ранг матрицы (4) удовлетворяет условию $1 \leq s \leq \min\left(k, \frac{(n+1)n}{2}\right)$, базис $(\mathbf{n}_1, \mathbf{n}_2, \dots, \mathbf{n}_k)$ является каноническим по координатам u_i и u_j и $K_{ijij,m} \neq 0, m = 1, \dots, s$, то матрицу (4) можно привести к виду

$$\begin{pmatrix} b'_{11,1} & \dots & b'_{1n,1} \\ \dots & \dots & \dots \\ b'_{11,s} & \dots & b'_{1n,s} \\ 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & 0 \end{pmatrix}.$$

Доказательство. Пусть ранг исходной матрицы равен s . Без ограничения общности представим элементы в виде

$$b_{lt,p} = \alpha_k \sum_{k=1}^s b_{lt,k}, \quad \text{где } p > s. \quad (9)$$

Подставим (9) в выражение (5), получим $b_{ii,p}b_{jj,q} - 2b_{ij,p}b_{ij,q} + b_{ii,q}b_{jj,p} = 0, p, q > s$.

Используя условие теоремы и определение канонического базиса, получаем, что $\alpha_k = 0$ при $k = 1, \dots, s$.

Следствие 8. Для канонических координат u_i и u_j в аксиальной точке и при $K_{ijij,1} \neq 0$ справедливо равенство $b_{ij,p} = 0, p > 1$.

Замечание 3. Обратное утверждение является тоже истинным.

Теорема 7. Если n -мерная поверхность $F^n \subset E^{n+k}$ является поверхностью без кручения и выполняются условия $K_{ijj,1} > 0, i \neq j, i, j = 1, \dots, n$, при этом коэффициенты Кристоффеля $\Gamma_{\alpha\beta}^\gamma$ ограничены в области определения параметров и F^n не является $(n+1)$ -мерной, то аксиальные точки на этой n -поверхности изолированы.

Доказательство. Каждая ассоциированная 2-поверхность F_T^2 удовлетворяет условиям теоремы, доказанной в [8], что обеспечивает изолированность на ней аксиальных точек. Для любой аксиальной точки на 2-поверхности F_T^2 существует единственная соответствующая аксиальная точка на n -мерной поверхности F^n . Таким образом, на исходной n -мерной поверхности либо все аксиальные точки изолированы, либо существует неизоллированная аксиальная точка M_0 .

В первом случае теорема доказана. Во втором случае можно показать, что существует по крайней мере одна регулярная дуга, проходящая через точку M_0 и состоящая из аксиальных точек. Считая данную дугу координатной линией, мы получили бы, что на одной из ассоциированных поверхностей существовали бы неизоллированные аксиальные точки. Рассматривая второй вариант, мы получим противоречие.

Заключение

Для исследования n -мерной поверхности, не обладающей кручением, в $(n+k)$ -мерном евклидовом пространстве построены классы ассоциированных с ней 2-поверхностей. Также изучены связи между некоторыми геометрическими характеристиками исходной n -поверхности и ассоциированных с ней поверхностей. При соблюдении определенных дополнительных условий выявлено, что аксиальные точки исследуемых n -поверхностей являются изолированными.

Список источников

1. Qin Y.A., Li S.J. Total torsion of closed lines of curvature // *Bulletin of the Australian Mathematical Society*. 2002. Vol. 65, № 1. P. 73–78. <https://doi.org/10.1017/S0004972700020074>
2. Zubkov A.N., Fomenko V.T. Some properties related to torsion of a two-dimensional surface // *J. of Soviet Mathematics*. 1991. Vol. 53. P. 494–498.
3. Аминов Ю.А. Кручение двумерных поверхностей в евклидовых пространствах // *Укр. геом. сб.* 1975. Вып. 17. С. 3–14.
4. Бодренко И.И. Характеристический признак поверхностей с постоянным гауссовым кручением в E^4 // *Вестн. Волгоградского гос. ун-та. Серия 1: Математика, физика*. 2013. № 2 (19). С. 13–17. EDN: RSVZUD.
5. Фоменко В.Т. Некоторые свойства двумерных поверхностей с нулевым нормальным кручением в E^4 // *Мат. сб.* 1978. Т. 106 (148), № 4 (8). С. 589–603.
6. Фоменко В.Т. Классификация двумерных поверхностей с нулевым нормальным кручением в четырехмерном пространстве постоянной кривизны // *Мат. заметки*. 2004. Т. 75, № 5. С. 744–756.
7. Фирсов А.И. Канонические нормали поверхности большой коразмерности // *Вестн. МГУ. Механика. Математика*. 1976. № 2. С. 37–42.
8. Шармин Д.В., Шармин В.Г. Поверхности без кручения в многомерном евклидовом пространстве // *Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки*. 2019. № 2 (202). С. 20–25. <https://doi.org/10.23683/0321-3005-2019-2-20-25>
9. Схоутен И.А., Стройк Д.Я. Введение в новые методы дифференциальной геометрии. М.: ГИИЛ, 1948. Т. 2. 348 с.

References

1. Qin Y.A., Li S.J. Total torsion of closed lines of curvature. *Bulletin of the Australian Mathematical Society*. 2002;65(1):73-78. <https://doi.org/10.1017/S0004972700020074>
2. Zubkov A.N., Fomenko V.T. Some properties related to torsion of a two-dimensional surface. *J. of Soviet Mathematics*. 1991;53:494-498.
3. Aminov Yu.A. Torsion of two-dimensional surfaces in Euclidean spaces. *Ukrainian Geometric Collection*. 1975;(17):3-14. (In Russ.).
4. Bodrenko I.I. A characteristic feature of the surfaces with constant gaussian torsion in E^4 . *Bulletin of Volgograd State University. Series 1: Mathematics, Physics*. 2013;(2):13-17. (In Russ.). EDN: RSVZUD.
5. Fomenko V.T. Some properties of two-dimensional surfaces with zero normal torsion in E^4 . *Mathematical Collection*. 1978;106(4);589-603. (In Russ.).

6. Fomenko V.T. Classification of two-dimensional surfaces with zero normal torsion in four-dimensional space of constant curvature. *Mathematical Notes*. 2004;75(5):744-756. (In Russ.).
7. Firsov A.I. Canonical surface normals of large codimension. *MSU Bulletin. Mechanics. Mathematics*. 1976;(2):37-42. (In Russ.).
8. Sharmin D.V., Sharmin V.G. Surfaces without torsion in a multidimensional Euclidean space. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science*. 2019;(2):20-25. (In Russ.). <https://doi.org/10.23683/0321-3005-2019-2-20-25>
9. Schouten I.A., Stroik D.Ya. *Introduction to new methods of differential geometry*. Moscow: State Publishing House of Foreign Literature; 1948. Vol. 2. 348 p. (In Russ.).

Информация об авторах

В.Г. Шармин – кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры алгебры и математической логики ТюмГУ.

Д.В. Шармин – кандидат педагогических наук, доцент, доцент кафедры алгебры и математической логики ТюмГУ.

Т.Н. Шармина – кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры программной и системной инженерии ТюмГУ.

Information about the authors

V.G. Sharmin – Candidate of Science (Physics and Mathematics), Associate Professor, Department of Algebra and Mathematical Logic, University of Tyumen.

D.V. Sharmin – Candidate of Science (Pedagogics), Associate Professor, Department of Algebra and Mathematical Logic, University of Tyumen.

T.N. Sharmina – Candidate of Science (Physics and Mathematics), Associate Professor, Department of Software and Systems Engineering, University of Tyumen.

*Статья поступила в редакцию 16.12.2024; одобрена после рецензирования 14.02.2025; принята к публикации 23.04.2025.
The article was submitted 16.12.2024; approved after reviewing 14.02.2025; accepted for publication 23.04.2025.*

НАУКИ О ЗЕМЛЕ SCIENCES OF EARTH

Научная статья

УДК 911.2:556.11

<https://doi.org/10.18522/1026-2237-2025-2-36-55>

ПОДЗЕМНЫЕ ИСТОЧНИКИ ЗАПАДНОЙ ПРИБРЕЖНОЙ ЗОНЫ ГИПЕРСОЛЕННОГО ОЗЕРА БАСКУНЧАК: ГИДРОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ И ЭМИССИЯ ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ

Д.Н. Гарькуша^{1✉}, Ю.А. Федоров², Ю.В. Попов³, Ю.А. Андреев⁴,
И.О. Мякинников⁵, Н.С. Тамбиева⁶, Б.В. Талпа⁷, О.В. Назаренко⁸

^{1, 2, 3, 7, 8} Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, Россия

^{4, 6} Гидрохимический институт, Ростов-на-Дону, Россия

⁵ Донской государственный технический университет, Ростов-на-Дону, Россия

¹gardim1@yandex.ru✉, <https://orcid.org/0000-0001-5026-2103>

²fedorov@sfedu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7411-3030>

³popov@sfedu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0216-5998>

⁴y.andreev@gidrohim.mecom.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6417-9439>

⁵igor.myakinnikoff@yandex.ru

⁶info@gidrohim.com

⁷talpabv@gmail.com

⁸ovnazarenko@sfedu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8515-4241>

Аннотация. В западной прибрежной зоне озера Баскунчак выявлено около 300 рассредоточенных выходов подземных вод, в основном железистых, разгружающихся в виде малodeбитных струй и высачиваний в неглубоких чашеобразных лунках или промоинах. Во многих действующих источниках наблюдаются выходы газовых пузырей. Для вод исследованных подземных источников характерны небольшой дебит (0,32–50 л/ч), высокая минерализация (16,6–284,4 г/л), низкие концентрации растворенного кислорода (0,144–1,75 мг/л), высокое содержание метана (14,9–74,8 мкл/л), растворенных форм железа (41,1–55,4 мг/л) и марганца (2,35–2,90 мг/л), слабокислый – нейтральный pH (5,89–7,07). Удельные потоки метана и диоксида углерода в атмосферу с поверхности воды источников варьируются в пределах 0,13–2,31 мг CH₄/(м²·ч) и 72,4–1683,6 мг CO₂/(м²·ч). При этом поток диоксида углерода в атмосферу с поверхности отложений на некотором удалении от разгружающихся источников был на порядок ниже (16,3–23,7 мг CO₂/(м²·ч)). Несмотря на более высокие удельные потоки с поверхности воды подземных источников, общая эмиссия диоксида углерода в результате разгрузки всех подземных источников в 30 раз меньше его общей эмиссии с прибрежной сухой котловины, в пределах которой разгружаются эти подземные источники.

Ключевые слова: подземные воды, грифоны, донные отложения, минерализация, основные ионы, концентрации растворенного кислорода и метана, диоксид углерода

Для цитирования: Гарькуша Д.Н., Федоров Ю.А., Попов Ю.В., Андреев Ю.А., Мьякинников И.О., Тамбиева Н.С., Талпа Б.В., Назаренко О.В. Подземные источники западной прибрежной зоны гиперсоленого озера Баскунчак: гидрохимические особенности и эмиссия парниковых газов // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2025. № 2. С. 36–55. <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2025-2-36-55>

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

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

Original article

UNDERGROUND SOURCES OF THE WESTERN COASTAL ZONE OF THE HYPER-SALTED LAKE BASKUNCHAK: HYDROCHEMICAL FEATURES AND GREENHOUSE GAS EMISSIONS

D.N. Gar'kusha^{1✉}, Yu.A. Fedorov², Yu.V. Popov³, Yu.A. Andreev⁴,
I.O. Myakinnikov⁵, N.S. Tambieva⁶, B.V. Talpa⁷, O.V. Nazarenko⁸

^{1, 2, 3, 7, 8} Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia

^{4, 6} Hydrochemical Institute, Rostov-on-Don, Russia

⁵ Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russia

¹gardim1@yandex.ru✉, <https://orcid.org/0000-0001-5026-2103>

²fedorov@sfedu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7411-3030>

³popov@sfedu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0216-5998>

⁴y.andreev@gidrohim.mecom.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6417-9439>

⁵igor.myakinnikov@yandex.ru

⁶info@gidrohim.com

⁷talpabv@gmail.com

⁸ovnazarenko@sfedu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8515-4241>

Abstract. In the western coastal zone of Lake Baskunchak, about 300 dispersed groundwater outlets have been identified, unloading in the form of low-flow jets and seeps in shallow bowl-shaped holes or gullies. Gas bubbles are observed in many operating sources. The waters of the studied underground sources are characterized by a low flow rate (0.32–50 l/h), high mineralization (16.6–284.4 g/l), low concentrations of dissolved oxygen (0.144–1.75 mg/l), high concentrations of methane (14.9–74.8 µl/l), dissolved forms of iron (41.1–55.4 mg/l) and manganese (2.35–2.90 mg/l), slightly acidic - neutral pH (5.89–7.07). Specific fluxes of methane and carbon dioxide into the atmosphere from the surface of the water sources vary between 0.13–2.31 mg CH₄/(m²·h) and 72.4–1683.6 mg CO₂/(m²·h). At the same time, the flow of carbon dioxide into the atmosphere from the sediment surface at some distance from the unloading sources was an order of magnitude lower (16.3–23.7 mg CO₂/(m²·h)). Despite the higher specific fluxes from the surface of the water of underground sources, the total emission of carbon dioxide as a result of unloading of all underground sources is 30 times less than its total emission from the coastal dry basin, within which these underground sources are discharged.

Keywords: groundwater, griffins, sediments, mineralization, basic ions, concentrations of dissolved oxygen and methane, carbon dioxide

For citation: Gar'kusha D.N., Fedorov Yu.A., Popov Yu.V., Andreev Yu.A., Myakinnikov I.O., Tambieva N.S., Talpa B.V., Nazarenko O.V. Underground Sources of the Western Coastal Zone of the Hyper-salted Lake Baskunchak: Hydrochemical Features and Greenhouse Gas Emissions. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2025;(2):36-55. (In Russ.). <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2025-2-36-55>

Acknowledgements: the study was carried out under the grant of the Russian Science Foundation No. 23-27-00330, <https://rscf.ru/project/23-27-00330/>, 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

Баскунчак – это крупное, бессточное, самосадочное, гиперсоленое озеро, расположенное на Прикаспийской низменности, примерно в 270 км к северу от Каспийского моря и в 53 км к востоку от р. Волга. Его площадь составляет около 96 км², длина береговой линии – 42 км. Озеро вытянуто с северо-запада на юго-восток на 16,5 км, максимальная ширина – до 9 км. Поверхность воды (рапы) находится на 21 м ниже уровня Каспийского моря. Во влажные периоды года (весна и осень) уровень рапы в оз. Баскунчак достигает 0,7 м [1].

Озеро Баскунчак – одно из крупнейших месторождений поваренной соли в России, которое разрабатывается открытым способом [1]. Оно возникло в западной части Прикаспийской низменности в результате солянокупольной тектоники, как компенсационная впадина (мульда), расположенная между соляными куполами и имеющая мощность озерных отложений четвертичного возраста свыше 270 м [2]. Соляные купола данного района имеют сходное строение и представлены толщей галита (по геофизическим данным их мощность превышает 800 м), перекрытой в кровле гипсовыми отложениями мощностью от 10 до 80 м.

Соленость оз. Баскунчак в среднем составляет более 300 г/л, что связано как с поступлением высокоминерализованных вод ручьев, так и с аридным климатом, обуславливающим высокую испаряемость воды [3–5]. Особенно крупные ручьи формируются на северо-западном и северном побережьях озера (ручьи Улан-Благ и Северная группа ручьев), а также на восточном побережье озера в балке Горький Ерик (ручей Горькая речка) за счет восходящих источников [1, 4–6]. Высокая минерализация ручьев связана с их преимущественным питанием водами подземных источников, которые насыщаются солью при циркуляции в зоне соляных штоков, а также обогащаются сульфатами при восхождении к дневной поверхности по перекрывающим соляные купола сильнозакарстованным гипсоносным отложениям пермского возраста [6, 7].

Изменчивость минерализации, катион-анионного состава и дебита вод наиболее крупных восходящих подземных источников, питающих притоки оз. Баскунчак, рассмотрена в ряде работ [4–10]. Практически не изученными остаются рассредоточенные подземные источники западного побережья озера [11, 12], разгружающиеся в пределах его сухой котловины, которая лишь в период сильных паводков кратковременно покрывается небольшим слоем атмосферных осадков. Авторами в научной литературе не встречено описание данных источников, особенностей их разгрузки, химического состава и дебита. Западная группа подземных источников интересна также и тем, что среди них встречаются дегазирующие грифоны, которые можно рассматривать как континентальные аналоги подводных газопроявлений (покмарки, сипы) (см., например, обсуждение и ссылки в работах [13–16]). В отличие от последних, нередко характеризующихся удаленностью от берега и нахождением под толщей воды различной мощности [17], положительным моментом при изучении функционирования подземных источников оз. Баскунчак является доступность разгружающихся из источников водно-газовых потоков для визуального наблюдения и непосредственного опробования воды и донных отложений.

Целью настоящей работы является изучение гидрохимических особенностей подземных источников западной прибрежной зоны оз. Баскунчак, их дебита и эмиссии из них диоксида углерода (CO₂) и метана (CH₄).

Материалы и методы исследования

Западная группа рассредоточенных подземных источников (западный участок) оз. Баскунчак исследована в июне и октябре 2023 г., в июне 2024 г. (рис. 1). В ходе исследований проведено подробное описание выявленных источников, в некоторых источниках выполнен отбор проб воды, оценен их дебит и морфометрические характеристики, а также величина эмиссии CH₄ и CO₂ в атмосферу. В воде определены минерализация, pH, температура, концентрации CH₄ и растворенного O₂, основных ионов, валовых и растворенных концентраций Fe и Mn.

В июне 2024 г. в одном из подземных источников с помощью ручной трубки отобран керн донных отложений длиной 14 см, в которых установлены концентрации CH₄, влажность, плотность, значения Eh и pH. Также изучен минеральный состав корок, образующихся при изливании вод данного подземного источника.

Отбор, транспортировка, хранение проб и последующее выявление метана проведены согласно аттестованным методикам [18, 19]. Измерение CH_4 выполнено на газовом хроматографе «Хроматэк-Кристалл 5000.2» с дозатором равновесного пара на пламенно-ионизационном детекторе. Определение CH_4 проведено при естественной влажности отложений, его концентрации выражены в мкг/г влажного осадка (вл. о.). Установление влажности донных отложений проводили на анализаторе влажности (влажмер весовой), модель ML-50 (A&D Co. Ltd, Япония), плотности – с помощью весов лабораторных высокого класса точности, модель ВЛТ-150-П (ЗАО «Сартогосм», Россия).



Рис. 1. Местоположение точек наблюдения в западной береговой зоне оз. Баскунчак
/ Fig. 1. Location of observation points in the western coastal zone of Lake Baskunchak

Содержание основных ионов в воде определено в лабораторных условиях по стандартным методикам [20]. Величины Eh и pH измерены с помощью электродов портативного pH-метра-иономера «Экотест-2000» сразу после отбора проб. Также непосредственно на водном объекте портативным кондуктометром «Марк-603/1» и кислородомером «Марк-303М» измерены минерализация вод и концентрация растворенного кислорода соответственно.

Измерение Fe и Mn в нефiltroванных и фильтрованных пробах выполнено на атомно-абсорбционных спектрометрах Shimadzu AA-7000 (Япония) (июнь 2023 г.) [21] и «КВАНТ-2АТ» (июнь 2024 г.) [22], что позволило количественно оценить растворенные формы металлов и их валовое содержание. Фильтрация проб воды проводилась через предварительно очищенные и взвешенные мембранные фильтры «Владипор» типа МФАС-ВА с размером пор 0,45 мкм.

Для измерения дебита и отбора проб в малодебитных подземных источниках применялся оригинальный способ отбора и устройство, представляющее собой емкость-цилиндр с открытым основанием и верхом [23]. На емкости с интервалом 1 см нанесены метки. Устройство аккуратно врезалось в отложения (на глубину до 4–5 см), из которых выходит родник, так, чтобы не нарушить их структуру, а родник оказался в центре основания данной емкости. Дебит источника рас-

считывался по скорости заполнения объема емкости высотой 1 см. Накопленную воду через верхнее отверстие в емкости отбирали с помощью шприца со шлангом во флаконы, предназначенные для последующего определения метана.

Минеральный состав корок изучен с применением методов электронно-зондовых исследований на аналитическом комплексе, включающем растровый электронный микроскоп Tescan Vega II LMU и энергодисперсионный микроанализатор INCA Energy 450/XT. Образцы напылялись углеродом (15 нм) и исследовались при ускоряющем напряжении 20 кВ. Данные работы выполнены на базе Центра исследований минерального сырья и состояния окружающей среды ЮФУ, г. Ростов-на-Дону.

Определение удельных потоков метана и диоксида углерода с поверхности подземных источников выполнено камерным методом с помощью накопительной камеры-ловушки [4, 24–26] с объемом воздушной фазы 6000 см³ и площадью основания 539 см². Ловушка представляет собой поликарбонатную емкость цилиндрической формы с открытым основанием на поплавках из пеноплекса для устойчивости на воде. В её верхней части имеется специальное отверстие диаметром до 1 см, перекрытое резиновой прокладкой толщиной 1,5 мм, через которую шприцем отбирается проба газовой смеси для определения концентраций CH₄. Сразу после установки ловушки (экспозиция 0 мин – «холостая» проба) и спустя определенный интервал времени отбирают шприцем 2,5 мл пробы газовой смеси и вводят в стандартные стеклянные флаконы для парофазного анализа с консервантом [18].

Для измерения концентраций CO₂ внутри накопительной камеры закреплен измерительный модуль, состоящий из микроконтроллера Freenove ESP32, датчика Sensirion SCD30, измеряющего концентрацию CO₂, датчика давления BME280 и модуля для подключения карт памяти формата microSD. Датчики Sensirion SCD30 и BME280 подключены к микроконтроллеру по шине I2C, модуль для подключения карт памяти – по шине SPI. В каждом из датчиков (Sensirion SCD30 и BME280) используются оригинальные встроенные сенсоры для измерения температуры и влажности, что позволяет осуществлять независимый контроль данных показателей. Обработка поступающих с датчиков сигналов, агрегация полученных данных, а также сохранение и вывод результатов осуществляются с помощью разработанного авторами программного обеспечения, записанного на микроконтроллер ESP32.

Экспозиция ловушки в накопительном режиме составляла от 3 до 82 мин. Удельные потоки CH₄ и CO₂ рассчитаны по скорости изменения их концентрации в воздушной фазе камеры с учетом «холостых» проб в соответствии с [27, 28].

Результаты исследования и их обсуждение

Западная группа подземных источников протягивается на 2,7 км вдоль береговой линии оз. Баскунчак на расстоянии до 100–150 м от берега в пределах его сухой котловины (рис. 1). Площадь участка, на котором расположены данные источники, составляет около 0,25 км². В этой группе насчитывается около 300 выходов подземных вод, в основном железистых, разгружающихся в виде сосредоточенных малодобитных струй и высачиваний в песчано-алевритоглинистых отложениях прибрежной зоны озера. Многие источники в периоды наблюдений были пересохшими, со следами бывших потоков воды, как правило, трассирующихся образовавшимися при испарении агрегатами кристаллов солей и минеральными корками.

Большинство активных выходов отчетливо фиксируется визуально: либо по наличию небольшой лунки с вытекающей из нее струйкой воды, либо по шлейфам охристо-красного и красно-бурого цвета в местах протекания высачиваемых вод по поверхности отложений, либо по радиальной вспученности отложений с охристо-красной, буро-красной, буро-коричневой и желтой поверхностью вокруг выводящего отверстия. Такие цвета обусловлены коагуляцией и осаждением из растекающихся и испаряющихся подземных вод окисленного железа, в том числе с образованием минеральных корок. При этом нередко на поверхности воды источников наблюдается хорошо выраженная «радужная» коллоидная пленка, вероятно, представленная гидроксидами железа Fe(OH)₃, которые образуются при окислении кислородом воздуха Fe (II) подземных вод. В этих процессах определенную роль могут играть металлоосаждающие бактерии, располагающиеся на поверхностях коллоидной пленки [29–31].

Вспученность отложений (превышение над прилегающими участками обычно до 5 см) и их рыхлое комковатое строение связаны с изменением объема при периодическом увлажнении и высыхании. В центре каждого участка диаметром от 0,3–0,5 до 5–10 м, как правило, расположено округлое углубление (лунка) с одним или несколькими небольшими (до 3–5 мм) выводными отверстиями, из которых слегка фонтанирует или высачивается вода. Диаметр лунки варьирует от 0,1 до 1,2 м, глубина – от 1 до 35 см, что может быть связано с дебитом источника: чем он больше, тем больше площадь и глубина лунки. Вытекающие (высачивающиеся) из источника воды, как правило, полностью испаряются и/или впитываются грунтом в пределах 0,5–7 м от выводного отверстия или зоны высачивания. Во многих действующих источниках наблюдается небольшая дегазация в виде газовых пузырей, заметно активизирующаяся при хождении в непосредственной близости от выводного отверстия. В целом характеристики источников западной группы схожи.

На юге описываемого западного участка наблюдается несколько обособленное от остальных рассредоточенных источников дебитное поле размером 200×40 м, включающее около 40 выходов подземных источников (см. рис. 1), для 50 % которых характерна радиальная вспученность отложений диаметром от 0,5 до 6 м. Здесь расположен один из наиболее дебитных источников (точка 1) всей западной группы (табл. 1, 2). Этот относительно крупный подземный источник дебитом до 50 л/ч (октябрь 2023 г.), вытекающий из вытянутой в направлении стока овальной воронки (лунки) размером 1,2×0,8 м и глубиной до 0,15 м, хорошо просматривается на космоснимках как участок буро-красного цвета площадью, составляющей в отдельные годы более 400 м² (рис. 2а). При этом в октябре 2023 г. длина поля растекания воды была около 50 м, ширина – до 20 м (рис. 2б).

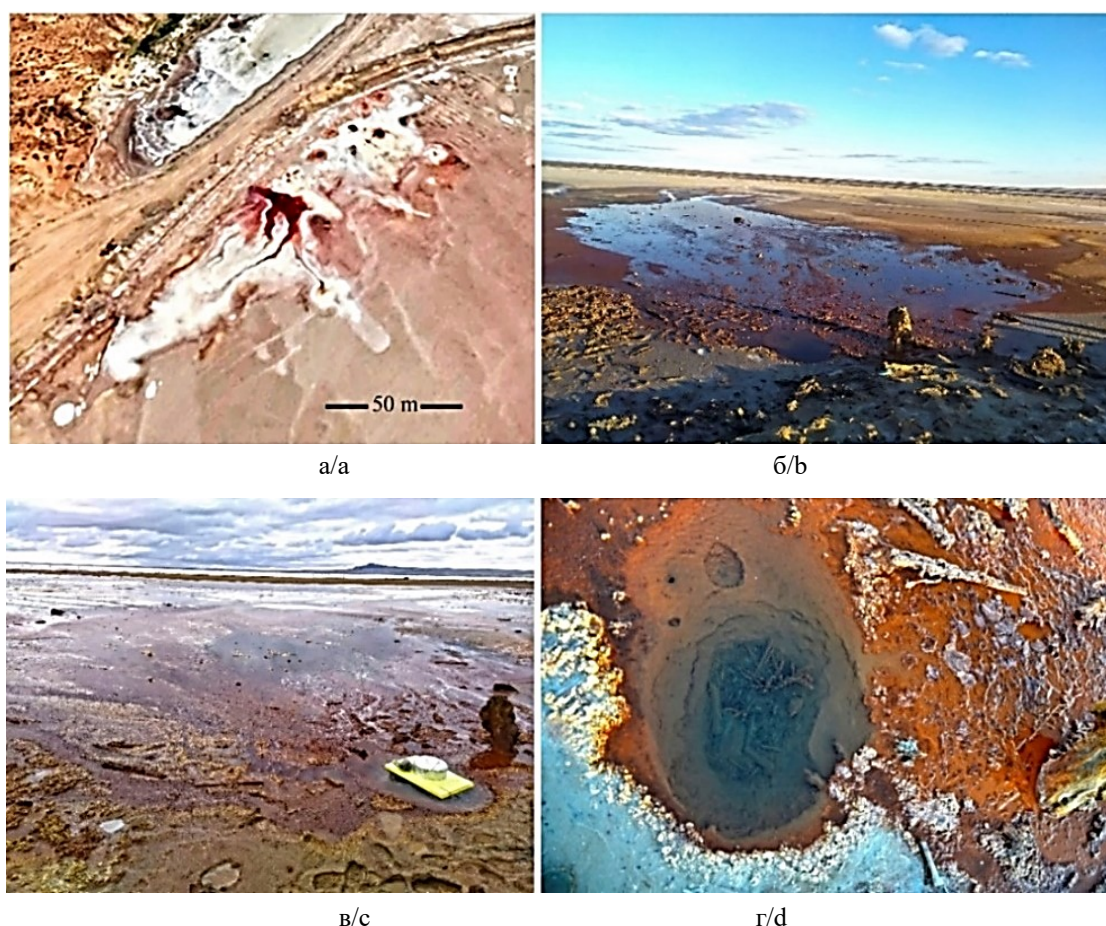


Рис. 2. Подземный источник в точке 1 на юге западного участка озера Баскунчак: а – поле растекания вод источника на космоснимке Google Earth (июнь 2019 г.); б, в – поле растекания воды источника в октябре 2023 г. и июне 2024 г. соответственно; г – на дне воронки источника части степной растительности / Fig. 2. An underground source at point 1 in the south of the western section of Lake Baskunchak: a - the source water spreading field on the Google Earth satellite image (June 2019); b, c - the source water spreading field respectively in October 2023 and June 2024; d - at the bottom of the source funnel of part of the steppe vegetation

Таблица 1 / Table 1

Результаты определения физико-химических показателей воды подземных источников западной прибрежной зоны оз. Баскунчак и удельных потоков CH₄ и CO₂ в атмосферу / The results of determining the physico-chemical parameters of groundwater sources in the western coastal zone of Lake Baskunchak and specific fluxes of CH₄ and CO₂ into the atmosphere

Объект наблюдения	№ точки	Координаты, с.ш. / в.д.	Дата отбора проб	Дебит, л/ч	Температура воды, °С	Минерализация, г/л *	рН	O ₂ , мг/л (% насыщения)	Концентрация CH ₄ в воде, мкг/л	Потоки CH ₄ , мг CH ₄ /(м ² ·ч)	Потоки CO ₂ , мг CO ₂ /(м ² ·ч)
Источник в лунке размером 1,2×0,8 м, глубина 0,15 м	1	48°12'03.35"/ 46°49'36.15"	Октябрь 2023 г.	50,0	13,3	91 (99,6)	6,77	1,75	65,8–74,8 (2)	0,17–0,24 (2)	–
			Июнь 2024 г.	–	–	91,0 (102,7)	6,61	0,296	48,86	2,08–2,31 (2)	72,4–1683,6 219,8 (76)
Высачивающийся источник	2	48°12'03.65"/ 46°49'36.63"	Июнь 2024 г.	0,32	19,4	21,6	6,61	0,350 (6,2)	42,48	–	–
Источник в лунке размером 0,32×0,21 м, глубина 0,11 м	3	48°12'04.05"/ 46°49'36.99"	Июнь 2024 г.	–	19,2	16,64	6,68	3,57 (61,1)	–	–	–
Источник в лунке размером 0,4×0,24 м, глубина 0,04 м	4	48°12'04.43"/ 46°49'37.02"	Июнь 2024 г.	0,63	22,2	>99,9	6,64	0,379	14,9	–	–
Источник в лунке размером 0,35×0,07 м, глубина 0,10 м	5	48°12'04.57"/ 46°49'37.31"	Июнь 2024 г.	–	17,1	>99,9	5,89	0,204	–	–	–
Источник в лунке размером 0,57×0,41 м, глубина 0,18 м	6	48°12'04.65"/ 46°49'37.79"	Июнь 2024 г.	–	17,7	>99,9	6,61	0,815	–	–	–
Источник в лунке размером 0,62×0,43 м, глубина 0,34 м	7	48°12'05.19"/ 46°49'37.52"	Июнь 2024 г.	–	17,0	>99,9	6,67	0,516	25,18	–	–
Водоем в устье ручья Динамитка	8-1	48°12'11.40"/ 46°49'38.34"	Май 2019 г.	–	–	–	–	–	1,85–1,87 (2)	–	–
	8-2	48°12'05.01"/ 46°49'35.46"	Июнь 2024 г.	–	–	–	–	–	4,98	–	–

Окончание табл. 1

Объект наблюдения	№ точки	Координаты, с.ш. / в.д.	Дата отбора проб	Дебит, л/ч	Температура воды, °С	Минерализация, г/л *	рН	О ₂ , мг/л (% насыщения)	Концентрация СН ₄ в воде, мкл/л	Потоки СН ₄ , мг СН ₄ /(м ² ·ч)	Потоки СО ₂ , мг СО ₂ /(м ² ·ч)
Источник в небольшом углублении	9	48°12'25.46"/ 46°50'04.12"	Июнь 2024 г.	1,30	24,2	>99,9	6,03	0,441	–	0,13	199,9–634,9 380,0 (16)
Источник в небольшом углублении	10	48°12'31.00"/ 46°50'8.43"	Июнь 2024 г.	–	24,3	>99,9	6,06	0,389	–	0,79	273,1–581,8 423,7 (3)
Источник в небольшом углублении	11	48°12'33.36"/ 46°50'10.58"	Июнь 2024 г.	3,60	25,2	48,55	6,04	0,361 (8,3)	–	–	16,3–23,7 ** 19,2 (3)
Источник в небольшом углублении	12	48°12'34.81"/ 46°50'11.58"	Июнь 2024 г.	2,88	25,9	>99,9	6,17	0,529	–	–	210,3–502,3 326,9 (8)
Источник в лунке размером 0,52×0,28 м, глубина 0,07 м	13	48°12'36.87"/ 46°50'90.69"	Июнь 2024 г.	–	20,5	>99,9	6,35	1,30	–	–	–
Высачивающийся источник	14	48°12'37.60"/ 46°50'11.94"	Июнь 2024 г.	1,15	29,3	35,22	6,28	0,214 (4,9)	–	–	–
Источник в небольшом углублении	15	48°12'38.80"/ 46°50'12.04"	Июнь 2024 г.	0,72	29,4	>99,9	6,33	0,144	–	–	–
Источник в лунке размером 0,33×0,25 м, глубина 0,08 м	16	48°12'40.94"/ 46°50'13.82"	Июнь 2024 г.	–	21,8	>99,9	7,07	0,233	–	–	–
Лужа 1 у тростника	17	48°12'44.71"/ 46°50'15.00"	Июнь 2024 г.	–	36,1	65,01	7,72	2,08	–	0,01	34,8–115,3 78,1 (16)
Лужа 2 у тростника	18	48°12'46.74"/ 46°50'16.56"	Июнь 2024 г.	–	40,0	66,06	7,72	2,21	–	–	98,3–115,7 104,7 (3)
Источник в небольшом углублении	19	48°12'54.10"/ 46°50'24.35"	Июнь 2023 г. Июнь 2024 г.	4,24 3,92	22,1 20,3	(284,4) >99,9	6,77 6,63	– 0,305	28,5 28,2	– –	– (2)

Примечание. * – приведена минерализация воды, измеренная кондуктометром «Марк-603/1» (верхний предел измерения прибора составляет 99,9 г/л); в скобках – минерализация, рассчитанная по сумме основных ионов, определенных в лабораторных условиях. ** – потоки СО₂ с отложений в 20 м от источника в г. 11; *** – участок старинной соледобычи.

Таблица 2 / Table 2

Результаты исследования химического состава вод подземных источников западной прибрежной зоны оз. Баскунчак / The results of the study of the chemical composition of groundwater sources in the western coastal zone of Lake Baskunchak

Точка наблюдения	Дата отбора пробы	Минерализация, г/л	Жёсткость, мг-экв/л	HCO ₃ ⁻ , г/л	Cl ⁻ , г/л	SO ₄ ²⁻ , г/л	Ca ²⁺ , г/л	Mg ²⁺ , г/л	Na ⁺ +K ⁺ , г/л	Fe _{общ. раств.} / вал., мг/л	Mn _{общ. раств.} / вал., мг/л
1, источник в лунке	Октябрь 2023 г.	99,6	307,1	0,11	59,1	2,9	2,6	2,2	32,7	–	–
	Июнь 2024 г.	102,7	327,0	0,12	61,0	2,9	2,7	2,4	33,7	41,1/44,4	2,90/3,30
19, источник в небольшом углублении	Июнь 2023 г.	284,4	431,7	0,24	172,2	2,6	2,3	3,8	103,1	55,4/61,2	2,35/2,66

Непосредственно в местах протекания разгружающихся вод на поверхности отложений видны охристо-красные шлейфы, вдоль которых образуются минеральные корки толщиной до 2–3 см. Изучение микростроения этих корок показало (рис. 3а – е), что они сложены преимущественно микрокристаллическим кальцитом, содержащим терригенные (полевошпатовые и кварцевые) зерна, глинистые агрегаты, а также нераскристаллизованные массы, корочки и налеты, состоящие из гидратов оксидов и хлоридов железа. Поверхность минеральной железо-карбонатной корки покрыта галитом, включающим карбонатно-глинистые микроагрегаты (рис. 3а, б).

Минерализация воды в этом крупном источнике в октябре 2023 г., измеренная кондуктометром «Марк-603/1», составила 91 г/л, в то время как рассчитанная по сумме основных ионов, определенных в лабораторных условиях по методике [20], достигла 99,6 г/л, что свидетельствует о хорошей сопоставимости данных, полученных разными методами. В соответствии с классификацией О.А. Алекина [32] по химическому составу воды источника относится к классу хлоридных, группе натриевых, третьему типу. Для данного случая формула Курлова имеет вид

$$M_{99,6} = \frac{(Cl)_{48,20}(SO_4)_{1,75}(HCO_3)_{0,05}}{(Na+K)_{41,12}(Mg)_{5,11}(Ca)_{3,77}} pH(6,77)T(13,3).$$

В октябре 2023 г. концентрация растворенного в воде метана в данном источнике составляла 65,8–74,8 мкл/л, что достаточно много [33]; концентрация O₂ – 1,75 мг/л (около 35 % насыщения по O₂); температура – 13,3°C, pH – 6,77. Удельный поток CH₄ в атмосферу с поверхности воды в воронке источника варьировался в пределах 0,17–0,24 мг CH₄/(м²·ч).

Незадолго до начала наблюдений, в июне 2024 г., выпало достаточно большое количество атмосферных осадков, поэтому границы поля растекания воды из источника в этот период были размыты, сливаясь с накапливающимися в углублениях прибрежной зоны осадками (рис. 2в). Концентрация растворенного в воде метана в воронке данного источника незначительно снизилась по сравнению с осенним периодом 2023 г. – до 48,9 мкл/л, концентрация O₂ стала значительно ниже – 0,30 мг/л (6 % насыщения по O₂); температура – 17,3°C, pH – 6,61. В источнике наблюдались высокие концентрации растворенных железа (41,1 мг/л) и марганца (2,9 мг/л), что соответствует 92,6 и 87,8 % от их валовых содержаний (табл. 2). Минерализация воды, измеренная в июне 2024 г. кондуктометром «Марк-603/1», так же как и в октябре 2023 г., составила 91 г/л, а рассчитанная по сумме ионов – 102,7 г/л, при этом формула Курлова имела следующий вид:

$$M_{102,7} = \frac{(Cl)_{48,23}(SO_4)_{1,71}(HCO_3)_{0,06}}{(Na)_{34,33}(Mg)_{5,86}(K)_{5,80}(Ca)_{4,01}} pH(6,61)T(17,3).$$

На дне воронки данного источника (т. 1) скапливаются приносимые ветром части сухой степной (полупустынной) растительности, так называемое перекасти-поле (рис. 2г), что характерно для всех понижений рельефа в пределах водосбора оз. Баскунчак [11]. Содержание метана в керне донных отложений длиной 14 см, отобранном в воронке источника, было низким и изменялось в небольшом диапазоне – от 0,013 до 0,020 мкг/г вл. о., с максимальным значением в нижнем слое. Донные отложения в поверхностном слое (0–5 см) представлены коричнево-ржавым песчано-алевритовым илом с сильным запахом окисленного Fe (ржавчины); в нижней части керна отложения становятся более тонкодисперсными, пластичными, их цвет меняется на темно-серый; запах сероводорода отсутствует.

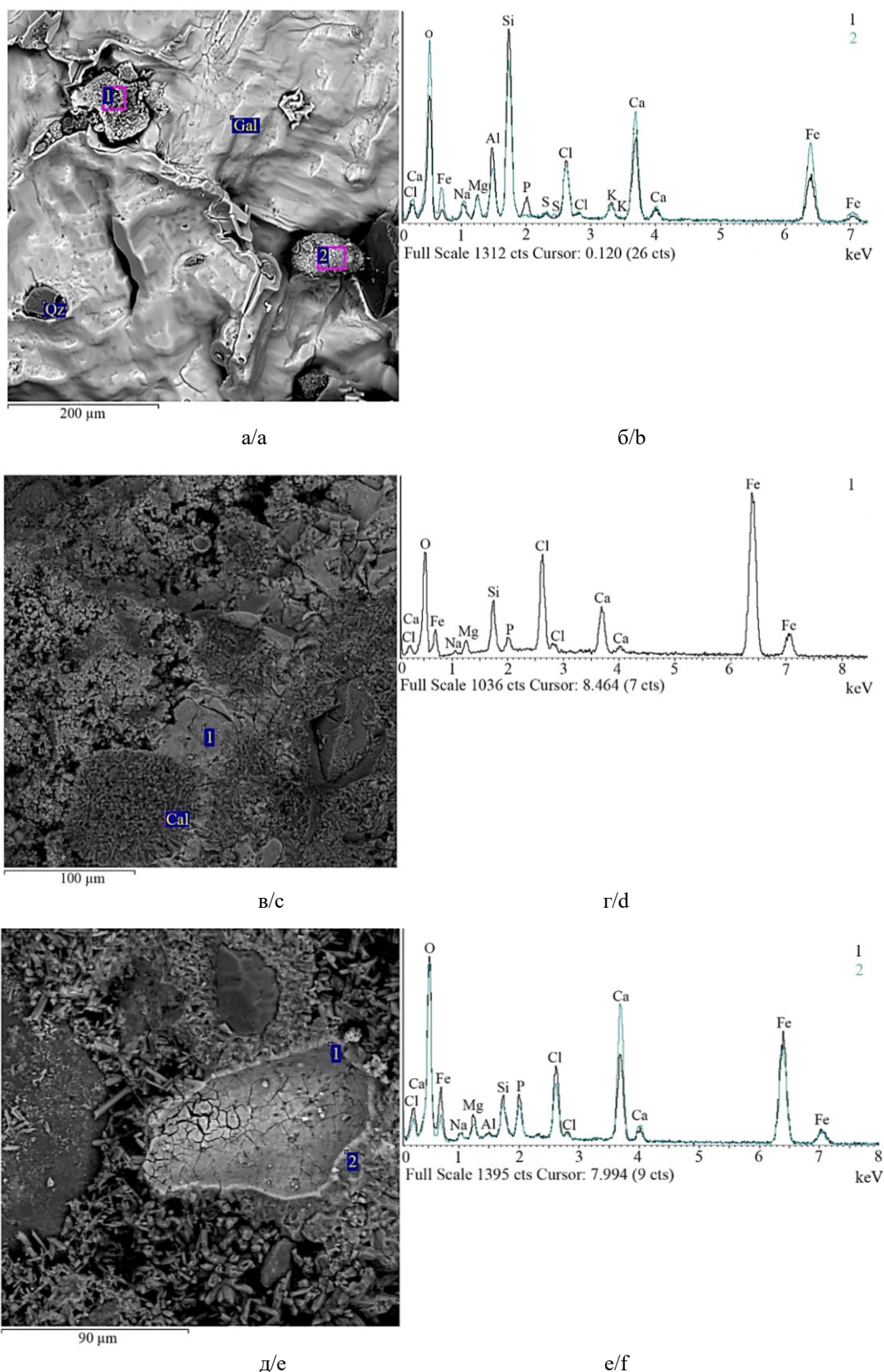


Рис. 3. Изображения железо-карбонатной корки в обратнорассеянных электронах и спектры EDX, показывающие ее состав в т. 1, 2: а – поверхность корки; в, д – скол корки; б, г, е – спектры EDX; Gal, Cal и Qz – обозначения минералов галита, кальцита и кварца / Fig. 3. Images of the iron carbonate crust in backscattered electrons and EDX spectra showing its composition at the points 1, 2: a - the surface of the crust; в, д - the chip of the crust; б, г, е - the EDX spectra. Gal, Cal и Qz - the designations of the minerals halite, calcite and quartz

Анализ изменения концентраций CO_2 в воздушном пространстве накопительной камеры-ловушки, установленной на поверхность воды данного источника в июне 2024 г., показывает, что в течение 82-минутной экспозиции его концентрация увеличилась с 373 до 1768 ppm, т.е. в 4,7 раза (рис. 4а). Удельный поток CO_2 , рассчитанный по скорости изменения концентрации CO_2 в воздушном пространстве накопительной камеры, характеризуется значительным варьированием – от 72,4 до 1683,6 мг $\text{CO}_2/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ (в среднем – 219,8 мг $\text{CO}_2/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$). При этом 85 % значений не превышают 300 мг $\text{CO}_2/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$, выше 600 мг $\text{CO}_2/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ – около 5 %. Особенно высокие значения потока CO_2 (799,4–1683,6 мг $\text{CO}_2/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$) зафиксированы после интенсивной пузырьковой дегазации, визуально наблюдаемой на 20–22-й мин экспозиции. Вероятно, с пузырьковой дегазацией связан и на два порядка больше удельный поток CH_4 с данного источника в атмосферу в июне 2024 г. (2,08–2,31 мг $\text{CH}_4/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$) по сравнению с потоком CH_4 в октябре 2023 г.

В целом минерализация и соотношение основных компонентов химического состава вод источника в точке 1, концентрации метана и кислорода, кислотно-щелочные условия в июне 2024 г. мало отличались от наблюдаемых в осенний период 2023 г. Это может свидетельствовать о незначительном влиянии окружающей среды и восходящем (напорном) характере движения подземной воды к зоне разгрузки, что косвенно подтверждается и выделением пузырьков газа.

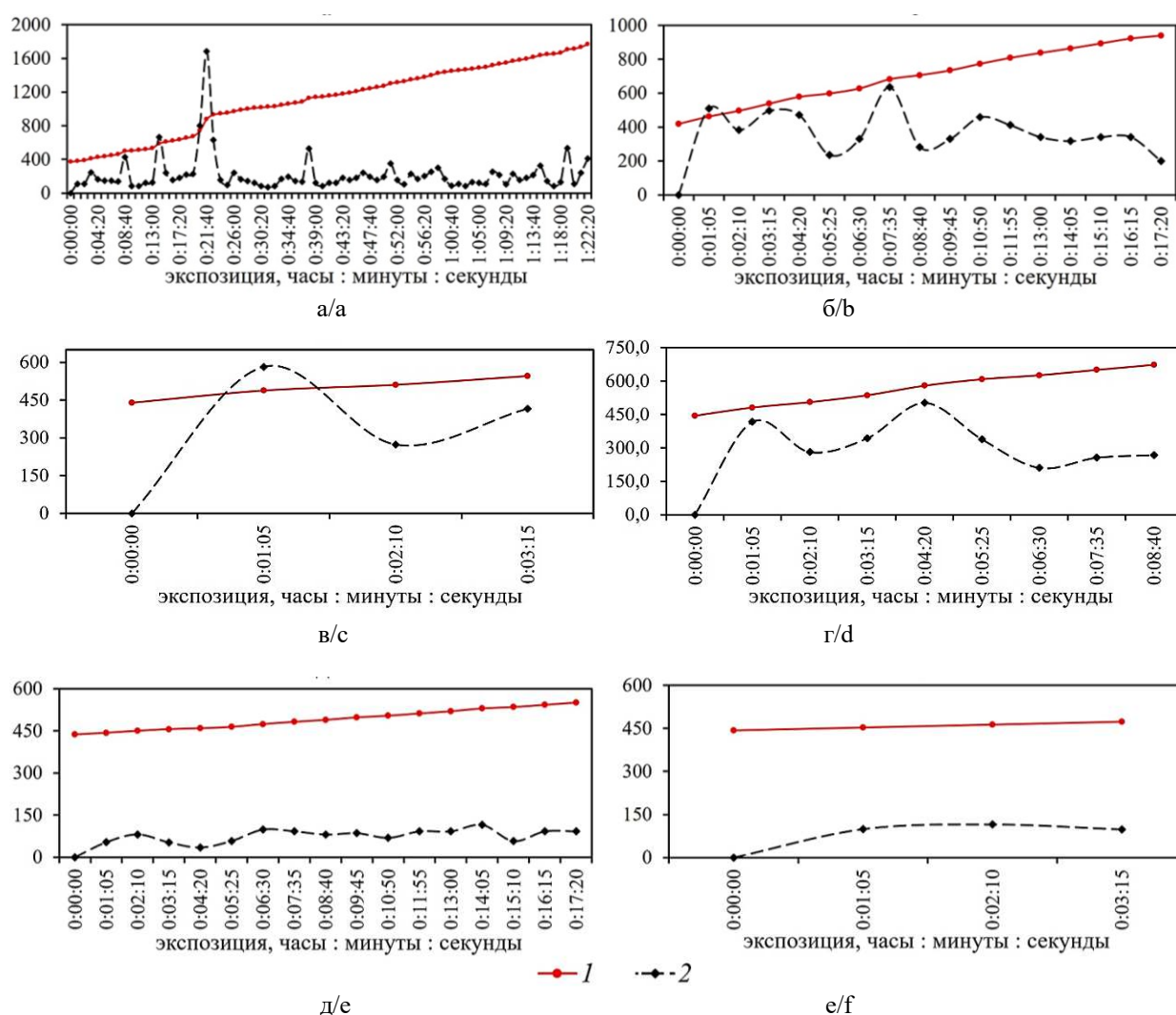


Рис. 4. Ход концентраций CO_2 (ppm) в накопительной камере-ловушке (1) и величины его удельного потока (мг $\text{CO}_2/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$) в атмосферу (2), июнь 2024 г. в период экспозиции: а – источник в т. 1; б – источник в т. 9; в – источник в т. 10; г – источник в т. 12; д – т. 17, лужа 1 у тростника; е – т. 18, лужа 2 у тростника / Fig. 4. The course of CO_2 concentrations (ppm) in the storage chamber trap (1) and the magnitude of its specific flux (mg $\text{CO}_2/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$) into the atmosphere (2) during the exposure period in June 2024: a - source at point 1; b - source at point 9; c - source at point 10; d - source at point 12; e - point 17, puddle 1 at the reed; f - point 18, puddle 2 at the reed

Помимо крупного источника (т. 1), в дебитном поле, расположенном на юге западного участка оз. Баскунчак, в июне 2024 г. были исследованы еще шесть малodeбитных выходов подземных вод (см. табл. 1), разгружающихся в пределах 70 м от источника в точке 1 (рис. 5).

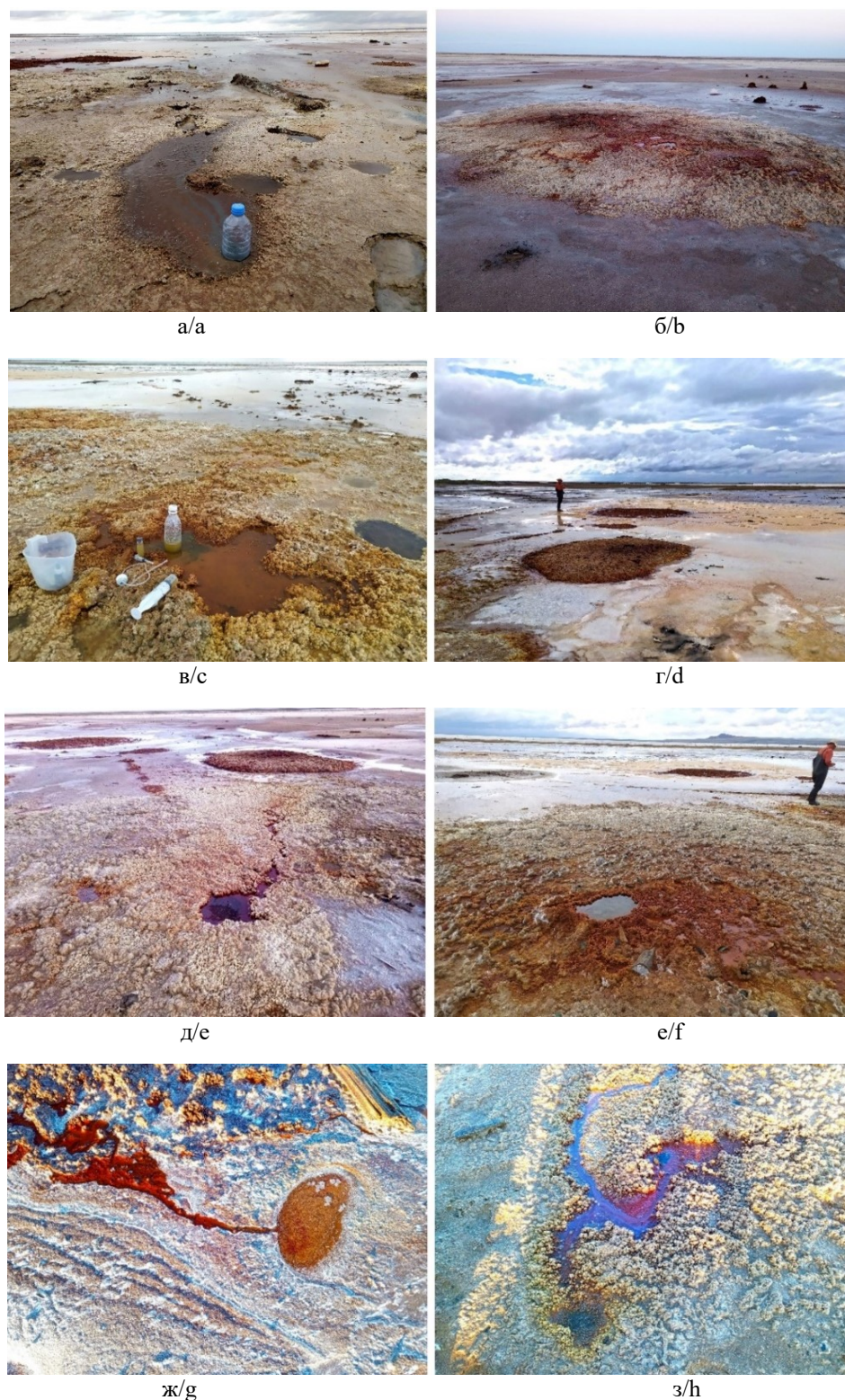


Рис. 5. Подземные источники на юге западного участка оз. Баскунчак: а – источник в т. 2; б – источник в т. 3; в – источник в т. 4; г – источник в т. 5; д – источник в т. 6; е – источник в т. 7; ж, з – другие источники / Fig. 5. Underground springs in the south of the western section of Lake Baskunchak: a - source at point 2; b - source at point 3; c - source at point 4; d - source at point 5; e - source at point 6; f - source at point 7; g, h - other sources

Большинство источников выходит в небольших (до 0,62 м) обычно чашеобразных воронках (лунках), вокруг которых наблюдается поле изливания вод, представленное 2–3-сантиметровой коркой выпаренной соли, сложенной желтовато-коричневыми почковидными агрегатами. Отдельные источники (рис. 5а, ж, з), не имея четко выработанных воронок, высачиваются из отложений, образуя неглубокие промоины.

Для вод большинства этих источников, как и для источника в т. 1, характерны низкие концентрации растворенного кислорода – от 0,204 до 0,815 мг/л (от 5 до 20 % насыщения). Исключением является вода в лунке источника в т. 3, в которой концентрация кислорода достигала 3,57 мг/л (61,1 % насыщения), что наряду с относительно низкой ее минерализацией (16,64 г/л) указывает на разбавление атмосферными осадками. В воде четырех из шести дополнительно исследованных источников минерализация, измеренная кондуктометром «Марк-603/1», была выше 99,9 г/л (верхний предел измерения прибора). Дебит в подземных источниках № 2 и 4 составил 0,32 и 0,63 л/ч, а концентрации метана – 42,5 и 14,9 мкл/л при минерализации 21,6 и 99,6 г/л соответственно. В исследованных источниках юга западного участка рН воды варьировался в пределах 5,89–6,68 (в среднем – 6,56).

В водоеме (т. 8, устье ручья Динамитка), расположенном гипсометрически выше, за дорогой, идущей вдоль берега оз. Баскунчак, концентрация метана в воде была существенно ниже, чем в источниках, и составляла в мае 2019 г. 1,85–1,87 мкл/л (по [4]), в июне 2024 г. – 5,0 мкл/л.

В 0,4 км севернее вышеописанного дебитного поля на участке протяженностью до 2,1 км выявлено еще около 260 аналогичных выходов подземных источников в виде сосредоточенных малодебитных струй и высачиваний в чашеобразных лунках или небольших углублениях в прибрежной зоне озера (см. табл. 1, рис. 6, 7).

Для исследованных девяти источников, равномерно распределенных на данном участке вдоль западного побережья, характерны небольшой дебит – от 0,72 до 4,24 л/ч (в среднем – 2,5 л/ч), высокая минерализация вод – от 35,2 до 284,4 г/л (в большинстве источников >99,9 г/л), низкие концентрации растворенного кислорода в воде – от 0,144 до 1,30 мг/л (в среднем – 0,435 мг/л) и слабощелочной – нейтральной рН воды – 6,03–7,07 (в среднем – 6,37). Удельные потоки CH_4 и CO_2 в атмосферу с поверхности воды исследованных источников составили, соответственно, 0,13–0,79 мг $\text{CH}_4/(\text{м}^2\cdot\text{ч})$ (в среднем – 0,46 мг $\text{CH}_4/(\text{м}^2\cdot\text{ч})$) и 199,9–634,9 мг $\text{CO}_2/(\text{м}^2\cdot\text{ч})$ (в среднем – 364,2 мг $\text{CO}_2/(\text{м}^2\cdot\text{ч})$) (см. табл. 1 и рис. 4б – г). При этом удельный поток CO_2 в атмосферу с поверхности отложений на некотором удалении от разгружающихся источников (рис. 7а и б) был на порядок меньше потока CO_2 с поверхности воды источников и составлял 16,3–23,7 мг $\text{CO}_2/(\text{м}^2\cdot\text{ч})$ (в среднем – 19,2 мг $\text{CO}_2/(\text{м}^2\cdot\text{ч})$). В целом наличие потока CO_2 в атмосферу из обнажившихся отложений соленых озер согласуется с работами [34, 35], в которых показано, что его эмиссия из пересыхающих отложений внутренних водоемов представляет собой значительный и, вероятно, увеличивающийся компонент углеродного цикла внутренних вод.

Измеренная на севере западного участка в июне 2023 г. минерализация воды в одном из таких источников (т. 19, рис. 6з) составила 284,4 г/л. Этот источник разгружается в 60 м от береговой линии в небольшом углублении в песчаных отложениях в виде пяти слегка фонтанирующих струек воды с периодически выходящими пузырьками газа. На поверхности растекающейся воды наблюдается буро-красная радужная плёнка, образование которой, вероятно, связано с окислением кислородом воздуха Fe (II) подземных вод. Концентрация растворенных Fe и Mn так же, как и в источнике в т. 1 на юге западного участка, достигала высоких значений – 55,4 и 2,35 мг/г соответственно, что составляет 90,5 и 88,3 % от их валовых содержаний. Концентрации CH_4 как в 2023 г. (28,5 мкл/л), так и в 2024 г. (28,2 мкл/л) были в 1,7–2,7 раза ниже, чем в воде источника в т. 1. Дебит источника низкий (4,24 и 3,92 л/ч соответственно в июне 2023 и 2024 гг.), на расстоянии до 4 м вытекающие из него воды полностью впитываются грунтом. Глубина проникновения мерного щупа в отложения, из которых вытекает источник, составляла 1 м. При извлечении щупа происходило значительное выделение пузырьков газа, при поднесении горящей спички к которым воспламенения не было. По химическому составу воды источника относятся к классу хлоридных, группе натриевых, третьему типу. Формула Курлова имеет следующий вид:

$$M_{284,4} = \frac{(Cl)_{49,41}(SO_4)_{0,55}(HCO_3)_{0,04}}{(Na+K)_{45,61}(Mg)_{3,20}(Ca)_{1,19}} pH(6,77)T(22,1).$$



Рис. 6. Подземные источники на севере западного участка оз. Баскунчак: а – источник в т. 9; б – источник в т. 11; в – источник в т. 13; г – источник в т. 14; д – источник в т. 12; е – источник в т. 15; ж – источник в т. 16; з – источник в т. 19; и, к – другие источники / Fig. 6. Underground springs in the north of the western section of Lake Baskunchak: a - source at point 9; b - source at point 11; c - source at point 13; d - source at point 14; e - source at point 12; f - source at point 15; g - source at point 16; h - source at point 19; i, j - other sources

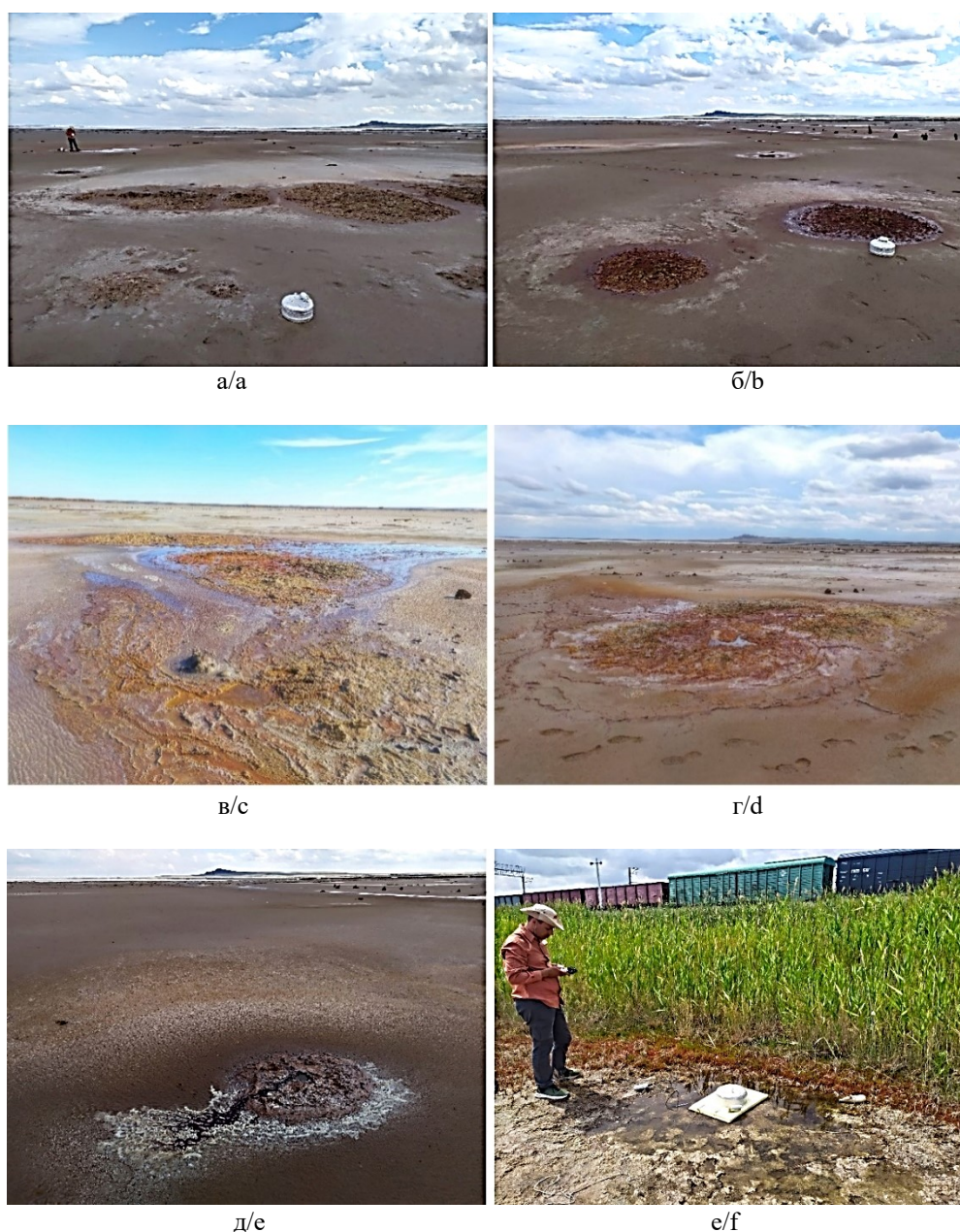


Рис. 7. Точки наблюдения на севере западного участка оз. Баскунчак: а, б – накопительная камера, установленная на поверхность отложений на некотором удалении от источников; в–д – другие источники; е – т. 18, лужа 2 у тростника / Fig. 7. Observation points in the north of the western section of Lake Baskunchak: a, b - a storage chamber installed on the surface of sediments at some distance from the sources; c-e - other sources; f - point 18, puddle 2 near the reed

Ряд подземных источников западной группы разгружаются в зарослях тростника, образуя вблизи них небольшие лужи шириной до 2–3 м и глубиной до 7 см (рис. 7ж). Лужи имеют сток в виде тонких ручейков, испаряющихся и поглощающихся грунтом в пределах 50–60 м от истока. Воды, вытекающие из зарослей тростника, не образуют шлейфов охристо-красного и красно-бурого цвета в местах их протекания по поверхности отложений, что свидетельствует о незначительном содержании в них железа. Заросли тростника имеют ширину до 10 м и протягиваются на 300 м вблизи береговой линии вдоль склона железнодорожного полотна рядом с юго-восточной оконечностью пос. Нижний Баскунчак. Минерализация воды в таких лужах, по данным двух измерений, составила 65,01–66,06 г/л, концентрация кислорода – 2,08–2,21 мг/л (около 52 % насыщения), рН – 7,72. Удельный поток CH_4 в атмосферу с лужи 1 (т. 17), измеренный в июне 2024 г., был одним из самых низких среди исследуемых участков и достиг $0,01 \text{ мг } \text{CH}_4/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$.

Удельный поток CO_2 с поверхности луж варьировался в пределах 34,8–115,3 мг $\text{CO}_2/(\text{м}^2\cdot\text{ч})$ (в среднем – 82,3 мг $\text{CO}_2/(\text{м}^2\cdot\text{ч})$) (рис. 4д, е). При этом 89 % всех значений удельного потока CO_2 ниже 100 мг $\text{CO}_2/(\text{м}^2\cdot\text{ч})$.

Согласно обобщенным данным для всей западной прибрежной зоны оз. Баскунчак, удельные потоки CH_4 и CO_2 в атмосферу с поверхности воды исследованных подземных источников варьируются, соответственно, в пределах 0,13–2,31 мг $\text{CH}_4/(\text{м}^2\cdot\text{ч})$ (в среднем – 0,95 мг $\text{CH}_4/(\text{м}^2\cdot\text{ч})$) и 72,4–1683,6 мг $\text{CO}_2/(\text{м}^2\cdot\text{ч})$ (в среднем – 259,7 мг $\text{CO}_2/(\text{м}^2\cdot\text{ч})$). Если принять, что все 300 выявленных выходов подземных источников в западной прибрежной зоне озера выделяют данные парниковые газы со средней скоростью, а площадь растекания разгружаемых подземных вод не превышает 2 м², то общая эмиссия всеми источниками западной группы составит 0,57 г $\text{CH}_4/\text{ч}$ (13,7 г/сут) и 0,16 кг $\text{CO}_2/\text{ч}$ (3,8 кг/сут).

Как показали наши исследования, отложения котловины озера, в которых разгружаются подземные источники западной группы, также являются поставщиками CO_2 в атмосферу. Приняв, что скорость его эмиссии с этих отложений составляет в среднем 19,2 мг $\text{CO}_2/(\text{м}^2\cdot\text{ч})$ (см. табл. 1), а площадь участка, на котором расположены данные источники, около 0,25 км², получим общую эмиссию около 4,8 кг $\text{CO}_2/\text{ч}$, или 115,2 кг $\text{CO}_2/\text{сут}$. Таким образом, суммарная эмиссия CO_2 в результате непосредственной разгрузки подземных источников западной группы в 30 раз меньше его совокупной эмиссии с участка прибрежной котловины, в пределах которой разгружаются эти подземные источники.

Заключение

Западная группа подземных источников протягивается на 2,7 км вдоль береговой линии оз. Баскунчак на расстоянии до 100–150 м от берега в пределах его сухой котловины. В этой группе насчитывается около 300 выходов подземных вод, в основном железистых, разгружающихся в виде сосредоточенных малодобитных струй и высачиваний в небольших чашеобразных лунках или неглубоких промоинах. Вытекающие из источника воды, как правило, полностью испаряются и/или впитываются грунтом в пределах 0,5–7 м от выводного отверстия. При этом во многих действующих источниках наблюдается небольшая дегазация в виде газовых пузырей.

Для вод исследованных источников характерны небольшой дебит – от 0,32 до 50 л/ч (обычно менее 4 л/ч), высокая минерализация – от 16,6 до 284,4 г/л, повышенные концентрации метана – от 14,9 до 74,8 мкл/л (в среднем – 41,1 мкл/л), низкие концентрации растворенного кислорода – от 0,144 до 1,75 мг/л (в среднем – 0,514 мг/л) и слабнокислый – нейтральный pH – 5,89–7,07 (в среднем – 6,46). Восстановительная (глеевая) обстановка в подземных водах обуславливает значительную подвижность Fe^{2+} и Mn^{2+} и, как следствие, высокие концентрации их растворенных форм – 41,1–55,4 и 2,35–2,90 мг/л соответственно. При разгрузке этих вод на поверхность в условиях окислительной обстановки подвижность данных металлов снижается, что приводит к их осаждению в составе минеральных корок. При этом вблизи источников более интенсивно осаждаются железо (по данным электронно-зондового микроанализа, в составе железистых микроагрегатов корок – не более 0,2–0,5 мас. % марганца).

Удельные потоки CH_4 и CO_2 в атмосферу с поверхности воды исследованных подземных источников варьируются в пределах 0,13–2,31 мг $\text{CH}_4/(\text{м}^2\cdot\text{ч})$ (в среднем – 0,95 мг $\text{CH}_4/(\text{м}^2\cdot\text{ч})$) и 72,4–1683,6 мг $\text{CO}_2/(\text{м}^2\cdot\text{ч})$ (в среднем – 259,7 мг $\text{CO}_2/(\text{м}^2\cdot\text{ч})$). Поток CO_2 в атмосферу с поверхности отложений на некотором удалении от источников на порядок ниже – в среднем 19,2 мг $\text{CO}_2/(\text{м}^2\cdot\text{ч})$. Несмотря на более высокие удельные потоки с поверхности воды подземных источников, общая эмиссия CO_2 в результате непосредственной разгрузки всех подземных источников западной группы в 30 раз меньше его общей эмиссии с прибрежной сухой котловины, в пределах которой разгружаются эти подземные источники.

Список источников

1. Состояние и многолетние изменения природной среды на территории Богдинско-Баскунчакского заповедника / под ред. И.Н. Сафронова, П.И. Бухарицина, А.В. Бармина. Волгоград: Царицын, 2012. 360 с. EDN: SDXCIZ.
2. Куриленко В.В., Зеленковский П.С. Месторождение минеральных солей оз. Баскунчак: геология, особенности современного соленакопления, механизмы природо- и недропользования // Вестн. Санкт-Петербургского ун-та. Серия 7: Геология. География. 2008. № 3. С. 17–32. EDN: KVXXLB.

3. Литовский В.В. Гравиогеография соленых озер Урала и сопредельных территорий. III: Особенности геохимии и генезиса // Геогр. вестн. 2018. № 4(47). С. 11–20. EDN: YTTYIX. <https://doi.org/10.17072/2079-7877-2018-4-11-20>
4. Гарькуша Д.Н., Федоров Ю.А., Трубник Р.Г., Талта Б.В., Ковалев Е.А. Концентрация и эмиссия метана и сероводорода в озере Баскунчак, ручье балки Улан-Благ и дегазирующих источниках подземных вод в весенний период // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2023. № 3. С. 80–92. EDN: XQWMYU. <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2023-3-80-92>
5. Гарькуша Д.Н., Федоров Ю.А., Ковалев Е.А., Талта Б.В., Андреев Ю.А., Тамбиева Н.С., Краснова Е.А. Подземные источники балки Пещерная озера Баскунчак: гидрохимические особенности и эмиссия парниковых газов // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2024. № 1. С. 63–75. EDN: OIFMXN. <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2024-1-63-75>
6. Зеленковский П.С., Куриленко В.В. Природно-техногенная система соляного озера Баскунчак и особенности эксплуатации её ресурсов // Вестн. Санкт-Петербургского ун-та. Серия 7: Геология. География. 2013. № 4. С. 33–52. EDN: RSKGXP.
7. Кучерук Т.А., Амельченко В.Н. Подземные трещинно-карстовые воды кунгурского яруса // Геология, география и глобальная энергия. 2008. № 4 (31). С. 73–75. EDN: KVDHYT.
8. Мязина Н.Г. Генезис и геохимия карстовых вод района озера Баскунчак // Южнорос. вестн. геологии, географии и глобальной энергии. 2006. № 4(17). С. 170–172. EDN: KKYDWP.
9. Головачев И.В., Ермолина А.В. Гидрогеологическая характеристика карстовых вод в окрестностях озера Баскунчак // Геология, география и глобальная энергия. 2018. № 4(71). С. 25–32. EDN: VPYCKM.
10. Умралиева А.С., Кутлусурина Г.В. Качественный состав водных объектов Богдинско-Баскунчакского заповедника // Настоящее и будущее современных научных направлений : сб. материалов Междунар. науч.-практ. конф. Кемерово: ЗапСибНЦ, 2020. С. 31–34. EDN: XAJPHM.
11. Головачев И.В. Географические особенности гипсового карста солянокупольных структур Северного Прикаспия (на примере района окрестностей озера Баскунчак): автореф. дис. ... канд. геогр. наук. Волгоград, 2006. 28 с.
12. Зеленковский П.С. Эколого-географическая характеристика месторождения минеральных солей озера Баскунчак и особенности рационального освоения его ресурсов: автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. СПб., 2010. 28 с. EDN: QHFDJT.
13. Леш А.Ю., Иванов М.В. Биогеохимический цикл метана в океане. М.: Наука, 2009. 576 с.
14. Etiope G., Klusman R.W. Geologic emissions of methane to the atmosphere // Chemosphere. 2002. Vol. 49, № 8. P. 777–789. [https://doi.org/10.1016/s0045-6535\(02\)00380-6](https://doi.org/10.1016/s0045-6535(02)00380-6)
15. Judd A.G., Hovland M., Dimitrov L.I., Gil S.G., Jukes V. The geological methane budget at continental margins and its influence on climate change // Geofluids. 2002. Vol. 2, № 2. P. 109–126.
16. EPA, 2010. Methane and Nitrous Oxide Emissions from Natural Sources. U.S. Environmental Protection Agency Office of Atmospheric Programs. Washington, DC, USA.
17. Granin N.G., Makarov M.M., Kucher K.M., Gnatovsky R.Y. Gas seeps in Lake Baikal-detection, distribution, and implications for water column mixing // Geo-Marine Letters. 2010. Vol. 30, № 3–4. P. 399–409. <https://doi.org/10.1007/s00367-010-0201-3>
18. РД 52.24.512-2012. Объемная концентрация метана в водах. Методика измерений газохроматографическим методом с использованием анализа равновесного пара. Ростов н/Д.: Гидрохим. ин-т, 2012. 23 с.
19. РД 52.24.511-2013. Массовая доля метана в донных отложениях. Методика измерений газохроматографическим методом с использованием анализа равновесного пара. Ростов н/Д.: Гидрохим. ин-т, 2013. 19 с.
20. Руководство по химическому анализу поверхностных вод суши / под ред. Л.В. Боевой. Ростов н/Д.: НОК, 2009. Ч. 1. 1037 с.
21. РД 52.24.377-2021. Массовая концентрация алюминия, бериллия, ванадия, железа, кадмия, кобальта, марганца, меди, молибдена, никеля, свинца, серебра, хрома и цинка в водах. Методика выполнения измерений атомно-абсорбционным методом с электротермической атомизацией проб. Ростов н/Д.: Гидрохим. ин-т, 2021. 38 с.
22. ПНД Ф 14.1:2.4.139-98. Количественный химический анализ вод. Методика измерений массовых концентраций кобальта, никеля, меди, цинка, хрома, марганца, железа, серебра, кадмия и свинца в пробах питьевых, природных и сточных вод методом атомно-абсорбционной спектрометрии. М., 1998. С. 24.
23. Gar'kusha D. N., Fedorov Yu. A., Tambieva N. S. Methane and Sulfide Sulfur in Water and Bottom Sediments of Watercourses of the Steppe Zone of the European Part of Russia // Geochemistry Int. 2024. Vol. 62, № 8. P. 878–896. EDN: EKGWDO. <https://doi.org/10.1134/S0016702924700459>
24. Гарькуша Д.Н., Федоров Ю.А., Тамбиева Н.С. Расчет элементов баланса метана в водных экосистемах Азовского моря и Мирового океана на основе эмпирических формул // Метеорология и гидрология. 2016. № 6. С. 48–58. EDN: WBERVB.
25. Федоров Ю.А., Тамбиева Н.С., Гарькуша Д.Н., Хорошевская В.О. Метан в водных экосистемах. Ростов н/Д; М.: Ростиздат, 2007. 330 с.

26. Федоров Ю.А., Гарькуша Д.Н., Шипкова Г.В. Эмиссия метана торфяными залежами верховых болот Псковской области // География и природные ресурсы. 2015. № 1. С. 88–97. EDN: ТККWFN.
27. Глаголев М.В., Сабреков А.Ф., Казанцев В.С. Измерение газообмена на границе почва/атмосфера. Томск: Изд-во Томского гос. пед. ун-та, 2010. 96 с.
28. Bastviken D., Cole J., Pace M., Tranvik L. Methane emissions from lakes: dependence of lake characteristics, two regional assessments, and a global estimate // *Global Biogeochem. Cycles*. 2004. Vol. 18. Art. GB4009. <https://doi.org/10.1029/2004GB002238>
29. Холодов В.Н. Проблема геохимии железа и марганца в осадках морей и океанов. М.: РАН, 2023. 232 с.
30. Sergienko E.S., Tarakhovskaya E.R., Rodinkov O.V., Yanson S.Y., Pankin D.V., Kozlov V.S., Gareev K.G., Bugrov A.N., Kharitonskii P.V. Biogenic Origin of Fe-Mn Crusts from Hydrothermal Fields of the Mid-Atlantic Ridge, Puy de Folles Volcano Region // *Geosciences*. 2024. Vol. 14. P. 240. <https://doi.org/10.3390/geosciences14090240>
31. Федоров Ю.А., Доценко И.В., Дмитрик Л.Ю. Железо в поверхностных и подземных водах бассейна Азовского моря // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2016. № 3 (191). С. 91–99. EDN: WRPGMR. <https://doi.org/10.18522/0321-3005-2016-3-91-99>
32. Алекин О.А. Основы гидрохимии: учеб. пособие для вузов. Л.: Гидрометеоиздат, 1970. 444 с.
33. Гарькуша Д.Н. Метан в подземных водах: образование, распределение, миграция и влияние добычи газа по технологии гидроразрыва пласта // Астраханский вестн. экол. образования. 2021. № 2 (62). С. 72–88. EDN: KWZKUU. <https://doi.org/10.36698/2304-5957-2021-2-72-88>
34. Keller P.S., Catalan N., Schiller D. et al. Global CO₂ emissions from dry inland waters share common drivers across ecosystems // *Nature Communications*. 2020. Vol. 11, № 2. Art. 2126. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-15929-y>
35. Cobo M., Goldhammer T., Brothers S. A desiccating saline lake bed is a significant source of anthropogenic greenhouse gas emissions // *One Earth*. 2024. Vol. 7, № 8. P. 1414–1423. <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2024.07.001>

References

1. Safronov I. N., Bukharitsin P. I., Barmin A.V., eds. *The state and long-term changes of the natural environment on the territory of the Bogdinsk-Baskunchak reserve*. Volgograd: Tsaritsyn; 2012. 360 p. (In Russ.). EDN: SDXCIZ.
2. Kurilenko V.V., Zelenkovsky P.S. Mineral salt deposit of Lake Baskunchak: geology, features of modern salt accumulation, mechanisms of natural and subsurface use. *Bulletin of the St. Petersburg University. Series 7. Geology. Geography*. 2008;(3):17-32. (In Russ.). EDN: KVXXLB.
3. Litovsky V.V. Graviogeography of the salt lakes of the Urals and adjacent territories. III: Features of geochemistry and genesis. *Geographical Bulletin*. 2018;(4):11-20. (In Russ.). EDN: YTTYIX. <https://doi.org/10.17072/2079-7877-2018-4-11-20>
4. Gar'kusha D.N., Fedorov Yu.A., Trubnik R.G., Talpa B.V., Kovalev E.A. Concentration and emission of methane and hydrogen sulfide in Baskunchak Lake, Ulan-Blag Beam creek and degassing groundwater sources in spring. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science*. 2023;(3):80-92. (In Russ.). EDN: XQWYU. <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2023-3-80-92>
5. Gar'kusha D.N., Fedorov Yu.A., Kovalev E.A., Talpa B.V., Andreev Yu.A., Tambieva N.S., Krasnova E.A. Underground sources of the Cave gulch of Lake Baskunchak: hydrochemical features and greenhouse gas emissions. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science*. 2024;(1):63-75. (In Russ.). EDN: OIFMXN. <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2024-1-63-75>
6. Zelenkovsky P.S., Kurilenko V.V. The natural-technogenic system of the Baskunchak salt lake and the peculiarities of exploitation of its resources. *Bulletin of the St. Petersburg University. Series 7. Geology. Geography*. 2013;(4):33-52. (In Russ.). EDN: RSKGXP.
7. Kucheruk T.A., Amelchenko V.N. Underground fractured karst waters of the Kungursky tier. *Geology, Geography and Global Energy*. 2008;(4):73-75. (In Russ.). EDN: KVDHYT.
8. Myazina N.G. Genesis and geochemistry of karst waters of the Baskunchak Lake area. *South-Russian Bulletin of Geology, Geography and Global Energy*. 2006;(4):170-172. (In Russ.). EDN: KKYDWP.
9. Golovachev I.V., Ermolina A.V. Hydrogeological characteristics of karst waters in the vicinity of Lake Baskunchak. *Geology, Geography and Global Energy*. 2018;(4):25-32. (In Russ.). EDN: VPYCKM.
10. Umralieva A.S., Kutlusrina G.V. Qualitative composition of water bodies of the Bogdinsk-Baskunchak reserve. *Present and future of modern scientific directions. Geology, geography: collection of materials of the International Scientific and Practical Conference*. Kemerovo: West Siberian Scientific Center Press; 2020:31-34. (In Russ.). EDN: XAJPHM.
11. Golovachev I.V. *Geographical features of gypsum karst of salt dome structures of the Northern Caspian Sea (on the example of the area around Lake Baskunchak)*. Abstract of PhD thesis. Volgograd, 2006. 28 p. (In Russ.).

12. Zelenkovsky P.S. *Ecological and geographical characteristics of the mineral salt deposit of Lake Baskunchak and the features of the rational development of its resources*. Abstract of PhD thesis. St. Petersburg, 2010. 28 p. (In Russ.). EDN: QHFDJT.

13. Lein A.Yu., Ivanov M.V. *Biogeochemical cycle of methane in the ocean*. Moscow: Science; 2009. 576 p. (In Russ.).

14. Etiope G., Klusman R.W. Geologic emissions of methane to the atmosphere. *Chemosphere*. 2002;49(8):777-789. [https://doi.org/10.1016/s0045-6535\(02\)00380-6](https://doi.org/10.1016/s0045-6535(02)00380-6)

15. Judd A.G., Hovland M., Dimitrov L.I., Gil S.G., Jukes V. The geological methane budget at continental margins and its influence on climate change. *Geofluids*. 2002;2(2):109-126.

16. EPA, 2010. *Methane and Nitrous Oxide Emissions from Natural Sources*. U.S. Environmental Protection Agency Office of Atmospheric Programs. Washington, DC, USA.

17. Granin N.G., Makarov M.M., Kucher K.M., Gnatovsky R.Y. Gas seeps in Lake Baikal-detection, distribution, and implications for water column mixing. *Geo-Marine Letters*. 2010;30(3-4):399-409 <https://doi.org/10.1007/s00367-010-0201-3>.

18. RD 52.24.512-2012. *The volume concentration of methane in the waters. Measurement technique by gas chromatographic method using equilibrium vapor analysis*. Rostov-on-Don: Hydrochemical Institute; 2012. 23 p. (In Russ.).

19. RD 52.24.511-2013. *The mass fraction of methane in bottom sediments. Measurement technique by gas chromatographic method using equilibrium vapor analysis*. Rostov-on-Don: Hydrochemical Institute; 2013. 19 p. (In Russ.).

20. Boeva L.V., ed. *Guidelines for the chemical analysis of land surface waters*. Rostov-on-Don: NOK; 2009. Part 1. 1037 p. (In Russ.).

21. RD 52.24.377-2021. *The mass concentration of aluminum, beryllium, vanadium, iron, cadmium, cobalt, manganese, copper, molybdenum, nickel, lead, silver, chromium and zinc in the waters. The method of performing measurements by atomic absorption method with electrothermal atomization of samples*. Rostov-on-Don: Hydrochemical Institute; 2021. 38 p. (In Russ.).

22. PND F 14.1.2:4.139-98. *Quantitative chemical analysis of waters. The method of measuring the mass concentrations of cobalt, nickel, copper, zinc, chromium, manganese, iron, silver, cadmium and lead in samples of drinking, natural and wastewater by atomic absorption spectrometry*. Moscow, 1998. 24 p.

23. Gar'kusha D.N., Fedorov Yu.A., Tambieva N.S. Methane and Sulfide Sulfur in Water and Bottom Sediments of Watercourses of the Steppe Zone of the European Part of Russia. *Geochemistry Int.* 2024;62(8):878-896. EDN: EKGDWO. <https://doi.org/10.1134/S0016702924700459>

24. Gar'kusha D.N., Fedorov Yu.A., Tambieva N.S. Calculation of methane balance elements in aquatic ecosystems of the Sea of Azov and the World Ocean based on empirical formulas. *Meteorology and Hydrology*. 2016;(6):48-58. (In Russ.). EDN: WBEPVB.

25. Fedorov Yu.A., Tambieva N.S., Gar'kusha D.N., Khoroshevskaya V.O. *Methane in aquatic ecosystems*. Rostov-on-Don; Moscow: Rostov Publishing House; 2007. 330 p. (In Russ.).

26. Fedorov Yu.A., Gar'kusha D.N., Shipkova G.V. Methane emission from peat deposits of the upper marshes of the Pskov region. *Geography and Natural Resources*. 2015;(1):88-97. (In Russ.). EDN: TKKWFN.

27. Glagolev M.V., Sabrekov A.F., Kazantsev V.S. *Measurement of gas exchange at the soil/atmosphere boundary*. Tomsk: Publishing House of Tomsk State Pedagogical University; 2010. 96 p. (In Russ.).

28. Bastviken D., Cole J., Pace M., Tranvik L. Methane emissions from lakes: dependence of lake characteristics, two regional assessments, and a global estimate. *Global Biogeochem. Cycles*. 2004;18:GB4009. <https://doi.org/10.1029/2004GB002238>

29. Kholodov V.N. *The problem of geochemistry of iron and manganese in sediments of seas and oceans*. Moscow: Russian Academy of Sciences; 2023. 232 p. (In Russ.).

30. Sergienko E.S., Tarakhovskaya E.R., Rodinkov O.V., Yanson S.Y., Pankin D.V., Kozlov V.S., Gareev K.G., Bugrov A.N., Kharitonskii P.V. Biogenic Origin of Fe-Mn Crusts from Hydrothermal Fields of the Mid-Atlantic Ridge, Puy de Folles Volcano Region. *Geosciences*. 2024;14:240. <https://doi.org/10.3390/geosciences14090240>

31. Fedorov Yu.A., Dotsenko I.V., Dmitrik L.Yu. Iron in surface and groundwater of the Azov Sea basin. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science*. 2016;(3):91-99. (In Russ.). EDN: WRPGMR. <https://doi.org/10.18522/0321-3005-2016-3-91-99>

32. Alekin O.A. *Fundamentals of hydrochemistry*. Leningrad: Hydro Meteo Publishing House; 1970. 444 p. (In Russ.).

33. Gar'kusha D.N. Methane in groundwater: formation, distribution, migration and impact of gas extraction using hydraulic fracturing technology. *Astrakhan Bulletin of Environmental Education*. 2021;(2):72-88. (In Russ.). EDN: KWZKUU. <https://doi.org/10.36698/2304-5957-2021-2-72-88>

34. Keller P.S., Catalan N., Schiller D. et al. Global CO₂ emissions from dry inland waters share common drivers across ecosystems. *Nature Communications*. 2020;11(1):2126. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-15929-y>

35. Cobo M., Goldhammer T., Brothers S. A desiccating saline lake bed is a significant source of anthropogenic greenhouse gas emissions. *One Earth*. 2024;7(8):1414-1423. <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2024.07.001>

Информация об авторах

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

Юрий Александрович Федоров – доктор географических наук, профессор, заведующий кафедрой физической географии, экологии и охраны природы Института наук о Земле ЮФУ.

Юрий Витальевич Попов – кандидат геолого-минералогических наук, руководитель Центра исследований минерального сырья и состояния окружающей среды Института наук о Земле ЮФУ.

Юрий Александрович Андреев – кандидат химических наук, заведующий лабораторией методов и технических средств анализа вод ГХИ.

Игорь Олегович Мякинников – магистрант кафедры информационных технологий факультета информатики и вычислительной техники ДГТУ.

Наталья Сергеевна Тамбиева – старший научный сотрудник лаборатории методов и технических средств анализа вод ГХИ.

Борис Васильевич Талпа – кандидат геолого-минералогических наук, доцент кафедры физической географии, экологии и охраны природы Института наук о Земле ЮФУ.

Олеся Владимировна Назаренко – кандидат географических наук, доцент кафедры физической географии, экологии и охраны природы Института наук о Земле ЮФУ.

Information about the authors

Dmitry N. Garkusha – Candidate of Science (Geography), Associate Professor, Department of Physical Geography, Ecology and Environment Protection, Institute of Earth Sciences, SFedU.

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

Yuri V. Popov – Candidate of Science (Geology and Mineralogy), Head of the Center for Research of Mineral Raw Materials and Environmental Conditions, Institute of Earth Sciences, SFedU.

Yuri A. Andreev – Candidate of Science (Chemistry), Head of the Laboratory of Methods and Technical Means of Water Analysis, HI.

Igor O. Myakinnikov – Master's Student, Department of Information Technology, Faculty of Computer Science and Computer Engineering, DSTU.

Natalia S. Tambieva – Senior Researcher, Laboratory of Methods and Technical Means of Water Analysis, HI.

Boris V. Talpa – Candidate of Science (Geology and Mineralogy), Associate Professor, Department of Physical Geography, Ecology and Environment Protection, Institute of Earth Sciences, SFedU.

Olesya V. Nazarenko – Candidate of Science (Geography), Associate Professor, Department of Physical Geography, Ecology and Nature Protection, Institute of Earth Sciences, SFedU.

Статья поступила в редакцию 05.12.2024; одобрена после рецензирования 20.01.2025; принята к публикации 23.04.2025.
The article was submitted 05.12.2024; approved after reviewing 20.01.2025; accepted for publication 23.04.2025.

Научная статья

УДК 553.96

<https://doi.org/10.18522/1026-2237-2025-2-56-62>

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ, СОСТАВ, КАЧЕСТВО И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА УГЛЕЙ МУГУНСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ (ИРКУТСКИЙ УГОЛЬНЫЙ БАСЕЙН)

Джумаян Наринэ Размиковна

Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, Россия

ООО «Горно-геологическая компания», Москва, Россия

dzhumayan@sfedu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2725-1745>

Аннотация. Рассмотрены особенности углеобразования Мугунского месторождения Иркутского угольного бассейна. Данное месторождение расположено в относительно спокойной части бассейна, приближающейся по тектонической обстановке к типичной платформе. Процессы торфообразования месторождения тесно связаны с этапами развития юго-восточной части Ангаро-Чулымского мезозойского прогиба. На основании проведенных петрографических исследований установлено, что накопление углей происходило в обводненных условиях, при компенсированном осадконакоплении. Анализ качества и технологических свойств углей I и II продуктивных пластов показал, что по вещественно-петрографической классификации угли гелиты, среднезольные, среднесернистые. Учитывая однообразный марочный состав углей Мугунского месторождения (принадлежность к подгруппе третий бурый витринитовый), были выделены следующие направления нетопливного использования: сырье для производства синтетического жидкого топлива и углегуминовых препаратов (удобрений). В результате сопоставления показателей качества исследуемых углей с регламентирующими показателями углей, пригодных для производства синтетического жидкого топлива, сделан предварительный вывод об их пригодности. Опытными испытаниями доказана возможность их использования в качестве органо-минеральных удобрений в комплексе с бедными фосфоритовыми рудами. Подобранный оптимальное соотношение обработанного фосфорита и бурого угля составляет (0,7–0,8):1,0.

Ключевые слова: Мугунское месторождение, бурый уголь, условия образования углей, нетопливное использование

Для цитирования: Джумаян Н.Р. Особенности формирования, состав, качество и технологические свойства углей Мугунского месторождения (Иркутский угольный бассейн) // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2025. № 2. С. 56–62. <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2025-2-56-62>

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

Original article

CONDITIONS OF FORMATION, COMPOSITION, QUALITY AND TECHNOLOGICAL PROPERTIES OF COALS OF THE MUGUN DEPOSIT (IRKUTSK COAL BASIN)

Narine R. Dzhumayan

Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia

LLC “Mining-Geological Company”, Moscow, Russia

dzhumayan@sfedu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2725-1745>

© Джумаян Н.Р., 2025

Abstract. The features of coal formation of the Mugun deposit of the Irkutsk coal basin are considered. This deposit is located in a relatively tectonically quiet part of the basin, approaching a typical platform in tectonic settings. The processes of peat formation of the deposit are closely related to the stages of development of the southeastern part of the Angara-Chulym Mesozoic trough. Based on the petrographic studies, it was established that coals accumulated in flooded conditions, with compensated sedimentation. Analysis of the quality and technological properties of coals of productive seams I and II showed that, according to the substance-petrographic classification, the coals are helites, medium-ash, medium-sulfur. Taking into account the uniform brand composition of coals of the Mugun deposit (belonging to the third brown vitrinite subgroup), the following areas of non-fuel use were identified: raw materials for the production of synthetic liquid fuel and coal-humic preparations (fertilizers). As a result of comparison of the quality indicators of the studied coals with the regulatory indicators of coals suitable for the production of synthetic liquid fuel, a conclusion was made about their preliminary suitability. Experimental tests proved the possibility of using the studied coals as organomineral fertilizers in combination with poor phosphorite ores. The selected optimal ratio of processed phosphorite and brown coal is (0.7-0.8):1.0.

Keywords: Mugun deposit, brown coal, coal formation conditions, non-fuel use of coal

For citation: Dzhumayan N.R. Conditions of Formation, Composition, Quality and Technological Properties of Coals of the Mugun Deposit (Irkutsk Coal Basin). *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2025;(2):56-62. (In Russ.). <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2025-2-56-62>

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

Мугунское угольное месторождение разрабатывается с 1993 г. Проектная добыча составляет порядка 7 млн т угля в год. Сегодня единственное направление их использования – топливное. Однако анализ условий формирования, технологические характеристики и результаты опытных испытаний позволяют с уверенностью утверждать, что исследуемые угли после глубокой переработки могут быть использованы в качестве синтетического жидкого топлива, а также углеугольных препаратов для сельского хозяйства.

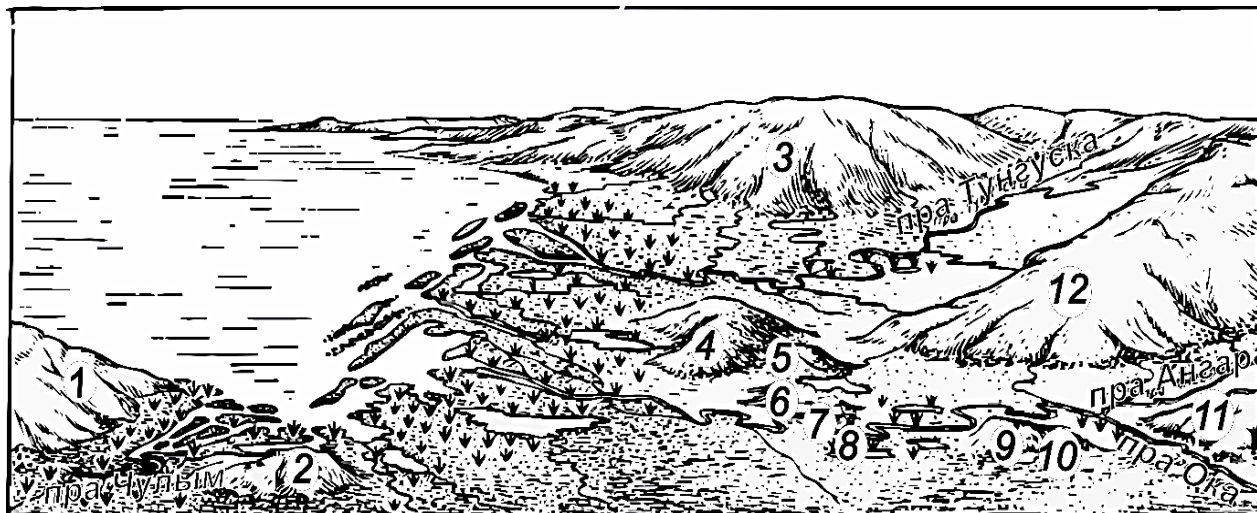
В рамках данной работы автором решены следующие задачи: раскрыты особенности образования месторождения; дана качественная и технологическая характеристика исследуемых угольных пластов; показаны нетрадиционные способы их использования. Объектом исследований являлись пробы углей, отобранных с продуктивных и отрабатываемых пластов I и II.

Методика исследований: для выяснения условий образования выполнено сопоставление результатов углепетрографических исследований, проведенных автором, с ранее изданными трудами [1]. Определение качественных характеристик выполнено в соответствии с государственными стандартами, а также обобщены результаты лабораторных исследований, приведенных в рамках геолого-разведочных работ, проводимых с 1950 г. (поисковые работы, выполненные Каранцайской ГРП) по 2006 г. (доразведка Мугунского месторождения, ООО «Компания Востсибуголь»). Основной объем геолого-разведочных работ – предварительная разведка (1962 г.), детальная разведка (1963–1965 гг.) и доразведка площади первоочередной разработки (1983–1991 гг.) – выполнен Мугунской ГРП и экспедицией «Востсибуголь»: определены основные показатели качества углей и даны рекомендации об использовании их в качестве низкокалорийного топлива. Опытные работы по получению органоминеральных удобрений проверены в АО «ВНИГРИуголь».

Результаты исследований

Процессы торфо(угле-)образования тесно связаны с общими условиями осадконакопления угленосных толщ. Детальному изучению геологии, литологии и генезиса юрских отложений Иркутского угольного бассейна посвящены труды [2, 3]. Область Мугунского месторождения относится к южной части Сибирской платформы, характеризуется простым геологическим строением. На исследуемой территории развиты отложения нижнего палеозоя с почти горизонтальным или слабоволнистым залеганием, прорванные интрузиями типа линзовидных пластовых залежей. На размытой поверхности этого фундамента залегают почти горизонтально угленосные отложения юры.

Промышленная угленосность Мугунского месторождения связана с горизонтом рабочих пластов черемховской свиты нижней – средней юры, который включает I и II эксплуатируемые пласты. Иркутский угольный бассейн, в том числе и Мугунское месторождение, расположен в юго-восточной части Ангаро-Чулымского мезозойского прогиба. Схема раннеюрской орогидрографии Ангаро-Чулымского мезозойского прогиба представлена на рис. 1. В раннеюрское время Мугунское месторождение территориально было приурочено к Тулунскому поднятию.



Возвышенности доюрского рельефа: 1 – Маринская; 2 – Аргинская; 3 – Северо-Енисейская; 4 – Южно-Енисейская; 5 – Панушинская; 6 – Тайнинская; 7 – Соколовская; 8 – Урало-Ключевская; 9 – Тулунская; 10 – Кирейская; 11 – Черемхово-Тагнинская; 12 – Верхнеленская / Pre-Jurassic relief uplands: 1 - Mariinskaya; 2 - Arginskaya; 3 - North-Yeniseiskaya; 4 - South-Yeniseiskaya; 5 - Panushinskaya; 6 - Taininskaya; 7 - Sokolovskaya; 8 - Ural-Klyuchevskaya; 9 - Tulunskaya; 10 - Kireyskaya; 11 - Cheremkhovo-Tagninskaya; 12 - Verkhnelenskaya

Рис. 1. Схема раннеюрской орогидрографии Ангаро-Чулымского мезозойского прогиба (по [4])
 / Fig. 1. Scheme of the Early Jurassic orohydrography of the Angara-Chulym Mesozoic trough (according to [4])

П.П. Тимофеевым [4] были выделены четыре макроцикла формирования юрской юго-восточной части (района Мугунского месторождения) аллювиально-озерно-морской формации Ангаро-Чулымского прогиба. Характеристика макроциклов, их состав и стратиграфическая принадлежность (в данном исследовании касаясь юго-восточной части прогиба) приведены в таблице.

Характеристика макроциклов юрской аллювиально-озерно-морской формации Ангаро-Чулымского прогиба [4] / Characteristics of macrocycles of the Jurassic alluvial-lacustrine-marine formation of the Angara-Chulym trough according [4]

Подформация / макроцикл	Характеристика пород	Стратиграфическое соответствие
I – аллювиально-озерно-болотная слабоугленосная	Грубообломочные породы, валуны и галечные конгломераты, гравелиты, песчаники	Низы черемховской свиты
II – аллювиально-озерно-болотная угленосная	<i>Нижняя часть (безугольная)</i> – гравелиты, конгломераты; <i>верхняя (угленосная)</i> – аллювиальные, озерные, озерно-болотные отложения, редко – делювиально-пролювиальные отложения	Средняя и верхняя части черемховской свиты
III – аллювиально-озерно-прибрежно-морская слабоугленосная	<i>Нижняя часть</i> – неполные аллювиально-озерно-болотные циклы (практически безугольная). <i>Верхняя часть</i> – озерно-болотные, реже аллювиально-озерно-болотные циклы. Отложения русла, основные источники сноса – Восточный Саян и Верхнеленская древняя возвышенность	Прииркутская свита
IV – аллювиально-прибрежно-морская углисто-карбонатная	Аллювиальные циклы, сложенные исключительно горно-руслыми отложениями; редко – аллювиально-озерно-болотные безугольные отложения	Кудинская свита

Отмечено, что широкое торфонакопление характерно для II макроцикла, аллювиально-озерно-болотной угленосной подформации (J_{1-2cr2} , J_{1-2cr3}). В это время происходит формирование Мугунского и ряда других угольных месторождений.

Согласно вышеизложенным сведениям, юрские породы на территории Мугунского месторождения образуют комплекс континентальных пресноводных осадков аллювиально-русловых, аллювиально-пойменных и озерно-болотных фаций.

Известно, что петрографический состав углей является индикатором их условий накопления [5–9]. Согласно [1], быстрота погружения области торфонакопления является определяющим фактором, который обуславливает структуру вещества углеобразующих микрокомпонентов.

В результате детального анализа мацерального состава углей выяснено, что наибольшим распространением пользуется подкласс гелитов, сумма мацералов группы витринита и 1/3 группы семивитринита ($Vt+1/3Sv$) $\geq 75\%$. Мацералы группы витринита структурные, сложены остатками стеблевой ткани, листовым материалом (гинкговидные, плауны, папоротники). Подкласс гелитов представлен собственно гелитами, липоидо-гелитами, фюзинито-гелитами и липоидо-фюзинито-гелитами.

Угли пласта I Мугунского месторождения телинитовые, характеризуются сохранностью растительных тканей, что свидетельствует об их образовании в обстановках с интенсивным опусканием болот и быстрым захоронением торфогенного слоя. Угли первой пачки пласта II коллинитовые, большей частью перекрыты углистыми аргиллитами и алевролитами, что свидетельствует о снижении скорости опускания древнего торфяника. Угли второй пачки пласта II перекрыты песчаниками мелко- и среднезернистыми, редко – аргиллитами, в петрографическом составе возрастает доля структурных компонентов (по сравнению с составом первой пачки пласта II), что свидетельствует об увеличении скорости погружения области торфонакопления.

Для выяснения условий торфонакопления были построены вариационные диаграммы, широко применяемые при реконструкции условий среды палеоторфяника (рис. 2).

Анализ расположения точек на диаграммах указывает на образование углей в обводненных болотах, благодаря чему в образцах преобладает хорошая сохранность растительных тканей. Незначительному окислению могли быть подвержены угли пласта II пачки 1, что также может быть следствием низких скоростей погружения.

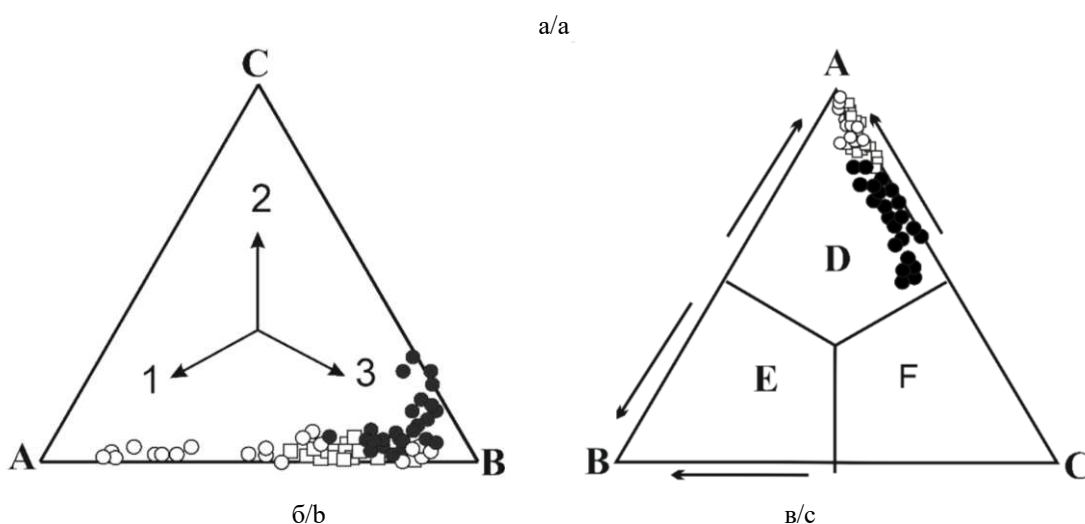
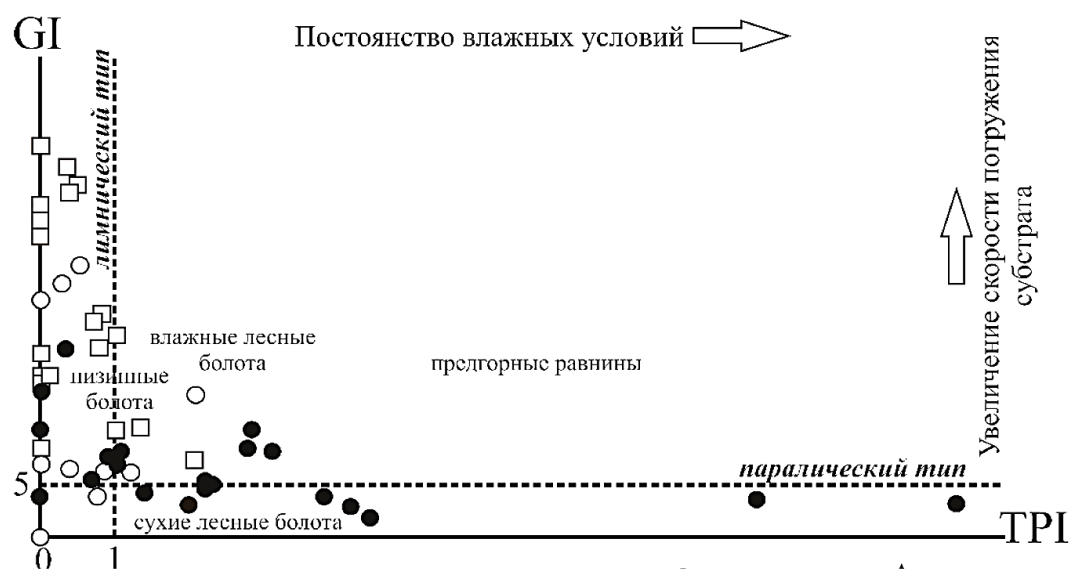
Технологическая характеристика: угли Мугунского месторождения относятся к марке Б (бурый), группе ЗБ (третий бурый), подгруппе ЗБВ (третий бурый витринитовый). Произвольный показатель отражения витринита в иммерсионном масле ($R_{o,r}$, %) изменяется от 0,40 до 0,49 % – класс 04; сумма фюзинизированных компонентов (ΣOK , %) – от 0 до 24 – категории 0, 1 и 2; содержание максимальной влагоемкости (W_{max}^{af} , %) – от 3,9 до 28 % – типы 10 и 20; выход смолы полукоксования (T_{sk}^{daf} , %) – от 61 до 86 % – подтип 20.

Угли характеризуются содержанием общей влаги (W_t) до 18 %, в основном среднезольные (A^d 16–23 %), среднее содержание общей серы (S_t^d) варьирует от 0,66 до 1,46 %, содержание свободных гуминовых веществ (H_t^{daf}) – в пределах 40–50 %, водорода (H^d) – 5 %, углерода (C^d) – 75 %.

Содержание микроэлементов в углях следующее, г/т: Zn – 8–78; Cu – 11–21; Mn – 29–171; Co – 1–14; Mo – 0,6–2,1 [10]. Гуминовые вещества представлены гуминовыми, гиматомелановыми, фульвовыми кислотами, аминокислотами и водорастворимыми карбоновыми кислотами. По петрографическому составу угли – гелиты.

Зола, полученная при сжигании бурого угля на котельной с. Алгатуй (Тулунский район Иркутской области), содержит: SiO_2 – 45–50 %; Al_2O_3 – 15–30; Fe_2O_3 – 7–18; CaO – 4,3–10,5; MgO – 1,7–2,3; K_2O+Na_2O – до 1,2 %. Содержание микроэлементов в золе, г/т: Mn – 955–1062; Zn – 29–30; Cu – 89–94; Mo – 7,3–7,8; Co – 31,2–32,9.

Пригодность углей для производства синтетического жидкого топлива оценена на основании разработанных критериев [11], к которым отнесены произвольный показатель отражения витринита ($R_{o,r}$) – от 0,3 до 0,85 %, содержание плавких мацералов $\Sigma(Vt+L)$ – более 80 %, фюзинизированных компонентов (ΣOK) – менее 20 %, углерода (C^{daf}) – от 65 до 85 %, водорода (H^{daf}) – более 5 %, выход летучих веществ (V^{daf}) – более 30 %, зольность (A^d) – не более 12 %, содержание щелочных оксидов ($R_2O=Na_2O+K_2O$) – не более 6 %, катализирующих и ингибирующих оксидов ($Fe_2O_3+CaO+MgO+TiO_2+SO_3$)/ SiO_2+R_2O – более 1 %. Сопоставление значений показателей качества изучаемых углей с оптимальными значениями для процесса позволяет сделать вывод о возможной пригодности мугунских углей в качестве сырья для получения синтетического жидкого топлива.



□ – изученные пробы пласта I; ● – изученные пробы пласта II пачки 1; ○ – изученные пробы пласта II пачки 2

Рис. 2. Поля фигуративных точек образцов Мугунского месторождения на генетических диаграммах а – по [12]; б – по [13]; в – по [14]. б: 1 – обстановки с преобладающими бескислородными условиями и с сохранной структурой тканей; 2 – обстановки с доминирующим развитием окисленной болотной растительности; 3 – богатые растительностью болота с высокой степенью обводненности и бактериальной активности; в: D – обводненные болота с умеренным затоплением и хорошей сохранностью тканей; E – (окси) сухие болота с повышенной сохранностью растительных тканей; F – обводненные болота с высокой степенью затопления и низкой сохранностью растительных тканей / Fig. 2. Fields of figurative points of samples from the Mugun deposit on genetic diagrams: a - according to [12]; b - according to [13]; c - according to [14]. b: 1 - environments with predominantly anoxic conditions and with preserved tissue structure; 2 - environments with dominant development of oxidized marsh vegetation; 3 - marshes rich in vegetation with a high degree of waterlogging and bacterial activity; c: D - flooded marshes with moderate flooding, with good preservation of tissues; E - (oxy) dry marshes with increased preservation of plant tissues; F - flooded marshes with a high degree of flooding and poor preservation of plant tissues

Основной показатель качества, по которому проводится оценка пригодности для производства углегуминовых препаратов, – принадлежность к гумолитам с содержанием общей серы (S_t^d) до 1,5 % и зольности до 15 %, для них характерен высокий выход гуминовых кислот (HA^{daf}) (более 10 %) [15, 16].

На основании серии опытных испытаний выяснено, что наиболее эффективным фосфатно-азотный раствор получается при оптимальном соотношении 5%-й азотной кислоты и фосфорной руды, подобранной экспериментально. Предложенное соотношение позволяет переводить фосфориты в подвижное состояние. При смешивании обработанной фосфоритной муки с бурым углем происхо-

дит окислительное нитрование органического вещества угля с образованием гуминовых веществ. Массовое соотношение обработанного фосфорита (ОФ) и бурого угля (БУ) выбирается в пределах ОФ:БУ (0,7–0,8):1,0, исходя из оптимального содержания подвижного фосфорита и азота в удобрении. Удобрения с меньшим соотношением ОФ:БУ < 0,7:1 менее эффективны из-за меньшего количества легкорастворимого фосфора и гуминовых веществ. Предлагаемое органоминеральное удобрение при необходимости может быть использовано с другими минеральными удобрениями.

Выводы

В ходе проведенных исследований установлено, что разложение и преобразование исходных растительных компонентов происходили в обводненных восстановительных условиях среды при компенсированном осадконакоплении. Формирование ложа торфяных болот территории Мугунского месторождения осуществлялось за счет опускания палеозойского фундамента и деятельности речной системы. Принадлежность углей к гелитам, а также высокое содержание гуминовых кислот позволяют использовать угли в качестве сырья для производства органоминеральных удобрений.

Список источников

1. Тимофеев П.П., Боголюбова Л.И. Закономерности образования гумусовых углей юрской эпохи угленакопления и их распределение на территории СССР // Литология и полезные ископаемые. 1965. № 5. С. 31–43.
2. Одинцов М.М. Юрские континентальные отложения юга Сибирской платформы. М.: Наука, 1967. 321 с.
3. Киричкова А.И., Носова Н.В., Костина Е.И., Ярошенко О.П. Континентальная юра Иркутского угленосного бассейна. СПб.: ВНИГРИ, 2020. 288 с.
4. Тимофеев П.П. Юрская угленосная формация Южной Сибири и условия ее образования. М.: Наука, 1970. 207 с.
5. Котик О.С., Валяева О.В. Органическое вещество и геохимия углей кунгурского возраста севера Предуральяского краевого прогиба // Георесурсы. 2017. Т. 19, № 2. С. 117–121. EDN: Y2BIDX. <https://doi.org/10.18599/grs.19.2.5>
6. Zdravkov A., Kortenski J. Maceral composition and depositional environment of the coals from Beli Breg basin, Bulgaria // Review of the Bulgarian Geol. Sci. 2004. Vol. 65. P. 157–166.
7. Suwarna N. Permian Mengkarang coal facies and environment, based on organic petrology study // J. Geol. Indonesia. 2006. Vol. 1, № 1. P. 1–8. <https://doi.org/10.17014/ijog.1.1.1-8>
8. Bechtel A., Gruber W., Sachsenhofer R.F., Gratzner R., Lucke A., Puttmann W. Depositional environment of the Late Miocene Hausruck lignite (Alpine Foreland Basin); insights from petrography, organic geochemistry and stable carbon isotopes // Int. J. Coal Geol. 2003. Vol. 53. P. 153–180. [https://doi.org/10.1016/S0166-5162\(02\)00194-5](https://doi.org/10.1016/S0166-5162(02)00194-5)
9. Singh P.K., Singh G.P., Singh M.P., Naik A.S. The petrology of coals from the rampur seam-IV and the Lajkura seam, Ib River Coalfield, Mahanadi Valley, Orissa, India // Energy Sour, Part A: Recov Util Environ Eff. 2013. Vol. 35. P. 1681–1690.
10. Джумаян Н.Р., Шумилова Т.Г., Светов С.А. Элементы-примеси в углях Мугунского месторождения (Иркутский угольный бассейн) // Химия твердого топлива. 2021. № 6. С. 59–66. <https://doi.org/10.31875/50023117721060049>
11. Балмасов Н.Н., Бранчугоев В.К., Быкадоров В.С., Голицын М.В., Евстрахин В.А., Ильин В.И., Козловский Е.А., Краев А.Г., Красавин А.П., Петров И.Ф., Твердохлебов В.Ф., Файдов О.Е., Череповский В.Ф. Минерально-сырьевая база угольной промышленности России: в 2 т. Т. 1: Состояние, динамика, развитие. М.: Изд-во Московского гос. горн. ун-та, 1999. 648 с.
12. Diessel C.F.K. Coal-Bearing Depositional Systems. Berlin: Springer Verlag, 1992. 721 p. <https://doi.org/10.1080/15567031003663158>
13. Mukhopadhyay P.K. Petrography of selected Wilcox and Jackson group lignites from tertiary of Texas // Geology of Gulf Coast Lignites. Geol. Sci of America, Coal Geology Division. R.B. Finkelman, D.J. Casagrade (eds). Field Trip. 1986. P. 126–145.
14. Singh P.K., Rajak P.K., Singh M.P., Singh V.K., Naik A.S., Singh A.K. Peat swamps at Giral lignite field of Barmer basin, Rajasthan, Western India: understanding the evolution through petrological modelling // Int. J. Coal Sci Technol. 2006. Vol. 3. P. 148–164.
15. Косинский В.А., Гонцов А.А., Хрусталева Г.К., Черников А.Б. Комплексная оценка свойств углей для нетрадиционного использования на стадиях поисковых и оценочных работ // Национальная ассоциация ученых. 2021. № 72-3. С. 12–17. <https://doi.org/10.31618/nas.2413-5291.2021.3.72.490>

16. Старокожева Г.И., Павлова Г.Г., Ефремцева Н.В., Шутов В.И. Оценка эффективности освоения бурогольных месторождений при комплексном использовании углей // Минеральные ресурсы России. 2014. № 4. С. 28–35. EDN: SJJENL.

References

1. Timofeev P.P., Bogolyubova L.I. Patterns of formation of humus coals of the Jurassic epoch of coal accumulation and their distribution on the territory of the USSR. *Lithology and Minerals*. 1965;(5):31-43. (In Russ.).
2. Odintsov M.M. *Jurassic continental deposits of the southern Siberian platform*. Moscow: Science; 1967. 321 p. (In Russ.).
3. Kirichkova A.I., Nosova N.V., Kostina E.I., Yaroshenko O.P. *The continental Jurassic of the Irkutsk coal-bearing basin*. St. Petersburg: All-Russian Petroleum Scientific Research Geological Exploration Institute; 2020. 288 p. (In Russ.).
4. Timofeev P.P. *The Jurassic coal-bearing formation of Southern Siberia and the conditions of its formation*. Moscow: Science; 1970. 207 p. (In Russ.).
5. Kotik O.S., Valyaeva O.V. Organic matter and geochemistry of Kungurian-aged coals in the north of the Pre-Ural regional trough. *Georesources*. 2017;19(2):117-121. (In Russ.). EDN: Y2BIDX. <https://doi.org/10.18599/grs.19.2.5>
6. Zdravkov A., Kortenski J. Maceral composition and depositional environment of the coals from Beli Breg basin, Bulgaria. *Review of the Bulgarian Geol. Sci*. 2004;65:157-166.
7. Suwarna N. Permian Mengkarang coal facies and environment, based on organic petrology study. *J. Geol. Indonesia*. 2006;1(1):1-8. <https://doi.org/10.17014/ijog.1.1.1-8>
8. Bechtel A., Gruber W., Sachsenhofer R.F., Gratzner R., Lucke A., Puttmann W. Depositional environment of the Late Miocene Hausruck lignite (Alpine Foreland Basin); insights from petrography, organic geochemistry and stable carbon isotopes. *Int. J. Coal Geol.* 2003;53:153-180. [https://doi.org/10.1016/S0166-5162\(02\)00194-5](https://doi.org/10.1016/S0166-5162(02)00194-5)
9. Singh P.K., Singh G.P., Singh M.P., Naik A.S. The petrology of coals from the rampur seam-IV and the Lajkura seam, Ib River Coalfield, Mahanadi Valley, Orissa, India. *Energy Sour, Part A: Recov. Util Environ Eff*. 2013;35:1681-1690.
10. Jumayan N.R., Shumilova T.G., Svetov S.A. Impurity elements in the coals of the Mugunskoye deposit (Irkutsk coal basin). *Chemistry of Solid Fuels*. 2021;(6):59-66. (In Russ.). <https://doi.org/10.31875/50023117721060049>
11. Balmasov N.N., Branchugov V.K., Bykadorov V.S., Golitsyn M.V., Evstrakhin V.A., Ilyin V.I., Kozlovsky E.A., Kraev A.G., Krasavin A.P., Petrov I.F., Tverdokhlebov V.F., Faydov O.E., Cherepovsky V.F. *The mineral resource base of the Russian coal industry: in 2 vols. Vol. 1: State, dynamics, development*. Moscow: Publishing House of the Moscow State Mining University; 1999. 648 p. (In Russ.).
12. Diessel C.F.K. *Coal-Bearing Depositional Systems*. Berlin: Springer Verlag; 1992. 721 p. <https://doi.org/10.1080/15567031003663158>
13. Mukhopadhyay P.K. *Petrography of selected Wilcox and Jackson group lignites from tertiary of Texas. Geology of Gulf Coast Lignites. Geol. Sci of America, Coal Geology Division*. R.B. Finkelman, D.J. Casagrade (eds). Field Trip. 1986:126–145.
14. Singh P. K., Rajak P. K., Singh M. P., Singh V. K., Naik A. S., Singh A.K. Peat swamps at Giral lignite field of Barmer basin, Rajasthan, Western India: understanding the evolution through petrological modelling. *Int. J. Coal Sci Technol*. 2006. Vol. 3. P. 148–164.
15. Kosinsky V.A., Gontsov A.A., Khrustaleva G.K., Chernikov A.B. Comprehensive assessment of the properties of coals for non-traditional use at the stages of prospecting and evaluation work. *National Association of Scientists*. 2021;(72-3):12-17. (In Russ.). <https://doi.org/10.31618/nas.2413-5291.2021.3.72.490>
16. Starokozheva G.I., Pavlova G.G., Efremtseva N.V., Shutov V.I. Evaluation of the efficiency of the development of brown coal deposits with the integrated use of coal. *Mineral Resources of Russia*. 2014;(4):28-35. (In Russ.). EDN: SJJENL.

Информация об авторе

Н.Р. Джумаян – старший преподаватель кафедры физической географии, экологии и охраны природы Института наук о Земле ЮФУ; начальник геологического отдела ГТК.

Information about the author

N.R. Dzhumayan – Senior Lecturer, Department of Physical Geography, Ecology and Environment Protection, Institute of Earth Sciences, SFedU; Head of Geological Department, MGC.

Статья поступила в редакцию 05.12.2024; одобрена после рецензирования 16.01.2025; принята к публикации 23.04.2025.
The article was submitted 05.12.2024; approved after reviewing 16.01.2025; accepted for publication 23.04.2025.

Научная статья

УДК 515.5

<https://doi.org/10.18522/1026-2237-2025-2-63-73>

ОСОБЕННОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ АГРОКЛИМАТИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ УДМУРТСКОЙ РЕСПУБЛИКИ

Денис Александрович Зорин

Удмуртский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук, Ижевск, Россия

zor-d@udman.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9489-708X>

Аннотация. Анализируется динамика основных агроклиматических показателей в Удмуртии. Целью работы являлась оценка изменений некоторых показателей климата территории Удмуртской Республики, используемых в практике лесного и сельского хозяйства. Исследование проводилось с использованием широко распространённых общепринятых методов: статистического, расчетно-конструктивного. Установлено, что в последние десятилетия (1961–2020 гг.) на территории Удмуртской Республики произошло повышение среднегодовой температуры приземного слоя воздуха на 1,4 °С, среднегодовой температуры теплого периода (апрель – октябрь) – на 1,0 °С и холодного периода (ноябрь – март) – на 2,6 °С. Доля в повышении среднесуточной среднегодовой температуры приземного слоя воздуха холодного и теплых периодов составила 69 и 31 % соответственно. Выявлено увеличение продолжительности периодов с температурой воздуха выше 0, 5, 10 и 15 °С на 9, 10, 6 и 11 дней соответственно (1971–2020 гг.). Сумма среднесуточных положительных температур воздуха за период выше 0 °С увеличилась на 223,1 °С, за период выше 5 °С – на 239,5 °С, за период выше 10 °С – на 209,9 °С, за период выше 15 °С – на 262,8 °С в среднем по Удмуртии. Отмечено увеличение продолжительности безморозного периода на 7 дней. Выявлено увеличение количества выпавших осадков за исследуемый период (1971–2020 гг.) на 30 мм. Анализ динамики площадей лесообразующих пород выявил снижение площади насаждений пихты сибирской и увеличение площади липы мелколистной.

Ключевые слова: агроклиматические ресурсы, изменение климата, суммы положительных температур, сумма осадков, период вегетации, заморозки, Удмуртия

Для цитирования: Зорин Д.А. Особенности изменения агроклиматических показателей Удмуртской Республики // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2025. № 2. С. 63–73. <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2025-2-63-73>

Благодарности: работа выполнена по государственному заданию FUUE-2024-0012.

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

Original article

FEATURES OF CHANGES IN AGROCLIMATIC INDICATORS OF THE UDMURT REPUBLIC

Denis A. Zorin

Udmurt Federal Research Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Izhevsk, Russia
zor-d@udman.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9489-708X>

© Зорин Д.А., 2025

Abstract. The study is devoted to the analysis of the dynamics of the main agroclimatic indicators in Udmurtia. The aim of the work was to assess changes in some climate indicators of the territory of the Udmurt Republic used in forestry and agriculture. The studies were carried out using widespread generally accepted methods: statistical, computational and constructive. It was found that in recent decades (1961-2020) in the Udmurt Republic there was an increase in the average annual surface air temperature by 1.4 °C, the average annual temperature of the warm period (April-October) by 1.0 °C and the cold period (November-March) by 2.6 °C. The share in the increase in the average long-term average annual surface air temperature of the cold and warm periods was 69 and 31 %, respectively. An increase in the duration of periods with air temperatures above 0, 5, 10 and 15 °C by 9, 10, 6 and 11 days, respectively (1971-2020) was revealed. The sum of average daily positive air temperatures for the period above 0 °C increased by 223.1 °C, for the period above 5 °C – by 239.5 °C, for the period above 10 °C – by 209.9 °C, for the period above 15 °C – by 262.8 °C on average in Udmurtia. An increase in the duration of the frost-free period by 7 days was noted. An increase in the amount of precipitation over the study period (1971-2020) by 30 mm was revealed. An analysis of the dynamics of the areas of forest-forming species revealed a decrease in the area of Siberian fir plantations and an increase in the area of small-leaved linden.

Keywords: agroclimatic resources, climate change, positive temperature sums, precipitation sums, vegetation period, frosts, Udmurtia

For citation: Zorin D.A. Features of Changes in Agroclimatic Indicators of the Udmurt Republic. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2025;(2):63-73. (In Russ.). <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2025-2-63-73>

Acknowledgments: the work was carried out according to state assignment FUUE-2024-0012.

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 очевидным фактом, фиксируемым многочисленными метеорологическими станциями, является возрастающая интенсивность и скорость изменения климата планеты в сторону увеличения глобальной температуры в приземном слое атмосферы, что наряду с другими мировыми проблемами становится важнейшим вызовом цивилизации. На территории нашей страны в XX в. среднегодовая температура приземного слоя атмосфера увеличилась на $0,6 \pm 0,2$ °C [1, 2]. Ученые отмечают, что наиболее активные изменения происходят в Северном полушарии, в частности в Российской Федерации. Анализ данных выявил увеличение температуры в России на 0,76 °C, что больше среднемировых значений. Зафиксированные климатические изменения на уровне регионов РФ и их частей имеют общую тенденцию [3–6]. В северной части Удмуртской Республики за последние 50 лет произошло увеличение среднегодовой температуры воздуха на 0,7 °C (теплого периода – на 0,5 °C, холодного – на 1,0 °C), отмечен также соответствующий рост суммы температур, особенно выше 15 °C, и продолжительности теплого периода (выше 0 °C) [7].

Происходящие и вероятные в будущем климатические изменения, приводящие к трансформации биосферы и социума, вызывают необходимость в своевременной научно обоснованной и выверенной реакции сельскохозяйственного производства и лесного хозяйства. По мнению ряда исследователей, изменения температуры, помимо отрицательных (гибель растений, распространение новых сорных растений, инвазии вредителей и болезней), влекут за собой некоторые позитивные последствия: например, в районах с недостаточным тепловым обеспечением увеличивается урожайность традиционных сельскохозяйственных культур, в ближайшей перспективе открывается возможность интродукции и дополнительного введения в культуру новых плодовых, ягодных, декоративных и технических растений и лесных пород [8–13]. В связи с этим необходим анализ произошедших климатических изменений и прогноз будущих с привязкой к сельскому и лесному хозяйству, для предотвращения потерь и обеспечения растущего спроса населения в продуктах данных отраслей народного хозяйства.

Цель работы – оценка изменений некоторых показателей климата территории Удмуртской Республики, используемых в практике лесного и сельского хозяйства.

Материалы и методы

Место проведения исследований – Удмуртская Республика. Объектом служили данные, находящиеся в открытом доступе в Интернете, трех метеорологических станций: городов Глазова, Ижевска и Сарапула, расположенных равномерно по территории изучаемого региона.

При постановке и проведении исследований применялись общепринятые и подробно описанные в научной литературе методы исследований: статистический и расчетный. Проанализированы изменения следующих агроклиматических показателей: среднеегодовой температуры, среднееголетней температуры теплого и холодного периодов, продолжительности периодов с температурой выше 0, +5, +10, 15 °С и суммы температур за данные интервалы, дат последних и первых заморозков и продолжительности сезона между ними, количества выпавших осадков. При этом использовались усреднённые данные за десятилетие.

Динамика площадей насаждений пихты сибирской и липы мелколистной изучалась на основании лесоустроительной документации и лесных планов региона.

Результаты и обсуждение

Изучение архивных данных по температуре воздуха в г. Ижевске выявило увеличение среднегодовой и средней температуры теплого и холодного периодов (рис. 1–3).

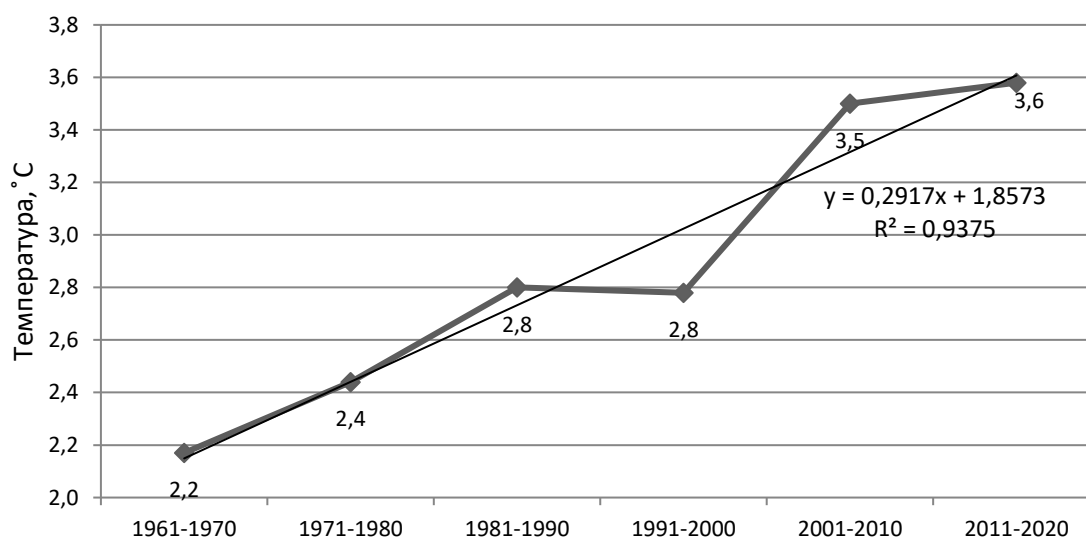


Рис. 1. Среднегодовая температура воздуха за период 1961–2020 гг.
/ Fig. 1. Average annual air temperature for the period 1961–2020

За исследуемое время (1961–2020 гг.) средняя годовая температура приземного слоя атмосферы в среднем по десятилетиям возросла на 0,2–1,6 °С по сравнению с контрольным периодом (табл. 1) [14]. Среднееголетняя среднегодовая температура контрольного периода взята по данным Вавожской метеостанции ввиду отсутствия данных по Ижевской [15]. Среднегодовая температура воздуха в 2011–2020 гг. составила +3,6 °С, что на 1,6 °С выше значений 1891–1935 гг. и на 1,4 °С выше по сравнению с началом изучаемого отрезка (1961–1970 гг.).

В рассматриваемый отрезок времени (1961–2020 гг.) среднегодовая температура периода с температурой выше 0 °С (апрель – октябрь) в среднем по десятилетиям повысилась на 0,1–1,1 °С по сравнению с контрольным отрезком (1891–1935 гг.). Выявлено, что 2011–2020 гг. были наиболее теплыми. Среднегодовая температура периода $t > 0$ °С составила 12,1 °С, что на 1,1 и 1,0 °С выше среднееголетних значений за 1891–1935 и 1961–1970 гг. соответственно (табл. 1, рис. 2).

Среднегодовая температура воздуха периода $t < 0$ °С (ноябрь – март) по десятилетиям повысилась на 0,1–2,7 °С по сравнению со среднееголетними данными контрольного периода. Наиболее значительное увеличение отмечено в 2011–2020 гг. и составило -7,8 °С, что на 2,7 и 2,6 °С выше среднееголетних данных за 1891–1935 и 1961–1970 гг. (табл. 1, рис. 3).

Таблица 1 / Table 1

Среднегодовая температура (по данным метеостанции г. Ижевска), °С
/ Average annual temperature (according to the Izhevsk weather station), °С

Период наблюдения	Год		Теплый период		Холодный период	
	°С	± к контролю	°С	± к контролю	°С	± к контролю
Среднегодовое 1891–1935 гг. (контроль)	2,0	–	11,0	–	–10,5	–
1961–1970 гг.	2,2	0,2	11,1	0,1	–10,4	0,1
1971–1980 гг.	2,4	0,4	11,0	0	–9,5	1,0
1981–1990 гг.	2,8	0,8	11,4	0,4	–9,3	1,2
1991–2000 гг.	2,8	0,8	11,4	0,4	–9,3	1,2
2001–2010 гг.	3,5	1,5	11,8	0,8	–8,3	2,2
2011–2020 гг.	3,6	1,6	12,1	1,1	–7,8	2,7
Среднее 1961–2020 гг.	2,7	0,9	11,3	0,5	–9,4	1,1

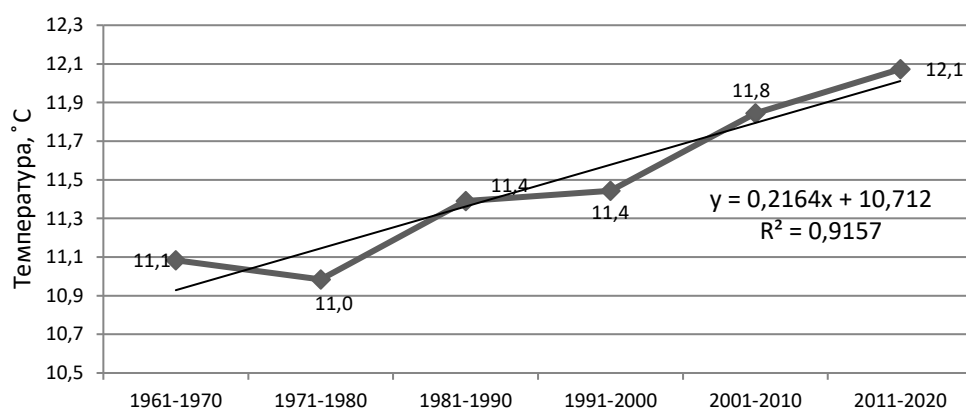


Рис. 2. Изменение средней температуры в теплый период 1961–2020 гг.
 / Fig. 2. Change in average temperature during the warm period, 1961–2020

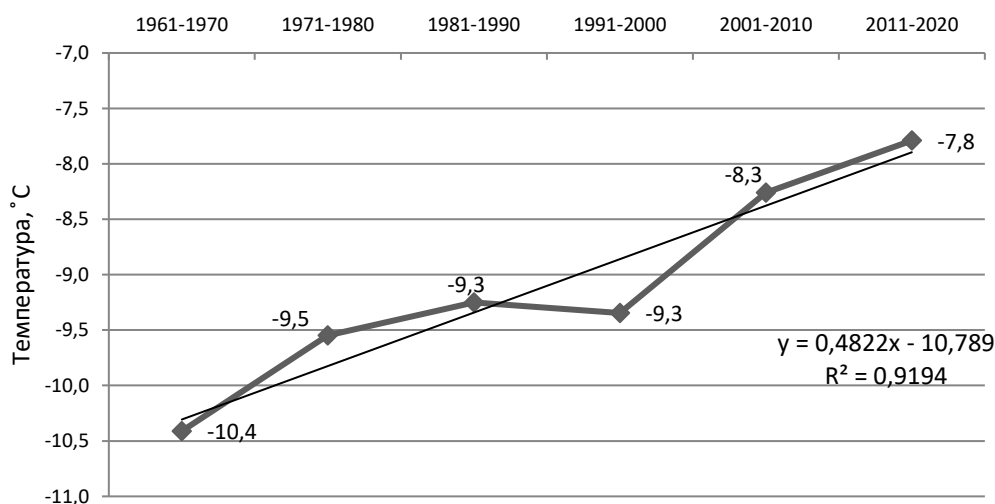


Рис. 3. Изменение средней температуры в холодный период 1961–2020 гг.
 / Fig. 3. Change in average temperature during the cold period, 1961–2020

Таким образом, анализ агроклиматических условий показал, что на повышение среднегодовой температуры приземного слоя воздуха наибольшее влияние оказал рост температур холодного периода года. Доля вклада теплого и холодного периодов в повышение среднегодовой температуры приземного слоя атмосферы составила 31 и 69 % соответственно.

Анализ данных среднесуточных устойчивых переходов температуры через 0 °С показал увеличение этого периода на 9 дней в среднем по Удмуртской Республике – с 202 (1971–1980 гг.) до 211 дней (2011–2020 гг.). Наиболее активное увеличение происходило на юге республики и составило 15 дней (по данным Сарапульской метеостанции) (рис. 4).

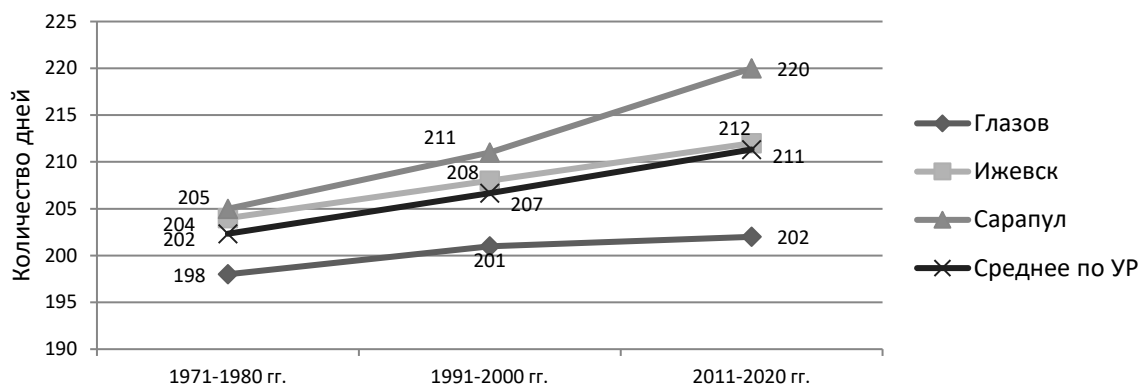


Рис. 4. Количество дней с температурой выше 0 °С / Fig. 4. Number of days with temperatures above 0 °С

Сумма положительных среднесуточных температур воздуха выше 0 °С в 1971–2020 гг. увеличилась в среднем на 223 °С (рис. 5). Наиболее значительный рост отмечен на юге и составил 275,7 °С, в северной части – менее значительный – 193,9 °С (по данным Глазовской метеостанции).

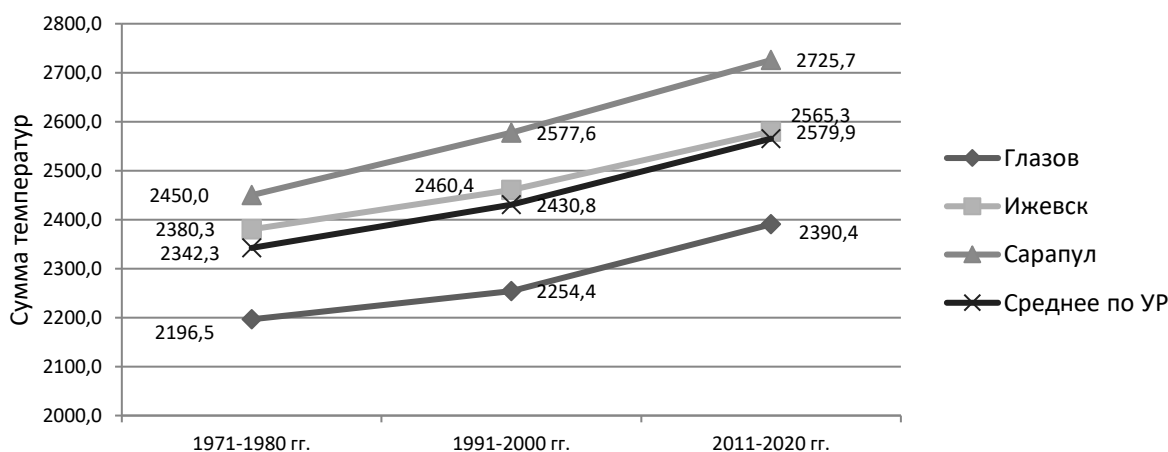


Рис. 5. Сумма температур за период с температурой выше 0 °С / Fig. 5. Sum of temperatures for the period with temperature above 0 °С

Исследование показало, что возросла продолжительность вегетационного периода в среднем на 10 дней по Удмуртии – со 166 (1971–1980 гг.) до 177 дней (2001–2020 гг.) (рис. 6). Сумма положительных среднесуточных температур воздуха выше 5 °С увеличилась в среднем на 239,5 °С (рис. 7) – от 193,4 (г. Глазов) до 289,3 °С (г. Сарапул).

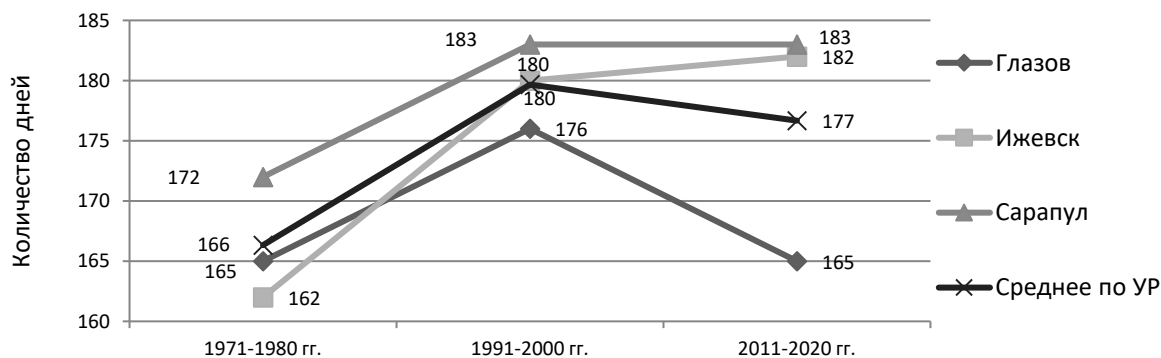


Рис. 6. Количество дней с температурой выше 5 °С / Fig. 6. Number of days with temperature above 5 °С

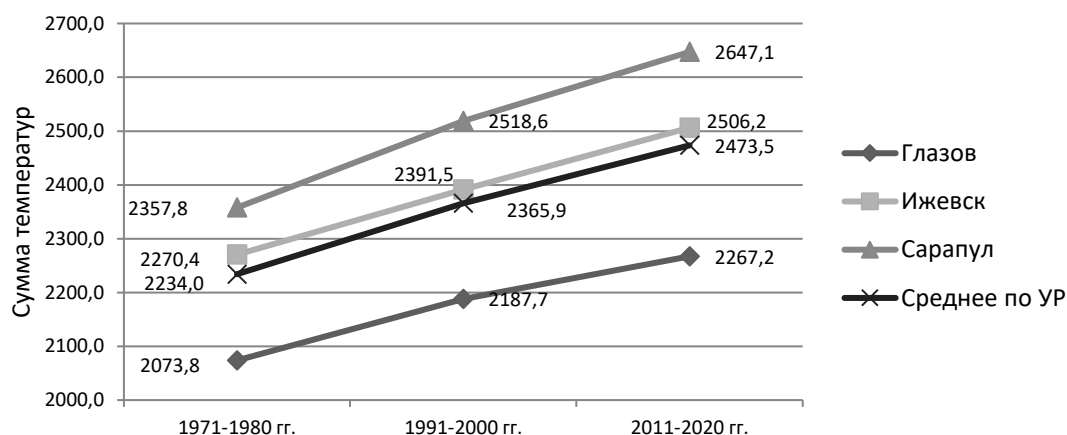


Рис. 7. Сумма температур за период с температурой выше +5 °C
 / Fig. 7. Sum of temperatures for the period with temperature above +5 °C

С переходом температуры воздуха через 10 °C начинается активная вегетация растений. Продолжительность периода активной вегетации растений увеличилась в среднем на 6 дней (рис. 8). Причем на севере отмечено снижение продолжительности этого периода на 2 дня, в центральной и южной части увеличение составило 9 и 10 дней соответственно. Сумма положительных среднесуточных температур данного периода (рис. 9) в среднем увеличилась на 209,9 °C и составила 2037,7 °C на севере Удмуртии и 2389,5 °C на юге.

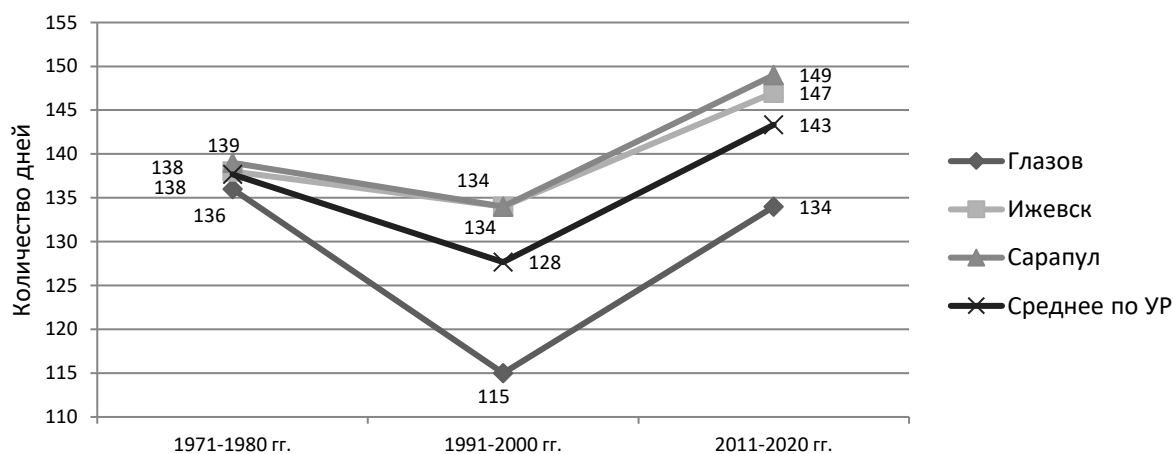


Рис. 8. Количество дней с температурой выше 10 °C / Fig. 8. Number of days with temperature above 10 °C

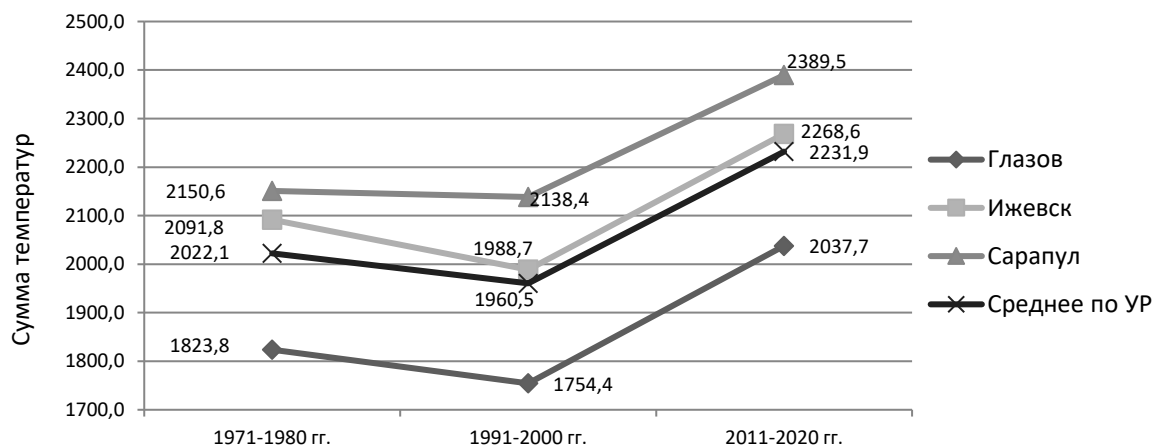


Рис. 9. Сумма температур за период с температурой выше 10 °C
 / Fig. 9. Sum of temperatures for the period with a temperature above 10 °C

Переход средней суточной температуры воздуха через +15 °С характеризует наиболее теплую часть лета. Продолжительность данного периода увеличилась в среднем по Удмуртии на 11 дней (рис. 10) – с 71 (1971–1980 гг.) до 82 дней (2011–2020 гг.). Сумма среднесуточных температур выше 15 °С выросла на 262,8–239,2 °С (г. Глазов), 295,8 °С (г. Ижевск) и составила в среднем 1414,9 °С (рис. 11).

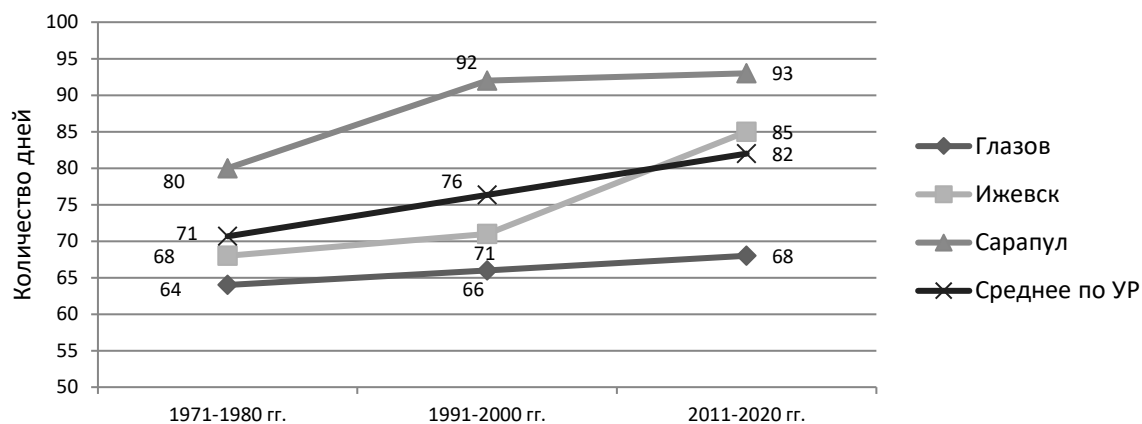


Рис. 10. Количество дней с температурой выше 15 °С / Fig. 10. Number of days with temperature above 15 °С

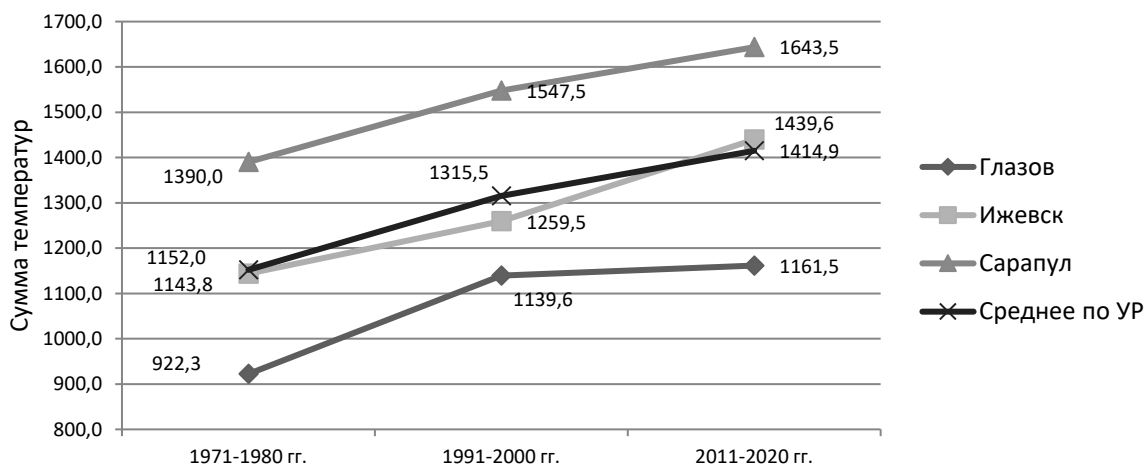


Рис. 11. Сумма температур за период с температурой выше 15 °С / Fig. 11. Sum of temperatures for the period with a temperature above 15 °С

По результатам анализа также выявлен сдвиг средних дат последних и первых заморозков на более ранние и более поздние сроки соответственно и увеличение отрезка времени между ними (безморозный период). Рост продолжительности данного периода в среднем составил 7 дней (табл. 2, рис. 12). Наибольшее увеличение безморозного периода на 20 дней отмечено на юге Удмуртии (г. Сарапул).

Таблица 2 / Table 2

Даты первых и последних заморозков / Dates of first and last frosts

Станция	1961–1970 гг.		1981–1990 гг.		2011–2020 гг.	
	Весенние заморозки	Осенние заморозки	Весенние заморозки	Осенние заморозки	Весенние заморозки	Осенние заморозки
Глазов	–	–	21.05	10.09	22.05	15.09
Ижевск	17.05	21.09	16.05	20.09	11.05	29.09
Сарапул	18.05	22.09	12.05	29.09	07.05	01.10
Казань	02.05	30.09	04.05	05.10	20.04	13.10

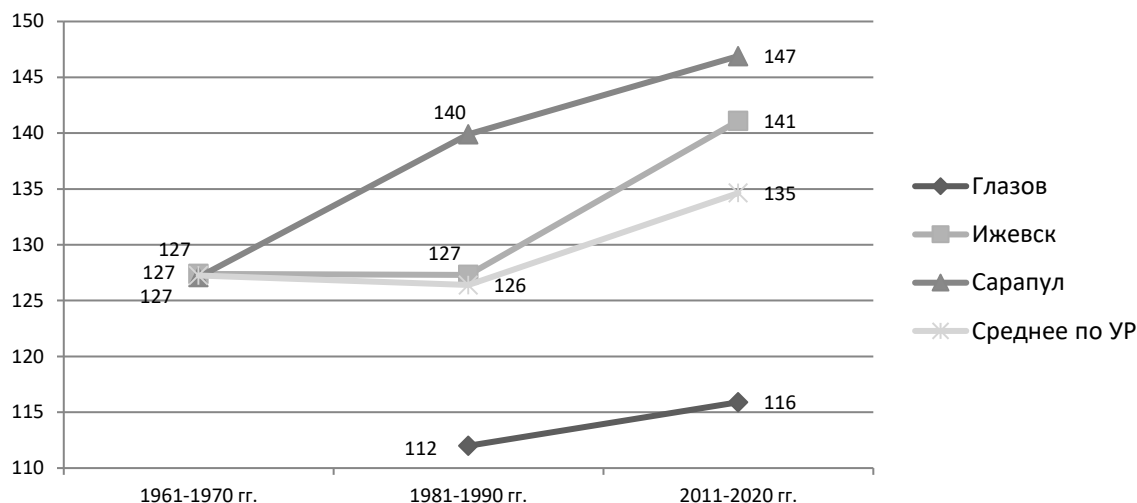


Рис. 12. Продолжительность безморозного периода / Fig. 12. Duration of frost-free period

Анализ среднемноголетнего среднегодового количества выпавших осадков по десятилетиям показал, что за период исследования (1971–2020 гг.) их количество увеличилось в среднем на 30 мм и составило 298 мм (рис. 13). Отмечается наибольшее увеличение количества выпавших осадков в центральной (г. Ижевск) и южной (г. Сарапул) частях Удмуртской Республики – на 41 и 33 мм соответственно.

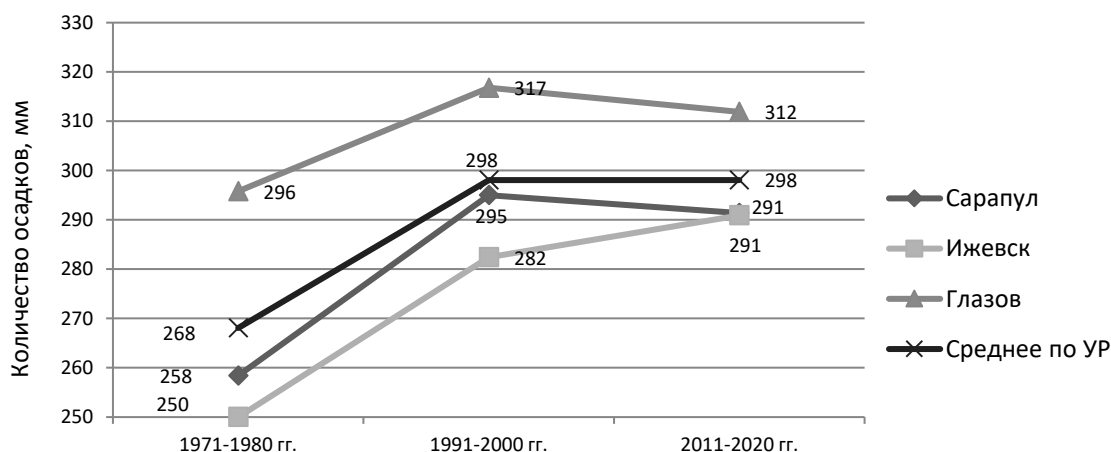


Рис. 13. Количество осадков за май – сентябрь, мм / Fig. 13. Amount of precipitation in May-September, mm

Выявленные закономерности климатических изменений необходимо учитывать при ведении сельского и лесного хозяйства. Анализ влияния этих изменений на устойчивость и продуктивность сельскохозяйственных культур на значительном промежутке времени затруднителен в силу изменения ассортимента сортов и технологий выращивания. Несмотря на данный факт, был проведен ряд исследований по влиянию воздействия агроклиматических показателей на зерновые культуры в ряде районов Удмуртской Республики [7–11].

Изменение климата сказывается на состоянии и породном составе древесных насаждений [16], границе лесорастительных зон [17]. Наиболее четко эти изменения видны на границах ареалов лесообразующих пород. Исследование площади насаждений пихты сибирской (рис. 14) и липы мелколистной (рис. 15) по данным, представленным в лесоустроительной документации Удмуртии [18, 19], выявило снижение площади пихтарников и увеличение липняков в 1981–2020 гг., коэффициент корреляции со среднегодовой температурой составил -0,78 и 0,68 соответственно.

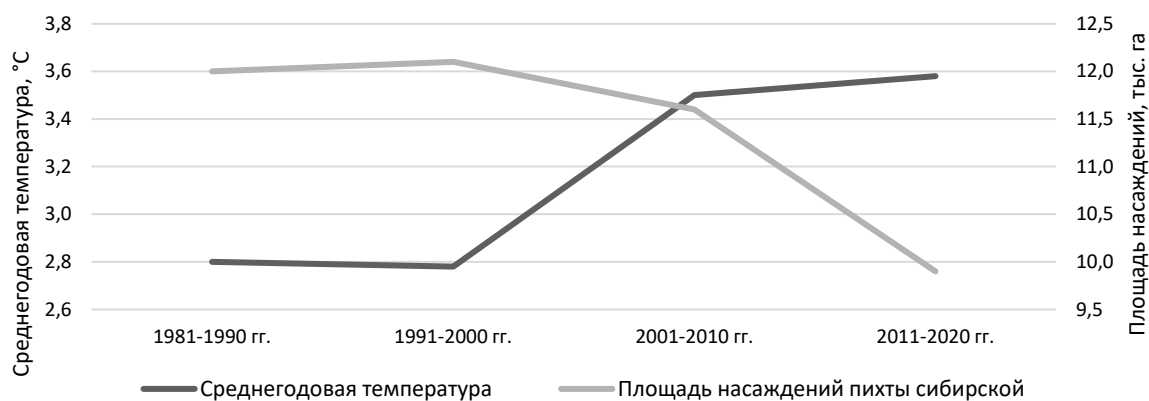


Рис. 14. Динамика площади насаждений пихты сибирской, 1981–2020 гг.
 / Fig. 14. Dynamics of the area of Siberian fir plantations, 1981-2020

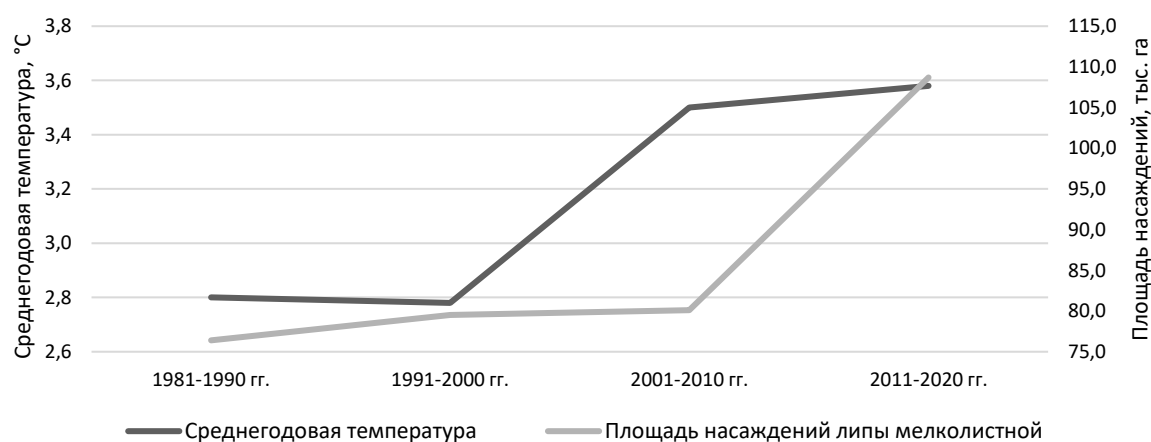


Рис. 15. Динамика площади насаждений липы мелколистной, 1981–2020 гг.
 / Fig. 15. Dynamics of the area of small-leaved linden plantations, 1981-2020.

Заключение

1. Установлено, что в последние десятилетия (1961–2020 гг.) на территории Удмуртской Республики произошло повышение среднегодовой температуры приземного слоя воздуха на 1,4 °C, температуры теплого периода (апрель – октябрь) – на 1,0 °C и холодного периода (ноябрь–март) – на 2,6 °C. Их вклад в повышение годовой температуры составил 69 и 31 % соответственно.
2. Выявлено увеличение продолжительности периодов с температурой воздуха выше 0, 5, 10 и 15 °C на 9, 10, 6 и 11 дней соответственно (1971–2020 гг.). Сумма среднесуточных положительных температур воздуха за период выше 0 °C увеличилась на 223,1 °C, за период выше 5 °C – на 239,5 °C, за период выше 10 °C – на 209,9 °C, за период выше 15 °C – на 262,8 °C в среднем по Удмуртии.
3. Отмечено увеличение продолжительности безморозного периода на 7 дней.
4. Выявлено увеличение количества выпавших осадков за исследуемый период (1971–2020 гг.) на 30 мм.
5. Анализ данных динамики площадей насаждений показал уменьшение площади, занятой пихтой сибирской, и увеличение площади насаждений липняков.

Список источников

1. Груза Г.В., Ранькова Э.А. Колебания и изменения климата на территории России // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2003. Т. 39, № 2. С. 166–185. EDN: OOCICT.
2. Вильфанд Р.М., Страшная А.И., Береза О.В. О динамике агроклиматических показателей условий сева, зимовки и формирования урожая основных зерновых культур // Тр. Гидрометеорол. науч.-исслед. центра Российской Федерации. 2016. № 360. С. 45–78. EDN: WFGWQN.

3. Авдеев С.М., Лазарев Н.Н. Динамика агроклиматических показателей Пермского края в условиях изменения климата // Кормопроизводство. 2021. № 3. С. 9–15. EDN: NZRCSY.
4. Камалова Р.Г., Козлова А.С., Фирстов А.О. Современные изменения агроклиматических ресурсов в природно-сельскохозяйственных зонах Республики Башкортостан в теплый период // Вестн. Удмуртского ун-та. Серия: Биология. Науки о Земле. 2023. Т. 33, № 4. С. 434–444. EDN: LCLTRM. <https://doi.org/10.35634/2412-9518-2023-33-4-434-444>
5. Переведенцев Ю.П., Павлова В.Н., Парубова Е.М., Мирсаева Н.А., Николаев А.А., Шанталинский К.М. Современные тенденции изменения агроклиматических ресурсов на территории Приволжского федерального округа // Фундамент. и прикл. климатология. 2022. Т. 8, № 4. С. 477–501. EDN: TTSVWO. <https://doi.org/10.21513/2410-8758-2022-4-477-501>
6. Переведенцев Ю.П., Шарипова Р.Б. Изменение основных климатических показателей на территории Ульяновской области // Вестн. Удмуртского ун-та. Серия: Биология. Науки о Земле. 2012. Вып. 1. С. 136–144. EDN: PAGNQT.
7. Дмитриев А.В. Региональные изменения климатических показателей на примере северного агроклиматического района Удмуртской Республики // Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2013. № 5(36). С. 10–14. EDN: RBDUBR.
8. Дмитриев А.В., Леднев А.В. Закономерности изменения агроклиматических показателей за период с 1959 по 2008 год на территории Удмуртской Республики и их влияние на урожайность основных сельскохозяйственных культур. Ижевск: Ижевская ГСХА, 2015. 164 с. EDN: WXJOL.
9. Елисеев И.П., Елисеева Л.В., Степанов А.В. Динамика продуктивности ячменя и стоимости зерна в зависимости от погодных условий в Чувашской Республике // Вестн. Чувашской ГСХА. 2020. № 2. С. 13–20. EDN: P1OPVX. <https://doi.org/10.17022/853m-jp34>
10. Ленточкин А.М., Бабайцева Т.А. Глобальное потепление и изменение условий ведения растениеводства в Среднем Предуралье // Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2021. Т. 22, № 6. С. 826–834. EDN: VWIIZQ. <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2021.22.6.826-834>
11. Макаров В.И. Агроклиматические ресурсы Удмуртии и их связь с урожайностью зерновых культур (на примере Ижевской ГМС) // Вестн. Удмуртского ун-та. Серия: Биология. Науки о Земле. 2016. Т. 26, вып. 3. С. 112–121. EDN: WMQOFP.
12. Переведенцев Ю.П., Шарипова Р.Б., Важнова Н.А. Агроклиматические ресурсы Ульяновской области и их влияние на урожайность зерновых культур // Вестн. Удмуртского ун-та. Серия: Биология. Науки о Земле. 2012. Вып. 2. С. 120–126. EDN: PAENXT.
13. Зорин Д.А. Интродукция *Vaccinium angustifolium* Ait. в Удмуртии // Изв. ТСХА. 2022. Вып. 4. С. 26–32. EDN: VVJIYN. <https://doi.org/10.26897/0021-342X-2022-4-26-32>
14. Зорин Д.А., Федоров А.В. Опыт возделывания *Ipotoea batatas* (L.) Lam. в условиях ограниченных тепловых ресурсов // Пермский аграр. вестн. 2022. № 1. С. 31–38. EDN: DGWUMO. https://doi.org/10.47737/2307-2873_2022_37_31
15. Агроклиматический справочник по Удмуртской АССР. Л.: Гидрометеиздат, 1961. 119 с.
16. Харук В.И., Шушпанов А.С., Петров И.А., Демидко Д.А., Им С.Т., Кнорре А.А. Усыхание *Abies sibirica* Ledeb. в горных лесах Восточного Саяна // Сиб. экол. журн. 2019. № 4. С. 369–382. EDN: YINUGD. <https://doi.org/10.15372/SEJ20190401>
17. Сергиенко В.Г. Динамика границ лесорастительных зон России в условиях изменения климата // Тр. Санкт-Петербургского НИИ лесного хозяйства. 2015. № 1. С. 5–19. EDN: TKVBZN.
18. Об утверждении Лесного плана Удмуртской Республики: указ Президента Удмуртской Республики от 15 декабря 2008 г. № 197. URL: <https://docs.cntd.ru/document/960017238> (дата обращения: 15.10.2024).
19. Об утверждении Лесного плана Удмуртской Республики: указ Главы Удмуртской Республики от 18 февраля 2019 г. № 17. URL: <https://docs.cntd.ru/document/553160573> (дата обращения: 15.10.2024).

References

1. Gruza G.V., Rankova E.Ya. Climate oscillations and changes over Russia. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2003;39(2):145-162. EDN: LIEJYN.
2. Vilfand R.M., Strashnaya A.I., Bereza O.V. About the dynamics of agroclimatic indicators of sowing conditions, wintering and yield formation of major grain crops. *Proceedings of the Hydrometeorological Research Center of the Russian Federation*. 2016;(360):45-78. (In Russ.). EDN: WFGWQN.
3. Avdeev S.M., Lazarev N.N. Dynamics of agroclimatic indicators of the Perm Territory in the context of climate change. *Fodder Production*. 2021;(3):9-15. (In Russ.). EDN: NZRCSY.
4. Kamalova R.G., Kozlova A.S., Firstov A.O. Modern changes in agroclimatic resources in natural agricultural zones of the Republic of Bashkortostan during the warm period. *Bulletin of Udmurt University. Series Biology. Earth Sciences*. 2023;33(4):434-444. (In Russ.). EDN: LCLTRM. <https://doi.org/10.35634/2412-9518-2023-33-4-434-444>
5. Perevedentsev Yu.P., Pavlova V.N., Parubova E.M., Mirsaeva N.A., Nikolaev A.A., Shantalinsky K.M. Current trends in changes in agroclimatic resources on the territory of the Volga Federal District. *Fundamental*

and Applied Climatology. 2022;8(4):477-501. (In Russ.). EDN: TTSVWO. <https://doi.org/10.21513/2410-8758-2022-4-477-501>

6. Perevedentsev Yu.P., Sharipova R.B. Changes in the main climatic indicators in the Ulyanovsk region. *Bulletin of Udmurt University. Series Biology. Earth Sciences*. 2012;(1):136-144. (In Russ.). EDN: PAGNQT.

7. Dmitriev A.V. Regional changes in climatic indicators on the example of the northern agroclimatic region of the Udmurt Republic. *Agricultural Science Euro-North-East*. 2013;5(36):10-14. (In Russ.). EDN: RBDUBR.

8. Dmitriev A.V., Lednev A.V. *Patterns of change in agroclimatic indicators for the period from 1959 to 2008 in the Udmurt Republic and their impact on the yield of major agricultural crops*. Izhevsk: Izhevsk State Agricultural Academy; 2015. 164 p. (In Russ.). EDN: WXJOWL.

9. Eliseev I.P., Eliseeva L.V., Stepanov A.V. Dynamics of barley productivity and grain cost depending on weather conditions in the Chuvash Republic. *Bulletin of the Chuvash State Agricultural Academy*. 2020;(2):13-20. (In Russ.). EDN: PIOPVX. <https://doi.org/10.17022/853m-jp34>

10. Lentochkin A.M., Babaitseva T.A. Global warming and changing conditions for crop production in the Middle Urals. *Agricultural Science Euro-North-East*. 2021;22(6):826-834. (In Russ.). EDN: VWIIZQ. <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2021.22.6.826-834>

11. Makarov V.I. Agroclimatic resources of Udmurtia and their relationship with the yield of grain crops (on the example of Izhevsk HMS). *Bulletin of Udmurt University. Series Biology. Earth Sciences*. 2016;26(3):112-121. (In Russ.). EDN: WMQOFP.

12. Perevedentsev Yu.P., Sharipova R.B., Vazhnova N.A. Agroclimatic resources of the Ulyanovsk region and their influence on the yield of grain crops. *Bulletin of Udmurt University. Series Biology. Earth Sciences*. 2012;(2):130-126. (In Russ.). EDN: PAENXT.

13. Zorin D.A. Introduction of *Vaccinium angustifolium* Ait. in Udmurtia. *Izvestiya of Timiryazev Agricultural Academy*. 2022;(4):26-32. (In Russ.). EDN: VVJYH. <https://doi.org/10.26897/0021-342X-2022-4-26-32>

14. Zorin D.A., Fedorov A.V. Cultivation experience of *Ipomoea batatas* (L.) Lam. in conditions of limited thermal resources. *Perm Agrarian Journal*. 2022;(1):31-38. (In Russ.). EDN: DGWUMO. https://doi.org/10.47737/2307-2873_2022_37_31

15. *Agroclimatic reference book for the Udmurt ASSR*. Leningrad: Hydrometeorological Publishing; 1961. 119 p. (In Russ.).

16. Kharuk V.I., Shushpanov A.S., Petrov I.A., Demidko D.A., Im S.T., Knorre A.A. Fir (*Abies sibirica* Ledeb.) mortality in mountain forests of the Eastern Sayan Ridge, Siberia. *Contemporary Problems of Ecology*. 2019;12(4):299-309. EDN: RROCIB. <https://doi.org/10.1134/S199542551904005X>

17. Sergienko V.G. Dynamics of the boundaries of forest vegetation zones of Russia in the context of climate change. *Proceedings of the Saint Petersburg Forestry Research Institute*. 2015;(1):5-19. (In Russ.). EDN: TKVBZN.

18. *On approval of the Forest Plan of the Udmurt Republic*: Decree of the President of the Udmurt Republic at December 15, 2008 No. 197. Available from: <https://docs.cntd.ru/document/960017238> [Accessed 15th October 2024]. (In Russ.).

19. *On approval of the Forest Plan of the Udmurt Republic*: Decree of the President of the Udmurt Republic at February 18, 2019 No. 17. Available from: <https://docs.cntd.ru/document/553160573> [Accessed 15th October 2024]. (In Russ.).

Информация об авторе

Д.А. Зорин – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник отдела интродукции и акклиматизации растений УФИЦ УрО РАН.

Information about the authors

D.A. Zorin – Candidate of Science (Biology), Senior Researcher, Department of Plant Introduction and Acclimatization, UFRC UB RAS.

Статья поступила в редакцию 08.11.2024; одобрена после рецензирования 12.02.2025; принята к публикации 23.04.2025.
The article was submitted 08.11.2024; approved after reviewing 12.02.2025; accepted for publication 23.04.2025.

Научная статья
УДК 504.453+504.4.054
<https://doi.org/10.18522/1026-2237-2025-2-74-82>

РЕГИОНАЛЬНЫЕ ОСОБЕННОСТИ СЕЗОННОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ ИОННОГО СТОКА В БАССЕЙНЕ РЕКИ КУБАНИ

Роман Сергеевич Комаров

Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, Россия

Гидрохимический институт, Ростов-на-Дону, Россия

KomarovRoman128@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7151-0126>

Аннотация. Рассмотрены региональные особенности сезонной изменчивости ионного стока в бассейне реки Кубани за период 1990–2020 гг. в условиях климатических изменений и антропогенного воздействия. Исследование проведено на основе многолетних гидрохимических и гидрологических данных государственной наблюдательной сети Росгидромета. Статистически значимые тенденции ионного стока определялись с помощью коэффициента ранговой корреляции Кендалла. Для выделения контрастных периодов ионного стока использовался метод нормализованных разностно-интегральных кривых. Оценка различий между выделенными периодами проводилась с помощью непараметрического критерия Манна – Уитни. Показано, что в бассейне р. Кубани внутригодовая изменчивость ионного стока определяется водным стоком рек. Анализ многолетней динамики ионного стока позволил выделить контрастные периоды стока веществ. На участках рук. Протока – г. Славянск-на-Кубани, рук. Протока – х. Слободка, р. Пишиш – г. Хадыженск, р. Псекупс – г. Горячий Ключ происходило статистически значимое снижение ионного стока. Рассчитанные для выделенных периодов сезонные значения ионного стока позволили проследить его изменения при смене контрастных периодов многолетней динамики. Показано, что направленность сезонных колебаний ионного стока соответствовала многолетней изменчивости – на участках происходило снижение стока веществ во все сезоны года.

Ключевые слова: ионный сток, сезонная изменчивость, река Кубань, притоки реки Кубани, дельтовые рукава

Для цитирования: Комаров Р.С. Региональные особенности сезонной изменчивости ионного стока в бассейне реки Кубани // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2025. № 2. С. 74–82. <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2025-2-74-82>

Благодарности: исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-27-00366, <https://rscf.ru/project/24-27-00366/>

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

Original article

REGIONAL FEATURES OF SEASONAL VARIABILITY OF ION FLUX IN THE KUBAN RIVER BASIN

Roman S. Komarov

Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia

Hydrochemical Institute, Rostov-on-Don, Russia

KomarovRoman128@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7151-0126>

© Комаров Р.С., 2025

Abstract. The regional features of seasonal variability of ion flux in the Kuban River basin for the period 1990–2020 in the context of climatic changes and anthropogenic impact are considered. The study was based on long-term hydrochemical and hydrological data of the state observation network of Roshydromet. Statistically significant ion flux trends were determined using the Kendall rank correlation coefficient. The method of normalized difference-integral curves was used to identify contrasting periods of ion flux. Differences between the selected periods were assessed using the non-parametric Mann-Whitney test. It is shown that the intra-annual variability of ion flux in the Kuban River basin is determined by the water runoff of rivers. The analysis of the long-term dynamics of ion flux made it possible to identify contrasting periods of flux of substances. In the sites Protoka - Slavyansk-on-Kuban, Protoka - Slobodka, Pshish - Khadyzhensk, Psekups - Goryachiy Klyuch, there was a statistically significant decrease in ionic flux. The seasonal values of ion flux calculated for the selected periods made it possible to trace its changes during the change of contrasting periods of long-term dynamics. It is shown that the direction of seasonal fluctuations in ion flux corresponded to long-term variability - there was a decrease in the flux of substances in all seasons of the year.

Keywords: ion flux, seasonal variability, Kuban River, tributaries of the Kuban River, delta branches

For citation: Komarov R.S. Regional Features of Seasonal Variability of Ion Flux in the Kuban River Basin. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2025;(2):74–82. (In Russ.). <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2025-2-74-82>

Acknowledgments: the research was carried out at the expense of a grant from the Russian Science Foundation No. 24-27-00366, <https://rscf.ru/project/24-27-00366/>

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

Введение

Изучение многолетней и сезонной изменчивости ионного стока (ИС) рек бассейна Кубани имеет значение в связи с возможным нарушением естественных «солевых циклов», засолением пресных вод [1, 2] и выносом веществ в Азовское море в условиях климатических изменений [3] и антропогенного воздействия.

Сезонная изменчивость ИС р. Кубани преимущественно изучалась в ее нижнем течении и дельтовых рукавах. Внутригодовое распределение ИС впервые было рассчитано О.А. Алекиным после накопления достаточного объема гидрохимической и гидрологической информации в первой половине XX в. Для вычисления использовались данные о химическом составе воды за 1936–1941 гг. в пункте наблюдений х. Тиховский и значения водного стока на гидрологическом посту (г/п) Краснодар. Установлено, что р. Кубань выносила от 83,4 (январь) до 343,3 тыс. т/месяц (июнь) главных ионов [4]. Позже значения были уточнены В.Я. Еременко и др. [5]. Оценка проводилась на основе информации 1940–1950 гг. для пунктов наблюдений г. Краснодар и х. Тиховский. Максимальный ионный сток чаще всего наблюдался весной [5]. В фундаментальной работе [6] показана разница между внутригодовым распределением ионного стока р. Кубани и рек Малый Зеленчук, Большой Зеленчук, Уруп, Курджипс и Адагум, которая обусловлена вертикальной зональностью физико-географических условий [6].

Во второй половине XX в. внимание обращалось на изменения в стоке растворенных веществ вследствие антропогенного воздействия: наблюдалось увеличение антропогенной составляющей [7, 8] и значительное изменение в структуре ИС [9]. Сезонной динамике ИС и его элементов уделялось меньше внимания.

Изменчивость стока растворенных веществ в дельтовых рукавах р. Кубани в отдельные сезоны года (зима, весна, лето, осень) рассмотрена в работе [10]. Показано, что сезонное распределение стока растворенных веществ в пунктах наблюдений рук. Петрушин – г. Темрюк и рук. Протока – х. Сlobodka за период 2008–2018 гг. соответствовало изменению водного стока.

Проведенные ранее исследования свидетельствуют о значительной пространственно-временной неоднородности химического состава и качества воды в конце XX – начале XXI в. [11–16], которая может быть обусловлена климатическими вариациями и хозяйственной деятельностью. Происходящие изменения, несомненно, могут повлиять на химический сток рек бассейна Кубани и на дальнейший вынос веществ в Азовское море.

Вместе с тем рассмотрение сезонной изменчивости ИС представляет особый интерес в связи с особенностями гидрологического режима рек бассейна. В его пределах выделяются водотоки с половодьем и паводками и только с паводками [11]. Как отмечалось О.А. Алекиным и Л.В. Бражниковой, «на крупных реках (в результате руслового регулирования и несовпадения фаз водного режима в отдельных частях бассейна) распределение ИС в году, особенно в нижнем течении, может существенно отличаться от наблюдающегося на притоках» [6, с. 59].

Исходя из этого, цель исследования – проанализировать сезонную изменчивость ИС в пределах бассейна р. Кубани.

Материалы и методы исследования

Исследование проведено на основе многолетних гидрологических и гидрохимических данных, собранных из архивных фондов Росгидромета и автоматизированной информационной системы государственного мониторинга водных объектов [17]. Исходная информация представляет собой ряды данных о расходах воды и концентрациях главных ионов в воде – гидрокарбонатов (HCO_3^-), хлоридов (Cl^-), сульфатов (SO_4^{2-}), ионов кальция (Ca^{2+}), ионов магния (Mg^{2+}), суммы ионов натрия и калия ($\text{Na}^+ + \text{K}^+$) – с 1990 по 2020 г.

На основе этих данных выполнен расчет многолетних и сезонных значений ИС для рек бассейна Кубани. Расчет проводили прямым способом по формуле [18]: $G = \bar{C}_v W$, где G – количество перенесенного вещества за расчетный период, тыс. т/год или тыс. т/месяц; \bar{C}_v – средняя концентрация вещества в рассматриваемом створе реки, рассчитанная по данным взятого для расчета периода, мг/дм³; W – водный сток за заданный расчетный период, км³.

Статистически значимые тренды ИС определялись с помощью коэффициента ранговой корреляции Кендалла и уровня доверительной вероятности, при котором эти коэффициенты могут считаться статистически значимыми (при $p < 0,05$).

На участках рек, где были выявлены статистически значимые изменения ИС, выделялись контрастные временные периоды: фазы повышенных или пониженных величин относительно среднемноголетних значений. Для выделения контрастных периодов ИС использовался метод нормализованных разностно-интегральных кривых. Оценка различий между выделенными периодами проводилась с помощью непараметрического критерия Манна – Уитни (различия считались значимыми при $p < 0,05$).

Обработка данных осуществлялась в MS Excel 2010 и Statistica 13.0.

Результаты работы и их обсуждение

На основе данных государственной наблюдательной сети Росгидромета для пунктов наблюдений в бассейне р. Кубани с достаточным объемом внутригодовой гидрохимической и гидрологической информации рассчитаны значения ИС за период 1990–2020 гг. в отдельные сезоны года: зима, весна, лето, осень. Полученные результаты выражены в тыс. т/месяц и представлены в таблице.

В бассейне р. Кубани водный сток определяет внутригодовую изменчивость ИС. По длине р. Кубани, ее дельтовых рукавов и рек Лабы и Белой наибольшие значения ИС прослеживаются весной и летом. Так же характеризуется распределение водного стока по сезонам на этих водотоках. На весеннее время приходится 26,6–39,9 %, на летнее – 25,0–49,5 % годового водного стока [11].

Для рек Пшиш, Псекупс и Адагум характерны высокие значения водного стока в зимнее время: 42,4; 51,8; 54,7 % годового водного стока соответственно [11]. Это обуславливает наибольшие значения ИС в зимний сезон.

Как показало исследование сезонной изменчивости стока растворенных веществ в дельтовых рукавах р. Кубани [10], даже сток загрязняющих веществ может повторять внутригодовое изменение водного стока. О.А. Алекиным и Л.В. Бражниковой отмечалось, что «из двух величин, непосредственно определяющих размер ИС, – водоносности реки и минерализации ее воды, – изменчивость первой из них в течение года для большинства рек значительно больше, чем изменчивость второй. Поэтому последовательность изменения величин ИС внутри года в общих чертах повторяет ход гидрографа» [6, с. 58].

**Сезонное распределение ИС в бассейне р. Кубани за период 1990–2020 гг.
/ Seasonal distribution of ion flux in the Kuban River basin for the period 1990–2020**

Водный объект, пункт наблюдений	Среднемесячные значения ионного стока, тыс. т/месяц			
	Зима	Весна	Лето	Осень
р. Кубань, г. Армавир	94,4±42,9*	157±81,2	178±122	89,3±40,5
р. Кубань, ст-ца Ладожская	147±57,1	228±126	234±133	111±52,0
рук. Петрушин, г. Темрюк	181±72,2	211±64,3	196±76,5	147±72,4
рук. Казачий Ерик, х. Дубовый Рынок	8,45±7,96	10,7±6,08	9,35±7,32	5,13±7,29
рук. Протока, г. Славянск-на-Кубани	148±79,5	250±96,7	224±93,3	156±107
рук. Протока, х. Слободка	183±68,8	262±93,9	265±95,7	181±112
р. Лаба, х. Догужиев	71,3±31,1	119±43,9	107±49,1	66,5±32,1
р. Белая, п. Гузерибль	3,56±2,74	12,3±5,10	6,14±3,74	6,69±4,78
р. Белая, г. Майкоп	17,4±10,9	30,3±8,31	20,0±9,29	17,7±11,0
р. Пшиш, г. Хадыженск	4,43±2,40	3,17±2,53	1,60±4,25	3,21±4,85
р. Псекупс, г. Горячий Ключ	16,9±8,88	9,23±6,72	3,43±4,85	5,37±5,48
р. Адагум, г. Крымск	7,42±8,25	4,73±4,15	3,67±10,5	0,76±1,00

* – среднее значение ± стандартное отклонение.

Ранее при рассмотрении пространственно-временной изменчивости ИС в бассейне р. Кубани [19] выделялись контрастные периоды стока (фазы повышенного или пониженного ИС относительно среднесноголетних значений). Эти данные были уточнены и дополнены. Статистически значимые тенденции ИС выявлены для участков рук. Протока – г. Славянск-на-Кубани ($r = -0,25, p < 0,05$), рук. Протока – х. Слободка ($r = -0,50, p < 0,05$), р. Пшиш – г. Хадыженск ($r = -0,29, p < 0,05$), р. Псекупс – г. Горячий Ключ ($r = -0,30, p < 0,05$). Для этих участков общий период (1990–2020 гг.) разделился на два контрастных периода повышенных или пониженных значений ИС. При проверке гипотезы о принадлежности двух сравниваемых выборок значений ИС к одной и той же генеральной совокупности с помощью U -критерия Манна – Уитни установлены статистически значимые отличия сравниваемых периодов ($p < 0,05$). На рис. 1 представлена изменчивость ионного стока в контрастные периоды.

Таким образом, получены контрастные периоды формирования ИС разной продолжительностью на отдельных участках рек бассейна Кубани. При сравнении средних величин ИС в контрастные периоды установлено, что в данных пунктах наблюдений произошло снижение ИС на 26–35 %. На участках рук. Протока изменения происходили из-за снижения минерализации на фоне уменьшения водного стока. На участках притоков изменения ИС в большей степени обусловлены сокращением водоносности. Рассматриваемые притоки относятся к рекам с преобладанием дождевого питания: 70,5 и 89,7 % от годового стока на участках г. Хадыженск и г. Горячий Ключ соответственно [11]. Возможной причиной уменьшения водного стока на участках может выступать сокращение количества выпадающих осадков. За 1990–2020 гг. по данным станции Краснодар [20] наблюдается статистически значимая ($r = -0,26, p < 0,05$) тенденция снижения их годовой суммы, при этом выделяются два периода повышенных и пониженных значений относительно среднесноголетней величины: 1990–2005 (776 мм/год) и 2006–2020 гг. (678 мм/год).

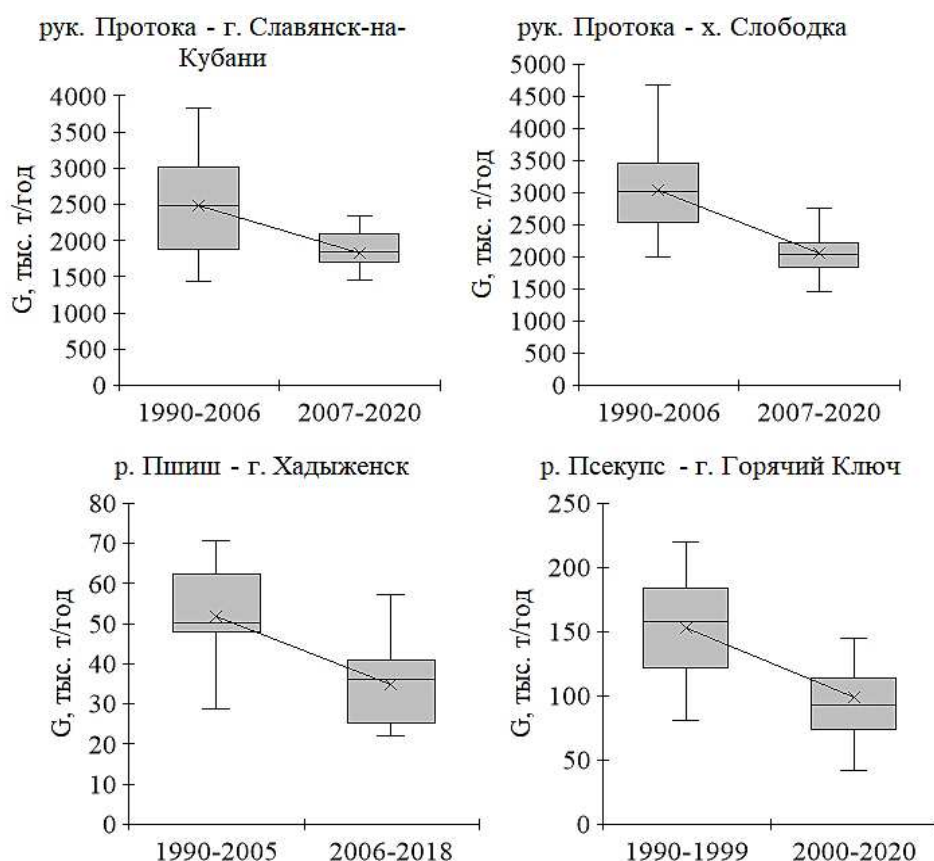


Рис. 1. Изменчивость ИС в контрастные периоды на участках дельтового рукава Протока и рек Пшиш и Псекупс / Fig. 1. Variability of ion flux in contrasting periods in the sections of the delta branch of the Protoka and the rivers Pshish and Psekups

Для более детального анализа целесообразно рассмотреть, какие изменения сезонного ИС произошли при смене контрастных многолетних фаз. Для этого были рассчитаны сезонные значения ИС в контрастные периоды (рис. 2).

Как видно из полученных результатов, в подавляющем большинстве случаев во все сезоны произошло снижение ИС.

Обращает на себя внимание наибольшее (по сравнению с другими сезонами) снижение ИС в осенний период в пунктах наблюдений рук. Протока – г. Славянск-на-Кубани и рук. Протока – х. Слободка от 190 до 108 тыс. т/месяц (-43 %) и от 221 до 127 тыс. т/месяц (-43 %) соответственно. Косвенно это может указывать на изменения, связанные с антропогенным воздействием на устьевой участок р. Кубани. По сравнению с условным фоновым периодом ионный состав воды в дельтовых рукавах (особенно в рук. Протока) существенно трансформировался вследствие хозяйственной деятельности. Однако «в многоводные 1987–2005 гг. и на фоне снижения масштабов хозяйственной деятельности в бассейне реки и дельте отмечено небольшое уменьшение среднего содержания главных ионов» [13, с. 548]. Как показали исследования [21, 22], в коллекторах оросительных систем в течение года значительно изменяется минерализация воды. Отмечалось, что в осенне-зимний период она имеет максимальные значения. При этом в коллекторах со временем происходит постепенное снижение минерализации воды из-за постепенного вымывания солей, содержащихся в почвах и подстилающих породах [21, 22].

На участке р. Пшиш – г. Хадыженск относительно первого периода произошло снижение ИС в зимний, весенний и летний сезоны на 36–73 %. Из-за паводка 2018 г. среднемесячное значение ИС увеличилось на 35 % в осенний сезон. При исключении выброса из выборки среднемесячное значение ИС составит 1,98 тыс. т/месяц, что меньше значения ИС в первый период на 29 %.

В пункте наблюдений р. Псекупс – г. Горячий Ключ ИС достаточно равномерно снизился во все сезоны на 30–39 %.

Таким образом, на рассматриваемых участках рек происходило снижение ИС во все сезоны года.

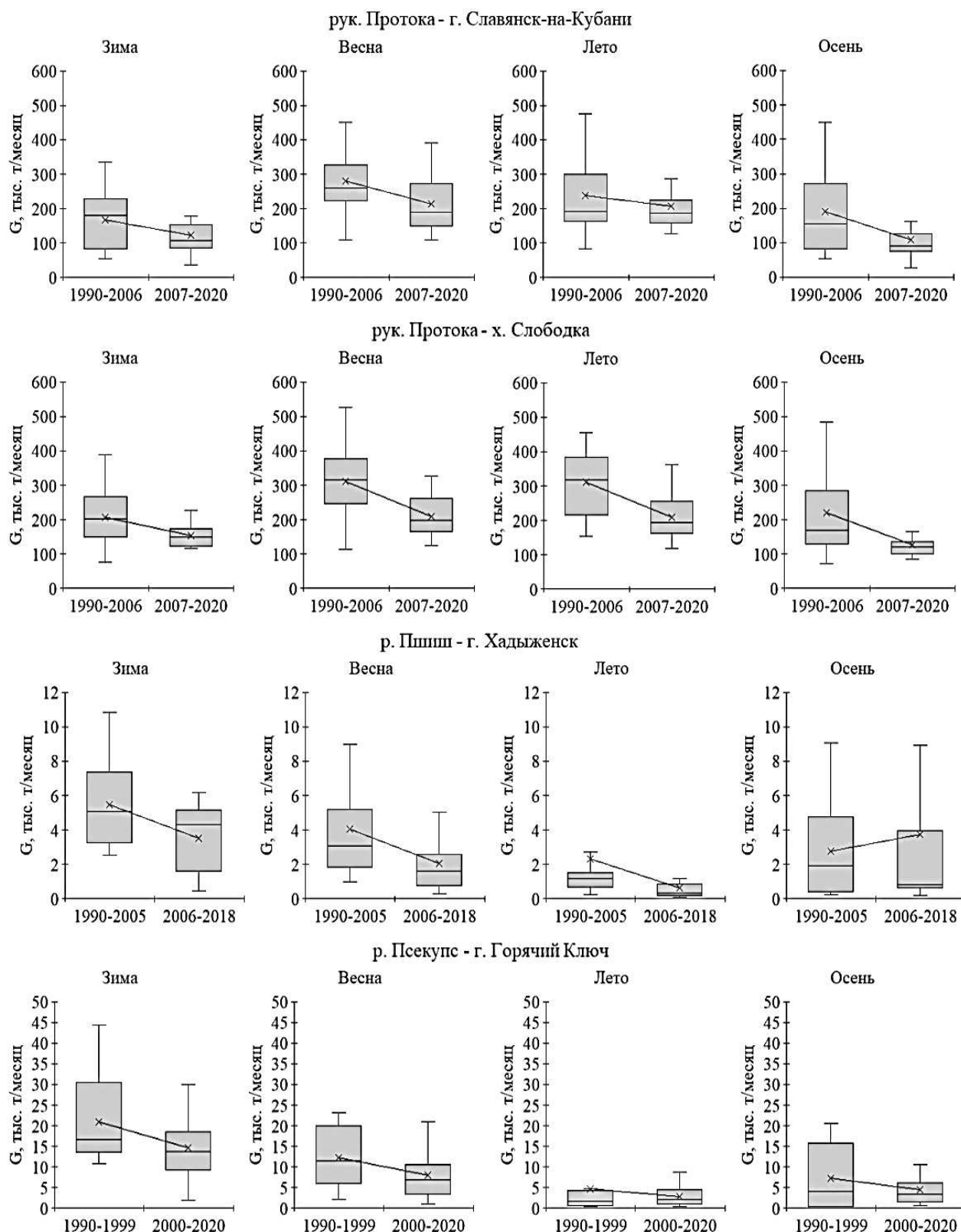


Рис. 2. Сезонная изменчивость ИС в контрастные периоды на участках дельтового рукава Протока и рек Пшиш и Псекупс / Fig. 2. Seasonal variability of ion flux in contrasting periods in the sections of the delta branch of the Protoka and the rivers Pshish and Psekups

Выводы

Результаты проведенных исследований позволили оценить региональные особенности сезонной изменчивости ИС в бассейне р. Кубани за период 1990–2020 гг.

Показано, что внутригодовая динамика ИС р. Кубани, ее дельтовых рукавов и притоков в общих чертах повторяет изменчивость водного стока.

В многолетней динамике ИС удалось выделить контрастные периоды. По сравнению с первым периодом повышенных значений ИС снизился на 26–35 %. Выделенные временные промежутки использованы при расчете сезонных значений ИС для анализа изменений, которые произошли при смене контрастных многолетних фаз.

В целом направленность сезонных колебаний ИС соответствовала многолетней тенденции – во все сезоны года на участках рук. Протока – г. Славянск-на-Кубани, рук. Протока – х. Слободка, р. Пшиш – г. Хадыженск, р. Псекупс – г. Горячий Ключ произошло снижение ИС на 13–73 %. Очевидно, что значительные изменения могут происходить в отдельные сезоны без статистически значимых колебаний многолетнего стока веществ, а контрастные периоды ИС отдельных сезонов могут иметь разную продолжительность. Однако рассмотренная динамика ИС в бассейне р. Кубани позволила проследить трансформацию сезонных величин стока веществ при смене контрастных многолетних фаз.

Выявленные региональные особенности сезонной изменчивости ИС могут быть использованы при планировании хозяйственной деятельности в пределах бассейна р. Кубани и разработке рекомендаций по снижению негативного воздействия на окружающую среду.

Список источников

1. Kaushal S.S., Likens G.E., Mayer P.M., Shatkay R.R., Shelton S.A., Grant S.B., Utz R.M., Yaculak A.M., Maas C.M., Reimer J.E., Bhide S.V., Malin J.T., Rippey M.A. The anthropogenic salt cycle // *Nature Reviews Earth & Environment*. 2023. Vol. 4. P. 770–784. <https://doi.org/10.1038/s43017-023-00485-y>
2. Wu J., Xu N., Wang Y., Zhang W., Borthwick A.G.L., Ni J. Global syndromes induced by changes in solutes of the world's large rivers // *Nature Communications*. 2021. Vol. 12. Art. 5940. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-26231-w>
3. Овчаренко Л.А., Короткова Е.А. Роль климатических факторов в формировании стока реки Белой в современный период // *Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки*. 2022. № 3. С. 62–69. EDN: BRZKSP. <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2022-3-62-69>
4. Алевкин О.А. Гидрохимия рек СССР. Реки Кавказа и Азиатской территории СССР // *Труды ГГИ*. 1949. Вып. 15 (69). 144 с.
5. Еременко В.Я., Зенин А.А., Коновалов Г.С. Сток растворенных веществ р. Кубани и ее гидрохимический режим // *Гидрохим. материалы*. 1953. Т. 21. С. 30–53.
6. Алевкин О.А., Бражникова Л.В. Сток растворенных веществ с территории СССР. М.: Наука, 1964. 144 с.
7. Коренева В.И., Коновалов Г.С., Коренев А.П., Гаранжа А.П. Выделение антропогенной составляющей речного стока минеральных компонентов // *Гидрохим. материалы*. 1989. Т. 106. С. 178–185.
8. Бортник В.Н., Друмева М.А. Оценка антропогенной составляющей солевого стока Дона и Кубани // *Водные ресурсы*. 1995. Т. 22, № 2. С. 155–158.
9. Коняев С.В., Белоногов В.А., Торсуев Н.П. Колебания ионного стока р. Кубань вследствие антропогенного воздействия // *Изв. РГО*. 2002. Т. 134, вып. 5. С. 48–53.
10. Решетняк О.С., Комаров Р.С. Межгодовая и сезонная изменчивость стока растворенных веществ в дельтовых рукавах реки Кубани // *Вестн. Московского ун-та. Серия 5: География*. 2023. № 1. С. 95–105. EDN: QHCCPB. <https://doi.org/10.55959/MSU0579-9414-5-2023-1-95-105>
11. Лурье П.М., Панов В.Д., Ткаченко Ю.Ю. Река Кубань: гидрография и режим стока. СПб.: Гидрометеоиздат, 2005. 498 с.
12. Клименко О.А., Косолапов А.Е., Радько Г.И. Оценка пространственно-временных изменений качества воды в бассейне р. Кубань // *Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление*. 2007. № 4. С. 38–54. EDN: IBUCJJ.
13. Михайлов В.Н., Магрицкий Д.В., Иванов А.А. Гидрология дельты и устьевого взморья Кубани. М.: ГЕОС, 2010. 728 с.
14. Никаноров А.М., Минаева Л.И., Лобченко Е.Е., Ничипорова И.П. Динамика качества поверхностных вод юга России // *Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление*. 2013. № 6. С. 57–72. EDN: RPJSFF.

15. Решетняк О.С., Комаров Р.С. Тенденции изменчивости химического состава и степени загрязненности воды реки Кубань // Вода и экология: проблемы и решения. 2021. № 1(85). С. 30–40. <https://doi.org/10.23968/2305-3488.2021.26.1.30-40>

16. Комаров Р.С., Решетняк О.С. Комплексная оценка качества воды притоков реки Кубани // Грозненский естественнонауч. бюл. 2023. Т. 8, № 2(32). С. 24–30. EDN: VMUKEI. <https://doi.org/10.25744/genb.2023.32.57.004>

17. СевКавНИИВХ. Автоматизированная информационная система государственного мониторинга водных объектов (АИС ГМВО). 2014. URL: <https://gmvo.skniivh.ru/> (дата обращения: 16.12.2024).

18. РД 52.24.748-2010. Усовершенствованная методика определения выноса (переноса) загрязняющих веществ с речным стоком. Ростов н/Д.: Росгидромет, ГХИ, 2010. 73 с.

19. Комаров Р.С., Решетняк О.С. Пространственно-временная изменчивость ионного стока в бассейне р. Кубани // Геология и геофизика Юга России. 2024. Т. 14, № 3. С. 191–203. EDN: GYHUSH. <https://doi.org/10.46698/q4491-7472-5566-w>

20. Всерос. науч.-исслед. ин-т гидрометеорологической информации – Мировой центр данных. URL: <http://meteo.ru/data/> (дата обращения: 03.01.2025).

21. Кобилева Э.А., Тарасов М.Н. Гидрохимический режим коллекторных вод Петровско-Анастасиевской оросительной системы // Гидрохим. материалы. 1973. Т. 59. С. 62–68.

22. Кобилева Э.А., Тарасов М.Н. Элементы солевого баланса Петровско-Анастасиевской рисовой оросительной системы // Гидрохим. материалы. 1974. Т. 60. С. 74–81.

References

1. Kaushal S.S., Likens G.E., Mayer P.M., Shatkay R.R., Shelton S.A., Grant S.B., Utz R.M., Yaculak A.M., Maas C.M., Reimer J.E., Bhide S.V., Malin J.T., Rippey M.A. The anthropogenic salt cycle. *Nature Reviews Earth & Environment*. 2023;4:770-784. <https://doi.org/10.1038/s43017-023-00485-y>

2. Wu J., Xu N., Wang, Y., Zhang W., Borthwick A.G.L., Ni J. Global syndromes induced by changes in solutes of the world's large rivers. *Nature Communications*. 2021;12:5940. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-26231-w>

3. Ovcharenko L.A., Korotkova E.A. The role of climatic factors in the formation of the flow of the Belaya river in the modern period. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science*. 2022;(3):62-69. (In Russ.). EDN: BRZKSP. <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2022-3-62-69>

4. Alekin O.A. Hydrochemistry of rivers of the USSR. Rivers of the Caucasus and the Asian territory of the USSR. *Proceedings of the State Hydrological Institute*. 1949;(15). 144 p. (In Russ.).

5. Eremenko V.Ya., Zenin A.A., Konovalov G.S. Flux of dissolved substances of the Kuban River and its hydrochemical regime. *Hydrochemical Materials*. 1953;21:30-53. (In Russ.).

6. Alekin O.A., Brazhnikova L.V. *Runoff of dissolved substances from the territory of the USSR*. Moscow: Science; 1964. 144 p. (In Russ.).

7. Koreneva V.I., Konovalov G.S., Korenev A.P., Garanzha A.P. Finding the anthropogenic component of the river flux of mineral components. *Hydrochemical Materials*. 1989;106:178-185. (In Russ.).

8. Bortnik V.N., Drumeva M.A. Assessment of the anthropogenic component of the salt flux of the Don and Kuban. *Water Resources*. 1995;22(2):155-158. (In Russ.).

9. Konyaev S.V., Belonogov V.A., Torsuev N.P. Fluctuations in the ion flux of the Kuban River due to anthropogenic impact. *Proceedings of the Russian Geographical Society*. 2002;134(5):48-53. (In Russ.).

10. Reshetnyak O.S., Komarov R.S. Interannual and seasonal variability of chemical runoff along the main delta branches of the Kuban River. *Lomonosov Geography J*. 2023;(1):95-105. (In Russ.). EDN: QHCCPB. <https://doi.org/10.55959/MSU0579-9414-5-2023-1-95-105>

11. Lurie P.M., Panov V.D., Tkachenko Yu.Yu. *The Kuban River: hydrography and flow regime*. St. Petersburg: Hydrometeorological Publishing; 2005. 498 p. (In Russ.).

12. Klimenko O.A., Kosolapov A.E., Radko G.I. Assessment of spatio-temporal changes in water quality in the Kuban River basin. *Water Management of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2007;(4):38-54. (In Russ.). EDN: IBUCJJ.

13. Mikhailov V.N., Magritsky D.V., Ivanov A. A. *Hydrology of the delta and estuarine coast of the Kuban River*. Moscow: GEOS; 2010. 728 p. (In Russ.).

14. Nikanorov A.M., Minina L.I., Lobchenko E.E., Nichiporova I.P. Dynamics of surface water quality in the South of Russia. *Water Management of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2013;(6):57-72. (In Russ.). EDN: RPJSFF.

15. Reshetnyak O.S., Komarov R.S. Trends in the variability of the chemical composition and water pollution level in the Kuban River. *Water and Ecology: Problems and Solutions*. 2021;(1):30-40. (In Russ.). <https://doi.org/10.23968/2305-3488.2021.26.1.30-40>

16. Komarov R.S., Reshetnyak O. S. Integrated water quality assessment of the tributaries of the Kuban River. *Grozny Natural Science Bulletin*. 2023;8(2):24-30. (In Russ.). EDN: VMUKEI. <https://doi.org/10.25744/genb.2023.32.57.004>

17. North Caucasus Scientific Research Institute of Water Management. *Automated information system for state monitoring of water bodies (AIS GMVO)*. 2014. Available from: <https://gmvo.skniivh.ru> [Accessed 16th December 2024]. (In Russ.).

18. RD 52.24.748-2010. *Improved methodology for determining the removal (transfer) of pollutants from river runoff*. Rostov-on-Don: Roshydromet, Hydrochemical Institute; 2010. 73 p. (In Russ.).

19. Komarov R.S., Reshetnyak O. S. Spatiotemporal variability of ion flux in the Kuban River basin. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2024;14(3):191-203. (In Russ.). EDN: GYHUSH. <https://doi.org/10.46698/q4491-7472-5566-w>

20. All-Russia Research Institute of Hydrometeorological Information – World Data Center. Available from: <http://meteo.ru/data/> [Accessed 3rd January 2025]. (In Russ.).

21. Kobileva E. A., Tarasov M. N. Hydrochemical regime of collector waters of Petrovsko-Anastasievskaya irrigation system. *Hydrochemical Materials*. 1973;59:62-68. (In Russ.).

22. Kobileva E. A., Tarasov M. N. Elements of salt balance of Petrovsko-Anastasievskaya rice irrigation system. *Hydrochemical Materials*. 1974;60:74-81. (In Russ.).

Информация об авторе

Р.С. Комаров – младший научный сотрудник кафедры геоэкологии и прикладной геохимии Института наук о Земле ЮФУ; младший научный сотрудник лаборатории региональной и экспериментальной гидрохимии ГХИ.

Information about the author

R.S. Komarov – Junior Researcher, Department of Geoecology and Applied Geochemistry, Institute of Earth Sciences, SFedU; Junior Researcher, Laboratory of Regional and Experimental Hydrochemistry, HI.

*Статья поступила в редакцию 09.01.2025; одобрена после рецензирования 10.02.2025; принята к публикации 23.04.2025.
The article was submitted 09.01.2025; approved after reviewing 10.02.2025; accepted for publication 23.04.2025.*

Научная статья
УДК 556.5; 543.3
<https://doi.org/10.18522/1026-2237-2025-2-83-94>

КОЛИЧЕСТВЕННЫЙ АНАЛИЗ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЖЕЛЕЗА И МАРГАНЦА В ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОДАХ ЕВРЕЙСКОЙ АВТОНОМНОЙ ОБЛАСТИ

Ирина Леонидовна Ревуцкая¹, **Оксана Леонидовна Ревуцкая²**,
Татьяна Михайловна Позднякова³, **Ольга Владленовна Суриц⁴**

^{1, 2, 3}Приамурский государственный университет им. Шолом-Алейхема, Биробиджан, Россия

²Институт комплексного анализа региональных проблем ДВО РАН, Биробиджан, Россия

⁴Центр гигиены и эпидемиологии в ЕАО, Биробиджан, Россия

¹irina.etx@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4214-1958>

²oksana-rev@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4148-282X>

³russland-54@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9292-8142>

⁴sangilab@mail.ru

Аннотация. Представлены результаты количественного анализа распределения железа и марганца в поверхностных водотоках Еврейской автономной области (ЕАО), принадлежащих бассейну р. Бира. Материалы для исследования получены в ходе экспедиционных выездов в осенний период 2018 г. и летний период 2019 г. Проведенное опробование речных вод позволило выявить контур распределения уровней содержания железа (Fe) и марганца (Mn) в бассейне р. Бира, что было статистически подтверждено корреляционным и кластерным анализом. На основе кластерного анализа выявлены три группы рек, отличающихся по концентрациям исследуемых элементов. В реках первой группы, берущих начало с южных отрогов Буреинского хребта, превышения ПДК по Fe и Mn не выявлено. В водах рек второй группы, протекающих по северо-западной части области и дренирующих предгорья Малого Хингана, чётко проявляются следы железомарганцевой рудоносности. Реки третьей группы характеризуются заметным содержанием металлов, в том числе за счёт поступления растворимых гумусовых кислот Fe и Mn с болотного водосбора. Показано, что, несмотря на различие природных условий осенью 2018 г. и летом 2019 г., распределение концентрации Mn по рекам в той или иной мере сохраняется, что подтверждается заметной корреляционной связью между валовым содержанием Mn в эти периоды. Высокие значения коэффициентов корреляции между температурой воды и содержанием Mn и Fe могут свидетельствовать о влиянии гидротермического фактора на их концентрацию в поверхностных водах.

Ключевые слова: железо, марганец, гидрохимические данные, поверхностные воды, корреляционный анализ, загрязнение, кластерный анализ, Еврейская автономная область

Для цитирования: Ревуцкая И.Л., Ревуцкая О.Л., Позднякова Т.М., Суриц О.В. Количественный анализ распределения железа и марганца в поверхностных водах Еврейской автономной области // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2025. № 2. С. 83–94. <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2025-2-83-94>

Благодарности: исследование выполнено при поддержке субсидии на выполнение государственного задания Минобрнауки России по проекту № FSNZ-2024-0004 ФГБОУ ВО «ПГУ им. Шолом-Алейхема».

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

Original article

QUANTITATIVE ANALYSIS OF IRON AND MANGANESE DISTRIBUTION IN SURFACE WATERS OF THE JEWISH AUTONOMOUS REGION

Irina L. Revutskaya^{1✉}, Oksana L. Revutskaya², Tatyana M. Pozdnyakova³, Olga V. Surits⁴

^{1, 2, 3} Sholom-Aleichem Amur State University, Birobidzhan, Russia

² Institute for Comprehensive Analysis of Regional Problems FEB RAS, Birobidzhan, Russia

⁴ Center of Hygiene and Epidemiology in the Jewish Autonomous Region, Birobidzhan, Russia

¹ irina.etx@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4214-1958>

² oksana-rev@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4148-282X>

³ russland-54@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9292-8142>

⁴ sangilab@mail.ru

Abstract. The article presents the results of a quantitative analysis of the distribution of iron and manganese in surface watercourses of the Jewish Autonomous Region (JAR) belonging to the Bira River basin. The materials for the study were obtained during expeditionary trips in the autumn of 2018 and the summer of 2019. The conducted sampling of river waters made it possible to identify the distribution contour of iron and manganese levels in the Bira River basin, which was statistically confirmed by correlation and cluster analysis. Based on the cluster analysis, the authors identified three groups of rivers that differ in the concentrations of the studied elements. In the rivers of the first group, originating from the southern spurs of the Bureinsky ridge, no excess of the MAC for iron and manganese was found. In the waters of the rivers of the second group, flowing through the northwestern part of the region and draining the foothills of the Maly Khingan, traces of ferromanganese ore content are clearly visible. The rivers of the third group are characterized by a noticeable content of metals, including due to the influx of soluble humic acids of iron and manganese from the swamp catchment. It is shown that, despite the difference in natural conditions in the fall of 2018 and summer of 2019, the distribution of Mn concentration by rivers is preserved to some extent, which is confirmed by a noticeable correlation between the total Mn content in these periods. High values of the correlation coefficients between water temperature and the content of Mn and Fe may indicate the influence of the hydrothermal factor on their concentration in surface waters.

Keywords: iron, manganese, hydrochemical data, surface waters, correlation analysis, pollution, cluster analysis, Jewish Autonomous Region

For citation: Revutskaya I.L., Revutskaya O.L., Pozdnyakova T.M., Surits O.V. Quantitative Analysis of Iron and Manganese Distribution in Surface Waters of the Jewish Autonomous Region. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2025;(2):83-94. (In Russ.). <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2025-2-83-94>

Acknowledgments: the study was carried out with the support of a subsidy for the implementation of the state assignment of the Ministry of Education and Science of Russia under project No. FSNZ-2024-0004 of the Sholom-Aleichem Amur State University.

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

Введение

Еврейская автономная область (ЕАО) расположена на юге Дальнего Востока России, в пределах таёжно-лесной биогеохимической зоны. Её территория относится к провинции, дефицитной по ряду химических элементов (кальций, магний, медь, йод, фтор, селен) и избыточной по железу (Fe) и марганцу (Mn). Практически во всех водотоках, а также подземных водах ЕАО отмечается повышенное содержание Fe и Mn, так как они являются типичными элементами природных вод Среднеамурской низменности [1–3].

Химический состав природных вод формируется под воздействием природных и антропогенных факторов, вследствие чего реки служат естественными аккумуляторами веществ как природного происхождения, так и загрязняющих, возникающих в результате хозяйственной деятельности [4, 5].

Появление тяжелых металлов, в том числе Fe и Mn, в водных объектах ЕАО вызвано физико-географическими и геологическими условиями окружающей среды, а также процессами химического выветривания горных пород и растворения минералов, что подробно рассмотрено и показано в предыдущих работах авторов [6, 7]. Однако следует отметить, что на территории автономии расположены промышленно значимые месторождения марганцевых руд – дефицитных для России полезных ископаемых, перспективных для освоения. Так уже осваивается Биджанское месторождение железомарганцевых руд на северо-западе области, начался ввод в промышленную эксплуатацию Южно-Хинганского месторождения. Вовлечение запасов этих и других месторождений ЕАО в хозяйственный оборот актуализирует необходимость изучения избыточных по содержанию химических элементов в поверхностных водах.

Объектом исследования является р. Бира и её преимущественно северные притоки. Отбор проб речной воды проведен в октябре 2018 г. и июле 2019 г. Материалы, полученные во время полевых выездов на территории Биробиджанского и Облученского муниципальных районов ЕАО, впервые обработаны с помощью математических методов, что позволило более детально рассмотреть и выявить возможные закономерности распределения Fe и Mn в реках ЕАО.

В связи с этим цель нашей работы – выполнить количественный анализ распределения концентраций Fe и Mn в поверхностных водах с учетом природных условий ЕАО.

Материалы и методы исследования

Основой для данной работы послужили материалы, собранные во время полевых выездов на территории Биробиджанского и Облученского муниципальных районов ЕАО. Пробы воды отбирались преимущественно на левых притоках речной системы Большой Бире (таблица). Площадь ее водосбора составляет почти 1/3 территории ЕАО [8, 9]. Анализируемые реки берут начало в двух горных системах: Малый Хинган (реки Кимкан, Кульдур, Биракан, правобережные притоки Каменушка) и Буреинский хребет (реки Никита, Сагды-Бира, левобережные притоки Каменушки, Трек, Икура). Долина р. Сутары лежит между двумя хребтами – Малым Хинганом и Сутарским.

Пробы речной воды отобраны в два периода: осенний (20 октября 2018 г.) и летний (20 июля 2019 г.). В октябре 2018 г. – для анализа на содержание только Mn, а в июле в 2019 г. – на содержание Mn и Fe.

Отбор проб поверхностных вод производился в соответствии с требованиями ГОСТ 31861-2012 [10]. В полевых условиях во время отбора проб воды фиксировали прозрачность и температуру воды. Определение pH, содержания Fe и Mn в речных пробах проходило в лабораторных условиях на базе аккредитованного испытательного лабораторного центра ФБУЗ «Центр гигиены и эпидемиологии в ЕАО».

Для выявления в воде суммарного (валового) содержания Mn в октябре 2018 г. использован фотометрический метод, согласно РД 52.24.467-2008 [11].

Определение в воде массовых концентраций (суммарных форм) Mn и Fe в июле 2019 г. выполнено на атомно-абсорбционном спектрометре «Квант-2 АТ» в соответствии с требованиями документа ПНД Ф 14.1:2.4.214-06 [12].

Для оценки действия тяжелых металлов на водотоки были рассчитаны значения кратности превышения предельно допустимой концентрации (ПДК). По значению кратности превышения ПДК устанавливался уровень загрязненности воды: (1; 2) – низкий; [2; 10) – средний; [10; 50) – высокий; [50; ∞) – экстремально высокий [13].

Для количественного анализа данных использовались методы математической статистики [14]. Для выявления тесноты связи между физико-химическими параметрами рек и концентрацией тяжелых металлов применялся корреляционный анализ. Рассчитывался коэффициент корреляции Пирсона r при достигнутом уровне значимости p и количестве наблюдений n , на основании которых был получен данный коэффициент. Связи между физико-химическими параметрами рек и концентрацией тяжелых металлов исследовали методами регрессионного анализа. Оценивался коэффициент детерминации R^2 , численно выражающий долю вариации зависимой переменной от изменения включенных в регрессионную модель факторов. Различия двух выборок проверяли методом t -критерия Стьюдента. Для выделения групп рек, сходных по содержанию тяжелых металлов, использовался кластерный анализ (в качестве меры дистанции выбиралось евклидово расстояние между объектами, связывание проводилось по методу Уорда).

Наименование рек ЕАО, их описание и место отбора проб воды / Names of the rivers of the Jewish Autonomous Region, their description and location of water sampling

№ реки	Название реки (тип)	Описание реки	Место отбора пробы воды
1	Верхний Кимкан	Правый приток р. Кимкан, впадающей в р. Кульдур. Начинается на восточном склоне Малого Хингана на высоте 460–470 м н. у. м.	На расстоянии 6,5 км от истока и в 4 км от места впадения в р. Кульдур
2	Кульдур	Левый исток р. Биры. Берет начало на хребте Малый Хинган на высоте 700 м	В нижнем течении реки между поселками Известковый и Биракан в 3,5 км от устья
3	Биракан	Берет начало на хребте Малый Хинган на высоте 700 м	В 2 км от устья
4	Каменушка	Берет начало на высоте 800 м. Ее долина разделяет хребты Малый Хинган и Буреинский. Правобережные притоки собирают воду с Малого Хингана, левобережные – со склонов южных отрогов Буреинского хребта	В 4 км от устья
5	Никита	Начинается в виде Большой Никиты на высоте 1150 м, стекающей с южных отрогов Буреинского хребта	В 4 км от устья
6	Сагды-Бира	Берет начало на высоте 1160 м	В 6 км от устья
7	Трек	Начинается на высоте 700 м	В 3 км от устья
8	Икура (среднее течение)	Берет начало на высоте 500 м в предгорной части Буреинского хребта на территории заповедника «Бастак»	В среднем течении реки в нескольких километрах к северу от г. Биробиджана
9	Икура (нижнее течение)		В нижнем течении, у моста между Желтым Яром и Найфельдом, в 8 км от устья
10	Бира (Большая Бира)	Начинается слиянием рек Сутара и Кульдур на высоте 240 м	На левом берегу ниже впадения р. Кирга в южной части пос. Раздольное (характеризует качество воды перед Биробиджаном)
11	Сутара	Правый приток Биры, является одним из ее истоков, протекает по территории, где находятся россыпи золота и месторождения железомарганцевых руд. Левобережные притоки Сутары сбегают с Малого Хингана, правобережные – с Сутарского хребта	На правом берегу р. Сутара в 1 км от места слияния рек Сутара и Кульдур

Результаты и обсуждение

Изученные водные объекты – р. Большая Бира и ее притоки – характеризуются слабокислой реакцией среды, с близкими значениями водородного показателя в октябре 2018 г. (рН изменялся от 6,2–6,4 ед.) и июле 2019 г. (рН 6,4–6,5 ед.) (рис. 1). При этом они значительно различаются температурой в соответствии с сезоном года (1–3,5 °С в октябре 2018 г. и 12–24 °С в июле 2019 г.). Согласно t-критерию Стьюдента были выявлены статистически значимые различия (при $p < 0,001$) между температурой воды в октябре 2018 г. и июле 2019 г. Несмотря на близкие значения уровня рН, t-критерий также выявил их достоверные различия (при $p < 0,05$) для разных сезонов 2018 и 2019 гг.

Для выявления тесноты связи между характеристиками воды и суммарным содержанием Mn и Fe в 2018–2019 гг. (рис. 1) были рассчитаны коэффициенты корреляции (рис. 2).

Отчетливо прослеживается линейная связь между температурой воды и валовым содержанием марганца и железа (рис. 2). Хорошо известно, что гидротермический фактор является определяющим в геохимической подвижности Mn и способствует миграции элемента в растворенной форме [16].

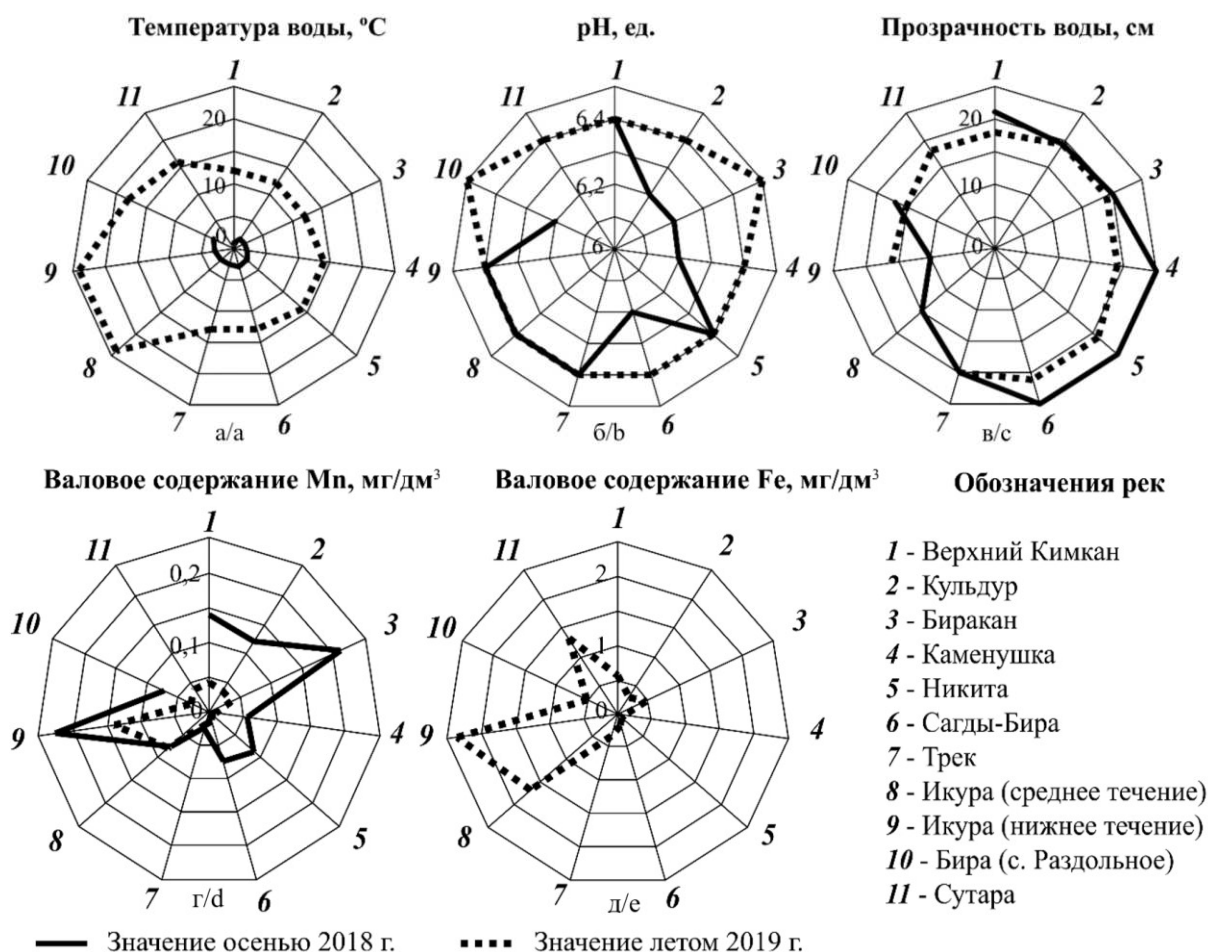


Рис. 1. Температура воды, рН и прозрачность воды и валовое содержание Mn и Fe, мг/дм³, в воде р. Бира и ее притоках, октябрь 2018 г., июль 2019 г. Значение ПДК Mn²⁺ для воды рек рыбохозяйственного значения составляет 0,01 мг/дм³, ПДК Fe – 0,1 мг/дм³ [15] (составлен авторами) / Fig. 1. Water temperature, pH and transparency of water and total content of manganese and iron, mg/dm³, in the water of the Bira River and its tributaries, October 2018, July 2019. The MAC value of Mn²⁺ for water of rivers of fishery importance is 0.01 mg/dm³, MAC Fe is 0.1 mg/dm³ [15] (compiled by the authors)

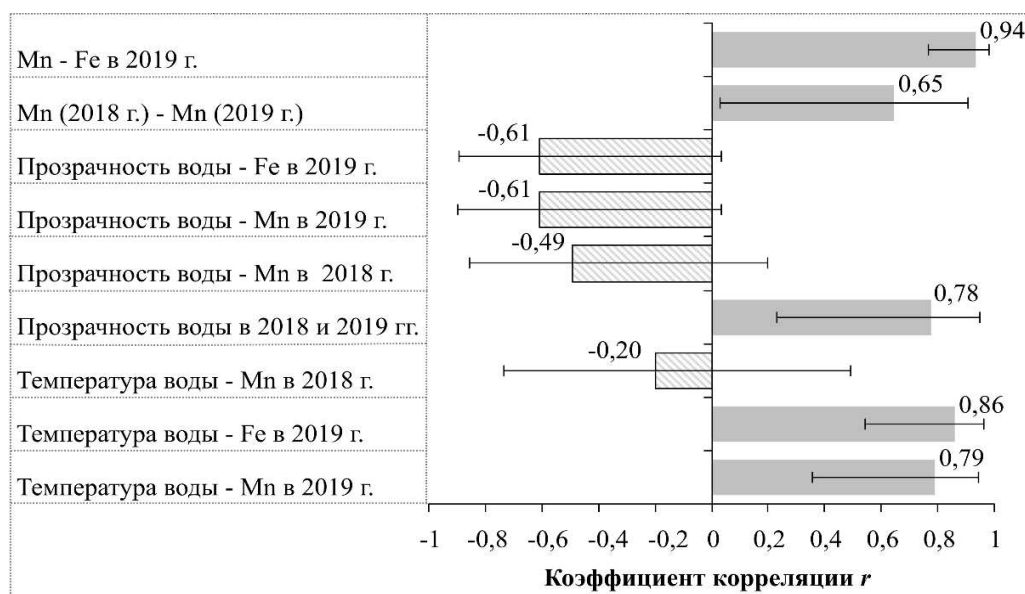


Рис. 2. Значения коэффициентов корреляции между разными показателями, представленными на рис. 1, и их 95%-е доверительные интервалы / Fig. 2. The values of the correlation coefficients between different indicators presented in Fig. 1 and their 95 % confidence intervals

Как видно на рис. 1, самые высокие показатели температуры воды, способствующие ускорению химических реакций, в том числе разложению органического вещества и образованию растворимых гуматов Mn, отмечены только на двух точках р. Икура – в ее среднем и нижнем течении в июле 2019 г.

В результате корреляционного анализа выявлена сильная статистически значимая корреляционная зависимость между температурой воды и валовым содержанием Mn ($r = 0,79$, $p < 0,01$, $n = 11$) и Fe ($r = 0,86$, $p < 0,001$, $n = 11$) в 2019 г. (рис. 2).

Изменение валового содержания Mn (а) и Fe (б) от температуры воды в 2019 г. проиллюстрировано на рис. 3.

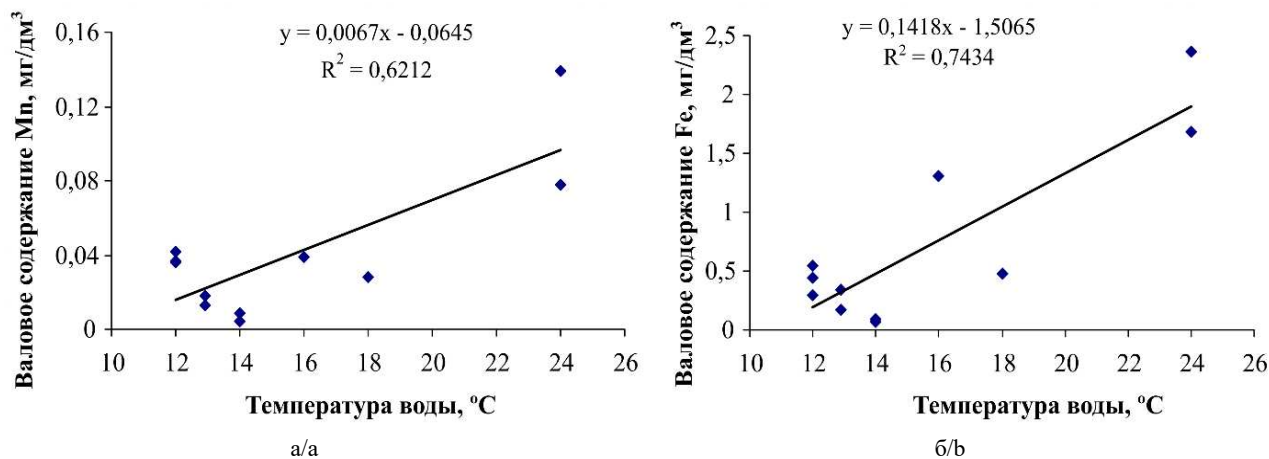


Рис. 3. Зависимость валового содержания Mn (а) и Fe (б) от температуры воды в реках ЕАО в 2019 г.
/ Fig. 3. Dependence of the total content of Mn (a) and Fe (b) on water temperature in the rivers of the Jewish Autonomous Region in 2019

Как видно на рис. 3, значения коэффициентов детерминации уравнений линейной регрессии R^2 , описывающих изменение валового содержания Mn (рис. 3а) и Fe (рис. 3б) от температуры воды, составляют 0,62 и 0,74 соответственно. Это свидетельствует о том, что вариация концентрации Mn и Fe на 62 и 74 % объясняется изменчивостью гидротермического фактора – температуры воды. Прочие факторы, не включенные в регрессионные модели, достигают 38 и 26 % от общей вариации валового содержания Mn и Fe.

Однако одновременно с этим корреляционная зависимость между температурой воды и валовым содержанием Mn в октябре 2018 г. является слабой и статистически незначимой ($r = -0,2$, $n = 10$) (рис. 2).

На момент взятия проб воды в октябре 2018 г. дождей на территории ЕАО не было в течение полутора месяцев. Уровень воды во всех реках был невысокий, вода – прозрачной, бесцветной, без элементов поверхностного стока. Отбор проб воды в июле 2019 г. проводился вскоре после интенсивных дождей. В верховьях р. Биры (в бассейнах рек Кульдур и Сутара) отмечены многочисленные проявления железомарганцевых руд. Почти на всех местах отбора проб вода была обильной, коричневой, быстротекущей.

Как видно из рис. 1, в октябре 2018 г. показатели прозрачности на многих станциях отбора были выше, чем в июле 2019 г., но в пробе речной воды, взятой на р. Икуре (нижнее течение) показатель вырос до 6 см. Коэффициент корреляции между значениями прозрачности в 2018 и 2019 гг. является статистически значимым ($r = 0,78$, $p < 0,05$, $n = 9$) (рис. 2). Это позволяет предполагать наличие сходных причин, влияющих на прозрачность воды в реках. В то же время значения прозрачности воды в изучаемых реках в 2018 и 2019 гг. согласно t-критерию Стьюдента статистически значимо не отличаются при принятом уровне значимости $p < 0,05$, т.е., возможно, природные условия разных сезонов года не повлияли на уровень прозрачности.

Одним из проявлений вариации концентрации тяжелых металлов в первую очередь в водах малых рек регионов считается изменение цветности и мутности (прозрачности) воды [17]. Уменьшение прозрачности природных вод свидетельствует об их загрязнении. На рис. 1 видно, что наибольшая прозрачность воды (25 см) в 2018 г. соответствует рекам с наименьшим содержанием Mn (Каменушка, Никита, Сагды-Бира), а наименьшая прозрачность (10 см) отмечается в

реках с наибольшей концентрацией Mn (нижнее течение р. Икура). Однако статистический анализ тесноты связи между прозрачностью воды и валовым содержанием Mn в 2018 и 2019 гг. не показал наличия статистически значимой корреляционной связи при стандартном уровне значимости $p < 0,05$ ($r = -0,49$, $p = 0,15$, $n = 10$) (рис. 2). Аналогично в 2019 г. между прозрачностью воды и содержанием тяжелых металлов (Mn и Fe) не было выявлено статистически значимой корреляционной связи при $p < 0,05$ ($r = -0,61$, $p < 0,1$, $n = 10$) (рис. 2). Следовательно, уровень прозрачности отражает загрязнение воды не только тяжелыми металлами, но и другими тонкодисперсными примесями, включая нерастворимые неорганические и органические вещества различного происхождения.

Как выше было отмечено, природные условия в момент опробования рек осенью 2018 г. и летом 2019 г. сильно отличались. Согласно t-критерию Стьюдента были выявлены достоверные различия ($p < 0,01$) между содержанием Mn в воде в 2018 и 2019 гг. При этом корреляционный анализ показал заметную достоверную связь между концентрациями Mn в 2018 и 2019 гг. ($r = 0,65$, $p < 0,05$, $n = 10$) (рис. 2). Следовательно, концентрация Mn в осенний и летний периоды достоверно отличается в силу различий природных условий, одновременно с этим распределение валового содержания Mn по рекам в той или иной мере сохраняется.

На содержание уровней Mn в речных водах влияют и климатические особенности территорий. Автономия расположена в области умеренного климата с чертами муссонности и относится к зоне достаточного увлажнения с летним максимумом осадков (до 80 % годового количества). Реки области имеют преимущественно дождевой тип питания за счёт ливневых дождей, которые приходится на июль-август. С ними же связаны паводки на реках, приводящие к их разливу в силу слабой врезанности речных русел. В число самых крупных рек области входят притоки Большой Биры – Икура и Сутара, также имеющие дождевой тип питания (50–70 % источников питания). [9].

Отборы вод в Бире и её притоках, берущих начало на Малом Хингане, в 2018 и 2019 гг. показали следующие результаты. Суммарная концентрация Mn (в растворённой и взвешенной формах) в летнем отборе 2019 г. была ниже в 3,3–6 раз, чем в осеннем отборе 2018 г.

На скорость течения реки и степень промывания русла оказывает влияние высота местности, где находится её исток. Так, самая восточная из исследуемых рек – р. Никита – берёт начало с отличных по геологическому строению от Малого Хингана отрогов Буреинского хребта на высоте 1150 м. Содержание марганца в осенних пробах 2018 г. в этом водотоке была в 21 раз выше, чем летом 2019 г. В то же время в р. Трек, схожей по протяжённости с р. Никита, но берущей начало на высоте 700 м и протекающей по более пологим склонам, различие концентраций составляет лишь 1,4 раза. Вероятно, это обусловлено меньшей промываемостью речного русла.

Содержание Mn в р. Икуре практически не изменилось. По-видимому, оно было выравнено выходом реки на равнину и контактом с заболоченными территориями (подпитка болотными водами с растворёнными в них гумусными комплексами Mn). Однако разница температур в весеннем и летнем отборах (2,5 и 24 °С соответственно) даёт основания предполагать наличие действия пока непознанных нами, скрытых, вероятно, противоборствующих процессов. Разница между осенним и летним содержанием марганца в воде, отобранной в нижнем течении р. Икура, небольшая – 1,6 раза. В самой Бире ниже впадения р. Кирги в летнем опробовании вод было зафиксировано уменьшение содержания Mn в 2,5 раза.

Сравнение полученных данных с нормативами, установленными для водоемов рыбохозяйственного значения [15], показало их превышение для Mn и Fe для большинства исследуемых рек (рис. 4).

Расчеты коэффициентов корреляции (рис. 2) показали, что существует высокая достоверная связь между концентрациями Mn и Fe в 2019 г. ($r = 0,94$, $p < 0,0001$, $n = 11$). Это свидетельствует о едином источнике поступления тяжелых металлов в речные воды.

Методом кластерного анализа было выявлено три группы рек, отличающихся концентрацией тяжелых металлов (Fe, Mn) в воде в 2019 г. Первая группа включает реки Каменушка, Никита, Сагды-Бира, вторая группа – Кимкан, Кульдур, Биракан, Трек, Бира (с. Раздольное), третья группа – Икура (как среднее течение, так и нижнее течение), Сутара.

Первая группа рек (Каменушка, Никита, Сагды-Бира) в 2019 г. характеризовалась сравнительно низкими значениями концентраций Mn и Fe – в среднем $0,01 \pm 0,003$ и $0,11 \pm 0,03$ мг/дм³ соответственно (рис. 5а, б). Самое низкое содержание Mn ($0,004 \pm 0,001$ мг/дм³) и Fe ($0,067 \pm 0,017$ мг/дм³) установлено в р. Никите (рис. 1).

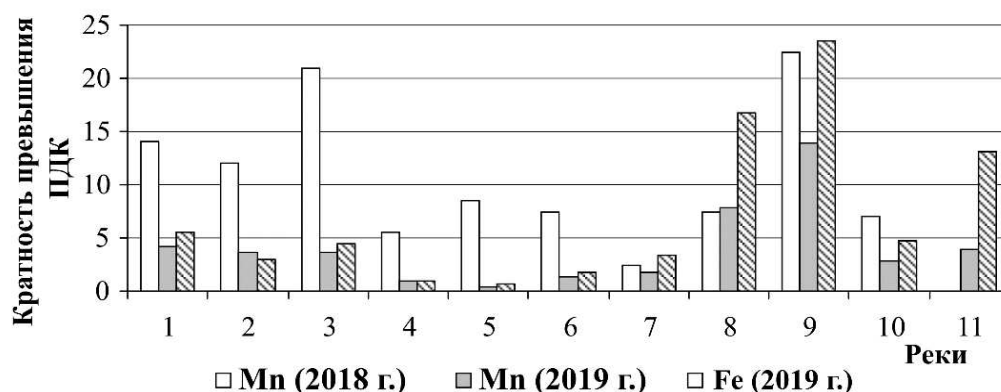


Рис. 4. Кратность превышения ПДК марганца и железа, установленных для водоемов, имеющих рыбохозяйственное значение [15], в воде р. Биры и ее притоков, октябрь 2018 г., июль 2019 г. Номера рек приведены в соответствии с таблицей и рис. 1 / Fig. 4. The frequency of exceeding the MAC of manganese and iron established for water bodies of fishery importance [15] in the water of the Bira River and its tributaries, October 2018, July 2019. The river numbers are given in accordance with Table and Fig. 1

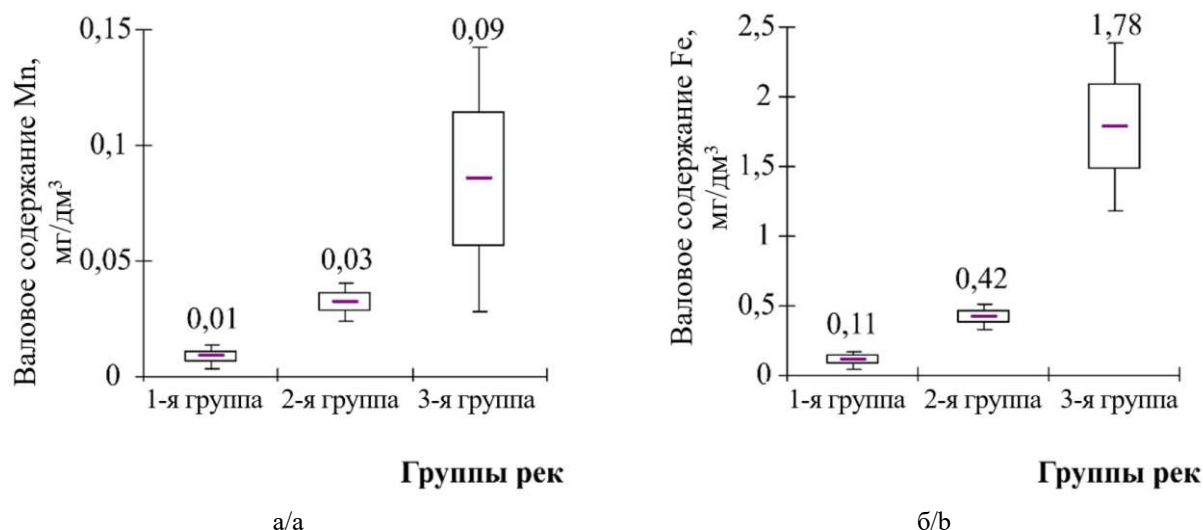


Рис. 5. Валовое содержание Mn (а) и Fe (б) по группам рек: 1-я группа – реки Каменушка, Никита, Сагды-Бира; 2-я группа – Кимкан, Кульдур, Биракан, Трек, Бира (с. Раздольное); 3-я группа – Икура (среднее и нижнее течение), Сутара; — – среднее арифметическое значение (далее – среднее); □ – среднее ± стандартная ошибка среднего; ⊥ – среднее ± 1,96-стандартная ошибка среднего / Fig. 5. Total content of Mn (a) and Fe (b) by groups of rivers: Group 1: Kamenushka, Nikita, Sagdy-Bira rivers, Group 2 – Kimkan, Kuldur, Birakan, Trek, Bira (Razdolnoye village), Group 3 – Ikura (middle and lower reaches), Sutara; — - arithmetic mean (hereinafter mean); □ - Mean ± standard error of the mean; ⊥ - mean ± 1.96·standard error of the mean

Согласно рассчитанным значениям показателя кратности превышения ПДК реки Каменушка, Никита, Сагды-Бира в 2018 г. имели средний уровень загрязнения воды по содержанию Mn, а в 2019 г. – низкий уровень загрязнения воды как по содержанию Mn, так и Fe в силу природных условий, обозначенных выше (рис. 4). Хотя корреляционный анализ не выявил достоверной связи между прозрачностью воды и содержанием Mn и Fe, тем не менее в этих реках, наименее загрязненных данными тяжелыми металлами, в октябре 2018 г. наблюдалась наибольшая прозрачность воды (25 см) (рис. 1). В июле 2019 г. в реках Никита и Сагды-Бира также отмечался наиболее высокий уровень прозрачности воды (21 см) по сравнению с другими реками, при этом почти повсеместно прозрачность воды снизилась.

Реки Кимкан, Кульдур, Биракан, Бира (с. Раздольное), входящие во *вторую группу* рек, в июле 2019 г. характеризовались средним уровнем загрязнения воды по содержанию Mn и Fe (рис. 4). Для этой группы рек концентрации Mn и Fe в среднем составили $0,03 \pm 0,004$ и $0,42 \pm 0,046$ мг/дм³ соответственно (рис. 5).

Река Трек, также входящая во 2-ю группу, летом 2019 г. имела низкий уровень загрязнения воды Mn (1,8 ПДК), но средний уровень загрязнения воды Fe (3,4 ПДК). По-видимому, превышение ПДК по уровню Fe связано с заболоченностью долины р. Трек. Заметим, что в октябре 2018 г. реки Кимкан, Кульдур и Биракан, дренирующие территории, находящиеся в зоне Биджанского месторождения железомарганцевых руд, имели высокий уровень загрязнения Mn – 14, 12 и 21 ПДК соответственно. При этом реки Бира (с. Раздольное) и Трек характеризовались средним уровнем загрязнения воды Mn – 7 и 2,5 ПДК (рис. 4).

Третья группа рек (Икура (среднее и нижнее течение) и Сутара) характеризовалась сравнительно высоким содержанием Fe и Mn в июле 2019 г., причем для этих рек отмечались наибольшие концентрации суммарного Fe. В среднем для этой группы рек суммарное содержание Mn и Fe в июле 2019 г. – $0,09 \pm 0,029$ и $1,78 \pm 0,31$ мг/дм³ соответственно (рис. 5). Для этих рек характерно заметное превышение ПДК Mn и Fe (рис. 4).

На самой южной из точек отбора, расположенной в ее нижнем течении, в 8 км от впадения в Биру, обнаружено наибольшее содержание Mn в 2019 г. – $0,139 \pm 0,028$ мг/дм³. Уровень загрязнения Mn и Fe в исследуемый период в воде р. Икуры (нижнее течение) оценивался как высокий (14 ПДК). Как и для Mn, сравнительно высокое содержание Fe (16,8 ПДК) выявлено в среднем течении Икуры ($1,679 \pm 0,336$ мг/дм³), а наибольшее (23,6 ПДК) – в нижнем ее течении ($2,358 \pm 0,470$ мг/дм³).

Заметим, что наиболее загрязненная р. Икура протекает по равнинной заболоченной территории с торфяно-болотными почвами. Как известно, торфяно-болотные места являются источником поступления в воды большого количества гуминовых кислот [2]. Гуминовые кислоты болотных вод переводят Mn и Fe в растворимые комплексы, способствуя их миграции и поступлению в поверхностные водотоки [18].

В р. Сутаре, имевшей на момент отбора рыжую мутную воду с обилием взвеси, определено достаточно большое содержание Fe и Mn – $1,309 \pm 0,262$ (13,1 ПДК) и $0,039 \pm 0,008$ мг/дм³ (3,9 ПДК) соответственно (рис. 1, 4). Избыточное количество Fe в воде Сутары может быть связано с расположением в ее долине торфяно-болотных и буротаежных глеевых почв, а также с разгрузкой железистых подземных вод, источники которых – железистые сланцы [3]. Кроме того, в бассейне Сутары ведется добыча рассыпного золота, сопровождающаяся сбросом в водотоки большого объема взвешенных веществ и увеличением содержания Fe в воде [3].

Заключение

В октябре 2018 г. и июле 2019 г. было проведено опробование поверхностных вод ЕАО, которое позволило выявить контур распределения уровней содержания Fe и Mn в бассейне р. Биры, что было статистически подтверждено корреляционным и кластерным анализом.

Показано, что концентрация Mn в осенний (2018 г.) и летний периоды (2019 г.) достоверно отличается в силу различий природных условий. Одновременно с этим распределение валового содержания Mn по рекам в той или иной мере сохраняется. Это подтверждается наличием заметной корреляционной связи между валовым содержанием Mn в эти периоды в речных водах.

Более того, корреляционный анализ выявил весьма высокую достоверную связь между валовым содержанием Mn и Fe в исследованных реках, что позволяет говорить о близких источниках поступления тяжелых металлов в воду.

В результате кластерного анализа выявлено три группы рек, отличающихся концентрацией Fe и Mn в воде. Реки первой группы включают водотоки, берущие начало с южных отрогов Буреинского хребта: Каменушка, Никита, Сагды-Бира. Марганцевой рудоносности в водах этих рек не ощущается. В водотоках второй группы рек (Кимкан, Кульдур, Биракан, Трек, Бира (с. Раздольное)), протекающих в северо-западной части области и дренирующих предгорья Малого Хингана, четко проявляется влияние месторождений железомарганцевых руд. Третья группа рек (Икура (среднее и нижнее течение) и Сутара) характеризуется заметным содержанием тяжелых металлов.

Резкий поворот Биры от горного севера на юг, к Амуру, происходит на фоне контрастного изменения рельефа и тесного контакта реки с соседствующей с нею заболоченной равниной. Природные процессы и источники поступления Mn в речные воды меняются: начинается поступление растворимых гумусовых комплексов металла с болотного водосбора.

Статистически подтверждено влияние гидротермического фактора (температура воды) на концентрацию Mn и Fe в поверхностных водах. Корреляционная связь между температурой воды и тяжелыми металлами (Mn и Fe) является статистически значимой при $p < 0,01$ и оценивается как высокая.

Полученные данные свидетельствуют о необходимости дальнейшего проведения мониторинга поверхностных вод ЕАО с целью определения уровней содержания тяжелых металлов, закономерностей их распределения и выявления миграции данных элементов в водотоках в связи с появлением антропогенного фактора – разработки месторождений полезных ископаемых.

Список источников

1. *Бондарева Д.Г.* Влияние природных и антропогенных факторов на повышенную концентрацию железа в питьевых водах Еврейской автономной области // Изв. Самарского науч. центра РАН. 2009. Т. 11, № 1 (6). С. 1123–1126. EDN: MCLBNZ.
2. *Левшина С.И.* Распределение железа в поверхностных водах бассейна Среднего и Нижнего Амура // Водные ресурсы. 2012. Т. 39, № 4. С. 377–384. EDN: OZKFOB.
3. *Христофорова Н.К., Клинская Е.О., Суриц О.В., Бондарева Д.Г., Антонова М.С.* Еврейская автономная область как биогеохимическая провинция. Биробиджан: ПГУ им. Шолом-Алейхема, 2012. 250 с. EDN: QKLEOT.
4. *Гибков Е.В., Закруткин В.Е., Склярченко Г.Ю., Решетняк В.Н.* Техногенные шахтные воды Восточного Донбасса и их влияние на микроэлементный состав речных вод и донных отложений // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2023. № 4. С. 79–90. EDN: HCCPIZ. <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2023-4-79-90>
5. *Шамарина М.А.* Внутригодовая динамика химического состава воды в устье реки Баксан // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2024. № 3. С. 132–140. EDN: AUALPL. <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2024-3-132-140>
6. *Ревуцкая И.Л., Христофорова Н.К., Суриц О.В.* Марганец в гидросфере Еврейской автономной области: поверхностные воды // Вестн. евразийской науки. 2020. Т. 12, № 6. URL: <https://esj.today/PDF/02NZVN620.pdf> (дата обращения: 18.11.2024). EDN: GVKGKF. <https://doi.org/10.15862/02NZVN620>
7. *Макаренко В.П., Позднякова Т.М., Поляков В.Ю., Ревуцкая И.Л., Христофорова Н.К., Касатова Е.А.* Марганец в речных водах Еврейской автономной области // III Междунар. науч.-образов. форум «Хэй-лунцзян – Приамурье»: сб. материалов Междунар. науч. конф. Биробиджан: Приамурский гос. ун-т. 2019. С. 201–209. EDN: RBOVFF.
8. Еврейская автономная область: энцикл. словарь / Андриевский Б.П. [и др.]; отв. ред. В.С. Гуревич и Ф.Н. Рянский. Биробиджан; Хабаровск: РИОТИП, 1999. 366 с.
9. География Еврейской автономной области: общий обзор / под ред. Е.Я. Фрисмана. Биробиджан: ИКАРП ДВО РАН, 2018. 408 с. EDN: BZKLMQ.
10. ГОСТ 31861-2012. Вода. Общие требования к отбору проб. М.: Стандартинформ, 2013. 36 с.
11. РД 52.24.467-2008. Массовая концентрация марганца в водах. Методика выполнения измерений фотометрическим методом с формальдоксимом. Ростов н/Д., 2008. 16 с.
12. ПНД Ф 14.1:2.4.214-06. Количественный химический анализ вод. Методика измерений массовых концентраций железа, кадмия, марганца, никеля, меди, цинка, хрома, свинца в питьевых, поверхностных и сточных водах методом пламенной атомно-абсорбционной спектрометрии. М., 2006. 22 с.
13. РД 52.24.643-2002. Методические указания. Метод комплексной оценки степени загрязнения поверхностных вод по гидрохимическим показателям. URL: <https://base.garant.ru/70467388/> (дата обращения: 04.10.2024).
14. *Лакин Г.Ф.* Биометрия. М.: Высшая школа, 1990. 352 с.
15. Об утверждении нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения (с изменениями на 13 июня 2024 года): приказ Минсельхоза России от 13.12.2016 № 552. 199 с. URL: <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1&documentId=477262&ysclid=mbghr9xap2134591415> (дата обращения: 05.08.2024).
16. *Линник П.Н., Набиванец Б.И.* Формы миграции металлов в пресных поверхностных водах. Л.: Гидрометеоздат, 1986. 268 с.

17. Соромотин А.В., Кудрявцев А.А., Ефимова А.А., Гертер О.В., Фефилов Н.Н. Фоновое содержание тяжелых металлов в воде малых рек Надым-Пуровского междуречья // Геоэкология, инженерная геология, гидрогеология, геокриология. 2019. № 2. С. 48–55. EDN: TWTCHQ. <https://doi.org/10.31857/S0869-78092019248-55>

18. Зубарев В.А. Изменение концентраций тяжелых металлов в компонентах малой реки (на примере осушительной мелиорации) // Изв. Томского политехн. ун-та. Инжиниринг георесурсов. 2020. Т. 331, № 8. 16–23. EDN: OUWOFG. <https://doi.org/10.18799/24131830/2020/8/2764>

References

1. Bondareva D.G. Influence of natural and anthropogenous factors on the raised iron concentration of drinking water in Jewish autonomous region. *Bulletin of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2009;11(1):1123-1126. (In Russ.). EDN: MCLBNZ.
2. Levshina S.I. Iron distribution in surface waters in the Middle and Lower Amur basin. *Water Resources*. 2012;39(4):375-383. EDN: RGCZPJ. <https://doi.org/10.1134/S0097807812040082>
3. Khristoforova N.K., Klinskaya E.O., Surits O.V., Bondareva D.G., Antonova M.S. *The Jewish Autonomous Region as a biogeochemical province*. Birobidzhan: Sholom-Aleichem Amur State University; 2012. 250 p. (In Russ.). EDN: QKLEOT.
4. Gibkov E.V., Zakrutkin V.E., Sklyarenko G.Yu., Reshetnyak V.N. Technogenic mine waters of Eastern Donbass and their influence on the microelement composition of river waters and bottom sediments. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science*. 2023;(4):79-90. (In Russ.). EDN: HCCPIZ. <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2023-4-79-90>
5. 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.). EDN: AUALPL. <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2024-3-132-140>
6. Revutskaya I.L., Khristoforova N.K., Surits O.V. Manganese in the hydrosphere of the Jewish autonomous region: surface water. *Eurasian Scientific J*. 2020;12(6). Available from: <https://esj.today/PDF/02NZVN620.pdf> [Accessed 18th November 2024]. (In Russ.). EDN: GVKGKF. <https://doi.org/10.15862/02NZVN620>
7. Makarenko V.P., Pozdnyakova T.M., Polyakov V.Yu., Revutskaya I.L., Khristoforova N.K., Kasatova E.A. Manganese in river waters of the Jewish autonomous area. *3rd International Scientific and Educational Forum "Heilongjiang - Amur Region": collection of materials of the International Scientific Conference*. Birobidzhan: Information Center of Sholom-Aleichem Amur State University; 2019:201-209. (In Russ.). EDN: RBOVFF.
8. Andrievsky B.P. et al. *Jewish Autonomous Region: encyclopedic dictionary*. V.S. Gurevich and F.N. Ryansky (eds.). Birobidzhan, Khabarovsk: RIOTIP; 1999. 366 p. (In Russ.).
9. Frisman E.Ya., ed. *Geography of the Jewish Autonomous Region: General Overview*. Birobidzhan: Institute of Complex Analysis of Regional Problems of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences; 2018. 408 p. (In Russ.). EDN: BZKLMQ.
10. GOST 31861-2012. *Water. General requirements for sampling*. Moscow: Standartinform; 2013. 36 p. (In Russ.).
11. RD 52.24.467-2008. *Mass concentration of manganese in waters. Methodology for performing measurements by the photometric method with formaldoxime*. Rostov-on-Don, 2008. 16 p. (In Russ.).
12. PND F 14.1:2:4.214-06. *Quantitative chemical analysis of water. Methodology for measuring mass concentrations of iron, cadmium, manganese, nickel, copper, zinc, chromium, lead in drinking, surface and waste water using flame atomic absorption spectrometry*. Moscow, 2006. 22 p. (In Russ.).
13. RD 52.24.643-2002. *Methodological guidelines. Method for comprehensive assessment of the degree of pollution of surface waters based on hydrochemical indicators*. Available from: <https://base.garant.ru/70467388/> [Accessed 4th October 2024]. (In Russ.).
14. Lakin G.F. *Biometrics*. Moscow: Higher School; 1990. 352 p. (In Russ.).
15. *On approval of water quality standards for water bodies of fishery importance, including standards for maximum permissible concentrations of harmful substances in the waters of water bodies of fishery importance (as amended on June 13, 2024)*: Order of the Ministry of Agriculture of Russia at December 13, 2016 No. 552. 199 p. Available from: <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1&documentId=477262&ysclid=mbghr9xap2134591415> [Accessed 5th August 2024]. (In Russ.).
16. Linnik P.N., Nabivanets B.I. *Forms of metal migration in fresh surface waters*. Leningrad: Hydrometeorological Publishing; 1986. 268 p. (In Russ.).
17. Soromotin A.V., Kudryavtsev A.A., Efimova A.A., Gerter O.V., Fefilov N.N. The background content of heavy metals in the water of small rivers in the Nadym - Pur interfluvial area. *Geocology, Engineering Geology, Hydrogeology, Geocryology*. 2019;(2):48-55. (In Russ.). EDN: TWTCHQ. <https://doi.org/10.31857/S0869-78092019248-55>
18. Zubarev V.A. Change of concentrations of heavy metals in the components of a small river (on the example of drainage reclamation). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2020;331(8):16-23. (In Russ.). EDN: OUWOFG. <https://doi.org/10.18799/24131830/2020/8/2764>

Информация об авторах

И.Л. Ревуцкая – кандидат биологических наук, доцент, заведующая кафедрой экологии и географии ПГУ им. Шолом-Алейхема.

О.Л. Ревуцкая – кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории экологии НОЦ «Центр исследований и инноваций» ПГУ им. Шолом-Алейхема; старший научный сотрудник ИКАРП ДВО РАН.

Т.М. Позднякова – кандидат географических наук, доцент кафедры экологии и географии ПГУ им. Шолом-Алейхема.

О.В. Суриц – кандидат биологических наук, заведующая отделом системы качества испытательного лабораторного центра и органа инспекции – химик-эксперт в медицинской организации, ЦГЭ ЕАО.

Information about the author

I.L. Revutskaya – Candidate of Science (Biology), Associate Professor, Head of the Department of Ecology and Geography, Sholom-Aleichem ASU.

O.L. Revutskaya – Candidate of Science (Physics and Mathematics), Leading Researcher Laboratory of Ecology, Center for Research and Innovation Sholom-Aleichem ASU; Senior Researcher, ICARP FEB RAS.

T.M. Pozdnyakova – Candidate of Science (Geography), Associate Professor, Department of Ecology and Geography, Sholom-Aleichem ASU.

O.V. Surits – Candidate of Science (Biology), Head of the Quality System Department of the Testing Laboratory Centre and Inspection Body - Expert Chemist, CHE JAR.

*Статья поступила в редакцию 25.11.2024; одобрена после рецензирования 18.01.2025; принята к публикации 23.04.2025.
The article was submitted 25.11.2024; approved after reviewing 18.01.2025; accepted for publication 23.04.2025.*

Научная статья

УДК 551.594

<https://doi.org/10.18522/1026-2237-2025-2-95-103>

СУТОЧНАЯ ДИНАМИКА АТМОСФЕРНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ В ТУРБУЛЕНТНО-КОНВЕКТИВНОМ ПРИЗЕМНОМ СЛОЕ

Дмитрий Владимирович Тимошенко¹, Геннадий Владимирович Куповых²✉

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

¹dmitrytim@sfedu.ru, <https://orcid.org/0009-0004-0444-2807>

²kupovykh@sfedu.ru ✉

Аннотация. Проведено математическое моделирование электрического состояния атмосферы в приближении электродного эффекта. С помощью уравнения для полного электрического тока исследована динамика характеристик электродного слоя с учетом одновременного действия локальных механизмов турбулентного и конвективного переноса. Установлены эффекты временной и амплитудной зависимостей суточной вариации напряженности электрического поля в приземном слое от интенсивности турбулентного и конвективного переносов.

Ключевые слова: электродный эффект, электрическое поле, электрический ток, приземный слой, турбулентное перемешивание, конвективный перенос

Для цитирования: Тимошенко Д.В., Куповых Г.В. Суточная динамика атмосферного электрического поля в турбулентно-конвективном приземном слое // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2025. № 2. С. 95–103. <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2025-2-95-103>

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

Original article

DIURNAL DYNAMICS OF THE ATMOSPHERIC ELECTRIC FIELD IN A TURBULENT-CONVECTIVE SURFACE LAYER

Dmitry V. Timoshenko¹, Gennady V. Kupovykh²✉

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

¹dmitrytim@sfedu.ru, <https://orcid.org/0009-0004-0444-2807>

²kupovykh@sfedu.ru ✉

Abstract. Mathematical modeling of the atmospheric electrical state in the electrode effect approximation is carried out. The dynamics of the electrode layer characteristics is studied using the equation for the total electric current, taking into account the simultaneous local mechanisms action of turbulent and convective transport. The effects of time and amplitude dependences of the electric field diurnal variation in the surface layer on the intensity of turbulent and convective transport have been established.

Keywords: electrode effect, electric field, electric current, surface layer, turbulent mixing, convective transport

© Тимошенко Д.В., Куповых Г.В., 2025

For citation: Timoshenko D.V., Kupovykh G.V. Diurnal Dynamics of the Atmospheric Electric Field in a Turbulent-Convective Surface Layer. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science*. 2025;(2):95-103. (In Russ.). <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2025-2-95-103>

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

Введение

Исследование суточных изменений напряженности электрического поля в нижних слоях атмосферы под воздействием локальных метеоусловий представляет собой актуальную задачу и с теоретической точки зрения, и в прикладных областях, таких как контроль состояния атмосферного электрического поля, оценка влияния на атмосферу антропогенных факторов, прогнозирование метеорологических и климатических процессов [1]. Электрическая характеристика приземного слоя определяется электродным эффектом [2], действие которого способствует формированию электродного слоя у поверхности Земли.

Основной компонентой суточных колебаний электрического поля считается его унитарная вариация, связанная с изменениями потенциала ионосферы, проявляющаяся в виде утреннего минимума (04^h–05^h UT) и вечернего максимума (18^h–20^h UT). Первичные наблюдения этой вариации были выполнены в условиях ясной погоды над океанской поверхностью [3].

Метеорологические измерения на материковых станциях выявили наличие дополнительного дневного пика в суточных изменениях напряженности электрического поля. В [4, 5] это явление связывается с присутствием аэрозолей в атмосфере, однако аналогичные эффекты обнаружены и при измерениях в высокогорных районах Приэльбрусья, где уровень аэрозольного загрязнения минимален [6].

В исследованиях [1, 7] рассмотрены суточные вариации электрического поля в приземном слое под действием турбулентных процессов переноса. В то же время при соответствующих условиях не менее интенсивное влияние на электрические процессы в приземном слое оказывают конвективные потоки. Наиболее выражен эффект конвективного переноса в периоды восхода солнца, обусловленный ростом интенсивности восходящих тепловых потоков вследствие увеличения теплового излучения [8].

Цель работы – изучение динамики параметров электродного слоя у поверхности Земли при совместном воздействии турбулентных и конвективных механизмов переноса.

Математическая модель приземного слоя атмосферы

Основной математической модели в настоящей работе является нестационарное уравнение полного тока [2], которое в случае отсутствия аэрозольных примесей в атмосфере имеет вид

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

где правая часть представляет собой полный ток j , состоящий из суммы токов проводимости: конвективного и турбулентного; E – напряжённость электрического поля; D – коэффициент турбулентной диффузии; ν – скорость конвективного переноса; λ – электрическая проводимость воздуха; t – время по Гринвичу; z – высота.

Суточные вариации полного электрического тока, согласно данным исследования [9], моделируются гармонической функцией, повторяющей глобальную унитарную суточную вариацию. Общая формулировка начально-краевой задачи для уравнения (1), обеспечивающая получение пространственно-временного распределения напряженности электрического поля в электродном слое, изложена в [9]. В работах [1, 9, 10] представлены решения уравнения полного тока для различных режимов: классического, турбулентного и конвективно-неустойчивого электродного слоя. При этом рассматривались случаи постоянных коэффициентов турбулентного и конвективного обмена внутри слоя. В исследовании [11] проанализирован электродный слой с переменным во времени коэффициентом турбулентного обмена, суточная вариация которого определена на основе экспериментальных данных.

Известно, что коэффициент турбулентной диффузии также зависит от высоты в пределах электродного слоя [12], а форма этой зависимости определяется особенностями стратификации приземного слоя и временем [9, 11]. В настоящей работе рассматривается обобщенное представление величины, позволяющее объединить указанные аспекты и сохранить размерность данной переменной [2, 13, 14].

$$D(t, z) = [D_0 + D_1 \sin(\omega t)]z, \quad (2)$$

где $\omega = 2\pi/T$; $T = 24$ ч; D_0 и D_1 – множители, обобщающие экспериментальные зависимости коэффициента турбулентной диффузии [9, 11, 12].

Соотношение (2) следует из объединения экспериментальных результатов измерения временных зависимостей [9, 11], гидродинамических гипотез [12] и расщепляемости общих уравнений электродного эффекта по физическим процессам [9].

В уравнении полного тока отдельно учитывается конвекция, в пределах электродного слоя определяемая соотношением [6]

$$v = v_0 \frac{z}{L} \left(1 - \frac{z}{L} \right), \quad (3)$$

где v_0 – скорость конвективного переноса у нижней границы электродного слоя; L – масштаб электродного слоя. Электрическую проводимость воздуха в пределах электродного слоя считаем постоянной $\lambda = \lambda_0 = 3 \cdot 10^{-14}$ Ом/м [2].

В случае $v_0 = 0$ уравнение (1) соответствует турбулентному электродному слою без конвективного переноса. Вариации коэффициента турбулентной диффузии представлены двумя составляющими: и высотной, и временной. В работах [9, 11] – отдельно временной и отдельно высотной, а в [12, 15] – зависимостью вида (2), описывающей все случаи турбулентного электродного эффекта. При отсутствии конвективных процессов одновременное обращение в нуль высотной и координатной составляющих коэффициента турбулентной диффузии в (2) означает переход к классическому электродному слою [2, 16]. При этом, как следует из [10] и основного модельного уравнения (1), при конвективном обмене и отсутствии турбулентности можно получить уравнение для предельного случая – электродного эффекта в условиях конвективно-неустойчивого приземного слоя.

В общем случае уравнение (1) представляет собой существенно нелинейное уравнение параболического типа с переменными коэффициентами. Для его решения применялся метод Галёркина [17–20]. Оценка скорости сходимости метода и точности приближенного решения приводится в [19]. Пространственно-временное распределение электрического поля в приземном слое атмосферы определяется выражением [10]:

$$E(t, z) = \sum_{k=1}^3 E_0 e^{\frac{-k\varepsilon_0 \left(\frac{D_0 + D_1}{L} + v_0 \right) z}{L} t} \sin(\omega t) \left(\frac{z}{z_0} \right)^{3k+2} + \frac{j_0}{\lambda_0}. \quad (4)$$

Электрические характеристики приземного слоя

Решение (4) уравнения (1) позволяет провести исследование параметров электродного слоя: электродного эффекта, напряженности электрического поля, тока проводимости, турбулентного и конвективного токов. Для упрощения дальнейших расчетов положим $D_0 = D_1$.

На рис. 1 приведен суточный ход напряженности электрического поля на высоте 1 м при различных значениях скорости турбулентного переноса и фиксированном значении скорости конвективного переноса. Увеличение интенсивности турбулентного переноса приводит к смещению по времени утреннего минимума в область (08^h–09^h) УТ и вечернего максимума в область (20^h–21^h) УТ напряженности электрического поля в приземном слое.

Данный эффект ранее был получен для электродного слоя со стационарным характером турбулентного обмена [1]. Также с ростом D_0 увеличивается примерно на 20 % максимум напряженности электрического поля.

На рис. 2 представлены графики суточного хода напряженности электрического поля в приземном слое, отражающие влияние интенсивности конвективного переноса.

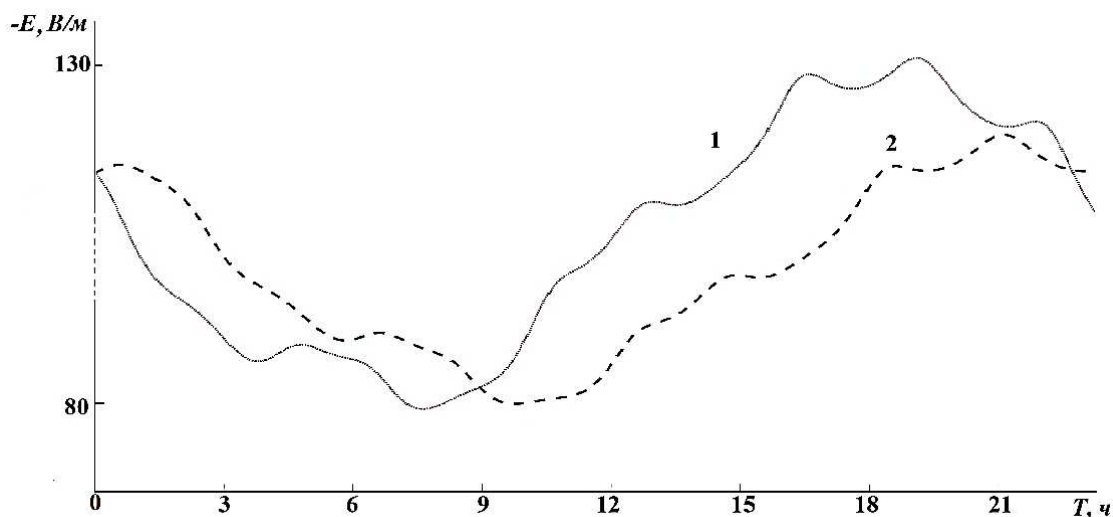


Рис. 1. Суточный ход напряженности электрического поля на высоте 1 м: 1 – $D_0=0,01$ м/с, $v_0=0,1$ м/с; 2 – $D_0=0,1$ м/с, $v_0=0,1$ м/с; $E_0=-100$ В/м / Fig. 1. Daily variation of electric field strength at a height of 1 m: 1 – $D_0=0.01$ m/s, $v_0=0.1$ m/s; 2 – $D_0=0.1$ m/s, $v_0=0.1$ m/s; $E_0=-100$ V/m

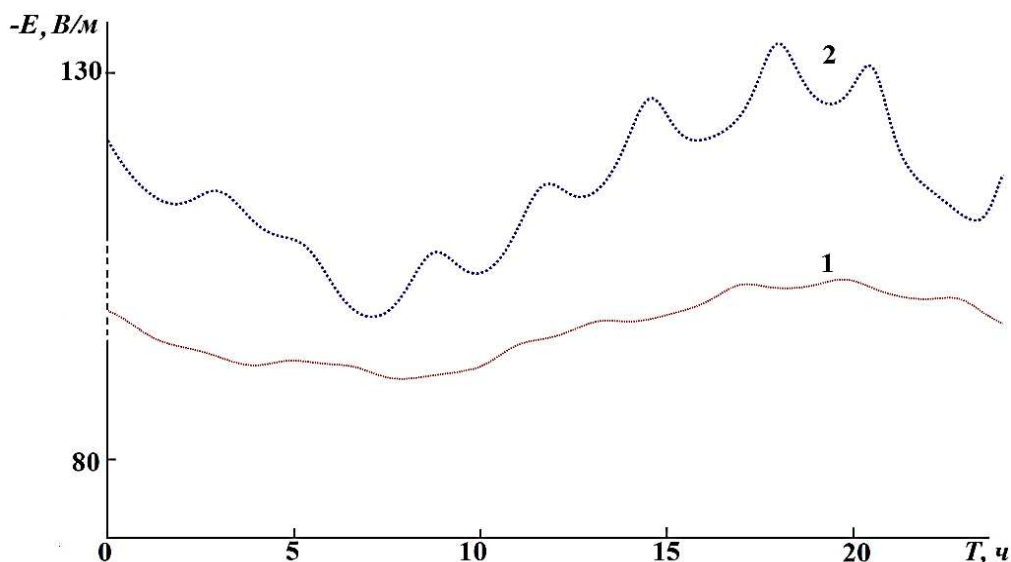


Рис. 2. Влияние интенсивности конвективного переноса на суточный ход напряженности электрического поля в приземном слое: 1 – $D_0=0,01$ м/с, $v_0=0,01$ м/с; 2: $D_0=0,01$ м/с, $v_0=0,5$ м/с; $E_0=-100$ В/м / Fig. 2. The influence of the intensity of convective transfer on the diurnal variation of the electric field strength in the surface layer: 1 – $D_0=0.01$ m/s, $v_0=0.01$ m/s; 2 – $D_0=0.01$ m/s, $v_0=0.5$ m/s; $E_0=-100$ V/m

Из рис. 2 можно видеть, что усиление интенсивности конвективного переноса (рост параметра v_0) ведет к появлению второстепенных экстремумов на суточном ходе электрического поля $E(t)$. Также наблюдается увеличение абсолютных значений (до 30 %) напряженности электрического поля при одинаковых его значениях на нижней границе электродного слоя ($E_0=-100$ В/м). При этом смещение суточных экстремумов напряженности электрического поля не наблюдается.

Далее исследуем величину электродного эффекта, тока проводимости, турбулентного и конвективного токов в приземном слое при различной интенсивности турбулентного и конвективного обмена.

Расчеты значений плотности тока проводимости ($j_{np} = \lambda E$), турбулентного ($j_T = \varepsilon_0 D(t, z) \frac{\partial^2 E}{\partial z^2}$) и конвективного ($j_k = \varepsilon_0 v(z) \frac{\partial E}{\partial z}$) токов проводим при помощи решения (4) уравнения полного тока (1).

Необходимо отметить, что интенсивность турбулентного обмена определяет масштаб электродного слоя L . С учетом зависимости (2) масштаб электродного слоя вычислим следующим образом [2, 13, 14]:

$$L = D_0 \tau, \tag{5}$$

здесь $\tau \approx 250$ с – характерное время электрической релаксации [2].

Таблица 1 отражает зависимость характеристик электродного слоя от интенсивности турбулентного и конвективного переносов. Рост интенсивности турбулентного перемешивания ведет к усилению электродного эффекта (E_0/E_∞), который возрастает на 30–40 % в часы вечернего максимума и утреннего минимума суточного хода напряженности электрического поля. Увеличение степени турбулентного перемешивания (от 0,01 до 0,1 м/с) усиливает разницу значений плотности тока проводимости и плотности турбулентного тока. Также наблюдается увеличение значений конвективного тока с ростом интенсивности турбулентного переноса.

Таблица 1 / Table 1

Характеристики электродного слоя при разной интенсивности турбулентно-конвективного переноса / Characteristics of the electrode layer at different intensities of turbulent-convective transfer

Вид переноса	Параметры	t, ч	E_0/E_∞	j_{np} , пА/м ²	j_T , пА/м ²	j_k , пА/м ²
Турбулентный	$D_0=0,01$ м/с, $v_0=0,1$ м/с, $E_0=-100$ В/м, $L=2,5$ м	0	1,93	3,88	2,54	3,12
		3	1,91	3,82	2,32	2,82
		6	1,78	3,55	2,23	2,51
		9	1,89	3,43	1,77	1,9
		12	1,97	3,43	1,35	1,87
		15	2,36	3,21	2,25	2,35
		18	2,57	4,34	2,73	2,62
		21	2,49	5,12	3,39	3,21
	$D_0=0,1$ м/с, $v_0=0,1$ м/с, $E_0=-100$ В/м, $L=25$ м	0	2,19	3,69	4,12	4,32
		3	1,97	4,25	3,91	4,62
		6	1,80	3,98	3,82	4,03
		9	1,65	3,77	3,63	3,97
		12	1,55	3,51	3,34	3,51
		15	1,78	3,21	3,09	3,45
18		2,12	4,18	4,11	4,08	
21	2,34	5,29	4,73	5,43		
Конвективный	$D_0=0,01$ м/с, $v_0=0,5$ м/с, $E_0=-100$ В/м, $L=2,5$ м	0	3,21	3,55	2,77	6,17
		3	2,97	3,97	2,59	6,32
		6	2,81	3,73	2,43	5,83
		9	2,69	3,68	1,83	4,97
		12	2,27	3,57	1,66	4,63
		15	2,46	3,49	2,51	3,95
		18	2,79	4,75	2,88	5,49
		21	2,88	5,59	3,27	5,34

Рост интенсивности конвективного переноса ведет к увеличению всех рассматриваемых параметров электродного слоя, в особенности конвективного тока. В среднем конвективный ток возрастает в два раза при росте скорости конвекции в пять раз. Также наблюдается увеличение электродного эффекта порядка 30 %.

Для сравнения проанализируем характеристики электродного слоя в случае сильного поля (табл. 2).

В сильном поле величина электродного эффекта возрастает на 10–15 % во всех трех случаях. При этом плотность турбулентного тока снижается в диапазоне от 20 % при низкой интенсивности турбулентного переноса до 50 % – при высокой, происходит «подавление» турбулентности сильным электрическим полем (табл. 2). Также наблюдается увеличение тока проводимости до 20 % по сравнению со данными табл. 1. Динамика поведения плотности конвективного тока при росте интенсивности конвективного переноса сохраняется.

Таблица 2 / Table 2

Характеристики турбулентно-конвективного электродного слоя в сильном электрическом поле
/ Characteristics of a turbulent-convective electrode layer in a strong electric field

Интенсивность турбулентного переноса	Параметры	t, ч	E_0/E_∞	$j_{np}, \text{пА/м}^2$	$j_T, \text{пА/м}^2$	$j_k, \text{пА/м}^2$
Низкая	$D_0=0,01 \text{ м/с},$ $v_0=0,1 \text{ м/с},$ $E_0=-500 \text{ В/м},$ $L=2,5 \text{ м}$	0	2,12	4,15	2,10	3,09
		3	2,10	4,09	1,95	2,92
		6	1,98	3,93	1,63	2,57
		9	2,15	3,75	1,25	2,03
		12	2,23	3,69	0,87	1,85
		15	2,59	3,52	1,77	2,27
		18	2,91	4,79	2,21	2,67
		21	2,75	5,67	2,83	3,25
Высокая	$D_0=0,1 \text{ м/с},$ $v_0=0,1 \text{ м/с},$ $E_0=-500 \text{ В/м},$ $L=25 \text{ м}$	0	2,43	3,91	2,05	4,51
		3	2,15	4,62	1,87	4,79
		6	2,03	4,39	1,96	4,27
		9	1,87	4,06	1,89	4,15
		12	1,79	3,82	1,91	3,76
		15	1,96	3,59	1,53	3,69
		18	2,44	4,67	2,03	4,33
		21	2,61	5,81	2,59	5,69

Далее построим профили напряженности электрического поля в пределах электродного слоя. В выражении для напряженности электрического поля (4) фиксируется значение переменной t , с шагом 0,5 м вычисляются значения величины E .

На рис. 3 приведены профили напряженности электрического поля, отражающие утренний минимум ($E=-80-90 \text{ В/м}$, рис. 3а) и вечерний максимум ($E=-110-120 \text{ В/м}$, рис. 3б) для трех значений коэффициента турбулентного переноса.

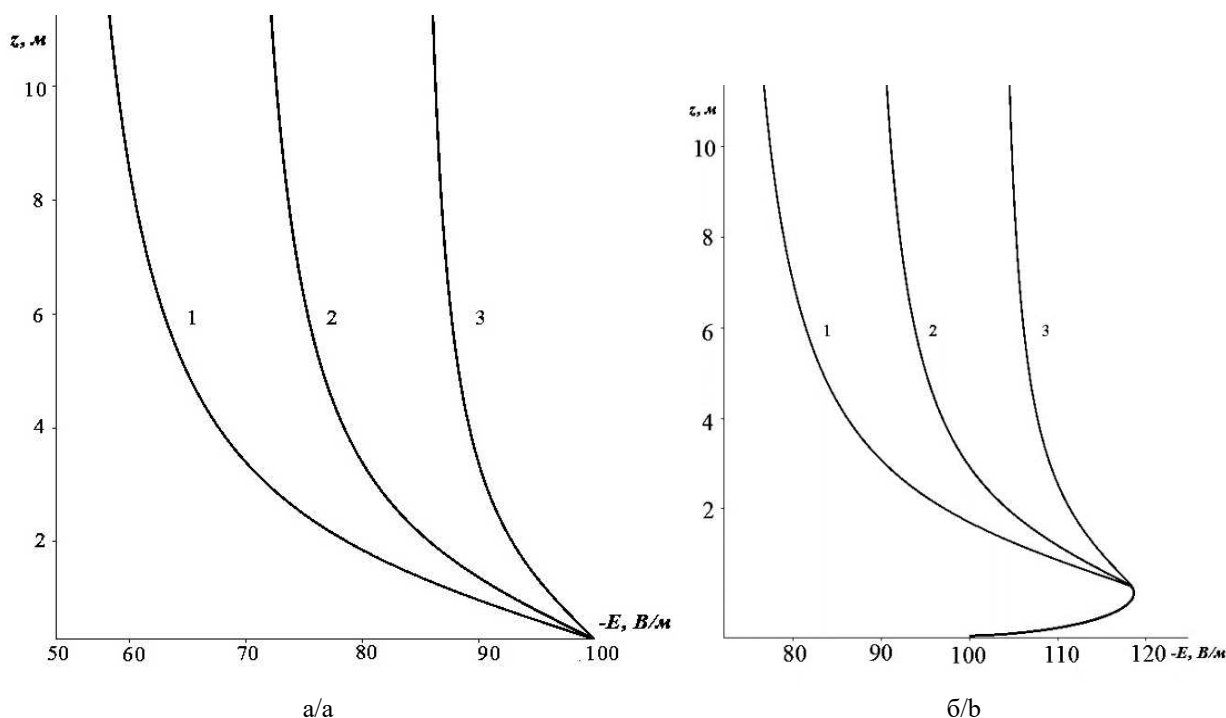


Рис. 3. Профили напряженности поля в турбулентном электродном слое: а – утренний минимум; б – вечерний максимум; 1 – $D_z=0,03$; 2 – $D_z=0,02$; 3 – $D_z=0,01$, $v_0=0,1$ / Fig. 3. Field strength profiles in the turbulent electrode layer: a - morning minimum; b - evening maximum; 1 – $D_z=0.03$; 2 - $D_z=0.02$; 3 - $D_z=0.01$, $v_0=0.1$

Наибольшие значения напряженности (с учетом электродного эффекта) в данный момент времени соответствуют наименьшей интенсивности турбулентного переноса. Данный факт подтверждает смещение по времени суточных экстремумов вариации напряженности электрического поля.

Заключение

В результате проведенных исследований установлено, что параметры электродного слоя и, как следствие, профили напряженности электрического поля, значения плотности тока проводимости, плотности турбулентного и конвективного токов в значительной степени зависят от локальных факторов: интенсивности турбулентного перемешивания и скорости конвективного переноса. Данные эффекты наблюдаются в стандартном и сильном полях. В частности, при увеличении интенсивности турбулентного переноса смещается время суточных экстремумов напряженности электрического поля в область 08^h–09^h UT для утреннего минимума и в область 20^h–21^h UT для вечернего максимума. Рост интенсивности конвективного переноса ведет к появлению дополнительных максимумов и минимумов в суточном ходе напряженности и общему возрастанию величины напряженности поля до 30 %. В то же время интенсивность конвективного переноса не влияет на время наступления суточных экстремумов напряженности электрического поля.

Результаты расчетов могут быть полезны при анализе рядов наземных атмосферно-электрических наблюдений, в частности при выделении глобальных возмущений электрического поля на фоне локальной изменчивости данных.

Список источников

1. 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. EDN: MVNDLT. <https://doi.org/10.31857/S0002351521040027>
2. Куповых Г.В., Морозов В.Н., Шварц Я.М. Теория электродного эффекта в атмосфере. Таганрог: Изд-во ТРТУ, 1998. 123 с.
3. Mauchly S.J. Diurnal variation on the potential gradient of atmospheric // Terr. Magn. Atm. El. 1923. Vol. 28. P. 61–81.
4. Чалмерс Дж.А. Атмосферное электричество. Л.: Гидрометеиздат, 1974. 420 с.
5. Шаталина М.В., Мареев Е.А., Клименко В.В., Кутерин Ф.А., Николл К.А. Экспериментальное исследование суточных и сезонных вариаций атмосферного электрического поля // Изв. вузов. Радиофизика. 2019. Т. 62, № 3. С. 205–214. EDN: EXKINR.
6. Куповых Г.В. Электродинамические процессы в приземном слое атмосферы. Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2009. 114 с. EDN: HYEYTN.
7. 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. EDN: CRHAJU. <https://doi.org/10.15372/AOO20231007>
8. Агафонцев М.В., Герасимова Л.О., Рейно В.В., Шестернин А.Н. Исследование конвективной турбулентности над нагретой поверхностью методом скоростной термографии // Оптика атмосферы и океана. 2023. Т. 36, № 7. С. 584–590. EDN: TOUDH. <https://doi.org/10.15372/AOO20230707>
9. Тимошенко Д.В. Особенности математического моделирования задач электродинамики приземного слоя // Изв. ЮФУ. Техн. науки. 2023. № 5. С. 152–162. EDN: QCWKKW. <https://doi.org/10.18522/2311-3103-2023-5-152-162>
10. Белоусова О.В., Тимошенко Д.В., Куповых Г.В. Математическое моделирование электрической структуры турбулентно-конвективного приземного слоя // Радиотехн. и телекоммун. системы. 2023. № 3 (51). С. 12–19. EDN: CNTHES. <https://doi.org/10.24412/2221-2574-2023-3-12-19>
11. 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. EDN: ETCUFG. <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2024-3-107-116>
12. Зилитинкевич С.С. Динамика пограничного слоя атмосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1970. 290 с.
13. Гухман А.А. Введение в теорию подобия. М.: Высшая школа, 1973. 296 с.
14. Седов Л.И. Методы подобия и размерности в механике. М.: Наука, 1987. 423 с.

15. Монин А.С., Яглом А.М. Статистическая гидромеханика. Л.: Наука, 1965. Т. 1. 639 с.
16. Нагорский П.М., Пустовалов К.Н., Смирнов С.В. Суточные и сезонные вариации невозмущенного электрического поля и их связь с изменчивостью геофизических величин на юге Западной Сибири // Тр. Военно-космической академии им. А.Ф. Можайского. 2022. № S685. С. 213–222. EDN: IUKCZB.
17. Найфэ А. Введение в методы возмущений. М.: Мир, 1984. 536 с.
18. Тихонов А.Н., Самарский А.А. Уравнения математической физики. 6-е изд. М.: Наука, 1999. 736 с.
19. Уиттекер Э.Т., Ватсон Дж.Н. Курс современного анализа. М.: Гос. изд-во физ.-мат. лит., 1966. Ч. 2. 515 с.
20. Михлин С.Г. Вариационные методы в математической физике. М.: Наука, 1970. 512 с.

References

1. Adzhiev A.Kh., Klovo A.G., Kudrinskaya T.V., Kupovykh G.V., Timoshenko D.V. Diurnal variations of the electric field in the atmospheric boundary layer. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2021;57(4):397-405. EDN: RKJWXP. <https://doi.org/10.1134/S0001433821040137>
2. Kupovykh G.V., Morozov V.N., Shvarts Ya.M. *Theory of the electrode effect in the atmosphere*. Taganrog: Taganrog State Radio Engineering University Publishing House; 1998. 123 p. (In Russ.).
3. Mauchly S.J. Diurnal variation on the potential gradient of atmospheric. *Terr. Magn. Atm. El.* 1923;28:61-81.
4. Chalmers J.A. *Atmospheric electricity*. Leningrad: Hydrometeorological Publishing; 1974. 420 p. (In Russ.).
5. Shatalina M.V., Mareev E.A., Klimenko V.V., Kuterin F.A., Nicoll K.A. Experimental study of diurnal and seasonal variations in the atmospheric electric field. *Radiophysics and Quantum Electronics*. 2019;62(3):183-191. <https://doi.org/10.1007/s11141-019-09966-x>
6. Kupovykh G.V. *Electrodynamic processes in the surface layer of the atmosphere*. Taganrog: Taganrog Institute of Technology of the Southern Federal University Publishing House; 2009. 114 p. (In Russ.). EDN: HYEYTN.
7. 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. *Atmosphere and Ocean Optics*. 2023;36(10):834-838. (In Russ.). EDN: CRHAJU. <https://doi.org/10.15372/AOO20231007>
8. Agafontsev M.V., Gerasimova L.O., Reino V.V., Shesternin A.N. Study of convective turbulence over a heated surface using high-speed thermography. *Atmosphere and Ocean Optics*. 2023;36(7):584-590. (In Russ.). EDN: TOOUDH. <https://doi.org/10.15372/AOO20230707>
9. Timoshenko D.V. Features of mathematical modeling of problems of electrodynamics of the surface layer. *Izvestiya SFedU. Engineering Sciences*. 2023;(5):152-162. (In Russ.). EDN: QCWKKW. <https://doi.org/10.18522/2311-3103-2023-5-152-162>
10. Belousova O.V., Timoshenko D.V., Kupovykh G.V. Mathematical modeling of the electrical structure of the turbulent-convective surface layer. *Radio Engineering and Telecommunication Systems*. 2023;(3):12-19. (In Russ.). EDN: CNTHES. <https://doi.org/10.24412/2221-2574-2023-3-12-19>
11. Timoshenko D.V. Modeling of daily variation of the atmospheric electric field in the turbulent surface layer. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science*. 2024;(3):107-116. (In Russ.). EDN: ETCUFG. <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2024-3-107-116>
12. Zilitinkevich S.S. *Dynamics of the atmospheric boundary layer*. Leningrad: Hydrometeorological Publishing; 1970. 290 p. (In Russ.).
13. Gukhman A. A. *Introduction to the theory of similarity*. Moscow: Higher School; 1973. 296 p. (In Russ.).
14. Sedov L. I. *Methods of similarity and dimension in mechanics*. Moscow: Science; 1987. 423 p. (In Russ.).
15. Monin A.S., Yaglom A.M. *Statistical fluid mechanics*. Leningrad: Science; 1965. Vol. 1. 639 p. (In Russ.).
16. Nagorsky P.M., Pustovalov K.N., Smirnov S.V. Daily and seasonal variations of the undisturbed electric field and their connection with the variability of geophysical quantities in the south of Western Siberia. *Proceedings of the Mozhaisky Military Space Academy*. 2022;(S685):213-222. (In Russ.). EDN: IUKCZB.
17. Nayfe A. *Introduction to perturbation methods*. Moscow: World; 1984. 535 p. (In Russ.).
18. Tikhonov A.N., Samarsky A.A. *Equations of mathematical physics*. 6th ed. Moscow: Science; 1999. 736 p. (In Russ.).

19. Whittaker E. T., Watson J.N. *Course of modern analysis*. Moscow: State Publishing House of Physical and Mathematical Literature; 1966. Part 2. 522 p. (In Russ.).

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

Информация об авторах

Д.В. Тимошенко – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физико-математических основ инженерного образования Инженерно-технологической академии ЮФУ.

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

Information about the authors

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

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

*Статья поступила в редакцию 25.10.2024; одобрена после рецензирования 10.12.2024; принята к публикации 23.04.2025.
The article was submitted 25.10.2024; approved after reviewing 10.12.2024; accepted for publication 23.04.2025.*

Научная статья

УДК 504.4.054

<https://doi.org/10.18522/1026-2237-2025-2-104-113>

О СОДЕРЖАНИИ РТУТИ В ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОДАХ БАССЕЙНА ОЗЕРА БАЙКАЛ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ЭКСПЕДИЦИОННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Ю.А. Федоров^{1✉}, Н.В. Доценко², Д.Ф. Костенко³, И.В. Головков⁴, К.С. Станиславский⁵

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

¹ fedorov@sfedu.ru ✉

² nickvd@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0002-9514-0788>

³ solodko@sfedu.ru, <https://orcid.org/0009-0000-6703-7906>

⁴ golovkov@sfedu.ru, <https://orcid.org/0009-0004-7632-8800>

⁵ kst@sfedu.ru, <https://orcid.org/0009-0007-1310-2582>

Аннотация. Представлен анализ распределения растворенной формы ртути в поверхностных водах бассейна оз. Байкал. В летний период 2022 г. на 14 станциях, расположенных на территории Байкальского государственного природного биосферного заповедника и в акватории озера, были отобраны пробы поверхностных вод. Анализ на содержание растворенной формы ртути проводился с использованием анализатора РА-915М в лаборатории Института наук о Земле Южного федерального университета. Полученные результаты продемонстрировали вариативность значений – от 0,002 до 0,042 мкг/дм³ (в среднем 0,019 мкг/дм³). Максимальные уровни были зафиксированы в речных водах, тогда как минимальные – в озерах. На пяти из четырнадцати станций, включая одну на оз. Байкал, превышений предельно допустимых концентраций (ПДК) для рыбохозяйственных водоемов и питьевых вод не было обнаружено. В остальных случаях отмечались точечные превышения, достигающие 4,2 ПДК_{рыб.хоз.}. Определены природные и антропогенные источники поступления ртути в водосборный бассейн озера.

Ключевые слова: Байкал, ртуть, формы миграции, водосборный бассейн, водные объекты

Для цитирования: Федоров Ю.А., Доценко Н.В., Костенко Д.Ф., Головков И.В., Станиславский К.С. О содержании ртути в поверхностных водах бассейна озера Байкал по результатам экспедиционных исследований // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2025. № 2. С. 104–113. <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2025-2-104-113>

Благодарности: исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-17-00038, <https://rscf.ru/project/24-17-00038/>, в Южном федеральном университете.

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

Original article

ON THE MERCURY CONTENT IN SURFACE WATERS OF THE LAKE BAIKAL BASIN BASED ON THE RESULTS OF EXPEDITIONARY RESEARCH

Yu.A. Fedorov^{1✉}, N.V. Dotsenko², D.F. Kostenko³, I.V. Golovkov⁴, K.S. Stanislavsky⁵

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

© Федоров Ю.А., Доценко Н.В., Костенко Д.Ф., Головков И.В., Станиславский К.С., 2025

¹ fedorov@sfedu.ru✉

² nickvd@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0002-9514-0788>

³ solodko@sfedu.ru, <https://orcid.org/0009-0000-6703-7906>

⁴ golovkov@sfedu.ru, <https://orcid.org/0009-0004-7632-8800>

⁵ kst@sfedu.ru, <https://orcid.org/0009-0007-1310-2582>

Abstract. This paper presents an analysis of the distribution of the dissolved form of mercury in the surface waters of Lake Baikal basin. In the summer of 2022, surface water samples were taken at 14 stations located on the territory of the Baikal State Natural Biosphere Reserve and in the lake's water area. The analysis of the dissolved form of mercury was carried out using the analyzer RA-915M in the laboratory of the Institute of Earth Sciences of the Southern Federal University. The results demonstrated a variability of values - from 0,002 to 0,042 µg/l (on average 0,019 µg/l). Maximum levels were recorded in river waters, while minimum values were observed in lake waters. No exceedances of the maximum permissible concentrations (MPC) for fishery reservoirs and drinking waters were detected at five of the fourteen stations, including one on Lake Baikal. In other cases, point exceedances were noted, reaching 4.2MPC for fishery reservoirs. Natural and anthropogenic sources of mercury supply to the lake's drainage basin have been identified.

Keywords: Lake Baikal basin, mercury migration forms, drainage basin, water bodies

For citation: Fedorov Yu.A., Dotsenko N.V., Kostenko D.F., Golovkov I.V., Stanislavsky K.S. On the Mercury Content in Surface Waters of the Lake Baikal Basin Based on the Results of Expeditionary Research. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2025;(2):104-113. (In Russ.). <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2025-2-104-113>

Acknowledgments: the research was supported by the grant of the Russian Science Foundation 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

Байкал – одно из самых грандиозных геологических образований на земном шаре. Его специфический химический состав воды, своеобразие животного и растительного мира, большие, под стать океаническому, глубины, прекрасная вентилируемость и высокое содержание молекулярного кислорода вызывают постоянный интерес у ученых всего мира [1]. В оз. Байкал, исходя из результатов исследований Д.И. Черского, датированных XIX в., впадает 336 рек, речек и ручьев. Крупнейшими притоками являются реки Селенга, Верхняя Ангара, Баргузин [2]. Вытекает из Байкала одна река – Ангара, впадающая сначала в Иркутское водохранилище, а затем в р. Енисей. Селенга вносит в Байкал до 50 % всех водных масс поверхностного речного стока, Верхняя Ангара – до 13–14 % (в среднем 13,5 %) и Баргузин – около 9 %. Из остальных притоков наибольшей водностью отличаются реки Турка, Тья, Голоустная, Бугульдейка и Кучера. Прочие притоки в основном являются мелкими горными речками и ручьями с небольшим дебитом. Их годовой сток составляет около 25 % от общего речного стока в озеро [3, 4].

Историю изучения оз. Байкал можно условно разделить на два этапа: доиндустриальный («фоновый») и индустриальный. На первом этапе, который можно ограничить началом 50-х гг. XX в., в большинстве работ рассматривались вопросы, связанные с изучением естественных факторов и процессов, через познание которых ученые пытались понять феноменологию оз. Байкал. В этот период времени был накоплен и опубликован бесценный материал, характеризующий относительно ненарушенные гидрологический, гидрохимический и биохимический режимы озера [1].

Строительством и пуском в строй Байкальского целлюлозно-бумажного комбината (БЦБК) в 1961–1966 гг. ознаменовано начало второго этапа – индустриального, для которого характерно проведение многочисленных определений ртути. С того времени не утихают споры по поводу их достоверности. Одни авторы [5–7] склонны видеть причины завышения результатов в несовершенстве методов анализа, другие связывают это с методикой отбора проб и определения концентраций ртути (в лаборатории или непосредственно на борту судна) [8].

Состояние проблемы

Анализ ретроспективных данных [5–11] показывает, что содержание ртути в воде озера изменялось от 0,03 до 1 мкг/дм³ и более. В 1973–1977 гг. была проведена советско-американская интеркалибрация методов, применяемых при мониторинге больших озер [12], в которой принимал участие аналитик А.М. Аниканов. В процессе интеркалибрации установлено, что содержание общей ртути в воде Южной котловины оз. Байкал на расстоянии первых километров от БЦБК было меньше её предела обнаружения, равного 0,05 мкг/дм³. Позднее в 1989 г. под руководством Т.Г. Лапердиной [5] проведены исследования распределения концентрации ртути на акватории озера. Зарегистрировано, что повышенные значения (0,02–0,04 мкг/дм³) обнаруживаются только в прибрежных водах в районе выпуска сточных вод БЦБК, на отдаленных участках – ниже предела обнаружения применяемой методики – 0,01 мкг/дм³. Как следует из анализа графика, приведенного в работе [8], наибольшие концентрации ртути, как и разброс их значений, характерен для периода 1981–1987 гг. Затем к 1991–1992 гг. уровни содержания ртути и диапазон вариаций значений по результатам независимых определений Лимнологического института и Росгидромета существенно уменьшились. Таким образом, в анализируемый период наблюдалась тенденция к снижению содержания ртути и её вариабельности. В то же время количество оставалось ещё достаточно высоким. В 1992–1993 гг. бельгийские исследователи [13] определили, что концентрация растворенной ртути в воде озера варьирует в пределах 0,0001–0,0008 мкг/дм³. По мнению М.А. Грачева [8], причина столь существенных расхождений результатов, полученных отечественными и зарубежными исследователями, связана с тем, что российскими учеными в большинстве случаев не производилась фильтрация проб.

Исследования поверхностных вод бассейна оз. Байкал проводились в конце первой декады XXI в. Пробы отбирались сотрудниками Сибирского филиала ФГУНПП «Росгеолфонд» с 17.09 по 20.09.2007 на 69 станциях (с горизонта 0,5 м в два одноразовых двухкомпонентных медицинских шприца объемом 25 см³ (FRAGA HUESCA ESPANA-SPAIN)). По результатам исследований вариабельность содержания ртути составила 0,0002–0,005 мкг/дм³ [14, 15].

Объекты, материалы и методы исследования

Научной группой в летний период 2022 г. проведены экспедиционные работы на территории Байкальского государственного природного биосферного заповедника и в акватории оз. Байкал. Расстояние между крайними станциями составило более 22 км (таблица, рис. 1).

Пробы поверхностного слоя воды отобраны на 14 станциях на предмет содержания растворенной ртути. При этом координаты крайних западной и восточной станций фактически совпали с границами буферной и переходной зон (таблица, рис. 2).

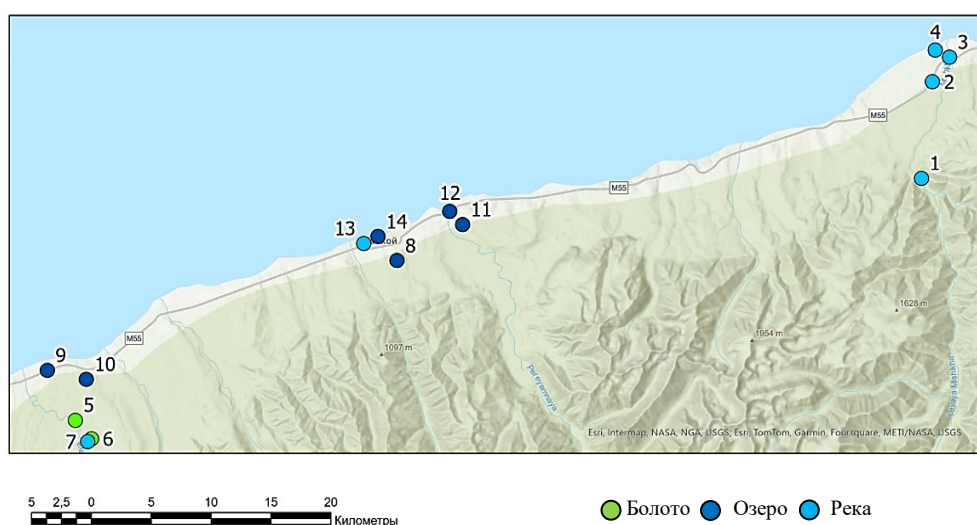


Рис. 1. Карта-схема станций отбора проб поверхностных вод в ходе экспедиции 2022 г.
/ Fig. 1. Map-diagram of surface water sampling locations during the 2022 expedition

Физико-географическая и административная характеристика станций отбора проб поверхностных вод / Physico-geographical and administrative characteristics of surface water sampling stations

№, описание станции	Широта	Долгота	Высота, м н. у. м.	Административная привязка	Физико-географическая привязка
1. Низовье р. Левая Мишиха	51,58362	105,52089	527	Бурятия, Кабанский р-н, Байкальский заповедник, Мишихинское лесничество	Южное Прибайкалье, Хамар-Дабан, северный макросклон, долина р. Мишихи в 9 км от устья и 1,1 км ниже слияния рек Левая и Правая Мишиха, левый берег реки, урочище Ленковое
2. Источник у р. Мишиха	51,62879	105,52923	475	Бурятия, Кабанский р-н, Байкальский заповедник, Мишихинское лесничество	Южное Прибайкалье, северные предгорья Хамар-Дабана чуть к западу от долины р. Мишиха в низовьях
3. Низовье р. Мишиха в месте пересечения с федеральной автомобильной дорогой Р258 «Байкал»	51,640426	105,54191	463	Бурятия, Кабанский р-н, окр. пос. Речка Мишиха, у ж.-д. моста через р. Мишиха	Южное Прибайкалье, северные предгорья Хамар-Дабана, долина р. Мишиха в низовьях, левый берег
4. Старица р. Мишиха	51,643704	105,53125	460	Бурятия, Кабанский р-н, охранный зона Байкальского заповедника в окр. пос. Речка Мишиха	Южное Прибайкалье, побережье Байкала к западу от устья р. Мишиха, старица
5. Безымянное верховое болото у р. Выдрино-1	51,46991	104,88639	466	Бурятия, Кабанский р-н, Байкальский заповедник, Выдринское лесничество	Южное Прибайкалье, северные предгорья Хамар-Дабана, бассейн р. Выдриной в нижнем течении, правобережье, болото в 1,2 км к северу от урочища Албаки
6. Безымянное верховое болото у р. Выдрино-2	51,46108	104,89838	484	Бурятия, Кабанский р-н, Байкальский заповедник, Выдринское лесничество	Южное Прибайкалье, северные предгорья Хамар-Дабана, бассейн р. Выдриной в нижнем течении, правобережье, болото в 400 м к востоку от урочища Албаки
7. Протока между р. Выдрино и безымянной рекой	51,45974	104,89554	480	Бурятия, Кабанский р-н, Байкальский заповедник, Выдринское лесничество	Южное Прибайкалье, северные предгорья Хамар-Дабана, бассейн р. Выдриной в нижнем течении, правобережье, урочище Албаки, протока
8. Лишковское болото	51,544932	105,1277	520	Бурятия, Кабанский р-н, окр. пос. Танхой, охранный зона Байкальского заповедника	Южное Прибайкалье, северные предгорья Хамар-Дабана, междуречье рек Осинковка танхойская и Безголовка, Лишковское болото

Окончание таблицы

№, описание станции	Широта	Долгота	Высота, м н. у. м.	Административная привязка	Физико-географическая привязка
9. Кривое озеро	51,4934	104,86533	489	Бурятия, Кабанский р-н, в 1,1 км к востоку от пос. Речка Выдрино	Южное Прибайкалье, северные предгорья Хамар-Дабана, прибайкальские террасы к востоку от долины р. Выдриной, оз. Кривое
10. Марусино озеро	51,4892	104,89463	500	Бурятия, Кабанский р-н, в 3 км к востоку от пос. Речка Выдрино, охранная зона Байкальского заповедника	Южное Прибайкалье, северные предгорья Хамар-Дабана, прибайкальские террасы в междуречье рек Выдриная и Осиновка выдринская (Подосиновка), Марусино озеро
11. Глухое озеро	51,56192	105,17673	467	Бурятия, Кабанский р-н, 3 км к востоку от пос. Танхой, охранная зона Байкальского заповедника	Южное Прибайкалье, северные предгорья Хамар-Дабана, прибайкальские террасы, долина р. Переёмной в низовьях, правобережье, старица – Глухое озеро
12. Старичное безымянное озеро на р. Переёмной в месте пересечения с федеральной автомобильной дорогой Р258 «Байкал»	51,56812	105,16723	457	Бурятия, Кабанский р-н, 3 км к востоку от пос. Танхой, у автомобильного моста через р. Переёмную	Южное Прибайкалье, побережье Байкала в низовьях р. Переёмной, старичное озерко близ устья, по правому берегу
13. Ручей Курмаевка	51,55302	105,10246	461	Бурятия, Кабанский р-н, пос. Танхой, ул. Байкальская у подземного перехода под ж.-д. путями	Южное Прибайкалье, побережье Байкала в междуречье рек Осиновка танхойская и Безголовка, низовья руч. Курмаевка
14. Оз. Байкал в районе п. Танхой	51,55621	105,11335	456	Бурятия, Кабанский р-н, пос. Танхой	Южное Прибайкалье, побережье Байкала в междуречье рек Осиновка танхойская и Безголовка

Лабораторный анализ материала выполнялся атомно-абсорбционным методом на анализаторе ртути РА-915М в межкафедральной лаборатории Института наук о Земле Южного федерального университета. Для получения растворенной формы ртути пробы воды предварительно фильтровали через очищенные и взвешенные мембранные фильтры «Владипор» типа МФАС-ВА с размером пор 0,45 мкм (450 нм) с помощью портативной установки. Из применяемых методик, представленных перманганатной и бромид-броматной, авторы использовали последнюю, предполагающую более мягкие условия минерализации. Аппаратный диапазон обнаружения ртути при выбранном подходе составляет 0,01–5 мкг/дм³.

Процесс применения бромид-броматного подхода заключается в предварительной консервации исследуемого материала с помощью добавления к 200 мл пробы 2 мл $K_2Cr_2O_7$ (0,5 г/л), после чего происходит смешивание 40 мл непосредственно пробы (в нашем случае – фильтрованной), 2,5 мл HCl конц., 1 мл смеси KBr (0,2 М)+KBrO₃ (0,333 М) (1:1). В получившийся раствор после 30-минутного настаивания было добавлено 0,5 мл $NH_2OH \cdot HCl$ (100 г/л), затем конечный объем доведен до 50 мл дистиллированной водой [16].



— Граница зоны ядра — Граница буферной зоны — Граница переходной зоны

Рис. 2. Территория Байкальского заповедника (baikalzapovednik.ru)
/ Fig. 2. The territory of the Baikal Nature Reserve (baikalzapovednik.ru)

Результаты и обсуждение

Водные объекты в процессе работ были разделены на три группы: озера (Кривое, Марусино, Глухое, Старичное безымянное и Байкал), реки (Мишиха, протока между р. Выдрино и безымянной рекой), болота (Лишковское, Безымянное верховое у р. Выдрино-1, Безымянное верховое у р. Выдрино-2) [17, 18]. Высота над уровнем моря менялась незначительно – от 456 до 527 м.

Рассмотрим распределение растворенной формы ртути по станциям (рис. 3).

По профилю р. Мишихи значения варьировались от 0,013 до 0,042 мкг/дм³ (в среднем 0,025 мкг/дм³), а в протоке у пос. Албаков – 0,016 мкг/дм³.

В болотных водах диапазон значений изменялся от 0,009 до 0,042 мкг/дм³ (в среднем 0,021 мкг/дм³), что свидетельствует о значительном разбросе. Максимальные концентрации ртути зафиксированы у станции № 5 (Верховое болото у р. Выдрино-1), что может быть связано с поступлением атмосферных осадков как доминирующего источника питания, а минимальные – у станции № 8 (Лишковское болото).

Содержание растворенной формы ртути в выделенных озерах было в диапазоне от 0,003 до 0,026 мкг/дм³ (в среднем 0,012 мкг/дм³) с максимальными значениями на станции № 11 (Глухое озеро) и с минимальными – на станции № 12 (Старичное безымянное озеро на р. Переёмной в месте пересечения с федеральной автомобильной дорогой Р258 «Байкал»).

По всем 14 станциям отбора проб значения варьировались от 0,002 до 0,042 мкг/дм³, при которых максимальные значения относятся к речным водам, а минимальные – к водам озер.

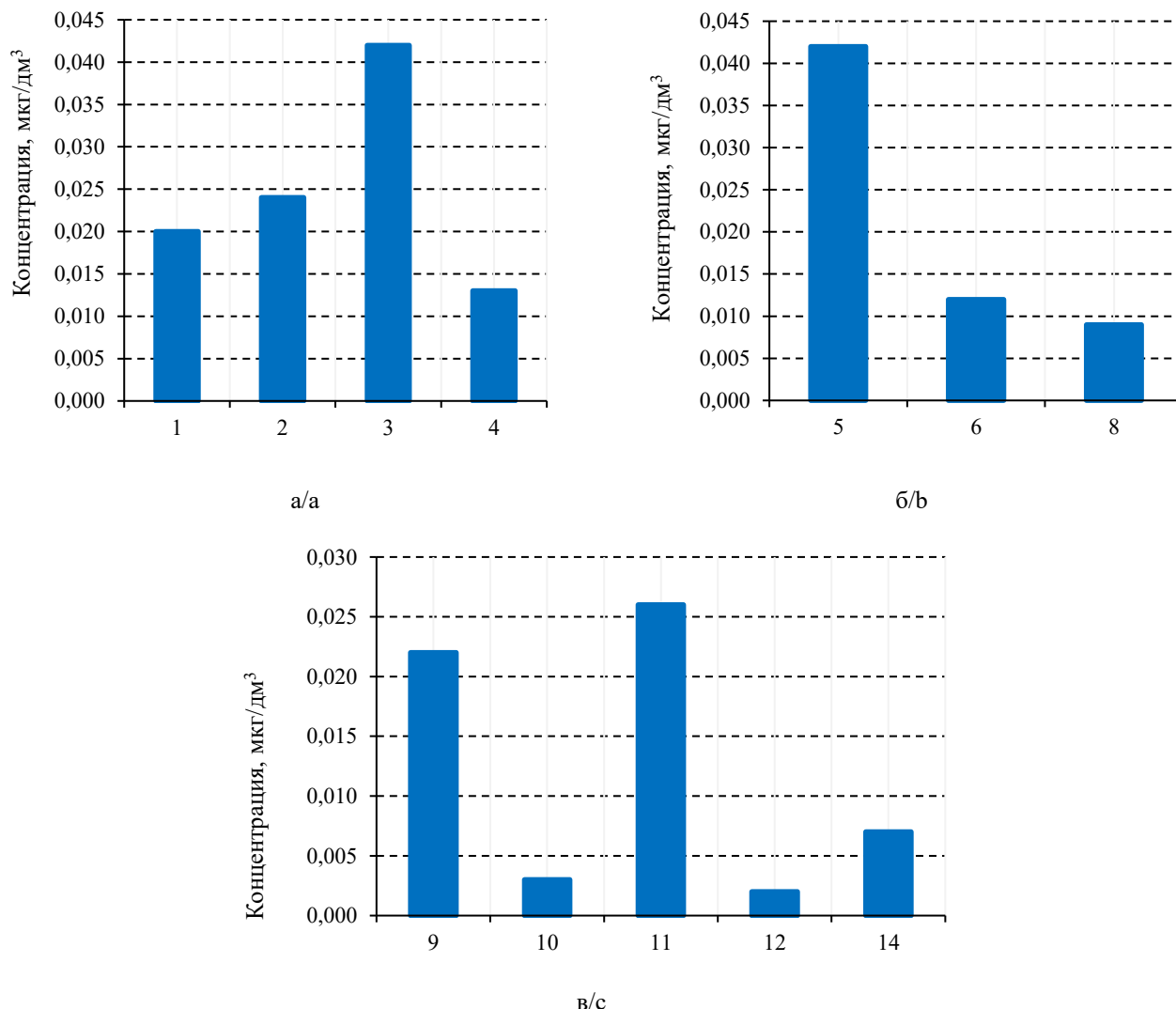


Рис. 3. Распределение содержания растворенной формы ртути в поверхностных водах по станциям: а – р. Мишиха и смежные территории; б – болота на территории Байкальского бассейна; в – озера на территории Байкальского бассейна / Fig. 3. Distribution of the dissolved mercury content in surface waters at the following stations: a - the Mishikha River and adjacent territories; b - swamps in the Baikal Basin; c - lakes in the Baikal Basin

Заключение

Оценивая весь массив данных, можно сделать вывод, что в водах на станциях № 8 (Лишковское болото), 10 (Марусино озеро), 12 (Старичное безымянное озеро на р. Переемной), 13 (Ручей Курмаевка) и 14 (оз. Байкал) не было зафиксировано превышений по ПДК_{рыб.хоз.} и ПДК, относящейся к питьевой воде с пределом 0,5 мкг/дм³ (СанПиН 1.2.3685-21). В остальных случаях отмечены точечные превышения по одному из показателей. Водосборный бассейн оз. Байкал имеет несколько источников поступления ртути антропогенного и природного происхождения. Особое внимание следует уделить следующим факторам: разрушению горных пород в водосборной зоне, выбросам ртути из глубоко залегающих источников, которые усиливаются в периоды тектонической активности, атмосферным осадкам, а также процессам урбанизации и техногенезу.

Возможно, что отдельные колебания уровня растворенной ртути в воде были вызваны одновременным воздействием тектонических процессов и антропогенной деятельности. Так, темпы выработки главных загрязняющих объектов, вероятно, были снижены в 1990-х гг. ввиду экономической ситуации, однако они до сих пор могут оказывать определенное влияние на гидрохимию озера, что косвенно подтверждается закрытием БЦБК в 2013 г. и при этом идентичными значениями ртути в поверхностных водах южной части оз. Байкал. Отметим, что в настоящее время госкорпорацией «Росатом» реализуется национальный проект «Экология». По результатам данных публичного совещания госкорпорации на декабрь 2024 г. на площадке бывшего «Усольехимпрома», относимого авторами к списку ключевых загрязняющих предприятий вместе с рассматриваемым в данной работе БЦБК и «Саянскимпластом» [19], демонтировано 92 % надземных и подземных частей загрязненных зданий, проводится рекультивация шламо-накопителя и ликвидация нефтяной линзы. На площадке бывшего БЦБК возведены основные производственные цеха и необходимые вспомогательные сооружения, подведены сети инженерного обеспечения, построена транспортная инфраструктура, начат монтаж технологического оборудования очистных сооружений.

Список источников

1. Федоров Ю.А. Стабильные изотопы и эволюция гидросферы. М.: Истина, 1999. 370 с. EDN: QVQHL.
2. Верещагин Г.Ю. Байкал. Иркутск: Вост.-Сиб. изд-во, 1947. 226 с.
3. Вотинцев К.К. Гидрохимия озера Байкал М.: Изд-во АН СССР, 1961. 311 с.
4. Вотинцев К.К., Глазунов И.В., Толмачева А.П. Гидрохимия рек бассейна оз. Байкал М.: Изд-во АН СССР, 1965. 495 с.
5. Лапердина Т.Г. Определение ртути в природных водах. Новосибирск: Наука, 2000. 222 с.
6. Сапрыкин А.В., Вижин В.В., Сагдеев Р.З. Ртуть в природных водах. Переоценка уровня содержания в связи с совершенствованием метода определения // Химия в интересах устойчивого развития. 1995. Т. 3, № 1–2. С. 113–117.
7. Сапрыкин А.В., Вижин В.В. Ртуть в оз. Байкал: история вопроса и современные представления // Химия в интересах устойчивого развития. 1995. Т. 3, № 1–2. С. 119–125.
8. Грачев М.А. О современном состоянии экологической системы озера Байкал. Новосибирск: СО РАН, 2002. 153 с.
9. Белова Н.И. Распределение микроэлементов в воде озера Байкал // Мониторинг фонового загрязнения природных сред. Л.: Гидрометеоздат, 1984. Вып. 2. С. 144–156.
10. Ветров В.А., Кузнецов А.И. Микроэлементы в природных средах региона озера Байкал. Новосибирск: СО РАН, 1997. 234 с.
11. Гребенщикова В.И., Лустенберг Э.Е., Китаев Н.А., Ломоносов И.С. Геохимия окружающей среды Прибайкалья. Байкальский геоэкологический полигон. Новосибирск: Гео, 2008. 234 с.
12. Mullin M.D., Matveyev A.A., Anikanov A.M. Intercomparisons of Analytical Methodology and Laboratory Capabilities Between Soviet and American Laboratories-1973 to 1977 // J. of Great Lakes Research. 1984. Vol. 10, № 3. P. 254–260.
13. Menleman C., Leermakers M., Baeyens W. Mercury speciation in Lake Baikal // Water, Air and Soil Pollut. 1995. Vol. 80. P. 539–551.
14. Федоров Ю.А. Ртуть в экосистеме озера Байкал по результатам современных и ретроспективных исследований // Геохимия биосферы : сб. материалов V междунар. совещания. Новороссийск: НИИ геохимии биосферы ЮФУ, 2009. С. 134–136. EDN: BLSTPN.
15. Аниканов А.М., Федоров Ю.А. Определение наногаммовых концентраций ртути в природных водах (на примере анализа проб воды оз. Байкал) // Ртуть в биосфере: эколого-геохимические аспекты : материалы междунар. симпозиума. М.: ГЕОХИ РАН, 2010. С. 250–354.
16. М 01-55-2016. Методика измерений массовой концентрации ртути в пробах природных (в том числе морских) вод атомно-абсорбционным методом на анализаторе ртути РА-915М. СПб., 2016. 33 с.
17. Федоров Ю.А., Доценко Н.В., Костенко Д.Ф. Ртуть в поверхностных водах водосборного бассейна оз. Байкал: по материалам ретроспективных и современных исследований // География, экология, туризм: новые горизонты исследований : материалы Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием, посвященной 90-летию создания факультета географии, геоэкологии и туризма ВГУ. Воронеж: Изд. дом ВГУ, 2024. Т. 1. С. 368–372.

18. Доценко Н.В., Федоров Ю.А. Ртуть в оз. Байкал и его водосборном бассейне: хронология исследований // Водные ресурсы в условиях глобальных вызовов: экологические проблемы, управление, мониторинг : сб. тр. Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием 20–22 сентября 2023 г. Новочеркасск: Лик, 2023. Т. 1. С. 205–210. EDN: TADPGR.

19. Доценко Н.В. Аналитический обзор исследований содержания ртути в экосистеме оз. Байкал и его водосборного бассейна // Неделя науки 2023: сб. тез.: в 2 ч. Ростов н/Д.; Таганрог: Изд-во Южного фед. ун-та, 2023. Ч. 1. С. 772–776.

References

1. Fedorov Yu.A. *Stable isotopes and the evolution of the hydrosphere*. Moscow: Truth; 1999. 370 p. (In Russ.). EDN: QBQHJI.
2. Vereshchagin G.Yu. *Baikal*. Irkutsk: East Siberian Publishing House; 1947. 226 p. (In Russ.).
3. Votintsev K.K. *Hydrochemistry of Lake Baikal*. Moscow: Publishing House of the USSR Academy of Sciences; 1961. 311 p. (In Russ.).
4. Votintsev K.K., Glazunov I.V., Tolmacheva A.P. *Hydrochemistry of the rivers of the Baikal Lake basin*. Moscow: Publishing House of the USSR Academy of Sciences; 1965. 495 p. (In Russ.).
5. Laperdina T.G. *Determination of mercury in natural waters*. Novosibirsk: Science; 2000. 222 p. (In Russ.).
6. Saprykin A.V., Vizhin V.V., Sagdeev R.Z. Mercury in natural waters. Reassessment of the content level in connection with the improvement of the method of determination. *Chemistry in the Interests of Sustainable Development*. 1995;3(1-2):113-117. (In Russ.).
7. Saprykin A.V., Vizhin V.V. Mercury in Lake Baikal: the history of the issue and modern concepts. *Chemistry in the Interests of Sustainable Development*. 1995;3(1-2):119-125. (In Russ.).
8. Grachev M. A. *On the current state of the ecological system of Lake Baikal*. Novosibirsk: Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences; 2002. 153 p. (In Russ.).
9. Belova N.I. Distribution of trace elements in Lake Baikal water. *Monitoring of background pollution of natural environments*. Leningrad: Hydrometeorological Publishing; 1984;(2):144-156. (In Russ.).
10. Vetrov V.A., Kuznetsov A.I. *Microelements in the natural environments of Lake Baikal region*. Novosibirsk: Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences; 1997. 234 p. (In Russ.).
11. Grebenshchikova V.I., Lustenberg E.E., Kitaev N.A., Lomonosov I.S. *Geochemistry of the environment of the Baikal region. Baikal geoecological landfill*. Novosibirsk: Geo; 2008. 234 p. (In Russ.).
12. Mullin M.D., Matveyev A.A., Anikanov A.M. Intercomparisons of Analytical Methodology and Laboratory Capabilities Between Soviet and American Laboratories-1973 to 1977. *J. of Great Lakes Research*. 1984;10(3):254-260.
13. Menleman C., Leermakers M., Baeyens W., Mercury speciation in Lake Baikal. *Water, Air and Soil Pollution*. 1995;80:539-551.
14. Fedorov Yu.A. Mercury in the ecosystem of Lake Baikal based on the results of modern and retrospective studies. *Geochemistry of the biosphere. Collection of materials of the 5th International meeting*. Novorossiysk: SFedU Research Institute of Geochemistry of the Biosphere; 2009:134-136. (In Russ.). EDN: BLSTPN.
15. Anikanov A.M., Fedorov Yu.A. Determination of nanogram concentrations of mercury in natural waters (using the example of the analysis of Lake Baikal water samples). *Mercury in the biosphere: ecological and geochemical aspects. Proceedings of the International Symposium*. Moscow: Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry of the Russian Academy of Sciences; 2010:250-354. (In Russ.).
16. M 01-55-2016. *The method of measuring the mass concentration of mercury in samples of natural (including marine) waters by atomic absorption method on the mercury analyzer RA-915M*. Saint Petersburg, 2016. 33 p. (In Russ.).
17. Fedorov Yu.A., Dotsenko N.V., Kostenko D.F. Mercury in the surface waters of the lake drainage basin. Baikal: based on the materials of retrospective and modern research. *Geography, ecology, tourism: new horizons of research*. Proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference with international participation dedicated to the 90th anniversary of the establishment of the Faculty of Geography, Geoecology and Tourism of VSU. Voronezh: Voronezh State University Publishing House; 2024;1:368-372. (In Russ.).
18. Dotsenko N.V., Fedorov Yu.A. Mercury in the lake Baikal and its drainage basin: a chronology of research. *Water resources in the context of global challenges: environmental issues, management, monitoring*. Proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference with international participation. Novochoerkassk: Face; 2023;1:205-210. (In Russ.). EDN: TADPGR.
19. Dotsenko N.V. Analytical review of studies of mercury content in the lake ecosystem. Baikal and its drainage basin. *Science Week 2023*. Collection of abstracts: in 2 parts. Rostov-on-Don; Taganrog: Southern Federal University, 2023;(1):772-776. (In Russ.).

Информация об авторах

Юрий Александрович Федоров – доктор географических наук, профессор, заведующий кафедрой физической географии, экологии и охраны природы Института наук о Земле ЮФУ.

Николай Витальевич Доценко – студент кафедры физической географии, экологии и охраны природы Института наук о Земле ЮФУ.

Дарья Федоровна Костенко – младший научный сотрудник Института наук о Земле ЮФУ.

Илья Валерьевич Головков – студент кафедры физической географии, экологии и охраны природы Института наук о Земле ЮФУ.

Константин Сергеевич Станиславский – студент кафедры физической географии, экологии и охраны природы Института наук о Земле ЮФУ.

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, SFedU.

Nikolay V. Dotsenko – Student, Department of Physical Geography, Ecology and Environment Protection, Institute of Earth Sciences, SFedU.

Darya F. Kostenko – Junior Researcher, Institute of Earth Sciences, SFedU.

Ilya V. Golovkov – Student, Department of Physical Geography, Ecology and Nature Conservation, Institute of Earth Sciences, SFedU.

Konstantin S. Stanislavsky – Student, Department of Physical Geography, Ecology and Nature Conservation, Institute of Earth Sciences, SFedU.

Статья поступила в редакцию 16.01.2025; одобрена после рецензирования 28.01.2025; принята к публикации 23.04.2025.

The article was submitted 16.01.2025; approved after reviewing 28.01.2025; accepted for publication 23.04.2025.

Научная статья

УДК 911.52

<https://doi.org/10.18522/1026-2237-2025-2-114-123>

СОВРЕМЕННЫЕ ПРИРОДНО-АНТРОПОГЕННЫЕ ЛАНДШАФТЫ И ТЕРРИТОРИАЛЬНЫЕ КОМПЛЕКСЫ РОСТОВСКОЙ ОБЛАСТИ

Александр Дмитриевич Хаванский^{1✉}, *Иван Викторович Богачев*²,
*Анна Борисовна Эртель*³, *Юлия Юрьевна Меринова*⁴

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

¹ khovansk@yandex.ru✉

² ivanbogachev@mail.ru

³ ertel@sfedu.ru

⁴ yuliyamerinova@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0658-4452>

Аннотация. При планировании и разработке региональных программ развития территорий необходимо учитывать зоны с различными природными условиями и характером их хозяйственного использования, выделение которых может быть осуществлено при помощи природно-антропогенной дифференциации региона. Цель представленного исследования – выявление и анализ современных природно-антропогенных ландшафтов и территориальных комплексов Ростовской области. Важной методической задачей стало совмещение природных и административных границ региона для использования обширной базы государственной статистической отчетности, представленной преимущественно по административно-территориальным образованиям. Отнесение природных условий к административному району производилось по преобладающему природному ландшафту. Природно-антропогенные ландшафты области, в зависимости от масштаба, расположения и типа природопользования, подразделены на промышленные, аграрно-промышленные и аграрные, которые, в свою очередь, разделяются на более мелкие таксономические единицы: крупный индустриальный город, средние индустриальные города, шахтерские города, сельские пригородные районы. Предлагается понятие территориального природно-антропогенного комплекса, представляющего собой территории с определенным сочетанием природных условий и взаимосвязанных видов хозяйственной деятельности. В результате исследования в Ростовской области выделено семь территориальных природно-антропогенных комплексов, которые отличаются сравнительно однородными природными условиями, типом природопользования и социально-экономическими и экологическими показателями.

Ключевые слова: Ростовская область, типы ландшафтов, природно-антропогенные ландшафты, территориальные природно-антропогенные комплексы

Для цитирования: Хаванский А.Д., Богачев И.В., Эртель А.Б., Меринова Ю.Ю. Современные природно-антропогенные ландшафты и территориальные комплексы Ростовской области // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2025. № 2. С. 114–123. <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2025-2-114-123>

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

Original article

MODERN NATURAL-ANTHROPOGENIC LANDSCAPES AND TERRITORIAL COMPLEXES OF THE ROSTOV REGION

Alexandr D. Khavanskii^{1✉}, *Ivan V. Bogachev*², *Anna B. Ertel*³, *Yuliya Yu. Merinova*⁴

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

© Хаванский А.Д., Богачев И.В., Эртель А.Б., Меринова Ю.Ю., 2025

¹ khovansk@yandex.ru✉

² ivanbogachev@mail.ru

³ ertel@sfedu.ru

⁴ yuliyamerinova@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0658-4452>

Abstract. *Planning and development of regional programs for territorial development assumes consideration of zones with different natural conditions and the nature of their economic use. Their allocation can be carried out using natural-anthropogenic differentiation of the region. The purpose of the presented research is to identify and analyze modern natural-anthropogenic landscapes and territorial natural-anthropogenic complexes of the Rostov region. An important methodological task was to combine the natural and administrative boundaries of the region, in order to use the extensive database of state statistical reporting, presented mainly by administrative-territorial entities. The assignment of natural conditions to the administrative region was based on the prevailing natural landscape. The natural-anthropogenic landscapes of the region, depending on the scale, location and type of nature management, can be divided into industrial, agricultural and agricultural, which, in turn, are divided into smaller taxonomic units: a large industrial city, medium-sized industrial cities, mining towns, rural suburban areas. The authors propose and substantiate the concept of a territorial natural-anthropogenic complex, which is a territory with a certain combination of natural conditions and interrelated types of economic activity. As a result of the study, seven territorial natural-anthropogenic complexes were identified in the Rostov region, which are characterized by relatively homogeneous natural conditions, the type of nature management, and their socio-economic and environmental indicators.*

Keywords: *Rostov region, types of landscapes, natural-anthropogenic landscapes, territorial natural-anthropogenic complexes*

For citation: Khavanskii A.D., Bogachev I.V., Ertel A.B., Merinova Y.Yu. Modern Natural-Anthropogenic Landscapes and Territorial Complexes of the Rostov Region. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2025;(2):114-123. (In Russ.). <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2025-2-114-123>

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 природные ландшафты под влиянием техногенеза сильно преобразованы и сохранились лишь на отдельных небольших участках. Основную часть территории занимают природно-антропогенные ландшафты, структура и функционирование которых изменены хозяйственной деятельностью человека.

Регион, как правило, имеет значительную площадь и характеризуется большим разнообразием природных условий и видов хозяйственной деятельности. При разработке региональных программ социально-экономического и экологического развития необходимо выявлять территории с разными природными условиями и характером их хозяйственного использования и учитывать эти различия при планировании. Для этого производится выделение сравнительно однородных природно-антропогенных комплексов, или природно-антропогенная дифференциация региона.

Цель данной работы – выделение и анализ современных природно-антропогенных ландшафтов и территориальных комплексов Ростовской области.

Материал и методы исследования

В работе использованы социально-экономические и экологические данные по территориальным образованиям Ростовской области. Методы природно-антропогенной дифференциации территорий разработаны в [1–4].

В процессе природно-антропогенной дифференциации территории важной методической задачей является совмещение природных и административных границ. Как правило, природные географические границы не совпадают с административными. Для проведения различных видов географического анализа территории необходима обширная информация. Значительная часть экономико-географической, природно-ресурсной и экологической информации содержится в материалах государственной статистической отчетности и приводится по административно-территориальным образованиям.

В связи с этим для использования данных статистической отчетности проводится совмещение географических границ с административными путем наложения географических карт на административные и привязки природных условий (ландшафтов) к границам административно-территориальных образований. Отнесение природных условий к административному району производится по преобладающему в данном районе природному ландшафту. Совмещение границ природных ландшафтов и муниципальных районов Ростовской области представлено в [5].

Результаты и обсуждение

На территории Ростовской области выделяются зональные и интразональные типы природных ландшафтов. К зональным относятся степные, сухостепные и полупустынные ландшафты, к интразональным – луговые, лесные и другие ландшафты. Их детальная характеристика представлена в [3].

Формирование той или иной территории в регионе определяется природными условиями и ресурсами, численностью населения, используемыми видами хозяйственной деятельности. Это образует определенные типы природопользования: промышленный, аграрно-промышленный и аграрный, которые, в свою очередь, делятся на подтипы. Описание типов и подтипов природопользования в Ростовской области приведены в исследовании [6].

В Ростовской области природные ландшафты сохранились лишь на отдельных небольших участках. На большей части территории региона распространены природно-антропогенные ландшафты, формирование которых определяется хозяйственной деятельностью человека.

К основным антропогенным изменениям природных ландшафтов относятся преобразование одного или нескольких компонентов, нарушение структуры и взаимосвязей между отдельными компонентами, поступление в ландшафты дополнительной энергии и вещества, изъятие производимой продукции и сырья, уменьшение биологического разнообразия.

Природно-антропогенные ландшафты формируются под влиянием природных условий и видов хозяйственной деятельности, разные сочетания которых определяют их многообразие. При выделении природно-антропогенных ландшафтов Ростовской области учитывались природные ландшафты и типы природопользования (рис. 1).

Для характеристики природно-антропогенных ландшафтов использовались социально-экономические и экологические показатели, отражающие характер и интенсивность антропогенной деятельности: численность населения, промышленное и сельскохозяйственное производство, инвестиции в основной капитал, выбросы в атмосферу и сбросы загрязняющих веществ в водные объекты (табл. 1).

Наиболее значительным природно-антропогенным ландшафтом Ростовской области является крупный индустриальный город в умеренно засушливых степных ландшафтах – Ростов-на-Дону, отличающийся высоким природно-ресурсным потенциалом, наибольшей численностью населения (1 125,3 тыс. чел.) и максимальными социально-экономическими показателями. В этот ландшафт поступает большое количество веществ и энергии, не свойственных для природных ландшафтов, что создает высокую антропогенную нагрузку и кризисную экологическую ситуацию [7].

В средних индустриальных городах в умеренно засушливых и очень засушливых степных ландшафтах (Новочеркасск, Таганрог, Волгодонск) проживает 590 тыс. чел., находится большое количество промышленных предприятий электроэнергетики, черной металлургии, машиностроения, металлообработки, химической промышленности, стройиндустрии и др.

Для этих ландшафтов характерен повышенный объем промышленного производства и инвестиций. Проблемой Новочеркасска и Таганрога является кризисная экологическая ситуация. В Волгодонске экологическая ситуация критическая.

Важное промышленное значение для Ростовской области имеют шахтерские города, расположенные в Восточном Донбассе. По экономическим и демографическим показателям они существенно различаются. В городах Шахты, Каменск-Шахтинский и Новошахтинск производятся средние объемы промышленной продукции, в то время как города Гуково, Донецк, Зверево отличаются низкими экономическими и демографическими показателями.

Сельские пригородные районы урбанизированных зон в умеренно засушливых степных ландшафтах характеризуются высоким природно-ресурсным потенциалом, хорошими демографическими и экономическими показателями, близостью к региональному административному центру

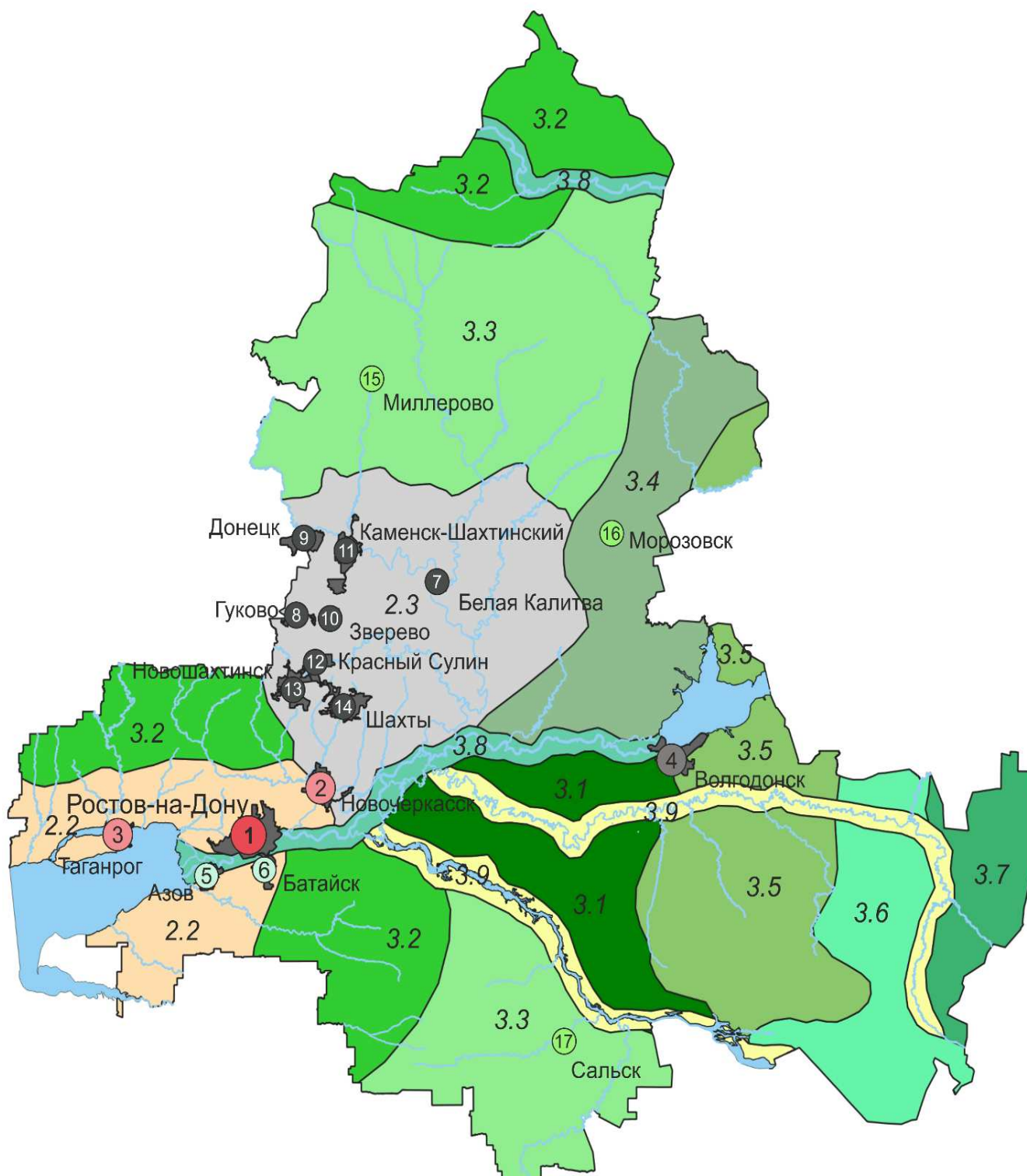
и средним городам, высокой инвестиционной привлекательностью (территории для промышленной и жилой застройки). В этих ландшафтах размещены отдельные промышленные предприятия с различными видами производств. Однако для большинства пригородных районов отмечается повышенная антропогенная нагрузка и критическая экологическая ситуация.

Сельские районы в зоне разработки минерального сырья в засушливых степных ландшафтах находятся в Восточном Донбассе, где наряду с добычей и переработкой каменного угля действуют металлургические, теплоэнергетические, машиностроительные, металлообрабатывающие и другие предприятия, а также развито интенсивное сельскохозяйственное производство. В пределах этих ландшафтов выделяются районы с высокими для сельских районов объемами промышленного производства (Красносулинский – 119,4 млрд р., Белокалитвинский – 20,9 млрд р.) и повышенными объемами инвестиций (Октябрьский – 10 млрд р.).

Таблица 1 / Table 1

Основные показатели природно-антропогенных ландшафтов Ростовской области (2017 г.)
 / **Main indicators of natural-anthropogenic landscapes of the Rostov region (2017)**

Природно-антропогенный ландшафт	Численность населения, тыс. чел.	Промышленное производство, млрд р.	Продукция сельского хозяйства, млрд р.	Инвестиции в основной капитал, млрд р.	Выбросы в атмосферу от стационарных источников, тыс. т	Сброс загрязнённых сточных вод, млн м ³ /год
Крупный индустриальный город в умеренно засушливых степных ландшафтах	1125,3	343,2	–	110,3	12,0	117,0
Средние индустриальные города в умеренно засушливых и очень засушливых степных ландшафтах	590,6	221,1	–	43,6	95,1	20,9
Шахтерские города и городские поселения в засушливых степных ландшафтах	569,7	59,0	–	9,7	10,9	44,2
Сельские пригородные районы урбанизированных зон в умеренно засушливых степных ландшафтах	342,6	35,3	31,4	52,6	6,7	3,1
Сельские районы в зоне разработки минерального сырья в засушливых степных ландшафтах	346,9	156,1	34,4	23,9	21,3	28,6
Сельские районы богарного и орошаемого земледелия в умеренно засушливых и засушливых степных ландшафтах	243,9	8,6	43,3	12,4	2,0	34,4
Сельские районы богарного земледелия в умеренно засушливых и засушливых степных ландшафтах	486,3	31,0	85,0	47,9	16,0	4,7
Сельские районы богарного земледелия в очень засушливых степных ландшафтах	109,4	15,5	16,0	2,9	1,9	1,6
Сельские районы богарного земледелия и скотоводства в сухих и очень сухих сухостепных ландшафтах	131,9	1,4	28,2	6,6	1,9	6,1



Условные обозначения

1. Промышленные ландшафты:

- 1.1. Крупный индустриальный город в умеренно засушливых степных ландшафтах
1 Ростов-на-Дону
- 1.2. Средние индустриальные города в умеренно засушливых степных ландшафтах
2 Новочеркасск **3** Таганрог
- 1.3. Средний индустриальный город в очень засушливых степных ландшафтах
4 Волгодонск
- 1.4. Города – спутники крупного промышленного центра в умеренно засушливых степных ландшафтах
5 Азов **6** Батайск
- 1.5. Шахтерские города и городские поселения в засушливых степных ландшафтах
7 Белая Калитва **10** Зверево **13** Новошахтинск **8** Гуково
11 Каменск-Шахтинский **14** Шахты **9** Донецк **12** Красный Сулин

2. Аграрно-промышленные ландшафты:

- 2.1. Малые агропромышленные города в засушливых и очень засушливых степных и сухих сухостепных ландшафтах
15 Миллерово **16** Морозовск **17** Сальск
- 2.2. Сельские пригородные районы урбанизированных зон в умеренно засушливых степных ландшафтах
2.2 Азовский, Аксайский, Мясниковский, Неклиновский
- 2.3. Сельские районы в зоне разработки минерального сырья в засушливых степных ландшафтах
2.3 Белокалитвинский, Каменский, Красносулинский, Октябрьский, Усть-Донецкий, Тацинский

3. Аграрные ландшафты:

- 3.1** Сельские районы богарного и орошаемого земледелия в умеренно засушливых и засушливых степных ландшафтах
- 3.2** Сельские районы богарного земледелия в умеренно засушливых степных ландшафтах
- 3.3** Сельские районы богарного земледелия в засушливых степных ландшафтах
- 3.4** Сельские районы богарного земледелия в очень засушливых степных ландшафтах
- 3.5** Сельские районы богарного земледелия в сухих сухостепных ландшафтах
- 3.6** Сельские районы богарного земледелия и скотоводства в очень сухих сухостепных ландшафтах
- 3.7** Сельские районы богарного земледелия и скотоводства в полупустынных ландшафтах
- 3.8** Пастбища и сенокосы в ландшафтах настоящих лугов
- 3.9** Пастбища и сенокосы в ландшафтах остепненных лугов

Рис. 1. Современные природно-антропогенные ландшафты Ростовской области
/ Fig. 1. Modern natural-anthropogenic landscapes of the Rostov region

Главной особенностью сельских районов богарного и орошаемого земледелия в умеренно засушливых и засушливых степных ландшафтах является орошение земель, которое сопровождается большим объемом потребляемой воды и высокоминерализованных возвратных вод. Низкий технический уровень орошения земель приводит к деградации почв. В районах орошаемого земледелия преобладает напряжённая экологическая ситуация.

Среди сельских районов богарного земледелия в умеренно засушливых и засушливых степных ландшафтах выделяются аграрно-промышленные центры и аграрные районы. Аграрно-промышленные центры Миллеровский, Сальский, Зерноградский отличаются более высокими показателями сельскохозяйственной продукции, имеют промышленное производство и выступают базовыми центрами организации и развития сельского хозяйства ближайших районов. В аграрных районах повышенные экономические и демографические показатели отмечаются в южных районах области, пониженные – в северо-западных районах.

Сельские районы богарного земледелия, богарного земледелия и скотоводства в северо-восточных и юго-восточных районах Ростовской области в силу неблагоприятных природных условий, значительной удаленности от крупных городов, неразвитой инфраструктуры имеют самые низкие показатели социально-экономического развития. В восточных районах области широкое распространение получили процессы опустынивания земель.

В географии распространено понятие «территориальный природный комплекс» (ТПК), под которым понимается территория, на которой все компоненты природы тесно взаимосвязаны, взаимодействуют друг с другом, обмениваются веществом и энергией и образуют сравнительно однородные участки земной поверхности. Однако в настоящее время в результате антропогенной деятельности ТПК практически не осталось.

В экономической географии широко используется термин «территориальный производственный комплекс» – совокупность расположенных рядом взаимосвязанных производств. В этом понятии отсутствует связь производства с природными условиями.

На региональном уровне для выделения территорий с определенным сочетанием природных условий и взаимосвязанных видов хозяйственной деятельности предлагается понятие «территориальный природно-антропогенный комплекс» (ТПАК). Каждый ТПАК отличается сравнительно однородными природно-климатическими условиями, определенным набором видов хозяйственной деятельности, социально-экономическими и экологическими показателями. Кроме этого, ТПАК можно представить как территорию с определённым сочетанием взаимосвязанных природно-антропогенных ландшафтов. В Ростовской области выделено семь ТПАК (рис. 2, табл. 2).

Наиболее крупным и значимым является юго-западный ТПАК, который включает крупный промышленный и административный центр – г. Ростов-на-Дону, средние индустриальные города Новочеркасск и Таганрог, города-спутники крупного промышленного центра Азов, Батайск, Аксай, сельские пригородные районы урбанизированных зон, расположенные в умеренно засушливых степных ландшафтах. Перечисленные города и районы образуют Ростовскую агломерацию, в которой сконцентрированы самые современные технологии и производства, институты развития, образовательные и научно-исследовательские центры, инновационные предприятия. Численность проживающего здесь населения составляет более 2 млн чел., отмечаются максимальные для региона показатели промышленного производства, инвестиций, но и самые высокие объемы выбросов загрязняющих веществ в атмосферу и сбросов загрязнённых сточных вод.

Донецкий ТПАК расположен в Восточном Донбассе. Здесь в засушливых степных ландшафтах находятся шахтерские города и городские поселения, а также сельские районы в зоне разработки минерального сырья, которые образуют Восточно-Донбасский урбанизированный центр с населением более 900 тыс. чел. Этот ТПАК характеризуется повышенными объемами промышленного производства, инвестиционной активностью, наличием многопрофильных индустриальных парков с современными предприятиями. Его экономический потенциал составляет 22 % от ВРП.

В центральный ТПАК входят г. Волгодонск и сельские районы богарного и орошаемого земледелия с населением 415,4 тыс. чел., из которых 172 тыс. проживает в г. Волгодонске, и экономическим потенциалом 255,3 млрд р., из которых 65 % приходится на Волгодонск. ТПАК расположен в очень засушливых степных ландшафтах.



Муниципальные районы: 1 – Азовский; 2 – Аксайский; 3 – Багаевский; 4 – Белокалитвинский; 5 – Боковский; 6 – Верхнедонской; 7 – Весёловский; 8 – Волгодонской; 9 – Дубовский; 10 – Егорлыкский; 11 – Заветинский; 12 – зерноградский; 13 – Зимовниковский; 14 – Кагальницкий; 15 – Каменский; 16 – Кашарский; 17 – Константиновский; 18 – Красносулинский; 19 – Куйбышевский; 20 – Мартыновский; 21 – Матвеево-Курганский; 22 – Миллеровский; 23 – Милютинский; 24 – Морозовский; 25 – Мясниковский; 26 – Неклиновский; 27 – Обливский; 28 – Октябрьский; 29 – Орловский; 30 – Песчанокопский; 31 – Пролетарский; 32 – Ремонтненский; 33 – Родионово-Несветайский; 34 – Сальский; 35 – Семикаракорский; 36 – Советский; 37 – Тарасовский; 38 – Тагинский; 39 – Усть-Донецкий; 40 – Целинский; 41 – Цимлянский; 42 – Чертковский; 43 – Шолоховский

Рис. 2. Территориальные природно-антропогенные комплексы Ростовской области
 / Fig. 2. Territorial natural-anthropogenic complexes of the Rostov region

Таблица 2 / Table 2

**Основные показатели территориальных природно-антропогенных комплексов Ростовской области
/ Main indicators of the territorial natural-anthropogenic complexes of the Rostov region**

Территориальный природно-антропогенный комплекс	Численность населения, тыс. чел.	Промышленное производство, млрд р.	Продукция сельского хозяйства, млрд р.	Инвестиции в основной капитал, млрд р.	Выбросы в атмосферу от стационарных источников, тыс. т	Сброс загрязнённых сточных вод, млн м ³ /год
Юго-западный	2169,7	562,1	45,6	192,0	111,1	156,0
Донецкий	916,6	215,0	34,4	33,6	31,5	69,8
Центральный	415,4	86,3	43,3	40,2	7,0	35,7
Северо-западный	209,1	18,4	35,4	36,4	11,2	1,1
Северо-восточный	109,4	15,5	16,0	2,9	1,9	1,6
Южный	277,2	12,6	49,6	11,5	4,8	3,6
Юго-восточный	131,2	1,4	28,2	6,6	1,9	6,1

Южный и северо-западный ТПАК представлены районами богарного земледелия. В этих ТПАК преобладают умеренно засушливые и засушливые ландшафты с высоким природно-ресурсным потенциалом и высокой урожайностью зерновых и подсолнечника. Повышенными социально-экономическими показателями отличаются аграрно-промышленные центры с развитой производственной базой (Сальский, Миллеровский), аграрные районы характеризуются средними и низкими показателями.

Северо-восточный и юго-восточный ТПАК являются наиболее удаленными от регионального административного центра и промышленных городов территориями. Здесь распространены очень засушливые степные и сухие и очень сухие сухостепные ландшафты с низким природно-ресурсным потенциалом. В большинстве районов отмечаются минимальные для региона показатели экономического развития и социальной сферы.

Выводы

1. Произведена природно-антропогенная дифференциация Ростовской области, в процессе которой впервые выделены современные природно-антропогенные ландшафты и территориальные природно-антропогенные комплексы.

2. Природно-антропогенные ландшафты подразделяются на промышленные, аграрно-промышленные и аграрные, которые в зависимости от масштаба, расположения существовавших ранее природных ландшафтов и типа природопользования делятся на более мелкие таксономические единицы.

3. В Ростовской области выделено семь территориальных природно-антропогенных комплексов, представляющих собой территории с определенным сочетанием природных условий и взаимосвязанных видов хозяйственной деятельности, которые отличаются сравнительно однородными природными условиями, типом природопользования и социально-экономическими и экологическими показателями.

Список источников

1. Исаченко А.Г. Ландшафтоведение и физико-географическое районирование. М.: Высшая школа, 1991. 366 с.
2. Перельман А.И., Касимов Н.С. Геохимия ландшафта. М.: Астрель-2000, 1999. 768 с.
3. Природные условия и естественные ресурсы Ростовской области / под ред. Ю.П. Хрусталёва, Е.С. Андреевой, В.Т. Богучарскова, В.Ф. Валькова [и др.]. Ростов н/Д.; Батайск: Батайское кн. изд-во, 2002. 432 с.
4. Экологический атлас Ростовской области / под ред. В.Е. Закруткина [и др.]. Ростов н/Д.: Изд-во СКНЦ ВШ, 2000. 120 с.

5. Иванченко А.М., Коновалов А.Н., Бессмертный И.В., Хованский А.Д., Латун В.В., Меринова Ю.Ю. Природный потенциал ландшафтов Ростовской области // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2019. № 4 (204). С. 62–70. EDN: IJSMYL. <https://doi.org/10.23683/0321-3005-2019-4-62-70>
6. Хаванский А.Д., Латун В.В., Хорошев О.А., Меринова Ю.Ю., Богачев И.В., Кравченко А.М. Типы природопользования и экологическая ситуация в Ростовской области // Экология. Экономика. Информатика. Системный анализ и моделирование экономических и экологических систем. 2018. Т. 1, № 3. С. 262–269. EDN: VLPMSW. <https://doi.org/10.23885/2500-395X-2018-1-3-262-269>
7. Хаванский А.Д., Латун В.В., Иванченко А.М., Меринова Ю.Ю., Бессмертный И.В., Шпак Н.Н. Комплексная экологическая оценка Ростовской области // Int. Agricultural J. 2021. № 1 (64). С. 257–270. EDN: ZKJDZA. <https://doi.org/10.24411/2588-0209-2021-10297>

References

1. Isachenko A.G. *Landscape science and physical and geographical zoning*. Moscow: High School; 1991. 366 p. (In Russ.).
2. Perelman A.I., Kasimov N.S. *Geochemistry of landscape: a textbook*. Moscow: Astrea-2000; 1999. 768 p. (In Russ.).
3. Khrustalev Yu.P., Andreeva E.S., Bogucharskov V.T., Valkov V.F. et al., eds. *Natural conditions and natural resources of the Rostov region*. Rostov-on-Don, Bataysk: Bataysk Publishing House; 2002. 432 p. (In Russ.).
4. Zakrutkin V. E. et al., ed. *Ecological atlas of the Rostov region*. Rostov-on-Don: Publishing House of the North Caucasian Scientific Center of Higher School; 2000. 120 p. (In Russ.).
5. Ivanchenko A.M., Konovalov A.N., Bessmertny I.V., Khovansky A.D., Latun V.V., Merinova Yu.Y. The natural potential of the landscapes of the Rostov region. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science*. 2019;(4):62-70. (In Russ.). EDN: IJSMYL. <https://doi.org/10.23683/0321-3005-2019-4-62-70>
6. Khavansky A.D., Latun V.V., Khoroshev O.A., Merinova Yu.Y., Bogachev I.V., Kravchenko A.M. Types of environmental management and the ecological situation in the Rostov region. *Ecology. Economy. Computer Science. Series: System Analysis and Modeling of Economic and Ecological Systems*. 2018;1(3):262-269. (In Russ.). EDN: VLPMSW. <https://doi.org/10.23885/2500-395X-2018-1-3-262-269>
7. Khavansky A.D., Latun V.V., Ivanchenko A.M., Merinova Yu.Y., Bessmertny I.V., Shpak N.N. Integrated environmental assessment of the Rostov region. *Int. Agricultural J*. 2021;(1):257-270. (In Russ.). EDN: ZKJDZA. <https://doi.org/10.24411/2588-0209-2021-10297>

Информация об авторах

А.Д. Хаванский – доктор географических наук, доцент, профессор кафедры социально-экономической географии и природопользования Института наук о Земле ЮФУ.

И.В. Богачев – кандидат географических наук, доцент, доцент кафедры социально-экономической географии и природопользования Института наук о Земле ЮФУ.

А.Б. Эртель – кандидат педагогических наук, заведующая кафедрой социально-экономической географии и природопользования Института наук о Земле ЮФУ.

Ю.Ю. Меринова – кандидат географических наук, доцент, доцент кафедры социально-экономической географии и природопользования Института наук о Земле ЮФУ.

Information about the authors

A.D. Khavansky – Doctor of Science (Geography), Associate Professor, Professor of the Department of Socio-Economic Geography and Environmental Management, Institute of Earth Sciences, SFedU.

I.V. Bogachev – Candidate of Science (Geography), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Socio-Economic Geography and Environmental Management, Institute of Earth Sciences, SFedU.

A.B. Ertel – Candidate of Science (Pedagogics), Head of the Department of Socio-Economic Geography and Environmental Management, Institute of Earth Sciences, SFedU.

Yu.Yu. Merinova – Candidate of Science (Geography), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Socio-Economic Geography and Environmental Management, Institute of Earth Sciences, SFedU.

Статья поступила в редакцию 14.02.2025; одобрена после рецензирования 10.03.2025; принята к публикации 23.04.2025.
The article was submitted 14.02.2025; approved after reviewing 10.03.2025; accepted for publication 23.04.2025.

Научная статья
УДК 581.524.1/552:504.73
<https://doi.org/10.18522/1026-2237-2025-2-124-132>

ЗАГРЯЗНЕНИЕ АТМОСФЕРНОГО ВОЗДУХА ВЫБРОСАМИ АВТОТРАНСПОРТА В ПРИГОРОДНОЙ ЗОНЕ СОЧИНСКОГО ПРИЧЕРНОМОРЬЯ

Виталий Георгиевич Щербина

Филиал Института природно-технических систем в г. Сочи, Сочи, Россия
v.g.scherbina@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5634-7079>

Аннотация. Исследование проводилось в буковом древостое на временных пробных площадях 25×200 м (по 0,5 га) вдоль дорог с различной интенсивностью движения автотранспорта, при удаленности от дороги 0–30 м, в бассейнах рек Шахе, Хоста, Большая Херота, Псахо. Оценивалось состояние атмосферного воздуха в приствольной зоне деревьев по видовому составу эпифитных лишайников, мощности лесной подстилки, таксационных характеристик древостоя, аллелопатической активности при аналитической концентрации 1:50. Выявлены зоны малого загрязнения (с индексом полеотолерантности 2,8–5,0), среднего (4,8–6,0) и сильного (6,5–7,8). Общее жизненное состояние древостоя изменяется от 0,62 до 0,53 %: доля здорового древостоя – от 0,0 до 23,1 %, доля ослабленных варьирует в диапазоне 37,2–44,3, сильно поврежденных – 33,3–47,1 %. Отмечено снижение мощности лесной подстилки (4,5–6,9 см) с возрастанием аллелопатической активности и индекса полеотолерантности. Определено, что между величинами качества атмосферного воздуха и жизненным состоянием древостоя существует преимущественно отрицательная статистически значимая связь ($r = -0,946 \dots -0,927$). Положительная зависимость отмечена только у сильно нарушенного древостоя в диапазоне индекса полеотолерантности до 5,0 и у разрушенного (отмирающего) древостоя на всем градиенте антропогенного загрязнения – 2,8–7,8.

Ключевые слова: древостой, лесная подстилка, автотранспорт, загрязнение атмосферы, аллелопатическая активность, биотест

Для цитирования: Щербина В.Г. Загрязнение атмосферного воздуха выбросами автотранспорта в пригородной зоне Сочинского Причерноморья // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2025. № 2. С. 124–132. <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2025-2-124-132>

Благодарности: Автор благодарен анонимному рецензенту за ценные рекомендации, направленные на улучшение статьи.

Работа выполнена в рамках государственного задания Института природно-технических систем «Фундаментальные и прикладные исследования закономерностей и механизмов формирования региональных изменений природной среды и климата под влиянием глобальных процессов в системе океан – атмосфера» № 124013000609-2.

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

Original article

AIR POLLUTION BY VEHICLE EMISSIONS IN THE SUBURBAN AREA OF THE SOCHI BLACK SEA REGION

Vitaliy G. Scherbina

Branch of Institute of Natural and Technical Systems in Sochi, Sochi, Russia
v.g.scherbina@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5634-7079>

© Щербина В.Г., 2025

Abstract. The assessment was carried out in beech stands on belt test plots of 25 × 200 m (0.5 ha each) along roads with different traffic intensity, at a distance of 0–30 m from the road, in the basins of the Shakhe, Khosta, Bolshaya Kherota, and Psakho rivers. The state of the atmospheric air in the tree trunk zone was assessed based on the species composition of epiphytic lichens, the thickness of the forest litter, the taxation characteristics of the tree stand, and allelopathic activity at an analytical concentration of 1:50. Based on the analysis results, zones of low pollution (with a field tolerance index of 2.8–5.0), moderate pollution (4.8–6.0), and high pollution (6.5–7.8) were identified. The overall vital condition of the forest stand varies from 0.62 to 0.53 %: the share of healthy forest stand is recorded from 0.0 to 23.1 %, the share of weakened stands varies in the range of 37.2–44.3, heavily damaged - 33.3–47.1 %. A decrease in the forest litter thickness (4.5–6.9 cm) with an increase in allelopathic activity and an increase in the field tolerance index was noted. It was determined that there is a predominantly negative statistically significant relationship between the values of atmospheric air quality and the vital condition of the forest stand ($r = -0.946 \dots -0.927$). A positive relationship was noted only for heavily damaged forest stands in the range of the field tolerance index up to 5.0 and for destroyed (dying) forest stands along the entire gradient of anthropogenic pollution - 2.8–7.8.

Keywords: forest stand, forest litter, motor transport, air pollution, allelopathic activity, biotest

For citation: Scherbina V.G. Air Pollution by Vehicle Emissions in the Suburban Area of the Sochi Black Sea Region. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2025;(2):124-132. (In Russ.). <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2025-2-124-132>

Acknowledgments: the author is grateful to the anonymous reviewer for valuable recommendations aimed at improving the article.

The work was carried out within the framework of the state assignment of the Institute of Natural and Technical Systems “Fundamental and applied research into the patterns and mechanisms of formation of regional changes in the natural environment and climate under the influence of global processes in the ocean-atmosphere system” No. 124013000609-2.

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

Введение

Негативное влияние автотранспорта на природную среду обусловлено превышением нормированных значений аэро-, гидро- и терраполлютантов [1], вызывающих преобразования в лесных биогеоценозах, которое приводит к упрощению состава и структуры сообщества [2]. Воздействие окружающей среды проявляется также в изменении (ослабление или повышение) межвидовой конкуренции, затрагивающем не только местные, но и адвентивные формы растений [3].

Аэрополлютанты, аккумулированные лесной подстилкой, способны вызывать стресс у лесных видов, произрастающих в зоне антропогенного загрязнения. Обнаруживается взаимосвязь между воздействием стрессовых факторов окружающей среды на стимуляцию выработки аллелопатических эффектов, зависящих в основном от уровня концентрации субстрата [4], и условиями окружающей среды [5]. Помимо отрицательных ингибирующих эффектов лесной подстилки (автотоксичность) [6], аллелопатические эффекты могут стимулировать положительные обратные связи [7], т.е. проявлять так называемый эффект биостимулятора [8].

Уникальные лесные сообщества в курортной зоне г. Сочи также испытывают негативное влияние от выбросов автотранспорта. Несмотря на устойчивый интерес экологов к проблеме загрязнения, информация по данному вопросу очень ограничена. Так, по исследованиям 2008 г. [9] экологическая ситуация в отдельных районах города оценивалась как предельно критическая. Оценка на основе спутниковых данных по интегральному индексу загрязнения атмосферы за 2023 г. [10] характеризует TAQI (Tropomi Air Quality Index) не ниже 19,8, подтверждая критическую ситуацию для курортной зоны влажных субтропиков, насыщенных эндемичной реликтовотретичной мезофильной растительностью [11].

Цель исследований – оценить уровень автотранспортного загрязнения атмосферного воздуха в пригородной зоне города-курорта Сочи. В задачи входило: 1) определение характеристик древо-стоя по таксационным ступеням толщины; 2) установление по лишеноиндикационным показателям фонового загрязнения атмосферного воздуха; 3) определение аллелопатической активности лесной подстилки на различных участках побережья по уровню загрязнения атмосферного воздуха.

Объекты и методы исследования

Исследования проводились в пригородной зоне Сочинского Причерноморья в интервале высот 95–235 м н. ур. м. на пологих юго-западных склонах 11–25°. Временные пробные площади (ПП) 25×200 м (по 0,5 га) закладывались в бассейнах рек (Шахе, Хоста, Большая Херота, Псахо), при удаленности от дорог 0–30 м, по координатам:

–ПП 1: пос. Лесное (вдоль дороги с минимальным движением транспорта) 43°34'26" с. ш., 39°58'24" в. д.;

–ПП 2: пос. Молдовка 43°28'01.1" с. ш., 39°57'19.9" в. д.;

–ПП 3: пос. Хлебороб (подъезд к рекреационному объекту «Каньон Чертовы ворота») 43°32'41.5" с. ш., 39°52'44.7" в. д.;

–ПП 4: пос. Головинка (вдоль федеральной трассы) 43°47'48.7" с. ш., 39°28'29.1" в. д.

Участки подбирались с учетом близких эдафических характеристик, лесорастительных условий и в порядке возрастания уровня интенсивности движения автотранспорта по дороге (рис. 1).

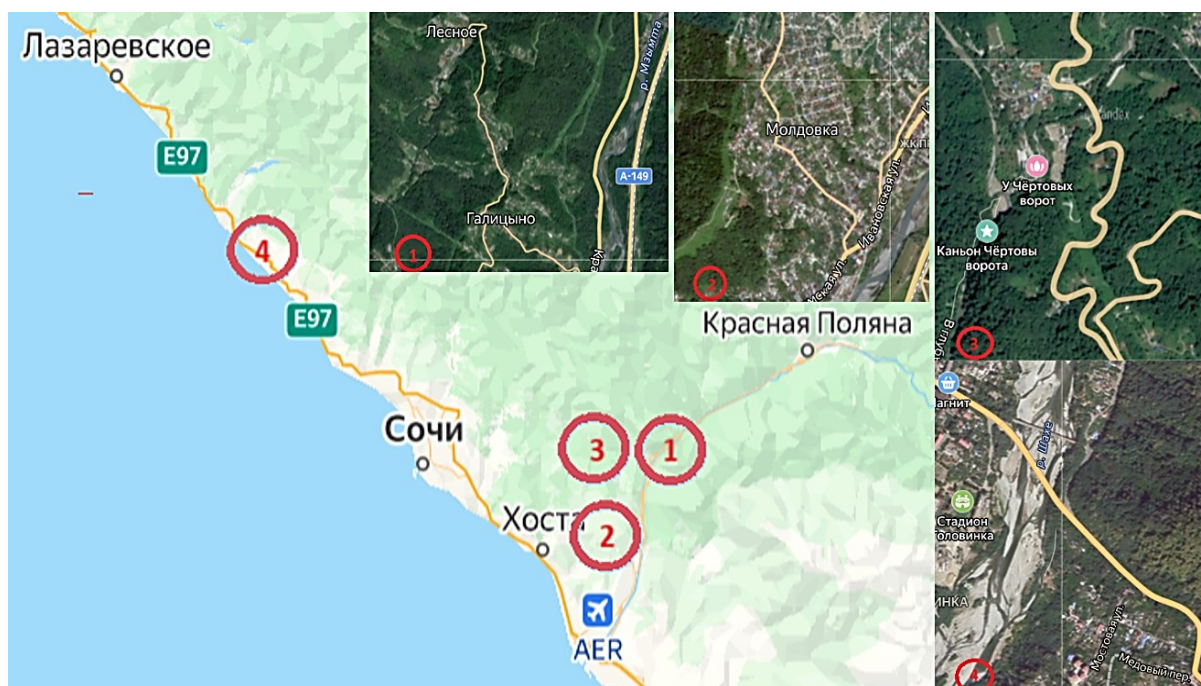


Рис. 1. Карта-схема местоположения временных ПП 1, ПП 2, ПП 3, ПП 4

/ Fig. 1. Map-scheme of the location of temporary trial plots: trial area 1, trial area 2, trial area 3, trial area 4

На анализируемых участках почва бурая лесная слабонасыщенная, среднемошная, средне-суглинистая на аллюво-делювии плотных пород [12]. Насаждение сложное (из двух-трех поколений леса), формирует буковый разнотравно-ежевиковый тип леса. Тип условий произрастания Д2 – Д3. Коэффициентное участие бука восточного (Бк) (*Fagus orientalis* L.) 7–9 единиц, в составе: граб обыкновенный (Г) (*Carpinus betulus* L.), липа кавказская (Лп) (*Tilia caucasica* Rupr.), дуб скальный (Дск) (*Quercus petraea* (Matt.) Liebl), дуб пушистый (Дпуш) (*Quercus pubescens* Willd.), ясень обыкновенный (Яс) (*Fraxinus excelsior* L.); формула состава: 8Бк2Г+Яс, Дск, Лп; 9Бк1Г+Дпуш, Яс; 8Бк1Лп1Г+Дск; 7Бк2Г1Лп+Яс. Во флористическом составе напочвенного покрова доминируют виды травяного покрова: ежевика кавказская (*Rubus caucasicus* Focke), щитовник мужской (*Dryopteris filix-mas* (L.) Schott). Частота встречаемости мезофитов 10–25 %: подмаренник душистый (*Asperula odorata* L.), купена многоцветковая (*Polygonatum multiflorum* (L.) All.), с постоянством до 5 % регистрируется вороний глаз неполный (*Paris incomplete* M. Bieb.), герань Роберта (*Geranium robertianum* L.), орляк обыкновенный (*Dryopteris austriaca* (Jacq.) Wagn. ex Schinz & Thell.), гнездовка настоящая (*Neottia nidus-avis* (L.) Rich.), волжанка обыкновенная (*Aruncus vulgaris* Raf.) и др. Внеярусная растительность представлена плющом колхидским (*Hedera colchica* C. Koch), плющом обыкновенным (*Hedera helix* L.) и тамусом обыкновенным (*Tamus communis* L.).

Определение таксационных характеристик древостоя на ПП включало сплошной пересчёт деревьев по ступеням толщины ≥ 8 см. Жизненное состояние древостоя (In) оценивалось по шкале Е.Н. Андреевой и др. [1] с учетом доли деревьев по категориям состояния: здоровое (1,0–0,8), поврежденное (0,79–0,50), сильно поврежденное (0,49–0,20), разрушенное ($\leq 0,19$).

Анализ состояния атмосферного воздуха на каждой ПП оценивался по видовому составу эпифитных лишайников. Объем выборки зависел от численности деревьев в каждой категории состояния и определялся по средним значениям 10 деревьев в 1–10-кратной повторности. Индекс полевотолерантности (IP) рассчитывался по шкале качественной оценки атмосферного воздуха А.С. Боголюбова и М.В. Кравченко [13] в условных зонах: нормальной ($IP = 1–2$), малого загрязнения ($IP = 2–5$), среднего загрязнения ($IP = 5–7$), сильного загрязнения ($IP = 7–10$), критического загрязнения ($IP = 10$), лишайниковой пустыне ($IP = 0$).

Для определения аллелопатически активной лесной подстилки отбор проб (в 3-кратной повторности) проводился в приствольной зоне деревьев бука с использованием цилиндрического бурава ($\varnothing 5$ см) врезного типа [14]. В качестве контроля выбран участок в буковом разнотравно-ежевиковом лесу при удаленности от селитебной зоны около 4,5 км.

Определение активности аллелопатических веществ в подстилке проводилось по общепринятому методу биопроб А.М. Гродзинского [15], в условных кумариновых единицах (УКЕ) на тест-культурах редьки посевной (*Raphanus sativus* var. *Radicula* Pers.), при аналитической концентрации 1:50. По величине всхожести определялся индекс относительного аллелопатического эффекта (I_{RAE}) [16]: $I_{RAE} = (I_o - I_c)/I_c$, где I_o – проросшие семена в опыте; I_c – проросшие семена в контроле. Индекс I_{RAE} позволяет выявлять не только тормозящий (отрицательные значения), но и стимулирующий эффект (положительные значения).

Расчитанные теоретически необходимые объемы выборочных совокупностей превосходили вероятность (p) фактически полученных объемов (при t (критерий Стьюдента) = 2, $p = 0,997$; $t = 3$, $p = 0,95$) на одну ПП: по древостою (31,4; 70,4); количеству проб подстилки (29,2; 65,2), проб на аллелопатическую активность (27,5; 61,9). Для вычисления доверительных границ и интервалов взято $t = 3$, что обеспечивает уровень значимости, близкий к 0,01. Характер связи между качеством атмосферного воздуха и аллелопатической активностью лесной подстилки определялся путем построения полиномиальных моделей (2-й степени) регрессии с оценкой статистически значимых на уровне $p < 0,05$ значений коэффициента детерминации (R^2).

Результаты исследования

На основе собранного материала рассчитаны показатели древостоя: число деревьев по ступеням толщины, приходящееся на ПП (рис. 2а). Выявлено, что анализируемые участки букового леса по классификациям Г.Е. Комина и И.В. Семечкина [17] относятся к группе разновозрастных, подгруппе равномерно разновозрастных, типу циклично разновозрастных, образуя полидоминантные, семенного происхождения древостои. Данный тип может быть характерным для трансформированных участков леса при антропогенном вмешательстве.

Из рис. 2б и табл. 1 видно, что на антропогенную природу ослабленности насаждений указывает и индекс относительного жизненного состояния. Доля здорового древостоя регистрируется от 0,0–6,3 (ПП 3, 4) до 23,1–22,2 (ПП 1, 2), ослабленных (поврежденных) – 37,2–44,3, сильно ослабленных (сильно поврежденных) – 33,3–47,1 %. Несмотря на общую оценку жизненного состояния в диапазоне $In = 0,62–0,53$, часть древостоя в ступенях толщины 20–32 см еще может полноценно выполнять свои средообразующие функции.

По [11, 15, 18] ослабление древостоя можно рассматривать в качестве диагностического признака антропогенного вмешательства. Сокращение доли здоровых деревьев сопровождается увеличением числа поврежденных, сильно поврежденных и отмирающих, что объясняется влиянием атмосферного загрязнения лесной среды вблизи автомобильных дорог на численность деструктурирующих грибов, стволовых инфекций и т.п. [18], еще более усиливающих ослабленность деревьев, особенно старших поколений.

Запасы лесной подстилки, находясь в тесной взаимосвязи с годовым количеством опада [1], значительно варьируют в диапазоне 8459–8992 кг/га, формируя мощность в приствольной зоне деревьев от 4,7 до 6,9 см (табл. 2). Регистрируемое увеличение мощности подстилки на ПП 3, 4 характеризует снижение скорости разложения при участии двух протекающих процессов.

Под воздействием группы танинов замедляется скорость разложения и углеродно-азотные циклы [19], в то время как фенольные соединения способствуют задержке колонизации подстилочными продуцентами [20]. В итоге происходит замедление трансформации лесной подстилки [21], с дальнейшим химическим распадом до аллелопатически активных веществ [22]. Было показано, что аллелопатические факторы, влияя на уровень токсичности для микроорганизмов, способны ингибировать активность ферментов [23].

Водные экстракты лесной подстилки в биотестах снижают количество проросших семян 32,1 % (528 УКЕ). Это свидетельствует о существенном подавляющем влиянии на ростовые процессы. В условиях возрастающей антропогенной нагрузки влияние усиливается, составляя на ПП 4 до 13,6 % (754 УКЕ).

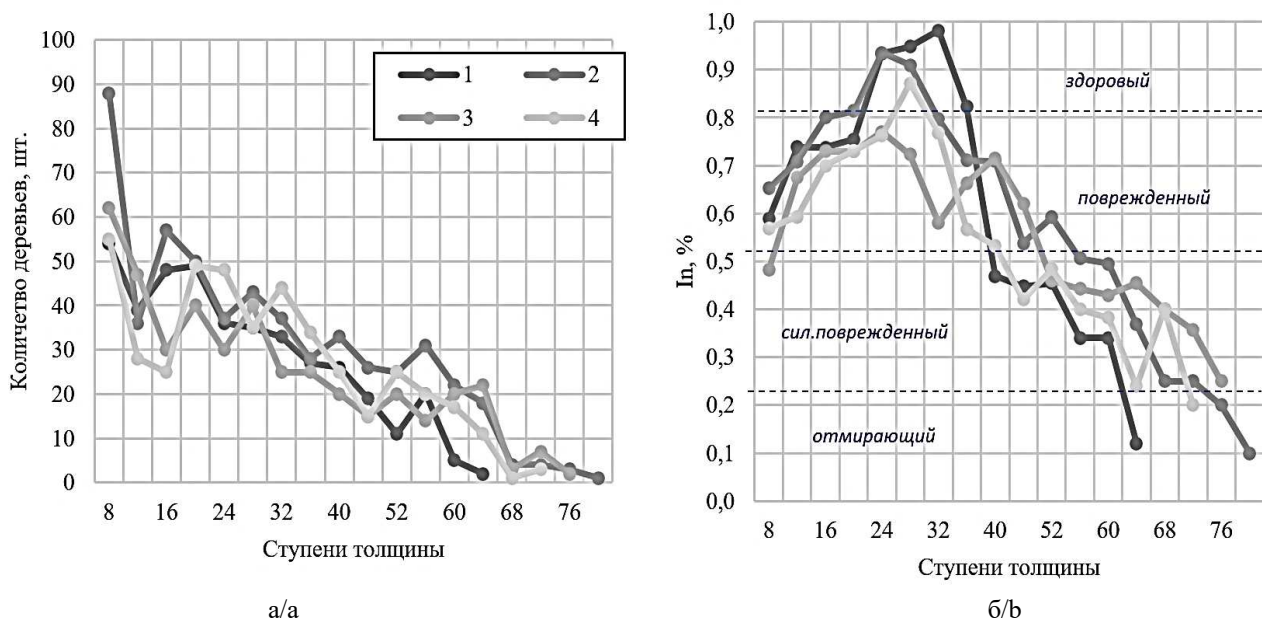


Рис. 2. Распределение деревьев по ступеням толщины (а) и относительному жизненному состоянию (б), в целом по древостою ПП 1, ПП 2, ПП 3, ПП 4 / Fig. 2. Distribution of trees by thickness grades (a) and relative vital state (b), in general, across the forest stand of the trial plot: trial area 1, trial area 2, trial area 3, trial area 4

Таблица 1 / Table 1

**Общая характеристика жизненного состояния древостоя
 / General characteristics of the vital state of the forest stand**

ПП	Категория состояния древостоя								Всего, шт.	In, %
	a		b		c		d			
	шт.	%	шт.	%	шт.	%	шт.	%		
1	142	35,2	154	38,0	94	23,3	14	3,5	404	0,62
2	182	33,5	202	37,2	137	25,2	22	4,1	543	0,57
3	67	15,9	183	43,4	120	28,4	25	5,9	422	0,55
4	103	23,7	175	40,2	100	23,0	57	13,1	435	0,53

Примечание. Состояние древостоя: а – здоровое; б – поврежденное; с – сильно поврежденное; d – разрушенное (отмирающее); In – индекс жизненного состояния по числу деревьев.

Из результатов анализа (рис. 3) следует, что между величинами качества атмосферного воздуха и жизненным состоянием древостоя существует преимущественно отрицательная статистически значимая связь ($r = -0,95 \dots -0,93$; $R^2 = 0,92-0,89$).

Таблица 2 / Table 2

Общая характеристика состояния воздушной среды и лесной подстилки, использованных в качестве объектов анализа / General characteristics of the state of the air environment and forest litter used as objects of analysis

ПП	Проективное покрытие лишайников			Полеотолерантность		Подстилка	
	c_i , см	C_i , %	C_n	A_i	IP	H , см	УКЕ
1	246,7–3972,3	23,5–58,0	5–8	2–4	2,8–3,5	4,5	528
2	207,5–2640,1	42,6–51,6	7–8	3–5	3,6–5,0	4,7	549
3	122,2–1207,5	17,2–32,7	4–6	4–6	4,8–6,0	6,5	682
4	73,6–1078,6	2,7–11,2	1–4	6–8	6,5–7,8	6,9	754

Примечание. c_i – суммарное покрытие; C_i – относительное покрытие; C_n – балл покрытия; A_i – класс полеотолерантности; IP – индекс полеотолерантности; H – мощность подстилки; УКЕ – условные кумариновые единицы.

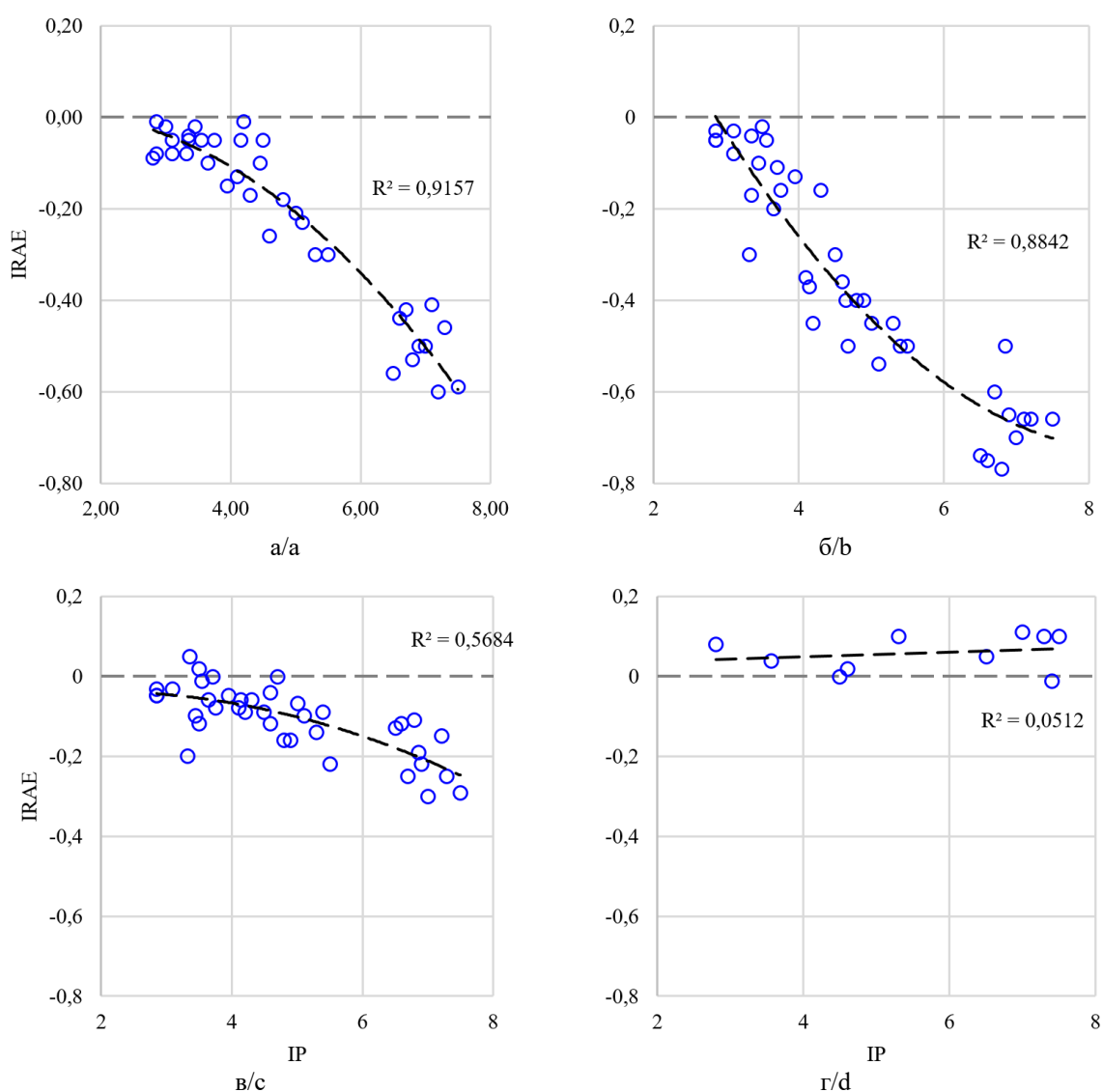


Рис. 3. Соотношение между качеством атмосферного воздуха (IP) и аллелопатической активностью лесной подстилки ($IRAЕ$) по категориям состояния древостоя: здоровое (а), поврежденное (б), сильно поврежденное (в), разрушенное (г) / Fig. 3. The relationship between the quality of atmospheric air (IP) and the allelopathic activity of the forest litter ($IRAЕ$) by categories of forest stand condition: healthy (a), damaged (b), severely damaged (c), destroyed (d)

Положительная зависимость отмечена только у сильно нарушенного древостоя в диапазоне IP до 5,0 ($R^2 = 0,57$) и у разрушенного (отмирающего) древостоя ($r = 0,23$; $R^2 = 0,05$) на всем градиенте антропогенного загрязнения ($IP = 2,8-7,8$), которая, однако, статистически незначима.

Это может означать, что на градиенте качественной оценки атмосферного воздуха фактор чистоты становится лимитирующим для сильно поврежденных и отмирающих деревьев.

Заключение

Проведенные исследования подтверждают ранее сделанные заключения [9, 10], что на пригодную зону влажных субтропиков, где располагается большая часть санаториев, домов отдыха, мотелей, кемпингов, автотранспортная нагрузка оказывает негативное влияние. В результате хронического воздействия аэрополлютантов основная доля древостоя (70,5–91,4 %) при удаленности от дорог 0–30 м не может полноценно выполнять свои средообразующие и защитные функции (гидрологическая, водоохранная, водорегулирующая, почвозащитная (противоэрозионная), климаторегулирующая, санитарно-гигиеническая), находясь в ослабленном (37,2–44,3 %) и сильно ослабленном (33,3–47,1 %) состоянии.

Снижение качества атмосферного воздуха приводит к росту мощности лесной подстилки и стимуляции выработки фитотоксинов в приствольной зоне деревьев. Определено, что между величинами качества атмосферного воздуха и жизненным состоянием здорового и ослабленного древостоя существует обратная статистическая зависимость. Для сильно нарушенного древостоя характерно снижение ингибирующих свойств, а у отмирающего – стимуляция до 7–10 %, т.е. отмечается критическая ситуация.

Список источников

1. Андреева Е.Н., Баккал И.Ю., Горшков В.В., Лянгузова И.В., Мазная Е.А., Нешатаев В.Ю., Нешатаева В.Ю., Ставрова Н.И., Ярмишко В.Т., Ярмишко М.А. Методы изучения лесных сообществ. СПб.: С.-Петербургский гос. ун-т, 2002. 240 с. EDN: YSEXKF.
2. Матвеев Н.М. Годичные и сезонные изменения аллелопатического режима в лесонасаждениях степного Заволжья // Вопросы лесной биогеоэкологии, экологии и охраны природы в степной зоне: межвуз. сб. Куйбышев: Куйбышевский гос. ун-т, 1977. Вып. 2. С. 12–20.
3. Gioria M., Osborne B.A. Resource competition in plant invasions: emerging patterns and research needs // Front. Plant Sci. 2014. Vol. 5. Art. 501. <https://doi.org/10.3389/fpls.2014.00501>
4. Li A., Zheng R., Tian L., Wei Y., Wu J., Hou X. Allelopathic effects of switchgrass on redroot pigweed and crabgrass growth // Plant Ecol. 2021. Vol. 222. P. 1–12. <https://doi.org/10.1007/s11258-020-01083-4>
5. Campanella M.V., Bisigato A.J. Conspecific leaf litter and root competition inhibits shrub emergence in the Patagonian steppe // Plant Ecol. 2019. Vol. 220. P. 985–993. <https://doi.org/10.1007/s11258-019-00968-3>
6. Meiners S.J., Kong C.-H., Ladwig L.M., Pisula N.L., Lang K.A. Developing an ecological context for allelopathy // Plant Ecol. 2012. Vol. 213. P. 1861–1867. <https://doi.org/10.1007/s11258-012-0121-6>
7. Xiong S., Nilsson C. The effect of plant litter on vegetation: a meta-analysis // J. Ecol. 1999. Vol. 87, iss. 6. P. 984–994. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2745.1999.00414.x>
8. Bonanomi G., Zotti M., Idbella M., Mazzoleni S., Abd-ElGawad A.M. Microbiota modulation of allelopathy depends on litter chemistry: Mitigation or exacerbation? // Sci Total Environ. 2021. Vol. 776. Art. 145942. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145942>
9. Хованский А.Д., Орлинский А.С., Шустов Н.А. Комплексная оценка экологической ситуации в городе-курорте Большой Сочи // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2008. № 3(145). С. 88–92. EDN: JKEINP.
10. Загрязнение воздуха. Индекс TAQI. Рейтинг городов по качеству воздуха URL: <https://www.taqi.strelka-kb.com> (дата обращения: 12.10.2024).
11. Грудзинская И. А. Широколиственные леса предгорий северо-западного Кавказа // Широколиственные леса Северо-Западного Кавказа. М.: Изд-во Академии наук, 1953. С. 5–186.
12. Вальков В.Ф., Штомпель Ю.А., Тюльпанов В.И. Почвоведение: почвы Северного Кавказа. Краснодар: Советская Кубань, 2002. 723 с. EDN: YWUEIQ.
13. Боголюбов А.С., Кравченко М.В. Оценка загрязнения воздуха методом лихеноиндикации. М.: Эко-система, 2001. 15 с.
14. Пат. № 2250579 С1 РФ, МПК А01В 1/00, А01G 23/00, А01G 23/06. Инструмент для извлечения тонких корней деревьев, растений / В.А. Закамский, С.В. Закамский. Заявл. 30.04.2004. Оpubл. 27.04.2005. EDN: OEGCMF.

15. Гродзинский А.М. Аллелопатия растений и почвоутомление. Киев: Наукова думка, 1991. 532 с.
16. Hashoum H., Santonja M., Gauquelin T., Saatkamp A., Gavinet J., Greff S., Lecareux C., Fernandez C., Bousquet-Mélou A. Biotic interactions in a Mediterranean oak forest: Role of allelopathy along phenological development of woody species // *European J. of Forest Research*. 2017. Vol. 136. P. 699–710. <https://doi.org/10.1007/s10342-017-1066-z>
17. Комин Г.Е., Семечкин И.В. Возрастная структура древостоев и принципы ее типизации // *Лесоведение*. 1970. № 2. С. 24–33.
18. Мелехов И.С. Лесоведение. М.: Лесная промышленность, 1980. 408 с.
19. Hättenschwiler S., Vitousek P. The role of polyphenols in terrestrial ecosystem nutrient cycling // *Trends in Ecology & Evolution*. 2000. Vol. 15, iss. 6. P. 238–243. [https://doi.org/10.1016/s0169-5347\(00\)01861-9](https://doi.org/10.1016/s0169-5347(00)01861-9)
20. Chomel M., Fernandez C., Bousquet-Mélou A., Gers C., Monnier Y., Santonja M., Gauquelin T., Gros R., Lecareux C., Baldy V. Secondary metabolites of *Pinus halepensis* alter decomposer organisms and litter decomposition during afforestation of abandoned agricultural zones // *J. of Ecology*. 2014. Vol. 102, iss. 2. P. 411–424. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.12205>
21. Калякина Р.Г., Ангалът Е.М., Бурлуцкий А.Ю. Формирование лесной подстилки в городских лесах (на примере урочища Качкарский мар) // *Изв. Оренбургского гос. аграр. ун-та*. 2017. № 4(66). С. 250–252. EDN: ZGRYXJ.
22. Iqbal J., Siegrist J.A., Nelson J.A., McCulley R.L. Fungal endophyte infection increases carbon sequestration potential of southeastern USA tall fescue stands // *Soil Biology & Biochemistry*. 2012. Vol. 44, iss. 1. P. 81–92. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2011.09.010>
23. Kraus T.E.C., Dahlgren R.A., Zasoski R.J. Tannins in nutrient dynamics of forest ecosystems – a review // *Plant and Soil*. 2003. Vol. 256. P. 41–66. <https://doi.org/10.1023/A:1026206511084>

References

1. Andreeva E.N., Bakal I.Yu., Gorshkov V.V., Lyanguzova I.V., Maznaya E.A., Neshataev V.Yu., Neshataeva V.Yu., Stavrova N.I., Yarmishko V.T., Yarmishko M.A. *Methods of studying forest communities*. St. Petersburg: St. Petersburg State University; 2002. 240 p. EDN: YSEXKF. (In Russ.).
2. Matveev N.M. Annual and seasonal changes in the allelopathic regime in forest plantations of the steppe Trans-Volga region. *Issues of forest biogeocenology, ecology and nature conservation in the steppe zone: interuniversity collection*. Kuibyshev: Kuibyshev State University; 1977;(2):12-20. (In Russ.).
3. Gioria M., Osborne B.A. Resource competition in plant invasions: emerging patterns and research needs. *Front. Plant Sci*. 2014;5:501. <https://doi.org/10.3389/fpls.2014.00501>
4. Li A., Zheng R., Tian L., Wei Y., Wu J., Hou X. Allelopathic effects of switchgrass on redroot pigweed and crabgrass growth. *Plant Ecol*. 2021;222:1-12. <https://doi.org/10.1007/s11258-020-01083-4>
5. Campanella M.V., Bisigato A.J. Conspecific leaf litter and root competition inhibits shrub emergence in the Patagonian steppe. *Plant Ecol*. 2019;220:985-993. <https://doi.org/10.1007/s11258-019-00968-3>
6. Meiners S.J., Kong C.-H., Ladwig L.M., Pisula N.L., Lang K.A. Developing an ecological context for allelopathy. *Plant Ecol*. 2012;213:1861-1867. <https://doi.org/10.1007/s11258-012-0121-6>
7. Xiong S., Nilsson C. The effect of plant litter on vegetation: a meta-analysis. *J. Ecol*. 1999;87(6):984-994. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2745.1999.00414.x>
8. Bonanomi G., Zotti M., Idbella M., Mazzoleni S., Abd-ElGawad A.M. Microbiota modulation of allelopathy depends on litter chemistry: Mitigation or exacerbation? *Sci Total Environ*. 2021;776:145942. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145942>
9. Khovanskiy A.D., Orlinskiy A.S., Shustov N.A. Comprehensive assessment of the environmental situation in the resort city of Greater Sochi. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science*. 2008;(3):88-92. (In Russ.). EDN: JKEINP.
10. *Air Pollution. TAQI Index. Air Quality Cities Ranking*. Available from: <https://www.taqi.strelka-kb.com> [Accessed 12th October 2024]. (In Russ.).
11. Grudzinskaya I. A. Broadleaf forests of the foothills of the northwestern Caucasus. *Broadleaf forests of the Northwestern Caucasus*. Moscow: Publishing House of the Academy of Sciences; 1953:5-186. (In Russ.).
12. Valkov V.F., Shtompel Yu. A., Tyulpanov V.I. *Soil science: soils of the North Caucasus*. Krasnodar: Soviet Kuban; 2002. 723 p. (In Russ.). EDN: YWUEIQ.
13. Bogolyubov A.S., Kravchenko M.V. *Air pollution assessment by lichen indication method*. Methodological guide. Moscow: Ecosystem; 2001. 15 p. (In Russ.).
14. Zakamsky V.A., Zakamsky S.V. *Tool for extracting fine roots of trees, plants*. Certificate, No. 2250579 C1, Russian Federation, IPC A01B 1/00, A01G 23/00, A01G 23/06. Declared on 30th April 2004. Published on 27th April 2005. (In Russ.). EDN: OEGCMF.
15. Grodzinsky A.M. *Plant allelopathy and soil fatigue*. Kyiv: Scientific Thought; 1991. 532 p. (In Russ.).

16. Hashoum H., Santonja M., Gauquelin T., Saatkamp A., Gavinet J., Greff S., Lecareux C., Fernandez C., Bousquet-Mélou A. Biotic interactions in a Mediterranean oak forest: Role of allelopathy along phenological development of woody species. *European J. of Forest Research*. 2017;36:699-710. <https://doi.org/10.1007/s10342-017-1066-z>
17. Komin G.E., Semechkin I.V. Age structure of forest stands and principles of its typification. *Forest Science*. 1970;(2):24-33. (In Russ.).
18. Melekhov I.S. *Forest science*. Moscow: Forestry industry; 1980. 408 p. (In Russ.).
19. Hättenschwiler S., Vitousek P. The role of polyphenols in terrestrial ecosystem nutrient cycling. *Trends Ecol Evol*. 2000;15(6):238-243. [https://doi.org/10.1016/s0169-5347\(00\)01861-9](https://doi.org/10.1016/s0169-5347(00)01861-9)
20. Chomel M., Fernandez C., Bousquet-Mélou A., Gers C., Monnier Y., Santonja M., Gauquelin T., Gros R., Lecareux C., Baldy V. Secondary metabolites of *Pinus halepensis* alter decomposer organisms and litter decomposition during afforestation of abandoned agricultural zones. *J. of Ecology*. 2014;102(2):411-424. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.12205>
21. Kalyakina R.G., Anhalt E.M., Burlutsky A.Yu. Formation of forest litter in urban forests (on the example of the Kachkarsky Mar tract). *Bulletin of the Orenburg State Agrarian University*. 2017;(4):250-252. (In Russ.). EDN: ZGRYXJ.
22. Iqbal J., Siegrist J.A., Nelson J.A., McCulley R.L. Fungal endophyte infection increases carbon sequestration potential of southeastern USA tall fescue stands. *Soil Biology & Biochemistry*. 2012;44(1):81-92. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2011.09.010>
23. Kraus T.E.C., Dahlgren R.A., Zasoski R.J. Tannins in nutrient dynamics of forest ecosystems - a review. *Plant and Soil*. 2003;256:41-66. <https://doi.org/10.1023/A:1026206511084>

Информация об авторе

В.Г. Щербина – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник ИПТС.

Information about the author

V.G. Scherbina – Candidate of Science (Biology), Senior Researcher, INTS.

Статья поступила в редакцию 30.10.2024; одобрена после рецензирования 20.02.2025; принята к публикации 23.04.2025.
The article was submitted 30.10.2024; approved after reviewing 20.02.2025; accepted for publication 23.04.2025.

БИОЛОГИЧЕСКИЕ НАУКИ

BIOLOGICAL SCIENCES

Научная статья

УДК 613.262:546.175

<https://doi.org/10.18522/1026-2237-2025-2-133-140>

ОЦЕНКА УРОВНЯ СОДЕРЖАНИЯ НИТРАТОВ В ПЛОДООВОЩНОЙ ПРОДУКЦИИ

Э.А. Аухадиева¹, Р.А. Даукаев², Д.Э. Мусабилов³, Г.Р. Аллаярова⁴,
С.Р. Афонькина⁵, Е.Е. Зеленковская⁶

^{1, 2, 3, 4, 5, 6} Уфимский научно-исследовательский институт медицины труда и экологии человека, Уфа, Республика Башкортостан, Россия

¹ phytoufa@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6793-6992>

² Ufa.lab@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0421-4802>

³ 30102000@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2042-8162>

⁴ phytoufa@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0838-3598>

⁵ svetafonk1@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0445-9057>

⁶ Ufa.lab@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7682-2703>

Аннотация. Цель исследования – проведение мониторинга содержания нитратов в плодоовощной продукции с последующей обработкой информации для оценки риска здоровью, разработка рекомендаций по снижению нитратной нагрузки. Установлено, что уровень нитратов варьирует в широких пределах – от 30 до 2906 мг/кг в зависимости от культуры. При длительном хранении при температуре от 2 до 5 °С в плодоовощной продукции наблюдается снижение содержания нитратов в 1,5–3 раза по сравнению со свежим урожаем. Для осуществления производственного контроля за качеством продукции, поступающей в торговую сеть г. Уфы, установлен допустимый уровень нитратов. Оценка неканцерогенного риска здоровью показала, что при употреблении плодоовощной продукции, выращенной в личных подсобных хозяйствах жителей Республики Башкортостан, уровень риска в летне-осенний сезон настораживающий ($HQ=1,3$), в зимне-весенний сезон – допустимый. При использовании в пищу тех же наименований продукции из торговой сети значение коэффициента опасности во все сезоны – допустимое. Для снижения риска развития алиментарно-зависимых заболеваний, связанных с нитратной нагрузкой, рекомендуется создавать оптимальные для данной культуры условия увлажнения почвы, минерального питания, соблюдать сроки и количество вносимых удобрений, урожай убирать на стадии зрелости; на хранение оставлять неповрежденный урожай в прохладном темном помещении; продукцию перед употреблением подвергать правильной переработке – тщательно промывать в проточной воде, вымачивать, термообработку проводить посредством варки в воде, желателен во вторичном бульоне.

Ключевые слова: безопасность пищевой продукции, плодоовощная продукция, содержание нитратов, ионометрический метод, личные подсобные хозяйства, торговая сеть, коэффициент опасности, неканцерогенный риск здоровью

Для цитирования: Аухадиева Э.А., Даукаев Р.А., Мусабилов Д.Э., Аллаярова Г.Р., Афонькина С.Р., Зеленковская Е.Е. Оценка уровня содержания нитратов в плодоовощной продукции // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2025. № 2. С. 133–140. <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2025-2-133-140>


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

Original article

ESTIMATION OF THE NITRATE CONTENT IN FRUIT AND VEGETABLE PRODUCTS

E.A. Aukhadieva¹, **R.A. Daukaev²**, **D.E. Musabirov³**, **G.R. Allayarova⁴**,
S.R. Afonkina⁵, **E.E. Zelenkovskaya⁶**

^{1, 2, 3, 4, 5, 6} Ufa Research Institute of Occupational Health and Human Ecology, Ufa, Republic of Bashkortostan, Russia

¹ phytoufa@yandex.ru , <https://orcid.org/0000-0002-6793-6992>

² Ufa.lab@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0421-4802>

³ 30102000@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2042-8162>

⁴ phytoufa@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0838-3598>

⁵ svetafonk1@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0445-9057>

⁶ Ufa.lab@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7682-2703>

Abstract. The aim of the study was to monitor the nitrate content in fruit and vegetable products with subsequent processing of the information to assess the health risk and develop recommendations for reducing the nitrate load. It was found that the nitrate level varies widely – from 30 to 2906 mg/kg, depending on the crop. With long-term storage at a temperature of 2-5 °C, a decrease in the nitrate content of 1.5 to 3 times is observed in fruit and vegetable products, compared to the fresh harvest. The products entering the retail network of Ufa have an acceptable level of nitrates, which can be explained by the implementation of industrial control over their quality. Evaluation of the non-carcinogenic health risk showed that when consuming fruit and vegetable products grown in private farms of residents of the Republic of Bashkortostan, the risk level in the summer-autumn season is alarming ($HQ=1.3$), and acceptable in the winter-spring season. When using the same types of products from the retail network for food, the hazard coefficient value is acceptable in all seasons. To reduce the risk of developing alimentary-dependent diseases associated with nitrate load, it is recommended to create optimal conditions for soil moisture and mineral nutrition for a given crop, observe the timing and amount of fertilizers applied, harvest at the maturity stage; leave the undamaged crop for storage and store it in a cool, dark room; subject the products to proper processing before use - thoroughly rinse in running water, soak, heat treatment by boiling in water, preferably in a secondary broth.

Keywords: food safety, fruit and vegetable products, nitrate content, ionometric method, private farms, retail chain, hazard coefficient, non-carcinogenic health risk

For citation: Aukhadieva E.A., Daukaev R.A., Musabirov D.E., Allayarova G.R., Afonkina S.R., Zelenkovskaya E.E. Estimation of the Nitrate Content in Fruit and Vegetable Products. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2025;(2):133-140. (In Russ.). <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2025-2-133-140>

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

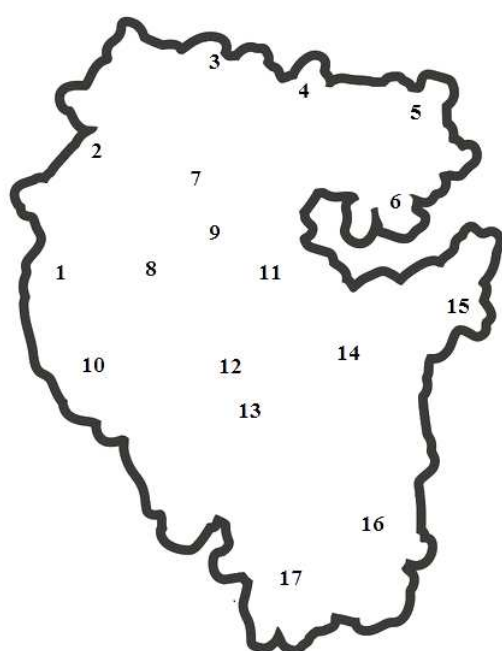
Введение

Важнейшим индикатором безопасности плодоовощной продукции являются нитраты, представляющие собой элементы минерального питания растений. Известно, что нитраты оказывают благотворное влияние на сердечно-сосудистую систему людей, страдающих гипертонией, снижая артериальное давление [1, 2]. Однако воздействие нитратов в больших концентрациях увеличивает риск рака желудка из-за эндогенного образования канцерогенных нитрозаминов, что приводит к общественным опасениям относительно их содержания в рационе [3]. Беспокойство по поводу количества нитратов в рационе обусловлено также существующей связью между ними и метгемоглобинемией у младенцев [4, 5]. Содержание нитратов в продукции может сильно различаться в зависимости от региона, биологических свойств культуры, условий освещения, свойств почвы, влажности, частоты посадки в поле, севооборота, вегетационного периода, сезона сбора урожая, времени обработки и внесения удобрений [6]. Для эффективного повышения урожайности важно соблюдение сроков, количества и техники их внесения [7, 8], что, в свою очередь, предотвращает также избыточную аккумуляцию нитратов.

Цель исследования – проведение мониторинга содержания нитратов в плодоовощной продукции с последующей обработкой информации для оценки риска здоровью и разработка рекомендаций по снижению нитратной нагрузки. Для осуществления цели поставлены следующие задачи: определить содержание нитратов в плодоовощной продукции, выращенной в различных районах Республики Башкортостан, а также реализуемой в торговой сети г. Уфы, в зависимости от сезона; оценить риски возникновения заболеваемости, связанные с воздействием нитратного фактора; подготовить практические рекомендации для снижения содержания нитратов в сельскохозяйственной продукции.

Объекты и методы

Проанализировано 296 образцов плодоовощной продукции. Для выполнения задач в 2022–2023 гг. произведён отбор проб наиболее употребляемой продукции растениеводства, выращенной в 17 районах Республики Башкортостан (рис. 1).



Условные обозначения районов
Республики Башкортостан:

- 1 – Туймазинский; 2 – Илишевский;
- 3 – Татышлинский; 4 – Аскинский;
- 5 – Белокатайский; 6 – Салаватский;
- 7 – Бирский; 8 – Чишминский;
- 9 – Уфимский; 10 – Миякинский;
- 11 – Архангельский;
- 12 – Стерлитамакский;
- 13 – Ишимбайский; 14 – Белорецкий;
- 15 – Учалинский; 16 – Баймакский;
- 17 – Зианчуринский

Рис. 1. Картограмма отбора проб плодоовощной продукции
/ Fig. 1. Scheme of sampling of fruit and vegetable products

Образцы отобраны в момент их биологической зрелости. Половину из каждой точки отбора оставляли на хранение в бумажных пакетах в холодильнике (2–5 °С) на 5 мес., чтобы определить влияние временного фактора на содержание нитратов. Для мониторинга качества в 2022, 2023 гг. были взяты образцы плодоовощной продукции, реализуемой в магазинах розничной торговли.

Концентрация нитратов определена ионометрическим методом согласно МУ 5048-89. Статистическая обработка результатов выполнена с использованием программы SPSS Statistics. Оценка неканцерогенного риска, связанного с пероральным поступлением нитратов с овощеводческой продукцией, соответствует Р 2.1.10.3968-23.

Результаты исследования

Проведен анализ овощей, входящих в состав борщевой набора (свёкла столовая, капуста, морковь, картофель), выращенных в личных подсобных хозяйствах (ЛПХ). Установлено, что уровень нитратов в продукции растениеводства варьирует в широких пределах – от 30 (в картофеле) до 2906 мг/кг (в капусте белокочанной) (табл. 1).

Таблица 1 / Table 1

Содержание нитратов в овощах из ЛПХ
/ Nitrate content in vegetables from private farms

Продукт	Допустимый уровень (не более), мг/кг	Содержание нитратов, мг/кг		
		M±σ	Минимальное значение	Максимальное значение
Картофель	250	83±17	30	313
Морковь	250	111±16	30	253
Свёкла столовая	1400	1014±117	143	2269
Капуста	500	634±198	37	2906

В отдельных пробах максимальное содержание нитратов превышало уровень, установленный техническим регламентом Таможенного союза «О безопасности пищевой продукции» (ТР ТС 021/2011). Содержание нитратов мало зависело от района произрастания картофеля ($F=0,583$ при $p=0,737$), моркови ($F=0,521$ при $p=0,781$), капусты ($F=0,588$ при $p=0,734$). В свёкле содержание исследуемого контаминанта зависело от района возделывания ($F=9,058$ при $p=0,001$). По мнению Г.А. Демиденко [9], проводившей экологический мониторинг содержания нитратов в овощах, культивируемых в Красноярском крае, это может быть связано с использованием высокоурожайных сортов, которые способны к их интенсивному накоплению. Проведенное ранее исследование влияния субстрата на аккумуляцию нитратов показало повышенные значения содержания нитратов во многих овощах при культивировании с применением удобрений по сравнению с контрольной выборкой. В связи с избыточной аккумуляцией нитратов в надземных органах для зеленных и бахчевых культур рекомендуется минимизировать количество вносимых удобрений, а для корнеплодных, луковичных и клубненосных культур при применении минерального азотного удобрения не проводить послепосевную подкормку, ограничившись предпосевным внесением [10]. Наиболее часто уровень исследуемого контаминанта превышал допустимый в капусте белокочанной и свёкле столовой, что авторы объясняют биологическими особенностями данных культур, а также бесконтрольным внесением удобрений.

В уменьшении негативного воздействия нитратов немаловажную роль играет время сбора урожая, а также технология хранения и обработки продуктов. Так, показано, что при приготовлении в СВЧ-печи возрастает содержание нитратов, что, скорее всего, связано с потерей влаги, а у овощей, отваренных в воде, их уровень снижается за счет того, что они выходят в бульон. При недлительном вымачивании в воде из них вымывается часть нитратов [11]. На примере урожая свёклы было установлено, что к концу вегетационного сезона содержание нитратов достоверно снижается [12].

Результаты сравнительного анализа показали, что содержание нитратов значительно отличается в овощах до и после длительного хранения: картофель – $U=68,500$ при $p=0,023$, морковь – $U=4,995$ при $p=0,033$, свёкла – $U=22,000$ при $p=0,0001$, капуста – $U=50,500$ при $p=0,002$ (рис. 2). При длительном хранении в образцах наблюдается снижение содержания нитратов в 1,5–3 раза по сравнению со свежим урожаем. Стоит отметить, что в литературе имеются также сведения по динамике накопления нитратов, где на примере корнеплодов разных сортов моркови показано, что при повышении температуры хранения возрастает концентрация нитрат-ионов [13]. Таким образом, исследованиями подтверждено снижение уровня нитратов в овощной продукции при правильной подготовке и хранении в прохладном темном помещении.

Создана база данных по содержанию нитратов в плодоовощной продукции, реализуемой в торговой сети, в зависимости от сезона года (табл. 2). Сравнительный анализ не показал статистически значимых различий для яблок ($F=0,846$ при $p=0,440$), томатов ($F=2,310$ при $p=0,118$), моркови ($F=1,363$ при $p=0,272$). Содержание нитратов в огурцах ($F=19,694$ при $p=0,0001$), клубнях картофеля ($F=14,316$ при $p=0,0001$), корнеплодах свёклы столовой ($F=12,961$ при $p=0,0001$), кочанах капусты ($F=67,631$ при $p=0,0001$) зависело от сезона и было статистически выше в летне-осенний период. Это подтверждается также анализом данных, проведенным в г. Благовещенске: наибольшее количество загрязненной исследуемым контаминантом овощной продукции поступает на полки магазинов Амурской области от местных производителей в летний и осенний периоды и импортируется из Китая весной, а от осени до весны заметна динамика уменьшения среднего содержания нитратов в анализируемых образцах [4].

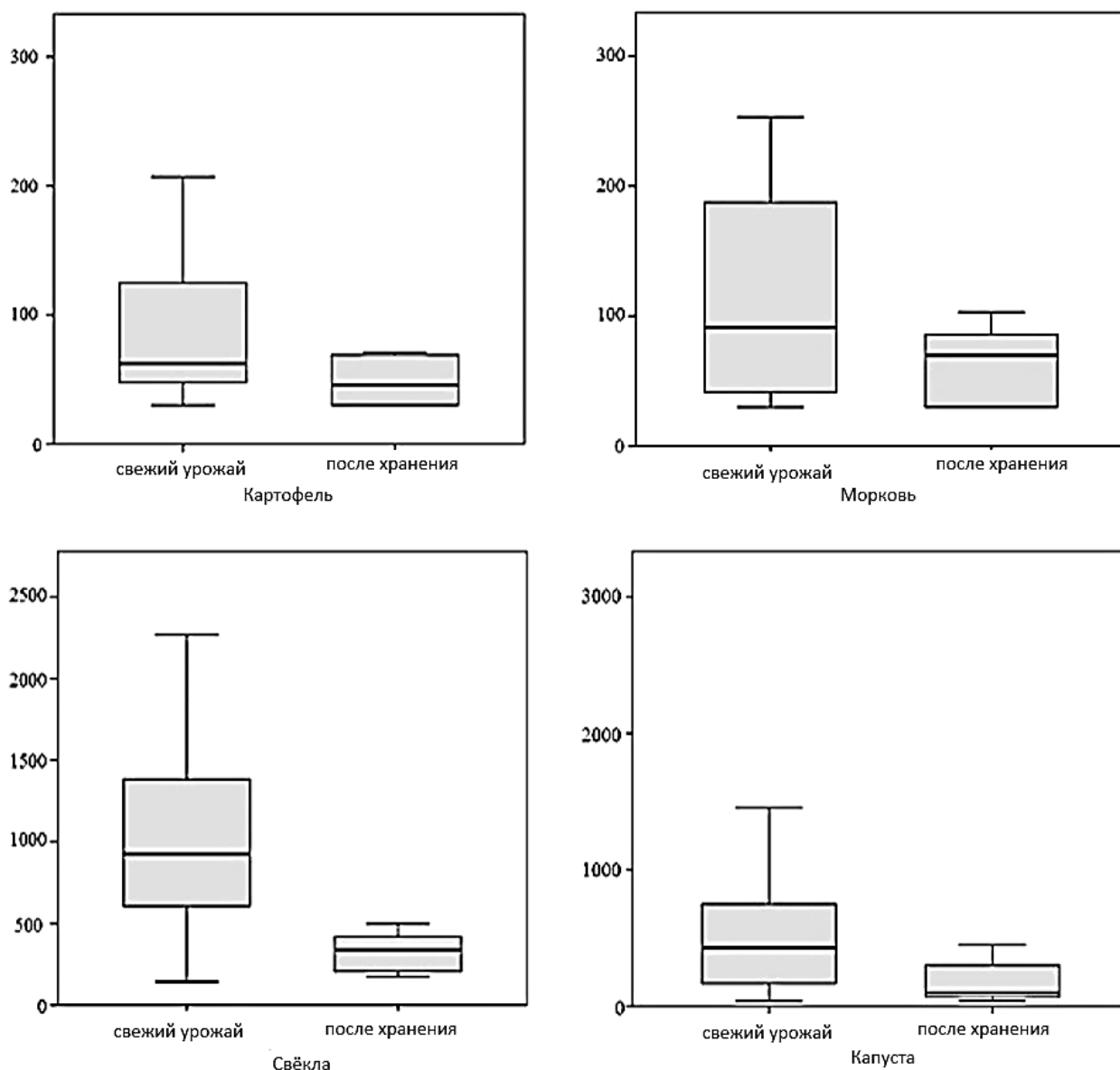


Рис. 2. Содержание нитратов в плодовоовощной продукции (свежий урожай / образцы после хранения), мг/кг / Fig. 2. Nitrate content in fruit and vegetable products (fresh harvest / samples after storage), mg/kg

Таблица 2 / Table 2

Содержание нитратов в плодовоовощной продукции из торговой сети в разные сезоны
 / Nitrate content in fruit and vegetable products from the retail network in different seasons

Продукция	Содержание нитратов, мг/кг						
	Допустимый уровень (не более), мг/кг	Зимний сезон		Весенний сезон		Летне-осенний сезон	
		М±σ	Диапазон	М±σ	Диапазон	М±σ	Диапазон
Яблоко	–	44±5	36–50	42±7	36–60	47±4	36–50
Томат	150	44±10	37–70	40±2	35–43	40±3	35–45
Огурец	150	88±37	49–140	89±31	34–139	141±19	132–146
Морковь	250	84±37	30–120	93±33	49–149	66±44	31–167
Картофель	250	55±14	41–75	54±15	39–78	80±6	71–91
Свёкла	1400	613±340	310–1137	709±172	490–1105	1101±114	906–1204
Капуста	500	181±36	172–203	110±34	98–152	213±42	190–234

Оценка неканцерогенного риска здоровью показала, что при употреблении плодоовощной продукции, выращенной в ЛПХ, уровень риска в летне-осенний сезон настораживающий ($HQ=1,30$), в зимне-весенний сезон – допустимый ($HQ=0,47$). При использовании в пищу борщевых наборов, приобретённых в торговой сети, значение коэффициента опасности во все сезоны можно охарактеризовать как допустимое (приемлемое) ($HQ<1,0$). Исходя из содержания нитратов, наибольший вклад в значение коэффициента опасности вносят капуста и свёкла, что связано с их видовыми особенностями (табл. 3).

Таблица 3 / Table 3

Нормы потребления, суточные дозы поступления и коэффициенты опасности развития неканцерогенных эффектов при употреблении плодоовощной продукции / Consumption standards, daily intake doses and hazard coefficients for the development of non-carcinogenic effects when consuming fruit and vegetable products

Продукция	Норма потребления, кг/день*	Среднесуточная доза, мг/кг			
		Урожай из ЛПХ		Продукция из торговой сети	
		Летне-осенний сезон	Зимне-весенний сезон	Летне-осенний сезон	Зимне-весенний сезон
Картофель	0,247	0,29	0,17	0,28	0,19
Морковь	0,047	0,99	0,31	0,33	0,23
Свёкла	0,049	0,07	0,04	0,04	0,06
Капуста	0,110	0,71	0,23	0,78	0,47
Коэффициент опасности (HQ) борщевых наборов	–	1,30	0,47	0,90	0,59

* – Приказ Министерства здравоохранения № 614 от 19.08.2016 «Об утверждении Рекомендаций по рациональным нормам потребления пищевых продуктов, отвечающих современным требованиям здорового питания».

Заключение

Установлено, что содержание нитратов в пробах плодоовощной продукции из торговой сети сравнительно ниже допустимого уровня, что свидетельствует о соблюдении агропромышленными предприятиями рекомендаций по агрономии и агрохимии и наличии входного контроля качества в магазинах. В растительной продукции, отобранной из ЛПХ, выявлено превышение допустимого уровня в некоторых образцах овощей. Наиболее часто уровень исследуемого контаминанта превышал допустимый в капусте белокочанной и свёкле столовой, что связано с биологическими особенностями данных культур, а также бесконтрольным внесением удобрений. Расчет алиментарной нагрузки нитратами выявил, что при их поступлении в организм в составе урожая из ЛПХ уровень риска в летне-осенний сезон выше допустимого. Для снижения риска развития алиментарно-зависимых заболеваний, связанных с нитратной нагрузкой, рекомендуется создавать оптимальные для конкретной культуры условия увлажнения почвы, минерального питания, соблюдать сроки и количество вносимых удобрений, не осуществлять подкормку растений ближе к сбору урожая; убирать урожай на стадии зрелости; на хранение оставлять неповрежденный урожай в прохладном темном помещении; продукцию перед употреблением подвергать правильной переработке – тщательно промывать в проточной воде, вымачивать, термообработку проводить посредством варки в воде, желательнее во вторичном бульоне.

Список источников

1. Bondonno C.P., Blekkenhorst L.C., Liu A.H., Bondonno N.P., Ward N.C., Croft K.D., Hodgson J.M. Vegetable-derived bioactive nitrate and cardiovascular health // *Molecular Aspects of Medicine*. 2018. Vol. 61. P. 83–91. <https://doi.org/10.1016/j.mam.2017.08.001>

2. Kerley C.P., Dolan E., James P.E., Cormican L. Dietary nitrate lowers ambulatory blood pressure in treated, uncontrolled hypertension: a 7-d, double-blind, randomised, placebo-controlled, cross-over trial // *Br. J. Nutr.* 2018. Vol. 119, iss 6. P. 658–663. <https://doi.org/10.1017/S0007114518000144>
3. Uddin R., Thakur M.U., Uddin M.Z., Islam G.M.R. Study of nitrate levels in fruits and vegetables to assess the potential health risks in Bangladesh // *Scientific Reports.* 2021. Vol. 11. Art. 4704. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-84032-z>
4. Козлова А.Б., Стокоз С.В. Оценка уровня содержания нитратов в овощах, поступающих в торговую сеть города Благовещенска // *Вестн. КрасГАУ.* 2009. № 12. С. 95–100. EDN: KZZQYJ.
5. Kmecl V., Knap T., Žnidarčič D. Evaluation of the nitrate and nitrite content of vegetables commonly grown in Slovenia // *Italian J. of Agronomy.* 2017. Vol. 12, iss. 2. P. 79–84. <https://doi.org/10.4081/ija.2017.801>
6. Глазков С.В., Якубик Д.С., Самойлов А.В. Спектрофотометрический метод определения нитратов в свежих овощах с применением салицилата натрия // *Вестн. КрасГАУ.* 2021. № 11 (176). С. 254–263. EDN: HZATXD. <https://doi.org/10.36718/1819-4036-2021-11-254-263>
7. Матюгин В.А., Безуглова О.С. Влияние гуминовых препаратов на азотное питание озимой пшеницы и уреазную активность чернозема обыкновенного карбонатного // *Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки.* 2023. № 3 (219). С. 106–116. EDN: CLUVGZ. <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2023-3-106-116>
8. 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 (223). С. 81–90. EDN: BEGXWW. <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2024-3-81-90>
9. Демиденко Г.А. Влияние видов обработки на снижение содержания нитратов в свекле // *Вестн. КрасГАУ.* 2017. № 6 (129). С. 110–115. EDN: YTNVSI
10. Aukhadieva E.A., Daukaev R.A., Allayarova G.R., Afonkina S.R., Zelenkovskaya E.E. Influence of the substrate on the accumulation of nitrates by vegetables when cultivated in open ground // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science.* 2022. Vol. 1112. Art. 012073. EDN: JTJJJ. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1112/1/012073>
11. Маркова Е.О., Дьяков М.Ю. Определение нитратов в сырых овощах и продуктах их переработки // *Изв. Саратовского ун-та. Серия: Химия. Биология. Экология.* 2023. Т. 23, № 2. С. 128–137. EDN: IISZJX. <https://doi.org/10.18500/1816-9775-2023-23-2-128-137>
12. Kallio H., Rousku R., Salminen A. Diurnal variations in nitrate content of red beets // *Agricultural and Food Science.* 1984. Vol. 56, № 4. P. 239–243. <https://doi.org/10.23986/afsci.72176>
13. Федюкович М.И., Гордейко В.А., Тиво П.П. Радиация, нитраты и человек. Минск: Ураджай, 1998. 112 с.

References

1. Bondonno C.P., Blekkenhorst L.C., Liu A.H., Bondonno N.P., Ward N.C., Croft K.D., Hodgson J.M. Vegetable-derived bioactive nitrate and cardiovascular health. *Molecular Aspects of Medicine.* 2018;61:83-91. <https://doi.org/10.1016/j.mam.2017.08.001>
2. Kerley C.P., Dolan E., James P.E., Cormican L. Dietary nitrate lowers ambulatory blood pressure in treated, uncontrolled hypertension: a 7-d, double-blind, randomised, placebo-controlled, cross-over trial. *Br. J. Nutr.* 2018;119(6):658-663. <https://doi.org/10.1017/S0007114518000144>
3. Uddin R., Thakur M.U., Uddin M.Z., Islam G.M.R. Study of nitrate levels in fruits and vegetables to assess the potential health risks in Bangladesh. *Scientific Reports.* 2021;11:4704. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-84032-z>
4. Kozlova A.B., Stokoz S.V. Estimation of the nitrate availability level in vegetables coming to the Blagoveshensk town market. *Bulletin of KSAU.* 2009;(12):95-100. (In Russ.). EDN: KZZQYJ.
5. Kmecl V., Knap T., Žnidarčič D. Evaluation of the nitrate and nitrite content of vegetables commonly grown in Slovenia. *Italian J. of Agronomy.* 2017;12(2):79-84. <https://doi.org/10.4081/ija.2017.801>
6. Glazkov S.V., Yakubik D.S., Samoilov A.V. Spectrophotometric method to determine nitrates in fresh vegetables using sodium salicylate reagent. *Bulletin of KSAU.* 2021;(11):254-263. (In Russ.). EDN: HZATXD. <https://doi.org/10.36718/1819-4036-2021-11-254-263>
7. Matjugin V.A., Bezuglova O.S. Effect of humic preparations on winter wheat nitrogen nutrition and calcic chernozem urease activity. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus region. Natural Science.* 2023;(3):106-116. (In Russ.). EDN: CLUVGZ. <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2023-3-106-116>
8. 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.). EDN: BEGXWW. <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2024-3-81-90>

9. Demidenko G.A. The effect of the types of processing on the reducing of nitrates content in beet. *Bulletin of KSAU*. 2017;(6):110-115. (In Russ.). EDN: YTNVSI.

10. Aukhadieva E.A., Daukaev R.A., Allayarova G.R., Afonkina S.R., Zelenkovskaya E.E. Influence of the substrate on the accumulation of nitrates by vegetables when cultivated in open ground. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2022;1112:012073. EDN: JTJJIJ. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1112/1/012073>

11. Markova E.O., Diakov M.Yu. Determination of nitrates in fresh vegetables and their processed products. *Izvestiya of Saratov University. Chemistry. Biology. Ecology*. 2023;23(2):128-137. (In Russ.). EDN: IISZJX. <https://doi.org/10.18500/1816-9775-2023-23-2-128-137>

12. Kallio H., Rousku R., Salminen A. Diurnal variations in nitrate content of red beets. *Agricultural and Food Science*. 1984;56(4):239-243. <https://doi.org/10.23986/afsci.72176>

13. Fedyukovich M.I., Gordeiko V.A., Tivo P.P. *Radiation, nitrates and man*. Minsk: Harvest; 1998. 112 p. (In Russ.).

Информация об авторах

Эльвира Ахатовна Аухадиева – младший научный сотрудник химико-аналитического отдела УфНИИ МТЭЧ.

Рустем Аскарлович Даукаев – кандидат биологических наук, заведующий химико-аналитическим отделом УфНИИ МТЭЧ

Дмитрий Эдуардович Мусабиров – младший научный сотрудник химико-аналитического отдела УфНИИ МТЭЧ.

Гузель Римовна Аллярова – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник химико-аналитического отдела УфНИИ МТЭЧ.

Светлана Разифовна Афонькина – кандидат химических наук, старший научный сотрудник химико-аналитического отдела УфНИИ МТЭЧ.

Евгения Евгеньевна Зеленковская – младший научный сотрудник химико-аналитического отдела УфНИИ МТЭЧ.

Information about the authors

Elvira A. Aukhadieva – Junior Researcher, Chemical Analytical Department, URIOHHE.

Rustem A. Daukaev – Candidate of Science (Biology), Head of Chemical Analytical Department, URIOHHE.

Dmitry E. Musabirov – Junior Researcher, Chemical Analytical Department, URIOHHE.

Guzel R. Allayarova – Candidate of Science (Biology), Senior Researcher, Chemical Analytical Department, URIOHHE.

Svetlana R. Afonkina – Candidate of Science (Chemistry), Senior Researcher, Chemical Analytical Department, URIOHHE.

Evgeniya E. Zelenkovskaya – Junior Researcher, Chemical Analytical Department, URIOHHE.

Статья поступила в редакцию 09.12.2024; одобрена после рецензирования 24.02.2025; принята к публикации 23.04.2025.
The article was submitted 09.12.2024; approved after reviewing 24.02.2025; accepted for publication 23.04.2025.

Научная статья

УДК 581.4:582.572.8(470.47)

<https://doi.org/10.18522/1026-2237-2025-2-141-151>

ПОЛИХРОМНЫЕ ЦЕНОПОПУЛЯЦИИ *TULIPA SUAVEOLENS* ROTH (LILIACEAE): СТРУКТУРА МОРФОЛОГИЧЕСКОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ И ВИТАЛИТЕТНАЯ СТРУКТУРА

Нина Цереновна Лиджиева^{1✉}, Гилян Даниловна Бадмаева², Александра Сергеевна Очирова³

^{1, 2, 3} Калмыцкий государственный университет им. Б.Б. Городовикова, Элиста, Республика Калмыкия, Россия

¹ for-lidjieva@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2668-698X>

² gilyana_badmaeva@mail.ru

³ ochirowa.alex@yandex.ru

Аннотация. Рассматривается структура морфологической изменчивости и виталитетная структура полихромных ценопопуляций *Tulipa suaveolens* Roth (Liliaceae). Три ценопопуляции вида, приуроченные к разным растительным сообществам, были исследованы в 2021, 2022 гг. в период активной вегетации растений. У растений, различавшихся по окраске околоцветника, изучена изменчивость 12 морфологических признаков. Наибольшие значения признаков имели особи с желтым оттенком лепестков венчика. Затем следуют растения с красным, розовым и оранжевым околоцветником. В структуре морфологической изменчивости признаков *T. suaveolens* большая часть исследованных признаков оказалась в группе эколого-биологических системных индикаторов. В полихромных ценопопуляциях *T. suaveolens* при увеличении общего количества осадков происходило возрастание доли морфологических признаков, вошедших в группу биологических системных индикаторов. В полихромной популяции *T. suaveolens*, произраставшей в центральной части Ергенинской возвышенности, наблюдались более высокие значения индекса IVC, что соответствует благоприятным условиям для реализации потенциальных возможностей вида. Климатические условия 2021 г., с большим суммарным объемом осадков в период вегетации вида, способствовали увеличению жизнеспособности ценопопуляций *T. suaveolens*. В ходе исследования полихромных ценопопуляций *T. suaveolens* было установлено, что им характерен тип жизнеспособности «процветающие».

Ключевые слова: *Tulipa suaveolens*, ценопопуляции, структура изменчивости, виталитет

Для цитирования: Лиджиева Н.Ц., Бадмаева Г.Д., Очирова А.С. Полихромные ценопопуляции *Tulipa suaveolens* Roth (Liliaceae): структура морфологической изменчивости и виталитетная структура // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2025. № 2. С. 141–151. <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2025-2-141-151>

Благодарности: исследование выполнено при поддержке гранта РНФ 23-24-10012.

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

Original article

POLYCHROME COENOPULATIONS OF *TULIPA SUAVEOLENS* ROTH (LILIACEAE): STRUCTURE OF MORPHOLOGICAL VARIABILITY AND VITALITY STRUCTURE

Nina Ts. Lidzhieva^{1✉}, Gilyan D. Badmaeva², Alexandra S. Ochirova³

^{1, 2, 3} Gorodovikov Kalmyk State University, Elista, Republic of Kalmykia, Russia

¹ for-lidjieva@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2668-698X>

² gilyana_badmaeva@mail.ru

³ ochirowa.alex@yandex.ru

© Лиджиева Н.Ц., Бадмаева Г.Д., Очирова А.С., 2025

Abstract. The paper considers the structure of morphological variability and vitality structure of polychrome coenopopulations of *Tulipa suaveolens* Roth (Liliaceae). Three coenopopulations of the species, confined to different plant communities, were studied in 2021 and 2022 during the period of active plant vegetation. The variability of 12 morphological traits was studied in plants that differed in perianth color. Individuals with a yellow tint of corolla petals had the highest trait values. They are followed by plants with red, pink and orange perianth. In the structure of morphological variability of *T. suaveolens* traits, most of the studied traits turned out to be in the group of ecological and biological systemic indicators. In polychrome coenopopulations of *T. suaveolens*, with an increase in the total amount of precipitation, the proportion of morphological traits included in the group of biological systemic indicators increased. In the polychrome population of *T. suaveolens*, growing in the central part of the Yergeni Upland, higher values of the IVC index were observed, which corresponds to favorable conditions for the realization of the potential of the species. The climatic conditions of 2021, with a large total amount of precipitation during the growing season of the species, contributed to an increase in the vitality of *T. suaveolens* coenopopulations. During the study of polychrome coenopopulations of *T. suaveolens*, it was found that they are characterized by the type of vitality “flourishing”.

Keywords: *Tulipa suaveolens*, coenopopulations, variability structure, vitality

For citation: Lidzhieva N.Ts., Badmaeva G.D., Ochirova A.S. Polychrome Coenopopulations of *Tulipa suaveolens* Roth (Liliaceae): Structure of Morphological Variability and Vitality Structure. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2025;(2):141-151. (In Russ.). <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2025-2-141-151>

Acknowledgements: the study was supported by the Russian Science Foundation grant 23-24-10012.

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

Введение

В условиях Калмыкии встречаются два варианта ценопопуляций (ЦП) *Tulipa suaveolens* Roth в отношении окраски околоцветника – монохромные и полихромные. На полихромность вида *T. suaveolens* указывали в своих работах многие исследователи [1–3].

В [4] описаны географические тренды в характере распространения форм, различающихся по окрасам цветков данного вида в европейской части его ареала. Само явление полихромности у *T. suaveolens*, по мнению ряда исследователей, – результат влияния абиотических факторов среды, на фоне которых таким образом проявляется действие естественного отбора. В отдельных случаях явление однозначно обусловлено географической изоляцией популяции, генетическим дрейфом и генетическими процессами, происходящими при этом [5].

Комплексное исследование биологии и экологии *T. suaveolens*, проводимое в Республике Калмыкии, обусловлено его охранным статусом [6–9]. В данной работе остановимся на таких популяционных характеристиках, как структура морфологической изменчивости и виталитетная структура его полихромных ЦП.

Материал и методы

В ходе исследования, проведенного в вегетационные периоды (2021, 2022 гг.), рассмотрены три полихромные ЦП *T. suaveolens*.

Растительные сообщества, к которым приурочены ЦП, описаны на основе доминантного подхода [10]. Они локализованы в разных частях Ергенинской возвышенности и приведены в [11].

Наряду с типичным красным окрасом листочков околоцветника визуально выделялись также желтый, розовый с вариантами оттенков от бледно-розового до лилового, оранжевый и белый. Бихромные околоцветники относили к одному из морфотипов на основе преобладающего цвета. Морфологические исследования растений включают в себя прижизненный учет и последующую статистическую обработку 12 морфологических признаков особей среднегенеративного возрастного состояния [12]. Для сравнительного анализа изменчивости признаков растений, различающихся по окраске цветков, случайным образом отбирали по 30 растений каждого морфологического типа, исключая белоцветковые в связи с низкой частотой их встречаемости. Для изучения структуры морфологической изменчивости популяций использовали случайную выборку расте-

ний каждого морфологического типа, полученную при учете частоты встречаемости растений разных морфологических типов, включая белоцветковые формы. Кроме того, массив данных за весь период исследования по трем полихромным ЦП был использован для выявления особенностей структуры морфологической изменчивости вида.

Для оценки ряда популяционных характеристик в наиболее типичных местах сообщества закладывали трансекты, включающие 10 последовательно расположенных участков размером $1,0 \times 1,0$ м². Для выявления характера взаимосвязи между признаками в каждой из трёх ЦП случайным образом отбирали по 30 растений с определённым окрасом околоцветника. Полученные данные по 12 признакам суммировались. Был проведен корреляционный анализ в пределах группы растений с данным окрасом околоцветника.

Для характеристики жизненности ЦП использована методика Ю.А. Злобина [13]. Жизненность отдельных индивидуумов характеризовали индексом виталитета (IVI) [14]. Его вычисление предваряли корреляционным анализом 12 морфологических признаков для последующего выявления ключевых признаков [15]. Взаимосвязь между признаками определяли с помощью коэффициента корреляции Пирсона. Уровень взаимосвязи между парами признаков оценивали по шкале Р.Э. Чеддока [15, 16].

Жизненность ЦП характеризовали индексом виталитета ЦП (IVC) [14]. Классификацию ЦП в отношении жизненности проводили с использованием критерия Q [12] и индекса I_Q [14, 17].

Характеристику погодных условий в два года исследования проводили по данным архивов погоды метеостанции пос. Малые Дербеты (для ценопопуляций 1 и 2) и Элисты (для ценопопуляции 3) [18].

Результаты и обсуждение

Растения из трех исследованных ЦП *T. suaveolens* имели следующие средние популяционные значения признаков: высота – 118,8–224,6 мм, длина нижнего междоузлия – 17,6–23,1 мм, длина второго междоузлия – 21,6–33,7 мм, длина стрелки цветка – 44,0–115,9 мм, длина листочка венчика – 27,2–49,3 мм, ширина листочка венчика – 14,6–23,7 мм, длина нижнего листа – 88,2–130,1 мм, ширина нижнего листа – 19,2–26,9 мм, длина среднего листа – 79,7–118,4 мм, ширина среднего листа – 10,9–18,6 мм, длина верхнего листа – 54,8–73,9 мм, ширина верхнего листа – 7,7–12,5 мм.

Значения изученных 12 морфологических признаков для форм, различающихся по окраске листочков околоцветника, графически приведены на примере ЦП 1 *T. suaveolens* (рис. 1).

Характеристике виталитета особей, образующих исследуемые полихромные ЦП *T. suaveolens*, предшествовало проведение корреляционного анализа для определения ключевых признаков. В их число в оба года исследования отнесли 4 признака: высоту растений, ширину листочков околоцветника, длину среднего листа, длину верхнего листа. В 2021 г. к ним была также причислена длина листочков околоцветника, а в следующий год – длина второго междоузлия и нижнего листа.

Виталитетные спектры полихромных ЦП *T. suaveolens*, построенные на основе ранжированных рядов индексов жизненности индивидуумов, показывают наличие в них особей всех трех виталитетных типов (а – высокий, б – средний, с – низкий) (рис. 2). Доля средних по жизненности особей во всех исследованных ЦП преобладала и составляла в 2021 г. от 60,6 до 68,6 %, в 2022 г. – от 65,2 до 70,6 %.

Сравнительный анализ изменчивости морфологических признаков у *T. suaveolens* выявил, что в трех исследованных ЦП растения с желтым оттенком венчика имели большие значения морфологических параметров по сравнению с другими морфотипами в отношении окраски околоцветника. ЦП 1 – различия по длине среднего листа по сравнению с красноцветковыми формами – 15,2 мм ($t_{\text{diff}} = 3,00$ при $p < 0,05$), розовоцветковыми – 18,7 мм ($t_{\text{diff}} = 3,00$ при $p < 0,05$), оранжевоцветковыми – 15,6 мм ($t_{\text{diff}} = 3,09$ при $p < 0,05$) в 2022 г.; по длине нижнего листа – по сравнению с красноцветковыми формами – 9,4 мм ($t_{\text{diff}} = 2,40$ при $p < 0,05$) в 2021 г. и с оранжевоцветковыми формами – 14,5 ($t_{\text{diff}} = 2,89$ при $p < 0,05$) в 2022 г.

В ЦП 2 в период исследования по большинству признаков отмечали значимые различия между желтоцветковыми растениями и другими морфотипами. В ходе исследования обнаружено, что у растений с красным оттенком венчиков длина цветочной стрелки на 30,5 мм больше ($t_{\text{diff}} = 2,89$ при $p < 0,05$), чем у растений с оранжевым оттенком венчиков.

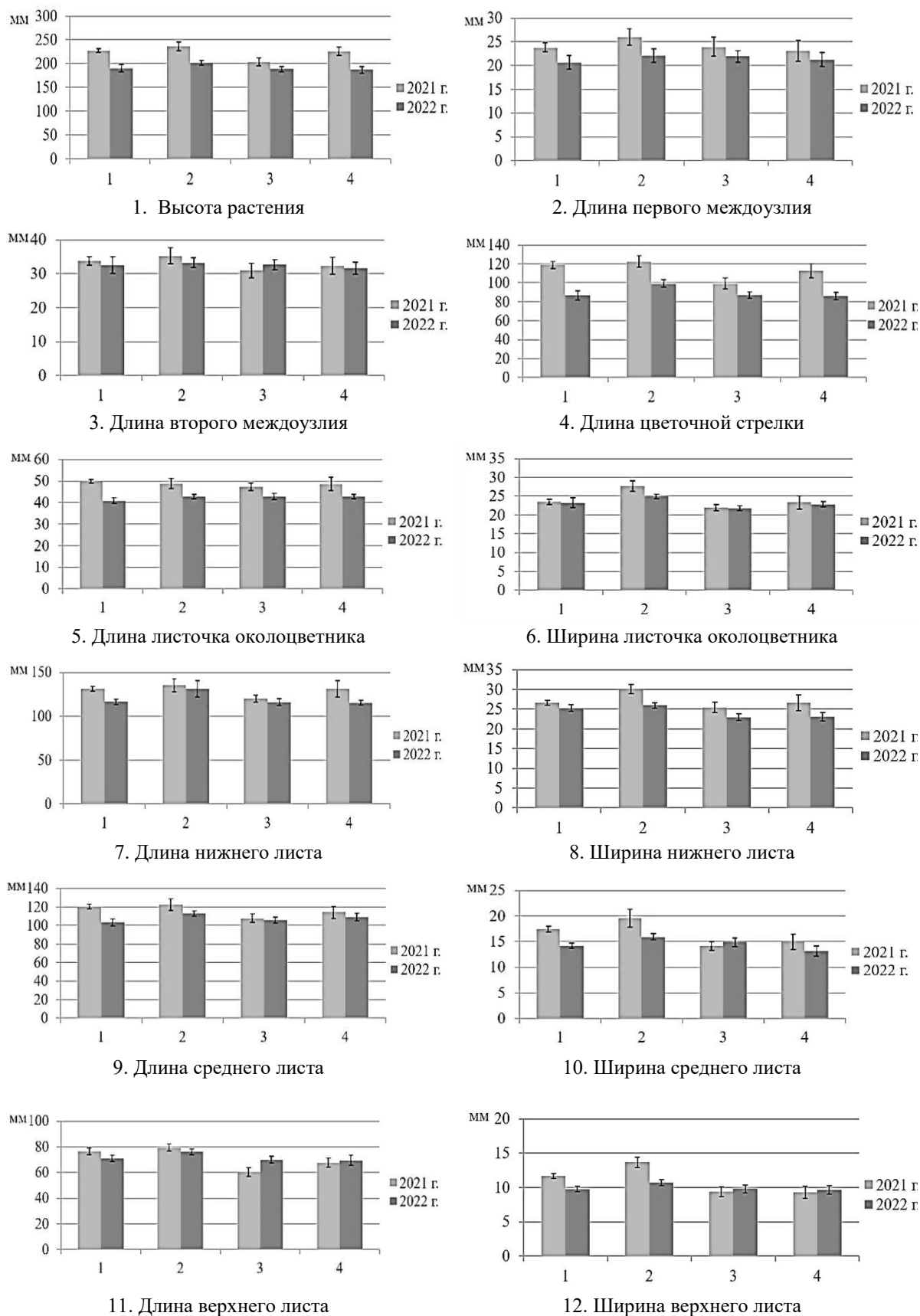


Рис. 1. Значения морфологических признаков у растений, различающихся по окраске листочков околоцветника: 1 – красная; 2 – желтая; 3 – розовая; 4 – оранжевая / Fig. 1. The values of morphological features in plants differing in the color of the perianth leaflets: 1 - red; 2 - yellow; 3 - pink; 4 - orange

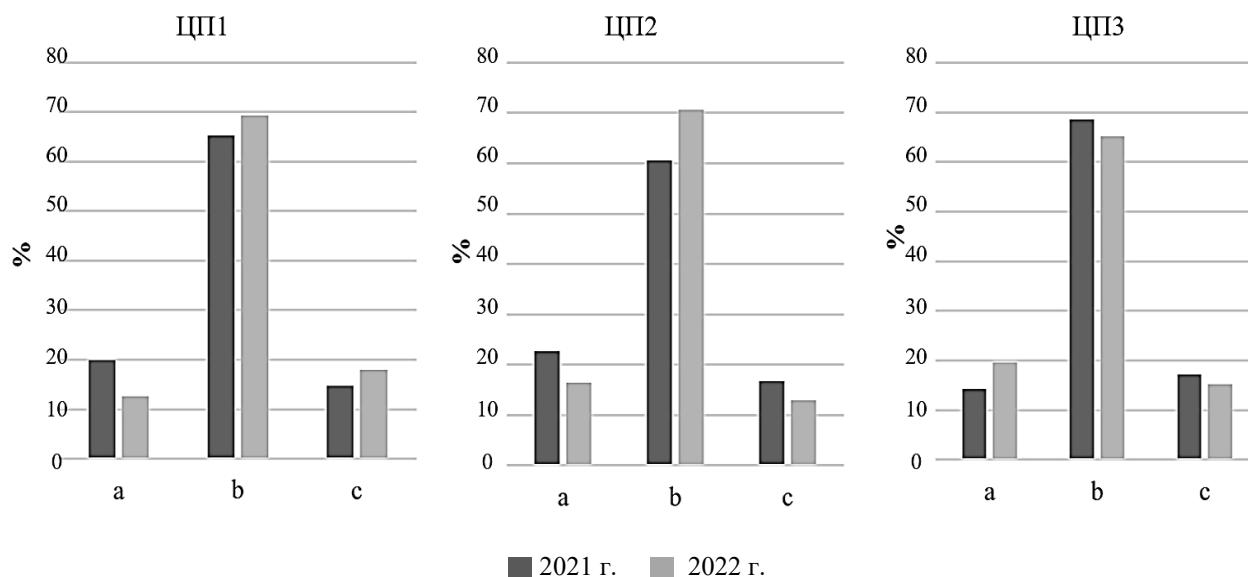


Рис. 2. Виталитетные спектры полихромных ЦП *Tulipa suaveolens*: а – высокий; б – средний; с – низкий / Fig. 2. Vitality spectra of polychrome cenopopulations of *Tulipa suaveolens*: a – high; b – average; c - low

В ЦП 3 в оба года исследования больше половины из 12 изученных признаков обнаружили значимые различия при сравнении между собой желтоцветковых и розовоцветковых. У красноцветковых растений по сравнению с желтоцветковыми были существенно уже в наиболее широкой части нижние листья – на 3,5 мм ($t_{diff} = 2,52$ при $p < 0,05$).

Различные морфотипы, расположенные в порядке уменьшения значений морфологических признаков, образовали следующий ряд: желтоцветковые → красноцветковые → розовоцветковые или оранжевоцветковые. Данное наблюдение коррелирует с тем, что желтые оттенки листочков обусловлены наличием каротиноидов, в то время как остальные рассмотренные оттенки – пигментов из группы антоцианов [19, 20].

Период активной вегетации растений *T. suaveolens* приходится на два весенних месяца – март и апрель. Средняя температура этих месяцев в годы исследования несколько выше – на 0,30–0,75 °С, в то время как суммарный объем осадков за эти месяцы в 2021 г. был на 66,9–107,0 мм больше (табл. 1). С такой динамикой осадков в весенний период скоррелирована динамика морфологических признаков. Все исследованные морфологические признаки растения *T. suaveolens* в 2021 г. имели большие значения, чем в 2022 г. (рис. 1). Исключение составляет ширина листовой пластинки, поскольку иногда удлинение листовой пластинки сопровождается её сужением.

Таблица 1 / Table 1

Средняя температура воздуха и сумма выпавших осадков (март и апрель) в местах произрастания ЦП *T. suaveolens* / The average air temperature and the amount of precipitation in March and April in the growing areas of *T. suaveolens* CP

Ближайшая метеостанция	Цено-популяция	Температура, °С		Сумма осадков, мм	
		2021 г.	2022 г.	2021 г.	2022 г.
Малые Дербеты	1, 2	5,95	6,7	121,6	14,6
Элиста	3	5,75	6,05	105,1	38,2

В структуре морфологической изменчивости *T. suaveolens* весной 2021 г. исследованные 12 морфологических показателей были отнесены к трем группам системных индикаторов [14]. Группа экологических системных индикаторов включила только один показатель – длину нижнего междоузлия (рис 3а, I), II группа индикаторов (рис 3а, II) – половину изученных показателей.

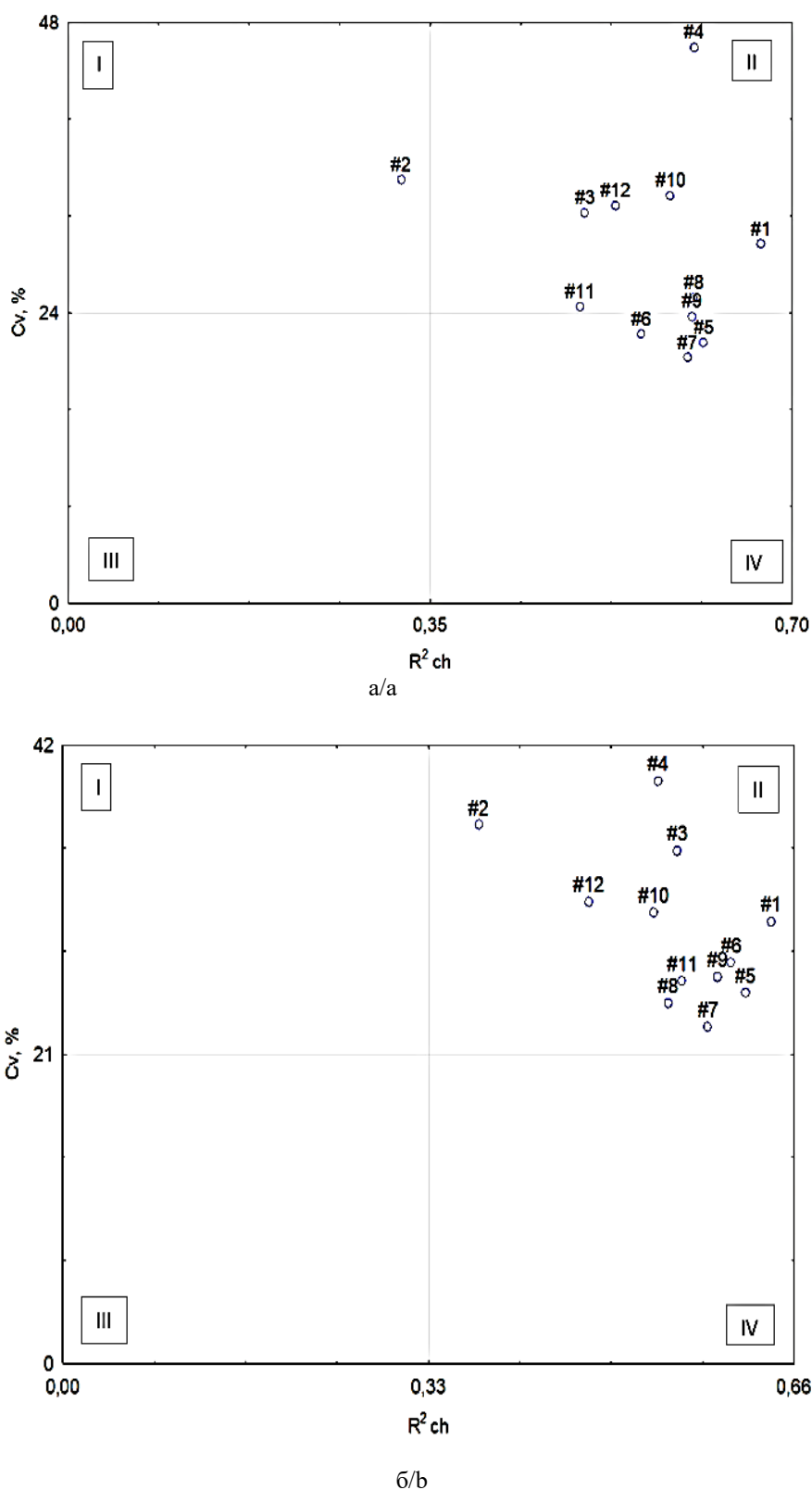


Рис. 3. Морфологические признаки особей *Tulipa suaveolens* в структуре морфологической изменчивости в 2021 (а) и 2022 гг. (б): по оси абсцисс – R²ch – согласованная вариативность признаков, по оси ординат – Cv – общая вариативность, 1–12 – морфологические параметры (см. рис. 1) / Fig. 3. Morphological features of *Tulipa suaveolens* individuals in the structure of morphological variability in 2021 (a) and 2022 (b): on the abscissa axis - R²ch - consistent variability of features, on the ordinate axis - Cv - general variability, 1-12 - morphological parameters (see Fig. 1)

Два признака (длина среднего и верхнего листа) имели промежуточное между I и II группами системных индикаторов расположение. Принадлежность к III группе индикаторов показана для двух параметров листочка околоцветника и длины нижнего листа.

В группу эколого-биологических системных индикаторов при исследовании видовых популяций *T. suaveolens* в климатических условиях 2022 г. попали все изученные морфологические параметры (рис 3б, II).

В благоприятных условиях произрастания, по-видимому, максимально реализуется наследственный потенциал особей, поэтому значения признаков приближаются к предельным, определяемым нормой реакции их генотипов, характерных данному биологическому виду. Полученные результаты показывают, что популяция как целостная биологическая система специфическим образом реагирует на абиотические условия, складывающиеся в период роста и развития растений. В 2022 г., когда в период вегетации растений *T. suaveolens* отмечали очень низкое значение суммарного объема осадков, все 12 признаков оказались во второй группе системных индикаторов.

Реакцию популяций на абиотические условия года подтвердили также данные анализа структуры модификационной изменчивости исследуемых полихромных популяций в 2022 г. в каждой по отдельности.

В 2022 г. в ЦП 1 большая часть морфологических признаков вошла во II группу системных индикаторов, в пограничном положении между II и III группами оказались 2 параметра – длина листочка околоцветника и длина нижнего листа, в то время как длина первого междоузлия, как это обычно наблюдалось, попала в I группу (рис. 4а). В ЦП 2 по мере продвижения по Ергенинской возвышенности, но в пределах ее северной части количество признаков во второй группе системных индикаторов сохранилось, а один из признаков (длина листочка околоцветника) перешел в группу биологических системных индикаторов (рис. 4б). В ЦП 3, расположенной в центральной части Ергени, где суммарный объем осадков (март-апрель) был немного больше, признаки распределились по трем группам системных индикаторов: в I продолжала оставаться длина первого междоузлия, промежуточное положение между II и III группами фиксировали для высоты растения и ширины листочка околоцветника, в III объединились длины листочка околоцветника, нижнего и среднего листа, во II группу индикаторов – остальные 6 признаков (рис. 4в).

Показатели виталитетной структуры исследованных полихромных ЦП *T. suaveolens* представлены в табл. 2. Жизненность ЦП, оцененная с помощью индекса IVC, по мере продвижения с северной части Ергенинской возвышенности к ее центральной части имела тенденцию к возрастанию: в 2021 г. – от 0,920 до 1,230, в 2022 г. – от 0,881 до 1,201. Неблагоприятными условиями влагообеспеченности в период активной вегетации растений можно объяснить понижение жизненности в ЦП во второй год исследования по сравнению с первым.

Таблица 2 / Table 2

Характеристики жизненности полихромных ЦП *Tulipa suaveolens* и их виталитетный тип / Characteristics of the vitality of polychrome coenopopulations of *Tulipa suaveolens* and their vital type

ЦП	Год	Частость по классам виталитета [13]			IVC	Q	I _Q	Виталитетный тип
		a	b	c				
1	2021	0,200	0,653	0,147	0,920	0,427	2,901	Процветающие
	2022	0,126	0,685	0,189	0,881	0,437	3,468	
2	2021	0,227	0,606	0,167	0,956	0,417	2,494	Процветающие
	2022	0,165	0,706	0,129	0,825	0,436	3,376	
3	2021	0,143	0,686	0,171	1,230	0,415	2,424	Процветающие
	2022	0,196	0,652	0,152	1,201	0,424	2,789	

Значения критерия Q в ЦП в 2021 и 2022 гг. изменялись от 0,415 до 0,436, что больше уровня частоты индивидуумов с наиболее низкой жизненностью. Это было основанием, чтобы определить видовые популяции *T. suaveolens* в виталитетный тип «процветающие». Степень процветания популяций, оцененная критерием I_Q, в последний год исследований заметно больше.

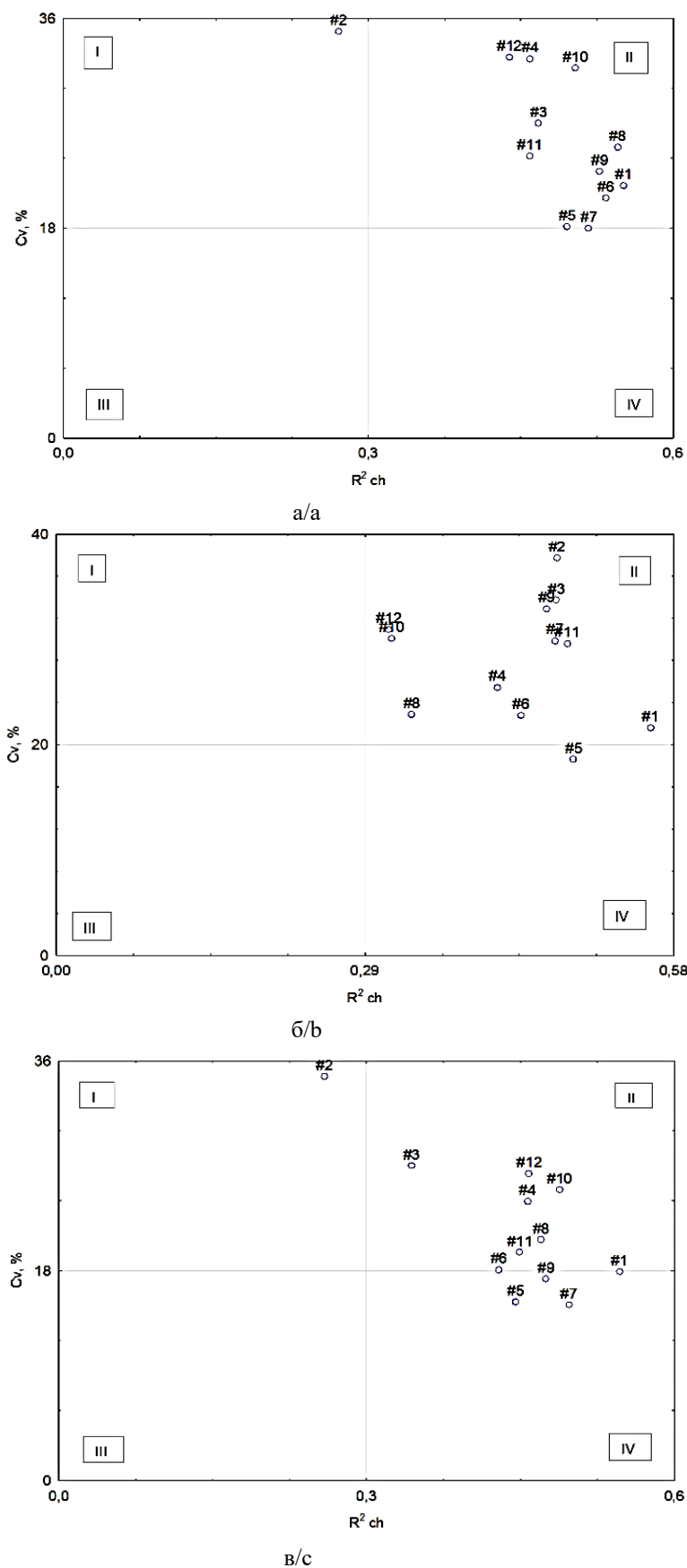


Рис. 4. Морфологические признаки особей в структуре морфологической изменчивости в разных ЦП *Tulipa suaveolens* в 2022 г.: а – ЦП 1; б – ЦП 2; в – ЦП 3 / Fig. 4. Morphological features of individuals in the structure of morphological variability in different CPs of *Tulipa suaveolens* in 2022: а – CP 1; б – CP 2; в – CP 3

Заключение

У растений *T. suaveolens* с красным, желтым, розовым и оранжевым оттенком венчиков в ЦП 1–3 на Ергенинской возвышенности подтвердились результаты, полученные нами ранее в островной ценопопуляции [5]. Упорядочение исследованных видовых популяций по уменьшению значений морфологических признаков приводит к следующей последовательности: желтоцветковые → красноцветковые → розовоцветковые или оранжевоцветковые.

В структуре морфологической изменчивости признаков *T. suaveolens* все 12 входили в группы экологических, биологических и эколого-биологических системных индикаторов, к последнему из которых относилось наибольшее количество исследованных. Выявлено, что в ЦП при улучшении условий произрастания увеличивается число признаков, относящихся к группе биологических системных индикаторов.

В полихромной популяции *T. suaveolens*, которая произрастала в центральной части Ергенинской возвышенности, наблюдали более высокие значения индекса IVC. Это свидетельствует о том, что здесь у вида более благоприятные условия для реализации потенциальных возможностей. Условия 2021 г., с большим суммарным объемом осадков в период вегетации вида, способствовали увеличению жизнеспособности ЦП *T. suaveolens*. Исследованные полихромные ЦП *T. suaveolens* относились к виталитетному типу «процветающие».

Список источников

1. Бочанцева З.П. Тюльпаны. Морфология, цитология и биология. Ташкент: АН УзССР, 1962. 406 с.
2. Everett D. The Genus Tulipa. Tulips of the World. Kew: Kew Publishing, Royal Botanic Gardens, 2013. 380 p.
3. Kritskaya T.A., Kashin A.S., Petrova N.A., Leweke M. ISSR analysis of *Tulipa suaveolens* (Liliaceae) populations from throughout the European part of the species range reveal genetic patterns shaped by Pleistocene transgressions of the Caspian Sea // Nordic J. of Botany. 2021. Vol. 39, № 9. Art. NJB12575. EDN: RTNEMZ. <https://doi.org/10.1111/njb.02967>
4. Кашин А.С., Крицкая Т.А., Кондратьева А.О., Петрова Н.А., Шилова И.В., Пархоменко А.С., Муртазалиев Р.А. Географические особенности распределения растений *Tulipa suaveolens* Roth (Liliaceae, Magnoliophyta) по окраске цветка в европейской части ареала // Поволжский экол. журн. 2022. № 2. С. 150–172. EDN: WDYQOL. <https://doi.org/10.35885/1684-7318-2022-2-150-172>
5. Лью Т.Н., Лиджиева Н.Ц., Лиджигорьева Ц.В. Зависимость изменчивости морфологических признаков растений от окраски околоцветника в ценопопуляции *Tulipa gesneriana* // Науч. мысль Кавказа. 2015. № 4. С. 119–123. EDN: VJPACH. <https://doi.org/10.18522/2072-0181-2015-84-4-119-123>
6. Красная книга Республики Калмыкия. Т. 2: Редкие и находящиеся под угрозой исчезновения растения и грибы. Элиста: Джангар, 2014. 199 с.
7. Красная книга Краснодарского края. Растения и грибы. Краснодар: Администрация Краснодарского края, 2017. 850 с.
8. Красная книга Ставропольского края. Т. I: Растения. Ставрополь: Министерство природных ресурсов и охраны окружающей среды Ставропольского края, 2013. 399 с.
9. Об утверждении Перечня объектов растительного мира, занесенных в Красную книгу Российской Федерации: приказ Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации от 23.05.2023 № 320. URL: <http://publication.pravo.gov.ru/document/0001202307210008?ysclid=m87tjrwyfy369289822> (дата обращения: 11.08.2024).
10. Александрова В.Д. Классификация растительности: обзор принципов классификации и классификационных систем в разных геоботанических школах. Л.: Наука, 1969. 275 с.
11. Лиджиева Н.Ц., Онкорова Н.Т., Бадмаева Г.Д., Мачкаева Е.М. Взаимосвязь морфологических признаков растений в полихромных популяциях *Tulipa suaveolens* Roth (Liliaceae) // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2025. № 1. С. 119–125. EDN: MQHZMB. <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2025-1-119-125>
12. Ценопопуляции растений (основные понятия и структура) / отв. ред. А.А. Уранов, Т.И. Серебрякова. М.: Наука, 1976. 217 с.
13. Злобин Ю.А. Принципы и методы изучения ценологических популяций растений. Казань: Изд-во Казанского ун-та, 1989. 146 с.

14. Ишбирдин А.Р., Ишмуратова М.М. К оценке виталитета ценопопуляций *Rhodiola iremelica* Boriss. по размерному спектру // Фундаментальные и прикладные проблемы популяционной биологии: материалы VI Всерос. популяц. семинара. Н. Тагил: Нижнетагильский гос. соц.-пед. ин-т, 2004. С. 80–85. EDN: SNFXNR.

15. Терентьев П.В., Ростова Н.С. Практикум по биометрии. Ленинград: Изд-во Ленинградского ун-та, 1977. 152 с.

16. Chaddock R.E. Principles and methods of statistics. Boston: Houghton Mifflin, 1925. 471 p.

17. Ишбирдин А.Р., Кливаденко Е.В., Ишмуратова М.М. Адаптивный морфогенез *Solanum tuberosum* // Изв. Самарского науч. центра Российской академии наук. 2011. Т. 13, № 5 (2). С. 76–78. EDN: PWMNAH.

18. Расписание погоды. URL: <https://rp5.ru/> (дата обращения: 22.07.2024).

19. Yuan Y., Ma X., Shi Y., Tang D. Isolation and expression analysis of six putative structural genes involved in anthocyanin biosynthesis in *Tulipa fosteriana* // Scientia Horticulturae. 2013. Vol. 153. P. 93–102. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2013.02.008>

20. Torskangerpoll K., Nørbæk R., Nodland E., Øvstedal D.O., Andersen Ø.M. Anthocyanin content of *Tulipa* species and cultivars and its impact on tepal colours // Biochemical Systematics and Ecology. 2005. Vol. 33, iss. 5. P. 499–510. <https://doi.org/10.1016/j.bse.2004.12.001>

References

1. Bochantseva Z. P. *Tulips. Morphology, cytology and biology*. Tashkent: Academy of Sciences of the Uzbek SSR; 1962. 406 p. (in Russ.).

2. Everett D. *The Genus Tulipa. Tulips of the World*. Kew: Kew Publishing, Royal Botanic Gardens; 2013. 380 p.

3. Kritskaya T. A., Kashin A. S., Petrova N. A., Leweke M. ISSR analysis of *Tulipa suaveolens* (Liliaceae) populations from throughout the European part of the species range reveal genetic patterns shaped by Pleistocene transgressions of the Caspian Sea. *Nordic J. of Botany*. 2021;39(9):NJB12575. EDN: RTNEMZ. <https://doi.org/10.1111/njb.02967>

4. Kashin A. S., Kritskaya T. A., Kondratieva A. O., Petrova N. A., Shilova I. V., Parkhomenko A. S., Murtagaliev R. A. Geographical features of the distribution of *Tulipa suaveolens* Roth (Liliaceae, Magnoliophyta) plants by flower color in the European part of the range. *Volga J. of Ecology*. 2022;(2):150-172. (In Russ.). EDN: WDYQOL. <https://doi.org/10.35885/1684-7318-2022-2-150-172>

5. Lyu T.N., Lidzhiyeva N.C., Lidzhiyoryaeva C.V. Dependence of the variability of morphological characteristics of plants on the color of the perianth in the cenopopulation of *Tulipa gesneriana*. *Scientific Thought of the Caucasus*. 2015;(4):119-123. (In Russ.). EDN: VJPACH. <https://doi.org/10.18522/2072-0181-2015-84-4-119-123>

6. *The Red Book of the Republic of Kalmykia. Vol. 2. Rare and endangered plants and fungi*. Elista: Dzhangar; 2014. 199 p. (In Russ.).

7. *The Red Book of the Krasnodar Territory. Plants and fungi*. Krasnodar: Administration of the Krasnodar Territory; 2017. 850 p. (In Russ.).

8. *The Red Book of the Stavropol Territory. Vol. I. Plants*. Stavropol: Ministry of Natural Resources and Environmental Protection of the Stavropol Territory; 2013. 399 p. (In Russ.).

9. *On Approval of the List of flora listed in the Red Book of the Russian Federation*: Order of the Ministry of Natural Resources and Ecology of the Russian Federation at 23rd May 2023 No. 320. Available from: <http://publication.pravo.gov.ru/document/0001202307210008?ysclid=m87tjrwyfy369289822> [Accessed 11th August 2024]. (In Russ.).

10. Alexandrova V.D. *Vegetation classification: an overview of the principles of classification and classification systems in different geobotanical schools*. Leningrad: Science; 1969. 275 p. (In Russ.).

11. Lidzhiyeva N.Ts., Onkorova N.T., Badmaeva G.D., Machkaeva E.M. Interrelations of morphological traits of plants in polychrome populations of *Tulipa suaveolens* L. (Liliaceae). *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science*. (In Russ.). 2025;(1):119-125. <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2025-1-119-125>

12. Uranov A.A., Serebryakova T.I., eds. *Coenopopulations of plants (basic concepts and structure)*. Moscow: Science; 1976. 217 p. (In Russ.).

13. Zlobin Yu. A. *Principles and methods of studying cenotic plant populations*. Kazan: Kazan University Press; 1989. 146 p. (In Russ.).

14. Ishbirdin A. R., Ishmuratova M. M. To assess the vitality of the cenopopulations of *Rhodiola iremelica* Boriss. according to the dimensional spectrum. *Fundamental and applied problems of population biology*. Proceedings of the 7th All-Russian population seminar. Nizhny Tagil: Nizhny Tagil State Social Pedagogical Institute; 2004:80-85. (In Russ.). EDN: SNFXNR.

15. Terentyev P. V., Rostova N.S. *A workshop on biometrics*. Leningrad: Publishing House of the Leningrad University; 1977. 152 p. (In Russ.).

16. Chaddock R.E. *Principles and methods of statistics*. Boston: Houghton Houghton Mifflin; 1925. 471 p.

17. Ishbirdin A. R., Klivadenko E. V. Ishmuratova M. M. Adaptive morphogenesis of *Solanum tuberosum*. *Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2011;13(5):76-78. (In Russ.). EDN: PWMNAH.

18. *The weather schedule*. Available from: <https://rp5.ru> [Accessed 22nd July 2024]. (In Russ.).

19. Yuan Y., Ma X., Shi Y., Tang D. Isolation and expression analysis of six putative structural genes involved in anthocyanin biosynthesis in *Tulipa fosteriana*. *Scientia Horticulturae*. 2013;153:93-102. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2013.02.008>

20. Torskangerpoll K., Nørbæk R., Nodland E., Øvstedal D. O., Andersen Ø. M. Anthocyanin content of *Tulipa* species and cultivars and its impact on tepal colours. *Biochemical Systematics and Ecology*. 2005;33(5):499- 510. <https://doi.org/10.1016/j.bse.2004.12.001>

Информация об авторах

Н.Ц. Лиджиева – доктор биологических наук, профессор кафедры биологии и экологии медицинского факультета КалмГУ.

Г.Д. Бадмаева – аспирант кафедры биологии и экологии медицинского факультета КалмГУ.

А.С. Очирова – ассистент кафедры биологии и экологии медицинского факультета КалмГУ.

Information about the authors

N.Ts. Lidzhieva – Doctor of Science (Biology), Professor, Department of Biology and Ecology, Faculty of Medicine, GKSU.

G.D. Badmaeva – Postgraduate Student, Department of Biology and Ecology, Faculty of Medicine, GKSU.

A.S. Ochirova – Assistant, Department of Biology and Ecology, Faculty of Medicine, GKSU.

Статья поступила в редакцию 12.12.2024; одобрена после рецензирования 24.03.2025; принята к публикации 23.04.2025.

The article was submitted 12.12.2024; approved after reviewing 24.03.2025; accepted for publication 23.04.2025.

Научная статья

УДК 579.266

<https://doi.org/10.18522/1026-2237-2025-2-152-167>

ВКЛАД МИКРООРГАНИЗМОВ В УГЛЕРОДНЫЙ БАЛАНС: ЭМИССИЯ И СЕКВЕСТРАЦИЯ CO₂ ПОЧВ

Марина Леонидовна Сидоренко¹, **Ольга Владимировна Нестерова²**

¹Федеральный научный центр биоразнообразия наземной биоты Восточной Азии ДВО РАН, Владивосток, Россия

²Дальневосточный федеральный университет, Владивосток, Россия

¹sidorenko@biosoil.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4035-8395>

²nesterova.ov@dvfu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3463-0962>

Аннотация. Разнообразие метаболических путей, по которым организмы перерабатывают органические вещества в разных условиях, отражает удивительную адаптивность живых существ и их способность к активной жизнедеятельности в различных экологических нишах. Ключевые аспекты этих процессов заключаются в аэробных и анаэробных способах расщепления исходных веществ. Обобщена роль микроорганизмов в почвенном газообмене, связанном с диоксидом углерода. Рассмотрен вклад отдельных групп микроорганизмов (грибы, бактерии, водоросли) в круговорот углерода. Показано, что влияние микробного сообщества на цикл углерода в почве, по всей видимости, определяется стратегиями жизнедеятельности, которые глубоко укоренены в эволюционной истории микроорганизмов (функциональные группы микробов формируются на уровне семейств или типов, а не видов или родов). Грибная и бактериальная биомасса являются ключевыми компонентами микробного сообщества в почвах, оказывая существенное влияние на углеродный обмен. Водоросли, как автотрофные организмы, также способствуют процессам углеродного цикла, поглощая углекислый газ и участвуя в образовании органического вещества. Несмотря на недостаток данных о конкретном влиянии почвенных водорослей на углеродный баланс, их роль в глобальном цикле углерода нельзя игнорировать. Таким образом, существует потенциал для применения почвенных микроорганизмов или управления ими для компенсации выбросов углекислого газа.

Ключевые слова: газообмен, углекислый газ, метан, микроорганизмы, грибы, бактерии, водоросли, круговорот углерода

Для цитирования: Сидоренко М.Л., Нестерова О.В. Вклад микроорганизмов в углеродный баланс: эмиссия и секвестрация CO₂ почв // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2025. № 2. С. 152–167. <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2025-2-152-167>

Благодарности: работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № 124012400285-7) и при финансовой поддержке государственного задания Минобрнауки России № FZNS-2025-0004.

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

Original article

MICROBIAL CONTRIBUTION TO THE CARBON BALANCE: SOILS CO₂ EMISSION AND SEQUESTRATION

Marina L. Sidorenko¹, **Olga V. Nesterova²**

¹Federal Scientific Center of the East Asia Terrestrial Biodiversity, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russia

²Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russia

¹sidorenko@biosoil.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4035-8395>

²nesterova.ov@dvfu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3463-0962>

© Сидоренко М.Л., Нестерова О.В., 2025

Abstract. *The diversity of metabolic pathways by which organisms process organic matter under different conditions reflects the amazing adaptability of living beings and their ability to actively function in various ecological niches. The key aspects of these processes are aerobic and anaerobic ways of splitting the initial substances. The review summarizes the role of microorganisms in soil gas exchange associated with the carbon cycle. The contribution of individual groups of microorganisms (fungi, bacteria, algae) to the carbon cycle is considered. It is shown that the influence of the microbial community on the carbon cycle in the soil is most likely determined by life strategies that are deeply rooted in the evolutionary history of microorganisms (functional groups of microbes are formed at the level of families or phyla, rather than species or genera). Fungal and bacterial biomass are key components of the soils microbial community, significantly affecting carbon metabolism. Algae, as autotrophic organisms, also contribute to carbon cycle processes by absorbing CO₂ and participating in the organic matter formation. Despite the lack of data on the specific impact of soil algae on the carbon balance, their role in the global carbon cycle cannot be ignored. Thus, there is potential for the use of soil microorganisms or their management to offset carbon dioxide emissions.*

Keywords: *gas exchange, carbon dioxide, methane, microorganisms, fungi, bacteria, algae, carbon cycle*

For citation: Sidorenko M.L., Nesterova O.V. Microbial Contribution to the Carbon Balance: Soils CO₂ Emission and Sequestration. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2025;(2):152-167. (In Russ.). <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2025-2-152-167>

Acknowledgements: *the research was carried out within the state assignment of Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (theme No. 124012400285-7) and with the financial support of the State Assignment of the Ministry of Education and Science of Russia No. FZNS-2025-0004.*

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

Введение

Круговорот углерода и роль микроорганизмов в этом процессе – предмет активных исследований с учетом глобальных вызовов, связанных с изменением климата, поиском инновационных решений для повышения устойчивости природных систем.

Изучение роли микроорганизмов в газообмене углерода – ключевой аспект экологии и климатологии. Эти микроскопические организмы, включая бактерии, грибы и одноклеточные водоросли, выполняют важные функции, влияющие на глобальный углеродный баланс. Они участвуют в разложении органического вещества, что способствует выделению углекислого газа (CO₂) в атмосферу.

По мнению ряда авторов [1–3], большая часть CO₂ поступает в атмосферу из биогенных источников, в том числе и при участии микроорганизмов, и потоки этого газа контролируются процессами на земной поверхности. В настоящее время педосфера остается одним из наименее изученных источников выброса биогенного CO₂ в атмосферу. Исследования процессов эмиссии и поглощения CO₂ различными типами почв характеризуются фрагментарностью, отсутствием единой методики измерения потоков газа, что затрудняет сравнение экспериментальных данных. Крайне важно провести более глубокое изучение почв как потенциального источника CO₂ для понимания их роли в углеродном цикле. Исследование выброса CO₂ из почв необходимо для составления глобальных балансов, так как почти 60 % годовых выбросов приходится на выделение из почвы [4].

Эмиссия почвами и сток в них CO₂ в результате различных микробиологических процессов зависят от факторов, определяющих рост и условия развития микроорганизмов. Поведение CO₂ может варьироваться в зависимости от типа почвы и ее физико-химических характеристик. К основным факторам, оказывающим влияние на интенсивность эмиссии или секвестрации CO₂ почвами, можно отнести температуру и влажность почвенного покрова [5].

Кроме того, изучение микроорганизмов открывает новые горизонты для биотехнологий, например, в разработке методов утилизации отходов [6–8] и производства биогаза [9]. Исследование их деятельности может привести к созданию эффективных стратегий для смягчения климатических изменений и защиты окружающей среды, что подчеркивает важность этого научного направления.

Цель работы – аналитический обзор и обобщение исследований, направленных на изучение круговорота углерода в виде CO₂ с акцентом на процессы, в которых участвуют микроорганизмы.

Круговорот углерода

В круговороте углерода на Земле особенно заметна взаимосвязь между различными видами организмов, которые реализуют свои метаболические пути в зависимости от наличия кислорода и других условий. От кислородного фотосинтеза до анаэробного дыхания эти процессы взаимосвязаны и обеспечивают поддержание экосистем и влияние на климат. Эти механизмы не только формируют живую природу, но и играют решающую роль в биогеохимических циклах, определяя выживание и процветание жизненных форм на нашей планете.

Почвы содержат большой пул углерода и влияют на его глобальный цикл (рис. 1).

Ученые объединяют весь углерод на Земле в четыре основных резервуара [10–14]. Первый и самый большой – литосфера (земная кора): она включает ископаемое топливо и отложения осадочных пород (основные из них – известняк, доломит и мел). Количество углерода в литосфере составляет $66\text{--}100 \cdot 10^{15}$ т, из них $0,004 \cdot 10^{15}$ т приходится на ископаемое топливо [10]. Второй резервуар – гидросфера. Воды океана, рек и озер содержат растворенный диоксид углерода и карбонат кальция морских организмов. Количество углерода в океанах – $0,038\text{--}0,04 \cdot 10^{15}$ т [10]. Третий резервуар – атмосфера, которая включает такие вещества, как диоксид и оксид углерода, метан. Количество углерода в атмосфере за 300 лет наблюдений увеличилось с $578 \cdot 10^9$ до $766 \cdot 10^9$ т и продолжает увеличиваться со скоростью около $6,1 \cdot 10^9$ т в год [10]. Четвертый и самый маленький резервуар – биосфера. Под углеродом биосферы понимают всех живых и мертвых организмов, еще не преобразованных в органическое вещество почвы. Количество углерода, находящегося в биосфере, – $540\text{--}610 \cdot 10^9$ т [10].

Некоторые авторы выделяют отдельно углерод почвы, считая его ключевым природным резервуаром и одним из самых значительных источников биогенного углерода в наземных экосистемах [15]. Согласно различным оценкам, в почве хранится приблизительно $14\text{--}15 \cdot 10^{11}$ т [16] и даже $25 \cdot 10^{11}$ т [17]. По состоянию на 01.01.2015 суммарные запасы углерода на покрытых лесом землях России – $123,77 \pm 18,93 \cdot 10^9$ т [18]. Резерв секвестрации CO_2 в почвах России – $3,6 \cdot 10^9$ т С, а его суммарный выброс – около $681 \cdot 10^6$ т С, что составляет более 19 суммарных годовых выбросов парниковых газов [19].

Основными этапами цикла углерода являются фотосинтез, дыхание, разложение и обмен между живыми и неживыми компонентами с потреблением и образованием CO_2 . На глобальном уровне углеродный цикл более сложен и включает углерод, хранящийся в ископаемом топливе, почвах, океанах и горных породах [10].

Крупнейшие потоки в круговороте углерода происходят между атмосферой, растительностью и океанами. Углерод поступает в почву главным образом через растения. Основной формой фиксированного неорганического углерода является диоксид углерода. Ежегодно в результате фотосинтеза преобразуется около 250 млрд т CO_2 [20]. При этом часть такого углерода растения отдают в почву через корневую систему в виде корневых выделений, которыми питается почвенная биота. В процессе дыхания корневая система растений потребляет кислород, после чего выделяет CO_2 , который, взаимодействуя с почвенной влагой, преобразуется в угольную кислоту.

Когда растение отмирает, углерод, находившийся в листьях, стебле и корнях, попадает в почву и становится почвенным органическим веществом. После отмирания мертвый органический материал (например, корни растений) усиливает дыхание микроорганизмов. Растительные ткани разлагаются в основном почвенными микроорганизмами, при этом большая часть углерода, содержащегося в растениях, исчезает, вещество в конечном счете выбрасывается обратно в атмосферу в виде CO_2 . По данным В.А. Ковды [21], дыхание почвы, богатой органическими веществами, производит в сутки до 1,5 т/га CO_2 . Его большая часть выделяется при разложении свежей органики гумуса в области ризосферы беспозвоночными, простейшими и микроорганизмами, что за год составляет 200–300 т/га. Выбросы CO_2 из почвы обусловлены почвенным дыханием, активный вклад в которое осуществляют почвенные микроорганизмы и корни растений [2]. В этом процессе гетеротрофные микроорганизмы, осуществляющие минерализацию органического вещества в почве, отвечают примерно за 70 % всех выбросов CO_2 [22]. Общий объем выбросов CO_2 из почвы состоит из нескольких компонентов: микробного разложения корневых выделений и остатков корней, дыхания корней растений, микробного распада гумусовых веществ, а также дополнительного разложения гумуса, вызванного повышенной активностью микроорганизмов в ризосфере [23].

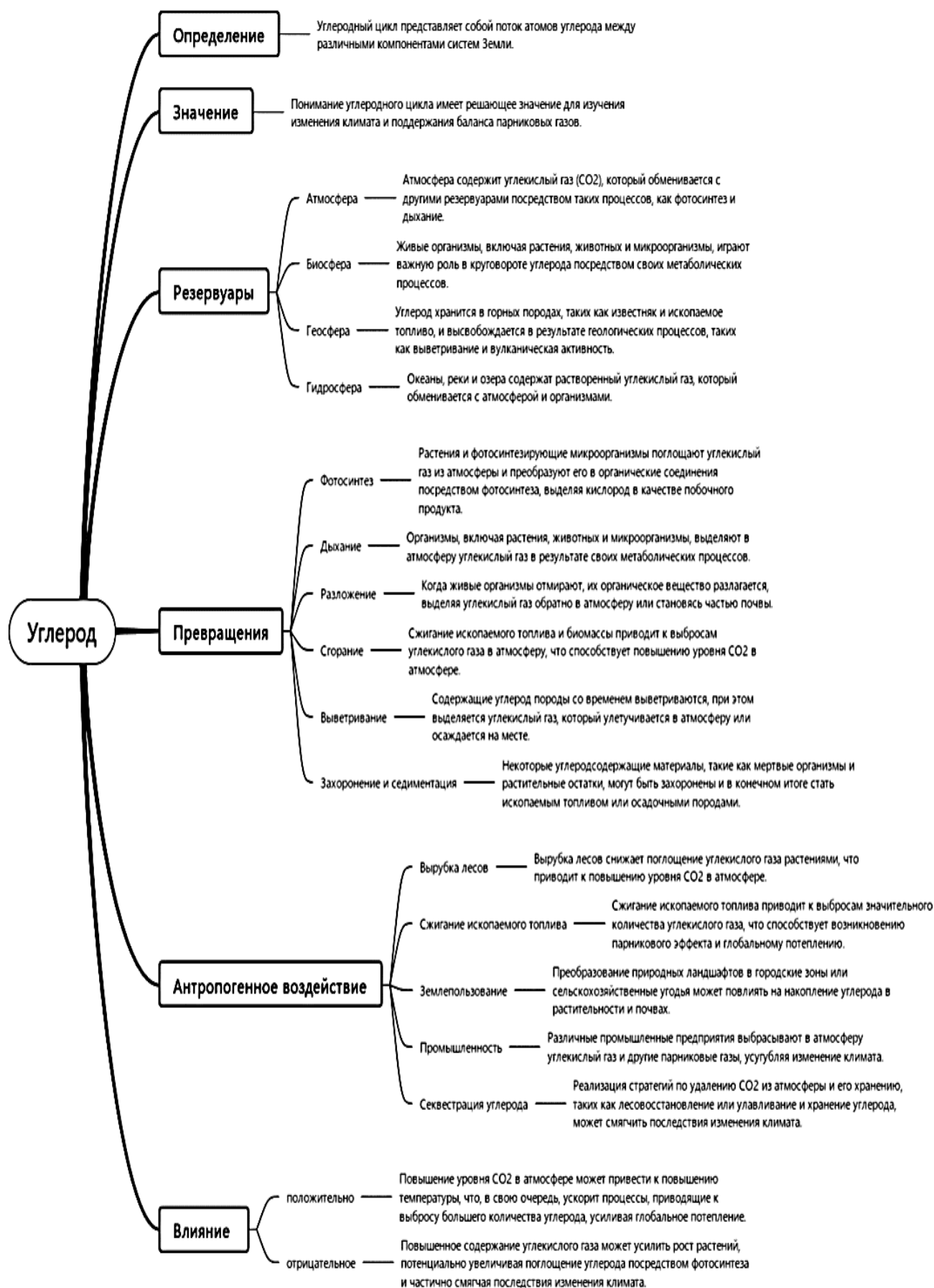


Рис. 1. Углеродный цикл (построен по данным [10–14])
 / Fig. 1. Carbon cycle (constructed according to data from [10–14])

Однако существует мнение, согласно которому микробная биомасса должна рассматриваться не только как пул углерода, но и как активный фактор его круговорота [24]. Для объяснения динамики цикла углерода в почве разработаны модели, основанные на активности микроорганизмов (рис. 2). Первоначально органическое вещество почв используется микроорганизмами непосредственно для роста. В это время другие питательные вещества быстро иммобилизируются [25, 26] и запускается выработка внеклеточных ферментов [27], способствующих переработке почвенного углерода, высвобождая его мономер. В то же время общий поток углерода может быть ограничен функционированием экзоферментной системы бактерий [28].

Далее рассмотрим вклад отдельных видов микроорганизмов в круговорот углерода.

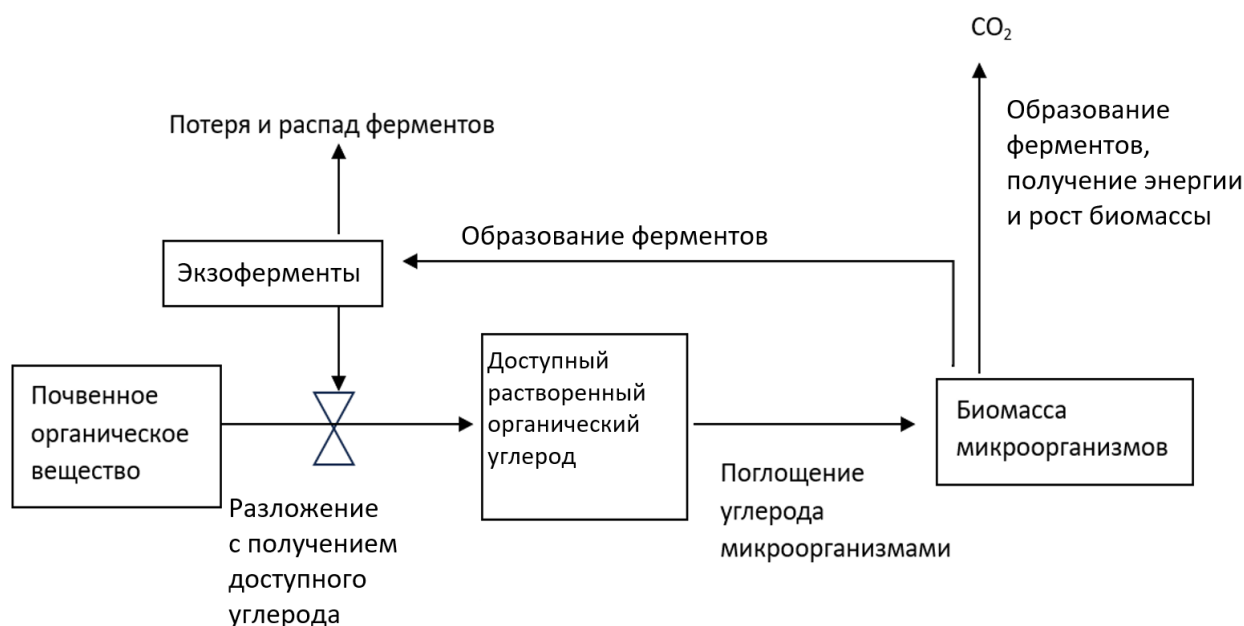


Рис. 2. Фундаментальная структура модели, объясняющей динамику цикла углерода в почве, основанную на активности микроорганизмов (построен по данным [24–29]) / Fig. 2. Fundamental structure of a model explaining the dynamics of the soil carbon cycle based on microbial activity (constructed according to data from [24–29])

Водоросли распространены во всех типах почв, но их численность меньше, чем бактерий и грибов [30]. В среднем $(5,5 \pm 3,4) \cdot 10^6$ водорослей населяют каждый грамм поверхностного грунта [31]. Они отличаются от других микроорганизмов тем, что являются автотрофными, способными к процессу метаболического фотосинтеза. Водоросли распространяются во влажных местах, подверженных воздействию света. Обнаружено, что некоторые штаммы могут существовать под поверхностью почвы. В целом водоросли, присутствующие в почве, либо одноклеточные, либо ленточные, как правило, они более простые и мелкие по структуре, чем водные водоросли. В почвах обнаруживаются 4 класса водорослей [30]: 1) зеленые *Chlorophyta* (наиболее известные виды, обитающие в почве, – *Chlamydomonas*, *Chlorella* и *Chlorococcum*); 2) диатомовые *Bacillariophyta* (наиболее распространенные роды – *Symbell*, *Surirella*); 3) желтозеленые *Xanthophyta* (наиболее распространенные роды – *Heterothrix* и *Heterococcus*); 4) синезеленые *Cyanophyta* (наиболее известные виды, распространенные в почве, – *Anabaena*, *Nostoc* и *Calothrix*).

Водоросли играют важную роль в процессах круговорота углерода. Они получают его из атмосферы в виде CO_2 , а обитающие в толще почв вдали от света обладают способностью потреблять органический углерод [32]. Велик их вклад в биологический процесс выветривания горных пород, поскольку они относятся к первым видам растений на скалах и после их отмирания разлагаются бактериями и микроскопическими грибами. Водоросли являются пищей для многих организмов (бактерии, грибы, нематоды и черви). Кислоты, образующиеся в результате такой деятельности, а также углекислота, возникающая при дыхании, способствуют выветриванию горных пород [33].

Кроме того, водоросли увеличивают содержание органического вещества в почве, так как могут превращать неорганические соединения в органические. Это стабилизирует почвенный покров и снижает вероятность эрозии почвы [34].

Синезеленые водоросли, обитающие на заболоченных почвах, вносят значительный вклад в обеспечение растений кислородом, необходимым для дыхания, и влияют на закрепление атмосферного азота, опосредованно увеличивая привнос органического углерода в почву. Особенно это актуально на рисоводческих фермах во многих странах Юго-Восточной Азии, где производят обработку некоторыми видами синезеленых водорослей [35].

Ежегодно поглощая около $3,6 \cdot 10^9$ т С/год, почвенные водоросли привносят в почвы около $56 \cdot 10^9$ т С/год, что составляет 6,4 % его глобального наземного производства [31]. Такой вклад в наземную чистую первичную продукцию может показаться относительно высоким, учитывая низкое содержание углерода в биомассе почвенных водорослей по сравнению с биомассой наземных растений. Тем не менее фотосинтетическая способность почвенных водорослей сравнима с растениями, если учитывать содержание хлорофилла в них на единицу площади клетки. Кроме того, небольшая доля углерода, содержащегося в живой биомассе почвенных водорослей, не отражает количества углерода, циркулирующего по этому пути, поскольку скорость роста и круговорот микроорганизмов намного выше, чем у растений. Наиболее активно в биотехнологиях улавливания CO_2 используются микроводоросли и цианобактерии, фототрофные зеленые, водородокисляющие бактерии, карбоксидобактерии и метаногенные археи [21, 23, 36–40].

Таким образом, несмотря на то что влияние почвенных водорослей на секвестрацию и высвобождение углерода до сих пор остается практически неизвестным, доказано, что они имеют решающее значение для его глобального цикла и, следовательно, должны учитываться в моделях круговорота наземного углерода и при решении вопросов выравнивания углеродного цикла.

Грибы. Грибная биомасса – преобладающий компонент микробной составляющей в органических горизонтах почв разных типов [41, 42]. Наиболее распространенными представителями почвенных грибов являются *Penicillium*, *Trichoderma*, *Mortierella*, *Chaetomium*, *Cladosporium*, *Epicoccum*, *Aspergillus* [43].

Грибы, наряду с другими микроорганизмами, играют важную роль в обеспечении почвы углеродом [44]. Среди них с точки зрения углеродного обмена выделяют грибы-деструкторы (преобразуют мертвое органическое вещество в более простые формы, которыми могут питаться другие организмы) и грибы-симбионты (нити (гифы), которые сплетаются корнями растений и проникают внутрь, образуя микоризу). При всех видах микоризы грибы производят большое количество мицелия в почве. Плотность микоризы на корнях растений может значительно варьироваться – от <1 до 111 м/г [45, 46]. Распространение мицелия приводит к отложению значительных количеств органического углерода далеко за пределы зоны, обычно считающейся подверженной влиянию корней (ризосфера) [39].

Распределение углерода в микоризных грибах составляет в среднем от 1 до 13 % в зависимости от типа гриба. Фиксированный углерод растений в микоризных грибах значительно варьирует в зависимости от функционального типа микоризы [44]. Углерод в эктомикоризных грибах составляет от 9 [47, 48] до 14 % [49], при этом некоторые авторы предполагают, что это – более половины углерода, поступающего в почву [36, 37, 50]. Значительно меньше углерода приходится на арбускулярные и эрикоидные микоризные грибы (3,3 и 3,5 % соответственно) [44].

Сегодня выделяют несколько механизмов, с помощью которых микоризные грибы влияют на накопление углерода в почве [44]: углерод используется для создания и поддержания активной мицелиальной сети; остается в виде грибковой некромассы, выступающей в качестве каркаса для почв; микоризные грибы выделяют соединения, которые помогают удерживать почвенный углерод; они дышат и участвуют в разложении, что приводит к потере углерода в почве.

В глобальном масштабе показано, что быстрорастущие растения (травянистые по сравнению с древесными; широколиственные по сравнению с хвойными) отдают больше углерода своим микоризным партнерам. Согласно проведенным подсчетам, до 30 % всей продукции, полученной в процессе фотоассимиляции, может быть затрачено на рост и поддержание грибов [51]. В работе [52] сообщается, что дыхательные процессы, происходящие в микоризных корнях и мицелии грибов, могут составлять свыше 50 % от общего уровня дыхания почвы. Следует отметить, что растительность с арбускулярной микоризой охватывает более обширные территории и обладает большим объемом биомассы, тогда как эктомикоризные грибы играют более значительную роль

в накоплении углерода в почве [45]. Углерод сохраняется в форме некромассы грибов, выступающих в качестве каркаса для почв. Кроме того, микоризные грибы производят соединения, способствующие удержанию углерода в почве (экссудаты, хитин и меланин в гифах). Эти компоненты помогают связывать и стабилизировать мелкие органические молекулы на минеральных поверхностях [53]. При этом углерод может теряться в процессе дыхания почвы и разложения органических материалов. Одновременно его можно повторно фиксировать анаэробным путем, что позволяет углероду оставаться в почве или улетучиваться в атмосферу [44].

Арбускулярно-микоризные грибы, в противовес эктомикоризным, потенциально оказывают значительное влияние на выделение CO_2 в окружающую среду. Так, некоторые авторы [54] отмечают, что при удалении микоризы дыхание почвы снизилось с 4,18 до 3,24 мкмоль, что эквивалентно 3,35 г/м² углерода в сутки.

Таким образом, грибы играют ключевую роль в углеродном обмене между почвами и атмосферой, выступая одновременно как деструкторы и симбионты и способствуя тем самым секвестрации и эмиссии CO_2 . Различные типы микоризных грибов отличаются механизмами влияния на содержание углерода в почве, включая создание мицелиальных сетей, образование некромассы и выделение соединений, удерживающих углерод. При этом растительность с эктомикоризами более эффективно накапливает углерод по сравнению с арбускулярными микоризами. Углерод, проходящий через грибы, может как сохраняться в почве, так и теряться в результате дыхательных процессов и разложения. Объемы этого переноса в глобальном масштабе ежегодно составляют более 13 млрд т CO_2 [44].

Почвенные бактерии представляют собой самую многочисленную и разнообразную группу микроорганизмов, обитающих в почве. Это делает их ключевыми элементами почвенных экосистем. Они играют незаменимую роль в различных почвенных процессах, участвуя в круговороте питательных веществ, расщепляя органические вещества и превращая сложные соединения в более простые, доступные для усвоения растениями [55]. К примеру, бактерии осуществляют фиксацию атмосферного азота, преобразовывая его в формы, которые могут быть усвоены растениями [56]. Бактерии родов *Pseudomonas* и *Azospirillum* выделяют ферменты, улучшающие усвоение питательных веществ, чем способствуют росту растений [55, 57]. При этом в круговорот углерода вносят вклад всего несколько родов очень многочисленных почвенных бактерий. К ним относят *Bradyrhizobium*, *Acidobacteria* и *Streptomyces*. Они эффективнее всех используют почвенный углерод и питательные вещества, растут и размножаются намного быстрее других бактерий. На их долю приходится более 50 % переработанного почвенного углерода [58].

Отмечена роль бактерий рода *Bacillus* в эмиссии углерода: *B. megatherium* var. *phosphaticus* разлагают органические соединения, содержащие фосфор, *B. methanicus* осуществляют окисление метана, *B. pasteurii* и *B. probatus* разлагают мочевину с образованием CO_2 [59, 60].

Среди родококков выявлены штаммы, которые в качестве единственного источника углерода и энергии могут использовать гуминовую кислоту, при этом активно выделяется CO_2 [60]. Микобактерии широко распространены в почвах и в процессе метаболизма выделяют CO_2 [61, 62].

Процессы разложения целлюлозы в почвах также ведут к образованию CO_2 . Среди бактериальных культур наиболее изучены в этом отношении представители родов *Clostridium*, *Cellulomonas*, *Bacillus*, *Ruminococcus*, *Thermomonospora*, *Erwinia*, *Bacteriodes*, *Acetovibrio*, *Microbispora* [63]. В процессе гидролиза целлюлозы образуются глюкоза, целлобиоза и целлодекстрины различной длины, которые сбраживаются с выделением значительного количества CO_2 [29].

В процессе кислородного фотосинтеза аэробные цианобактерии и зеленые растения трансформируют основную часть углерода в окисленном состоянии (CO_2) в восстановленные органические соединения, такие как глюкоза, при этом восстанавливая молекулы воды до свободного кислорода [64–66]. Анаэробные пурпурные и зеленые бактерии тоже способны восстанавливать CO_2 до органических веществ, используя соединения, отличные от воды (NH_3 , NO_2 , N_2 , Fe^{2+} и восстановленные соединения серы), однако их вклад в общую фиксацию CO_2 заметно ниже. Зеленая серная бактерия *Chlorobaculum limnaeum* выделяет в среду около 10 % углерода, ассимилированного в процессе автотрофной фиксации CO_2 [67]. В результате фотосинтетической фиксации CO_2 синтезируются сахара и некоторые органические соединения, при этом основная часть углерода у растений накапливается в виде полимеров углеводов (чаще всего крахмал и целлюлоза) [68].

При наличии кислорода большинство микроорганизмов способно к полному окислению органических соединений, преобразовывая их в CO_2 и воду. Это происходит благодаря аэробным

бактериям, таким как псевдомонады и бациллы, а также множеству грибов. Они используют кислород в качестве конечного акцептора электронов, что делает их метаболизм высокоэффективным и экономичным. Яркий пример – неполное окисление сахаров уксуснокислыми бактериями (*Acetobacter*, *Gluconobacter*) с образованием ацетата или получение глюконовой кислоты грибами рода *Aspergillus* и *Penicillium* [69].

В анаэробных условиях процессы расщепления органических соединений происходят через брожение (с участием молочнокислых и пропионовокислых бактерий, энтеробактерий, дрожжей) или анаэробное дыхание с использованием акцепторов водорода (нитраты, сульфаты, карбонаты, фумараты и трехвалентное железо). Активность проявляют денитрифицирующие, сульфатредуцирующие и метанобразующие бактерии. Последние (*Methanobacterium*, *Methanococcus*, *Methanosarcina*) являются строгими анаэробами и завершают цепь анаэробного пищевого процесса выделением метана [70], который может быть окислен до CO₂ в аэробных условиях метилотрофными бактериями (*Methylomonas*, *Methylosinus*, *Methylococcus*) [71].

Сравнение вклада почвенных грибов и бактерий в круговорот углерода

В качестве двух основных редуцентов бактерии и грибы характеризуются своими быстрорастущими, высокоизменчивыми и медленно растущими, более стабильными стратегиями и, таким образом, рассматриваются как r- и K-стратегии соответственно [72–74]. Следовательно, интенсивность минерализации r-стратегиями может быть выше, чем у k-стратегов: r-стратеги увеличивают отток CO₂ за счет ускорения микробного оборота [75, 76], k-стратеги увеличивают минерализацию органического вещества почвы для удовлетворения микробного спроса [75, 77].

Интенсивность процесса минерализации определяется количеством растворенного органического углерода – веществ, которые растворяются в воде и поступают в почву, например, из корней растений. Эти вещества делятся на две категории: гидрофильные (сахара, аминокислоты и карбоновые кислоты) и гидрофобные (лигнин и липиды). Считается, что гидрофильные соединения значительно способствуют ускорению минерализации органики в почве, поскольку они более легко усваиваются микроорганизмами, отвечающими за их разложение [78]. Процесс разложения как гидрофобных, так и гидрофильных материалов проходит быстрее в сухих условиях, при этом выделение CO₂ увеличивается в два раза по сравнению с влажной почвой (49,4–54,5 мг/кг). Минерализация гидрофильной фракции происходит существенно быстрее, а её интеграция в бактерии в 11,4–16,4 раза больше, чем в грибах. Для гидрофобной фракции наблюдается обратная зависимость: интеграция в грибы превосходит таковую в бактерии в 1,5 раза. Это указывает на то, что быстрорастущие бактерии более эффективны в усвоении гидрофильной фракции, в то время как медленно растущие грибы лучше работают с гидрофобной [79].

Ряд авторов утверждает, что в микробное дыхание больший вклад вносят грибы по сравнению с бактериями. Так, исследование почвенного дыхания в широколиственных и еловых лесах (дубрава, ельник зеленчуковый, осинник, ельник зеленомошный, елово-широколиственный лес) выявило, что микробное на 90 % по биомассе состоит из грибов и, соответственно, вклад в микробное дыхание у грибов был больше, чем у бактерий в большинстве видов почв разных лесов [80]. Китайские ученые проанализировали факторы почвенного дыхания во время длительного естественного опустошения Лёссового плато. Было обнаружено, что увеличение компонентов дыхания почвы положительно коррелировало с увеличением численности микробного сообщества [81].

Заключение

Круговорот углерода на Земле представляет собой сложный процесс, в котором взаимосвязаны различные метаболические пути организмов и среды, что, в свою очередь, влияет на экосистемы и климат. Основные этапы цикла углерода включают фотосинтез, дыхание и разложение, при этом микробная активность в почвах значительно влияет на количество углекислого газа.

На данный момент исследования в области газообмена почвой нацелены на измерение общего дыхания микробиоты определённого вида почв, анализ таксономических групп микроорганизмов и корреляцию этих групп с дыханием почвы, но пока имеются только единичные исследования относительно вклада отдельных групп микроорганизмов в базальное дыхание.

Грибная и бактериальная биомассы являются ключевыми компонентами микробного сообщества в почвах, оказывая существенное влияние на углеродный обмен. Грибные микроорганизмы делятся на деструкторов и симбионтов, где первые расщепляют мертвое органическое вещество, а вторые образуют микоризу с корнями растений, способствуя накоплению углерода в почве. Микоризные грибы, в частности, эффективно используют углерод для формирования мицелиальных сетей и создания некромассы, что усиливает стабильность почвенного углерода. Бактерии, с другой стороны, активно участвуют в расщеплении органических веществ и фиксации атмосферного азота, что также поддерживает углеродный цикл в экосистемах. Вместе эти микроорганизмы способствуют как накоплению углерода в почве, так и его выделению в атмосферу, играя важную роль в глобальных климатических процессах. Водоросли, как автотрофные организмы, также способствуют процессам углеродного цикла, поглощая CO₂ и участвуя в образовании органического вещества. Несмотря на недостаток данных о конкретном влиянии почвенных водорослей на углеродный баланс, их роль в глобальном цикле углерода нельзя игнорировать.

Таким образом, изучение круговорота углерода акцентирует внимание на роли микроорганизмов в процессах преобразования углекислого газа, подчеркивая значимость для экосистем и климатических изменений.

Список источников

1. Черных Н.А. Миграционные потоки вещества в биосфере // Экология в современном мире / под ред. Н.А. Черных, Р.А. Алиева. М.: Аспект Пресс, 2022. С. 297–318.
2. Кудеяров В.Н. Дыхание почв и биогенный сток углекислого газа на территории России (аналитический обзор) // Почвоведение. 2018. № 6. С. 643–658. EDN: XQNGST. <https://doi.org/10.7868/S0032180X18060011>
3. Bond-Lamberty B., Wang C., Gower S.T. A global relationship between the heterotrophic and autotrophic components of soil respiration? // Global Change Biol. 2004. Vol. 10, № 10. P. 1756–1766. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2004.00816.x>
4. Кудеяров В.Н. Почвенное дыхание и секвестрация углерода (обзор) // Почвоведение. 2023. № 9. С. 1011–1022. EDN: YUFLKS. <https://doi.org/10.31857/S0032180X23990017>
5. Федоров Ю.А., Сухоруков В.В., Трубник Р.Г. Аналитический обзор: эмиссия и поглощение парниковых газов почвами. Экологические проблемы // Антропогенная трансформация природной среды. 2021. Т. 7, № 1. С. 6–34. EDN: WKLFBN. <https://doi.org/10.17072/2410-8553-2021-1-6-34>
6. Попов В.Н., Корнеева О.С., Искусных О.Ю., Искусных А.Ю. Инновационные способы переработки биоотходов птицеводства // Вестн. Воронежского гос. ун-та инженерных технологий. 2020. Т. 82, № 1 (83). С. 194–200. EDN: YHVGII. <https://doi.org/10.20914/2310-1202-2020-1-194-200>
7. Володин В.В., Шубаков А.А., Володина С.О., Шергина Н.Н., Василев Р.Г. Тенденции в развитии методов утилизации коры и кородревесных отходов длительного хранения (обзор) // Аграрная наука Северо-Востока. 2022. Т. 23, № 5. С. 611–632. EDN: BJQCVW. <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2022.23.5.611-632>
8. Пакулина А.П., Платонова Т.П. Стратегия обращения с отходами полимеров // Естеств. и техн. науки. 2022. № 2 (165). С. 50–55. EDN: OLTFOI. <https://doi.org/10.25633/ETN.2022.02.01>
9. Молочный В.А. Биогазовая установка – производство биотоплива и экологически чистых органических удобрений. Новая уникальная технология по получению энергии из биомассы // Малая энергетика. 2011. № 3–4. С. 71–76.
10. Rice C.W., Pires C.B., Sarto M.V.M. Carbon cycle in soils: Dynamics and management // Encyclopedia of Soils in the Environment. Ed. M.J. Goss, M. Oliver. 2nd Academic Press, 2023. P. 219–227. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822974-3.00154-3>
11. Звягинцев Д.Г., Бабьева И.П., Зенова Г.М. Биология почв: учебник. 3-е изд., испр. и доп. М.: МГУ, 2005. 445 с. EDN: RBVHNL.
12. Емцев В.Т., Мишустин Е.Н. Микробиология: учебник для вузов. 8-е изд., испр. и доп. М.: Юрайт, 2016. 428 с. EDN: MEMJNM.
13. Заварзин Г.А., Кудеяров В.Н. Почва как главный источник углекислоты и резервуар органического углерода на территории России // Вестн. РАН. 2006. Т. 76, № 1. С. 14–24. EDN: HSYMIZ.
14. Silva-Olaya A.M., Cerri C.E.P., La Scala N.Jr., Dias C.T.S., Cerri C.C. Carbon dioxide emissions under different soil tillage systems in mechanically harvested sugarcane // Environ. Res. Lett. 2013. Vol. 8, № 1. Art. 015014. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/8/1/015014>
15. Eglin T. Organic carbon in soils – meeting climate change and food security challenges. ADEME, 2015. 32 p.
16. Пулы и потоки углерода в наземных экосистемах России / отв. ред. Г.А. Заварзин. М.: Наука, 2007. 315 с. EDN: PZQYLX.

17. Lal R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security // *Science*. 2004. Vol. 304, № 5677. P. 1623–1627. <https://doi.org/10.1126/science.1097396>
18. Замолодчиков Д.Г., Грабовский В.И., Честных О.В. Динамика баланса углерода в лесах федеральных округов Российской Федерации // *Вопросы лесной науки*. 2018. Т. 1, № 1. С. 1–24. EDN: YTTVJJ. <https://doi.org/10.31509/2658-607X-2018-1-1-1-24>
19. Иванов А.Л., Кулик К.Н., Столбовой В.С., Хитров Н.Б., Конюшков Д.Е. Методология мониторинга учета баланса углерода в почвенных экосистемах и агролесокомплексах в условиях изменения климата // *Почвы – стратегический ресурс России: материалы пленарных докл. VIII съезда Общества почвоведов им. В.В. Докучаева и Школы молодых ученых по морфологии и классификации почв / отв. ред. С.А. Шоба, И.Ю. Савин, Е.М. Лаптева*. Москва; Сыктывкар: Ин-т биологии Коми науч. центра УрО РАН, 2022. С. 59–64. EDN: MWEJAP.
20. Geider R.J., DeLucia E.H., Falkowski P.G., Finzi A., Grime J.P., Grace J., Kana T.M., LaRoche J., Long S.P., Osborne B.A. et al. Primary productivity of planet Earth: biological determinants and physical constraints in terrestrial and aquatic habitats // *Global Change Biology*. 2001. Vol. 7, iss. 8. P. 849–882. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2486.2001.00448.x>
21. Ковда В.А. Биогеохимия почвенного покрова. М.: Наука, 1985. 263 с. EDN: VXFJNS.
22. Friedlingstein P., Jones M.W., O'Sullivan M., Andrew R.M., Hauck J., Peters G.P., Peters W., Pongratz J., Sitch S., Le Quéré C. et al. Global Carbon Budget 2019 // *Earth Syst. Sci. Data*. 2019. Vol. 11, № 4. P. 1783–1838. <https://doi.org/10.5194/essd-11-1783-2019>
23. Dalal R.C., Allen D.E. Greenhouse gas fluxes from natural ecosystems // *Australian J. of Botany*. 2008. Vol. 56, № 5. P. 369–407. <https://doi.org/10.1071/bt07128>
24. Kuzyakov Y. Priming effects: interactions between living and dead organic matter // *Soil Biol. Biochem*. 2010. Vol. 42, iss. 9. P. 1363–1371. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2010.04.003>
25. Buchkowski R.W., Schmitz O.J., Bradford M.A. Microbial stoichiometry overrides biomass as a regulator of soil carbon and nitrogen cycling // *Ecology*. 2015. Vol. 96, iss. 4. P. 1139–1149. <https://doi.org/10.1890/14-1327.1>
26. Sawada K., Funakawa S., Toyota K., Kosaki T. Potential nitrogen immobilization as influenced by available carbon in Japanese arable and forest soils // *Soil Sci. Plant. Nutr*. 2015. Vol. 61, iss. 6. P. 917–926. <https://doi.org/10.1080/00380768.2015.1075364>
27. Blagodatskaya E., Kuzyakov Y. Mechanisms of real and apparent priming effects and their dependence on soil microbial biomass and community structure: critical review // *Biol. Fert. Soils*. 2008. Vol. 45. P. 115–131. <https://doi.org/10.1007/s00374-008-0334-y>
28. Schimel J.P., Weintraub M.N. The implications of exoenzyme activity on microbial carbon and nitrogen limitation in soil: a theoretical model // *Soil Biol. Biochem*. 2003. Vol. 35, iss. 4. P. 549–563. [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(03\)00015-4](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(03)00015-4)
29. Morrissey E.M., Mau R.L., Schwartz E., McHugh Th.A., Dijkstra P., Koch B.J., Marks J.C., Hungate B.A. Bacterial carbon use plasticity, phylogenetic diversity and the priming of soil organic matter // *ISME J*. 2017. Vol. 11, № 8. P. 1890–1899. <https://doi.org/10.1038/ismej.2017.43>
30. Naji N.S., Jassim Y.A., Al-Amery S.M.H. Review Algae and Fungi on Soil Ecosystem // *Int. J. Adv. Multi-discip. Res. Stud*. 2024. Vol. 4, iss. 1. P. 1037–1041. <https://doi.org/10.62225/2583049X.2024.4.1.2337>
31. Jassey V.E.J., Walcker R., Kardol P., Geisen S., Heger Th., Lamentowicz M., Hamard S., Lara E. Contribution of soil algae to the global carbon cycle // *New Phytol*. 2021. Vol. 234, iss. 1. P. 64–76. <https://doi.org/10.1111/nph.17950>
32. Blaser M.J., Cardon Z.G., Cho M.K., Dangl J.L., Donohue T.J., Green J.L., Knight R., Maxon M.E., Northen T.R., Pollard K.S., Brodie E.L. Toward a predictive understanding of Earth's microbiomes to address 21st century challenges // *Am. Soc. Microbiol*. 2016. Vol. 7, № 3. P. 1–16. <https://doi.org/10.1128/mBio.00714-16>
33. Allison V.J., Condron L.M., Peltzer D.A., Richardson S.J., Turner B.L. Changes in enzyme activities and soil microbial community composition along carbon and nutrient gradients at the Franz Josef chronosequence, New Zealand // *Soil Biol. Biochem*. 2007. Vol. 39, iss. 7. P. 1770–1781. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2007.02.006>
34. Amundson R., Berhe A.A., Hopmans J.W., Olson C., Szein A.E., Sparks D.L. Soil and human security in the 21st century // *Science*. 2015. Vol. 348, № 6235. Art. 1261071. <https://doi.org/10.1126/science.1261071>
35. Bai Y., Muller D.B., Srinivas G., Garrido-Oter R., Potthoff E., Rott M., Dombrowski N., Münch Ph. C., Spaepen S., Remus-Emsermann M. et al. Functional overlap of the Arabidopsis leaf and root microbiota // *Nature*. 2015. Vol. 528. P. 364–369. <https://doi.org/10.1038/nature16192>
36. Cairney J.W.G. Extramatrical mycelia of ectomycorrhizal fungi as moderators of carbon dynamics in forest soil // *Soil Biol. Biochem*. 2012. Vol. 47. P. 198–208. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2011.12.029>
37. Clemmensen K.E., Bahr A., Ovaskainen O., Dahlberg A., Ekblad A., Wallander H., Stenlid J., Finlay R.D., Wardle D.A., Lindahl B.D. Roots and associated fungi drive long-term carbon sequestration in boreal forest // *Science*. 2013. Vol. 339, № 6127. P. 1615–1618. <https://doi.org/10.1126/science.1231923>
38. Smith F.A., Grace E.J., Smith S.E. More than a carbon economy: nutrient trade and ecological sustainability in facultative arbuscular mycorrhizal symbioses // *New Phytol*. 2009. Vol. 182, iss. 2. P. 347–358. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2008.02753.x>

39. Smith S.E., Facelli E., Pope S., Smith F.A. Plant performance in stressful environments: interpreting new and established knowledge of the roles of arbuscular mycorrhizas // *Plant Soil*. 2010. Vol. 326. P. 3–20. <https://doi.org/10.1007/s11104-009-9981-5>
40. Глазунова Д.М., Галицкая П.Ю., Селивановская С.Ю. Секвестрация углерода атмосферы с использованием микроводорослей // Учен. зап. Казанского ун-та. Естеств. науки. 2024. Т. 166, № 1. С. 82–125. EDN: BEWUAK. <https://doi.org/10.26907/2542-064X.2024.1.82-125>
41. Averill C., Turner B.L., Finzi A.C. Mycorrhiza-mediated competition between plants and decomposers drives soil carbon storage // *Nature*. 2014. Vol. 505. P. 543–545. <https://doi.org/10.1038/nature12901>
42. Хабибуллина Ф.М., Кузнецова Е.Г., Васенева И.З. Микробиоты подзолистых и болотно-подзолистых почв в подзоне средней тайги на северо-востоке европейской части России // Почвоведение. 2014. № 10. С. 1228–1234. EDN: SNWNRV. <https://doi.org/10.7868/S0032180X14100049>
43. Matei G.-M., Matei S., Mocanu V. Assessing the role of soil microbial communities of natural forest ecosystem // *The EuroBiotech J*. 2020. Vol. 4, iss. 1. 4. P. 1–7. <https://doi.org/10.2478/ebtj-2020-0001>
44. Hawkins H.-J., Cargill R.I. M., Van Nuland M.E., Hagen S.C., Field K.J., Sheldrake M., Soudzilovskaia N.A., Kiers E.T. Mycorrhizal mycelium as a global carbon pool // *Cur. Biol*. 2023. Vol. 33, iss. 11. P. R560–R573. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2023.02.027>
45. Воронина Е.Ю. Микоризы в наземных экосистемах: экологические, физиологические и молекулярно-генетические аспекты микоризных симбиозов // Микология сегодня / под ред. Ю.Т. Дьякова, Ю.В. Сергеева М.: Нац. академия микологии, 2007. Т. 1. С. 142–234.
46. Miller R.M., Jastrow J.D., Reinhardt D.R. External hyphal production of vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi in pasture and tallgrass prairie communities // *Oecol*. 1995. Vol. 103. P. 17–23. <https://doi.org/10.1007/BF00328420>
47. Leake J.R., Donnelly D.P., Saunders E.M., Boddy L., Read D.J. Rates and quantities of carbon flux to ectomycorrhizal mycelium following ¹⁴C pulse labeling of *Pinus sylvestris* seedlings: effects of litter patches and interaction with a wood-decomposer fungus // *Tree Physiol*. 2001. Vol. 21, iss. 2–3. P. 71–82. <https://doi.org/10.1093/treephys/21.2-3.71>
48. Mäkelä A., Tian X., Repo A., Ivesniemi H., Marshall J., Minunno F., Näsholm T., Schiestl-Aalto P., Lehtonen A. Do mycorrhizal symbionts drive latitudinal trends in photosynthetic carbon use efficiency and carbon sequestration in boreal forests? // *For. Ecol. Manage.* 2022. Vol. 520. Art. 120355. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2022.120355>
49. Vogt K.A., Grier C.C., Meier C.E., Edmonds R.L. Mycorrhizal role in net primary production and nutrient cycling in *Abies amabilis* ecosystems in western Washington // *Ecol*. 1982. Vol. 63, iss. 2. P. 370–380. <https://doi.org/10.2307/1938955>
50. Godbold D.L., Hoosbeek M.R., Lukac M.M., Cotrufo M.F., Janssens I.A., Ceulemans R., Polle A., Velthorst E.J., Scarascia-Mugnozza G., De Angelis P., Miglietta F., Peressotti A. Mycorrhizal hyphal turnover as a dominant process for carbon input into soil organic matter // *Plant Soil*. 2006. Vol. 281. P. 15–24. <https://doi.org/10.1007/s11104-005-3701-6>
51. Nehls U., Wiese J., Guttenberger M., Hampp R. Carbon allocation in ectomycorrhizas: identification and expression analysis of an *Amanita muscaria* monosaccharide transporter // *Mol Plant Microbe Interact*. 1998. Vol. 11, № 3. P. 167–176. <https://doi.org/10.1094/MPMI.1998.11.3.167>
52. Bhupinderpal-Singh, Nordgren A., Ottosson Löfvenius M., Högberg M.N., Melander P.-E., Högberg P. Tree root and soil heterotrophic respiration as revealed by girdling of boreal Scots pine forest: extending observations beyond the first year // *Plant, Cell & Environment*. 2003. Vol. 26, iss. 8. P. 1287–1296. <https://doi.org/10.1046/j.1365-3040.2003.01053.x>
53. Brundrett M.C. Diversity and classification of mycorrhizal associations // *Biol. Rev*. 2004. Vol. 79, iss. 3. P. 473–495. <https://doi.org/10.1017/s1464793103006316>
54. Solaiman Z.M. Contribution of arbuscular mycorrhizal fungi to soil carbon sequestration // *Mycorrhizal fungi: use in sustainable agriculture and land restoration*. Soil Biology. Berlin; Heidelberg: Springer, 2014. Vol. 41. P. 287–296. https://doi.org/10.1007/978-3-662-45370-4_18
55. Gupta Sh., Chaudhary S., Purushotham P., Aman A.S., Singh V. Exploring the Unseen: The Remarkable Role of Soil Microorganism // *Agri Articles*. 2023. Vol. 3, iss. 6. P. 651–655.
56. Бережная В.В., Клыков А.Г., Сидоренко М.Л., Быковская А.Н., Богдан П.М. Влияние бактериальных комплексов на урожайность яровой пшеницы (*Triticum aestivum* L.) // Вестн. Дальневосточного отделения РАН. 2019. № 3 (205). С. 103–111. EDN: ISZTZK. <https://doi.org/10.25808/08697698.2019.205.3.018>
57. Русакова Д.А., Сидоренко М.Л., Ким А.В. Характеристика бактерий рода *Pseudomonas*, выделенных из глинистых органогенных отложений пещеры Мраморная (Приморский край) // Микробиология. 2024. Т. 93, № 1. С. 79–90. EDN: EOPWGG. <https://doi.org/10.31857/S0026365624010086>
58. Stone B.W., Li J., Koch B.J., Blazewicz S.J., Dijkstra P., Hayer M., Hofmockel K.S., Liu X.-J.A., Mau R.L., Morrissey E.M. et al. Nutrients cause consolidation of soil carbon flux to small proportion of bacterial community // *Nat. Commun*. 2021. Vol. 12. Art. 3381. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-23676-x>
59. Садунова А.В. Общая характеристика бактерий рода *Bacillus* // Студенческий научный форум : материалы VI Междунар. студ. науч. конф., 2014. URL: <https://scienceforum.ru/2014/article/2014001198?ysclid=m64o2ridfe559064868> (дата обращения: 03.09.2024).

60. Краткий определитель бактерий Берджи / под ред. Дж. Хоулт; пер. с англ. под ред. Г.А. Заварзина. 7-е изд. М.: Мир, 1980. 495 с.
61. *Hartmans S., De Bont J.A.M., Stackebrandt E.* The genus *Mycobacterium* – nonmedical // *The Prokaryotes*. New York: Springer; 2006. P. 889–918. https://doi.org/10.1007/0-387-30743-5_33
62. *Иванов П.В.* Изменение состава, строения и свойств дисперсных грунтов при активизации их природного микробного комплекса: автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. М., 2015. 24 с. EDN: ZPYCKD
63. *Цавкелова Е.А., Егорова М.А., Петрова Е.В., Непрусов А.И.* Образование биогаза микробными сообществами при разложении целлюлозы и пищевых отходов // *Прикладная биохимия и микробиология*. 2012. Т. 48, № 4. С. 417–424. EDN: OYIRDD.
64. *Zhou W., Wang J., Chen P., Ji C., Kang Q., Lu B., Li K., Liu J., Ruan R.* Bio-mitigation of carbon dioxide using microalgal systems: Advances and perspectives // *Renewable Sustainable Energy Rev.* 2017. Vol. 76. P. 1163–1175. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.065>
65. *Cheah W.Y., Show P.L., Chang J.-S., Ling T.C., Juan J.C.* Biosequestration of atmospheric CO₂ and flue gas-containing CO₂ by microalgae // *Bioresour. Technol.* 2015. Vol. 184. P. 190–201. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.11.026>
66. *Мокроносов А.Т.* Глобальный фотосинтез и биоразнообразие растительности // *Круговорот углерода на территории России / под общ. ред. Г.А. Заварзина*. М.: Московский филиал Гос. науч.-исслед. центра прогнозирования и предупреждения геоэкологических и техногенных катастроф при Кубанском гос. ун-те, 1999. С. 19–62.
67. *Ивановский Р.Н., Лебедева Н.В., Кеппен О.И., Чудновская А.В.* Выделение продуктов фотосинтеза аноксигенными фототрофными бактериями // *Микробиология*. 2020. Т. 89, № 1. С. 34–41. EDN: MAUPVW. <https://doi.org/10.31857/S0026365620010073>
68. *Мокроносов А.Т., Гавриленко В.Ф., Жигалова Т.В.* Фотосинтез. Физиолого-экологические и биохимические аспекты. М.: Academia, 2006. 445 с. EDN: QKOLXF.
69. *Adachi O., Moonmangmee D., Toyama H., Yamada M., Shinagawa E., Matsushita K.* New developments in oxidative fermentation // *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 2003. Vol. 60. P. 643–653. <https://doi.org/10.1007/s00253-002-1155-9>
70. *Кадысева А.А., Безухова С.В., Гильмутдинов Р.М.* Биохимическое окисление органических веществ в анаэробных условиях // *Вестн. ОмГАУ*. 2014. № 1 (13). С. 42–46. EDN: SYNTEB.
71. *Каллистова А.Ю., Меркель А.Ю., Тарновецкий И.Ю., Пименов Н.В.* Образование и окисление метана прокариотами // *Микробиология*. 2017. Т. 86, № 6. С. 661–683. EDN: ZTXEPD. <https://doi.org/10.7868/S002636561706009X>
72. *Jagadamma S., Mayes M.A., Steinweg M.J., Schaeffer S.M.* Substrate quality alters microbial mineralization of added substrate and soil organic carbon // *Biogeosci.* 2014. Vol. 11, iss. 17. P. 4665–4678. <https://doi.org/10.5194/bg-11-4665-2014>
73. *Paterson E., Gebbing T., Abel C., Sim A., Telfer G.* Rhizodeposition shapes rhizosphere microbial community structure in organic soil // *New Phytol.* 2007. Vol. 173, iss. 3. P. 600–610. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2006.01931.x>
74. *Rousk J., Bååth E.* Growth of saprotrophic fungi and bacteria in soil // *FEMS Microbiol. Ecol.* 2011. Vol. 78, iss. 1. P. 17–30. <https://doi.org/10.1111/j.1574-6941.2011.01106.x>
75. *Chen R., Senbayram M., Blagodatsky S., Myachina O., Dittert K., Lin X., Blagodatskaya E., Kuzyakov Y.* Soil C and N availability determine the priming effect: microbial N mining and stoichiometric decomposition theories // *Glob. Chang. Biol.* 2014. Vol. 20, iss. 7. P. 2356–2367. <https://doi.org/10.1111/gcb.12475>
76. *Hessen D.O., Ågren G.I., Anderson T.R., Elser J.J., De Ruiter P.C.* Carbon sequestration in ecosystems: the role of stoichiometry // *Ecol.* 2004. Vol. 85, iss. 5. P. 1179–1192. <https://doi.org/10.1890/02-0251>
77. *Kuzyakov Y., Friedel J.K., Stahr K.* Review of mechanisms and quantification of priming effects // *Soil Biol. Biochem.* 2000. № 11–12. P. 1485–1498. [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(00\)00084-5](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(00)00084-5)
78. *Шевцова Л.К., Черников В.А., Сычев В.Г., Беличенко М.В., Рухович О.В., Иванова О.И.* Влияние длительного применения удобрений на состав, свойства и структурные характеристики гумусовых кислот основных типов почв. Сообщение 1 // *Агрохимия*. 2019. № 10. С. 3–15. EDN: UAPMMI. <https://doi.org/10.1134/S0002188119100120>
79. *Deng S., Zheng X., Chen X., Zheng Sh., He X., Ge T., Kuzyakov Y., Wu J., Su Y., Hu Y.* Divergent mineralization of hydrophilic and hydrophobic organic substrates and their priming effect in soils depending on their preferential utilization by bacteria and fungi // *Biol. Fertil. Soils.* 2021. Vol. 57. P. 65–76. <https://doi.org/10.1007/s00374-020-01503-7>
80. *Ананьева Н.Д., Полянская Л.М., Стольникова Е.В., Звягинцев Д.Г.* Соотношение биомассы грибов и бактерий в профиле лесных почв // *Изв. РАН. Серия биол.* 2010. № 3. С. 308–317. EDN: LRGAEБ.
81. *Tian X., Zhang Y., Liang Y., Fu R., Sun L., Yu Zh., Shi J., Sailike A., Hao H., Zhang W.* Differential response of soil bacteria and fungi to carbon and respiration components in abandoned grasslands on the Loess Plateau, China // *Plant Soil.* 2024. Vol. 504. P. 347–365. <https://doi.org/10.1007/s11104-024-06628-4>

References

1. Chernykh N.A. Migration flows of matter in the biosphere. *Ecology in the modern world*. N. A. Chernykh, R. A. Aliyev (eds.). Moscow: Aspect Press; 2022:297-318. (In Russ.).
2. Kudeyarov V.N. Soil respiration and biogenic carbon dioxide sink in the territory of Russia: an analytical review. *Eurasian Soil Science*. 2018;51(6):599-612. EDN: VAYCWK. <https://doi.org/10.1134/S1064229318060091>
3. Bond-Lamberty B., Wang C., Gower S.T. A global relationship between the heterotrophic and autotrophic components of soil respiration? *Global Change Biol*. 2004;10(10):1756-1766. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2004.00816.x>
4. Kudeyarov V.N. Soil respiration and carbon sequestration: a review. *Eurasian Soil Science*. 2023;56(9):1191-1200. EDN: PSRZDQ. <https://doi.org/10.1134/S1064229323990012>
5. Fedorov Yu.A., Sukhorukov V.V., Trubnik R.G. Analytical review: emission and absorption of greenhouse gases by soils. Environmental problems. *Anthropogenic Transformation of the Natural Environment*. 2021;7(1):6-34. (In Russ.). EDN: WKLFBN. <https://doi.org/10.17072/2410-8553-2021-1-6-34>
6. Popov V.N., Korneeva O.S., Iskusnykh O.Yu., Iskusnykh A.Yu. Innovative methods of processing poultry biowaste. *Bulletin of the Voronezh State University of Engineering Technologies*. 2020;82(1):194-200. (In Russ.). EDN: YHVGII. <https://doi.org/10.20914/2310-1202-2020-1-194-200>
7. Volodin V.V., Shubakov A.A., Volodina S.O., Shergina N.N., Vasilov R.G. Trends in the development of methods for recycling bark and bark and wood waste of long-term storage (review). *Agricultural Science Euro-North-East*. 2022;23(5):611-632. (In Russ.). EDN: BJQCVW. <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2022.23.5.611-632>
8. Pakusina A.P., Platonova T.P. Strategy for handling polymer waste. *Natural and Technical Sciences*. 2022;(2):50-55. (In Russ.). EDN: OLTFOF. <https://doi.org/10.25633/ETN.2022.02.01>
9. Molochny V.A. Biogas plant - production of biofuel and environmentally friendly organic fertilizers. New unique technology for obtaining energy from biomass. *Small Energy*. 2011;(3-4):71-76. (In Russ.).
10. Rice C.W., Pires C.B., Sarto M.V.M. Carbon cycle in soils: Dynamics and management. *Encyclopedia of soils in the environment*. M.J. Goss, M. Oliver (eds.). 2nd ed. Academic Press, 2023:219-227. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822974-3.00154-3>
11. Zvyagintsev D.G., Babeva I.P., Zenova G.M. *Soil biology*. Textbook. 3rd ed., rev. and add. Moscow: Moscow State University; 2005. 445 p. (In Russ.). EDN: RBBHHL.
12. Emtsev V.T., Mishustin E.N. *Microbiology*. Textbook for universities. 8th ed., revised. and add. M.: Yurayt; 2018. 428 p. (In Russ.). EDN: MEMJNM.
13. Zavarzin G.A., Kudeyarov V.N. Soil as the key source of carbonic acid and reservoir of organic carbon on the territory of Russia. *Herald of the Russian Academy of Sciences*. 2006;76(1):12-26. EDN: MHFLTP. <https://doi.org/10.1134/S1019331606010035>
14. Silva-Olaya A.M., Cerri C.E.P., La Scala N.Jr., Dias C.T.S., Cerri C.C. Carbon dioxide emissions under different soil tillage systems in mechanically harvested sugarcane. *Environ. Res. Lett*. 2013;8(1):015014. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/8/1/015014>
15. Eglin T. *Organic carbon in soils - meeting climate change and food security challenges*. ADEME; 2015. 32 p.
16. Zavarzin G.A., ed. *Carbon pools and flows in terrestrial ecosystems of Russia*. Moscow: Science; 2007. 315 p. (In Russ.). EDN: PZQYLX.
17. Lal R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Science*. 2004;304(5677):1623-1627. <https://doi.org/10.1126/science.1097396>
18. Zamolodchikov D.G., Grabowsky V.I., Chestnykh O.V. Dynamic pattern of carbon balance in the forests of federal districts of the Russian Federation. *Forest Science Issues*. 2019;2(S2):1-19. EDN: NXNVIU. <https://doi.org/10.31509/2658-607x-2019-2-2-1-19>
19. Ivanov A.L., Kulik K.N., Stolbovoy V.S., Khitrov N.B., Konyushkov D.E. Methodology for monitoring the carbon balance in soil ecosystems and agroforestry complexes under climate change. *Soils - a strategic resource of Russia*. Proceedings of the plenary reports of the 8th Congress of the Dokuchaev Soil Science Society and the School of Young Scientists on Soil Morphology and Classification. S.A. Shoba, I.Yu. Savin, E.M. Lapteva (eds.). Moscow, Syktyvkar: Institute of Biology of the Komi Scientific Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences; 2022:59-64. (In Russ.). EDN: MWEJAP.
20. Geider R.J., DeLucia E.H., Falkowski P.G., Finzi A., Grime J.P., Grace J., Kana T.M., LaRoche J., Long S.P., Osborne B.A. et al. Primary productivity of planet earth: biological determinants and physical constraints in terrestrial and aquatic habitats. *Global Change Biology*. 2001;7(8):849-882. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2486.2001.00448.x>
21. Kovda V.A. *Biogeochemistry of soil cover*. Moscow: Science; 1985. 263 p. (In Russ.). EDN: VXFJNS.
22. Friedlingstein P., Jones M.W., O'Sullivan M., Andrew R.M., Hauck J., Peters G.P., Peters W., Pongratz J., Sitch S., Le Quéré C. et al. Global Carbon Budget 2019. *Earth Syst. Sci. Data*. 2019;11(4):1783-1838. <https://doi.org/10.5194/essd-11-1783-2019>

23. Dalal R.C., Allen D.E. Greenhouse gas fluxes from natural ecosystems. *Australian J. of Botany*. 2008;56(5):369-407. <https://doi.org/10.1071/bt0712824>.
24. Kuzyakov Y. Priming effects: interactions between living and dead organic matter. *Soil Biol. Biochem*. 2010;42(9):1363-1371. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2010.04.003>
25. Buchkowski R.W., Schmitz O.J., Bradford M.A. Microbial stoichiometry overrides biomass as a regulator of soil carbon and nitrogen cycling. *Ecology*. 2015;96(4):1139-1149. <https://doi.org/10.1890/14-1327.1>
26. Sawada K., Funakawa S., Toyota K., Kosaki T. Potential nitrogen immobilization as influenced by available carbon in Japanese arable and forest soils. *Soil. Sci. Plant. Nutr.* 2015;61(6):917-926. <https://doi.org/10.1080/00380768.2015.1075364>
27. Blagodatskaya E., Kuzyakov Y. Mechanisms of real and apparent priming effects and their dependence on soil microbial biomass and community structure: critical review. *Biol. Fert. Soils*. 2008;45:115-131. <https://doi.org/10.1007/s00374-008-0334-y>
28. Schimel J.P., Weintraub M.N. The implications of exoenzyme activity on microbial carbon and nitrogen limitation in soil: a theoretical model. *Soil. Biol. Biochem*. 2003;35(4):549-563. [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(03\)00015-4](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(03)00015-4)
29. Morrissey E.M., Mau R.L., Schwartz E., McHugh Th.A., Dijkstra P., Koch B.J., Marks J.C., Hungate B.A. Bacterial carbon use plasticity, phylogenetic diversity and the priming of soil organic matter. *ISME J*. 2017;11(8):1890-1899. <https://doi.org/10.1038/ismej.2017.43>
30. Naji N.S., Jassim Y.A., Al-Amery S.M.H. Review Algae and Fungi on Soil Ecosystem. *Int. J. Adv. Multi-discip. Res. Stud.* 2024;4(1):1037-1041. <https://doi.org/10.62225/2583049X.2024.4.1.2337>
31. Jassey V.E.J., Walcker R., Kardol P., Geisen S., Heger Th., Lamentowicz M., Hamard S., Lara E. Contribution of soil algae to the global carbon cycle. *New Phytol.* 2021;234(1):64-76. <https://doi.org/10.1111/nph.17950>
32. Blaser M.J., Cardon Z.G., Cho M.K., Dangi J.L., Donohue T.J., Green J.L., Knight R., Maxon M.E., Northen T.R., Pollard K.S., Brodie E.L. Toward a predictive understanding of Earth's microbiomes to address 21st century challenges. *Am. Soc. Microbiol.* 2016;7(3):1-16. <https://doi.org/10.1128/mBio.00714-16>
33. Allison V.J., Condon L.M., Peltzer D.A., Richardson S.J., Turner B.L. Changes in enzyme activities and soil microbial community composition along carbon and nutrient gradients at the Franz Josef chronosequence, New Zealand. *Soil. Biol. Biochem*. 2007;39(7):1770-1781. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2007.02.006>
34. Amundson R., Berhe A.A., Hopmans J.W., Olson C., Sztein A.E., Sparks D.L. Soil and human security in the 21st century. *Science*. 2015;348(6235):1261071. <https://doi.org/10.1126/science.1261071>
35. Bai Y., Muller D.B., Srinivas G., Garrido-Oter R., Potthoff E., Rott M., Dombrowski N., Münch Ph. C., Spaepen S., Remus-Emsermann M. et al. Functional overlap of the Arabidopsis leaf and root microbiota. *Nature*. 2015;528:364-369. <https://doi.org/10.1038/nature16192>
36. Cairney J.W.G. Extramatrical mycelia of ectomycorrhizal fungi as moderators of carbon dynamics in forest soil. *Soil Biol. Biochem*. 2012;47:198-208. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2011.12.029>
37. Clemmensen K.E., Bahr A., Ovaskainen O., Dahlberg A., Ekblad A., Wallander H., Stenlid J., Finlay R.D., Wardle D.A., Lindahl B.D. Roots and associated fungi drive long-term carbon sequestration in boreal forest. *Science*. 2013;339(6127):1615-1618. <https://doi.org/10.1126/science.1231923>
38. Smith F.A., Grace E.J., Smith S.E. More than a carbon economy: nutrient trade and ecological sustainability in facultative arbuscular mycorrhizal symbioses. *New Phytol.* 2009;182(2):347-358. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2008.02753.x>
39. Smith S.E., Facelli E., Pope S., Smith F.A. Plant performance in stressful environments: interpreting new and established knowledge of the roles of arbuscular mycorrhizas. *Plant Soil*. 2010;326:3-20. <https://doi.org/10.1007/s11104-009-9981-5>
40. Glazunova D.M., Galitskaya P.Yu., Selivanovskaya S.Yu. Atmospheric carbon sequestration using microalgae. *Scientific Notes of Kazan University. Series: Natural Sciences*. 2024;166(1):82-125. (In Russ.). EDN: BEWUAK. <https://doi.org/10.26907/2542-064X.2024.1.82-125>
41. Averill C., Turner B.L., Finzi A.C. Mycorrhiza-mediated competition between plants and decomposers drives soil carbon storage. *Nature*. 2014;505:543-545. <https://doi.org/10.1038/nature12901>
42. Khabibullina F.M., Kuznetsova E.G., Vaseneva I.Z. Micromycetes in podzolic and bog-podzolic soils in the middle taiga subzone of Northeastern European Russia. *Eurasian Soil Science*. 2014;47(10):1027-1032. EDN: UFFURH. <https://doi.org/10.1134/S1064229314100044>
43. Matei G.-M., Matei S., Mocanu V. Assessing the role of soil microbial communities of natural forest ecosystem. *The EuroBiotech J*. 2020;4(1):1-7. <https://doi.org/10.2478/ebtj-2020-0001>
44. Hawkins H.-J., Cargill R.I. M., Van Nuland M.E., Hagen S.C., Field K.J., Sheldrake M., Soudzilovskaia N.A., Kiers E.T. Mycorrhizal mycelium as a global carbon pool. *Cur. Biol*. 2023;33(11):R560-R573. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2023.02.027>
45. Voronina E. Yu. Mycorrhizae in terrestrial ecosystems: ecological, physiological and molecular-genetic aspects of mycorrhizal symbioses. *Mycorrhizal symbiosis today*. Yu. T. Dyakov, Yu. V. Sergeev (eds.). Moscow: National Academy of Mycology; 2007;1:142-234. (In Russ.).
46. Miller R.M., Jastrow J.D., Reinhardt D.R. External hyphal production of vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi in pasture and tallgrass prairie communities. *Oecol*. 1995;103:17-23. <https://doi.org/10.1007/BF00328420>

47. Leake J.R., Donnelly D.P., Saunders E.M., Boddy L., Read D.J. Rates and quantities of carbon flux to ectomycorrhizal mycelium following ^{14}C pulse labeling of *Pinus sylvestris* seedlings: effects of litter patches and interaction with a wood-decomposer fungus. *Tree Physiol.* 2001;21(2-3):71-82. <https://doi.org/10.1093/treephys/21.2-3.71>
48. Mäkelä A., Tian X., Repo A., Ilvesniemi H., Marshall J., Minunno F., Näsholm T., Schiestl-Aalto P., Lehtonen A. Do mycorrhizal symbionts drive latitudinal trends in photosynthetic carbon use efficiency and carbon sequestration in boreal forests? *For. Ecol. Manage.* 2022;520:120355. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2022.120355>
49. Vogt K.A., Grier C.C., Meier C.E., Edmonds R.L. Mycorrhizal role in net primary production and nutrient cycling in *Abies amabilis* ecosystems in western Washington. *Ecol.* 1982;63(2):370-380. <https://doi.org/10.2307/1938955>
50. Godbold D.L., Hoosbeek M.R., Lukac M.M., Cotrufo F., Janssens I.A., Ceulemans R., Polle A., Velthorst E.J., Scarascia-Mugnozza G., De Angelis P., Miglietta F., Peressotti A. Mycorrhizal hyphal turnover as a dominant process for carbon input into soil organic matter. *Plant Soil.* 2006;281:15-24. <https://doi.org/10.1007/s11104-005-3701-6>
51. Nehls U., Wiese J., Guttenberger M., Hampp R. Carbon allocation in ectomycorrhizas: identification and expression analysis of an *Amanita muscaria* monosaccharide transporter. *Mol. Plant Microbe Interact.* 1998;11(3):167-176. <https://doi.org/10.1094/MPMI.1998.11.3.167>
52. Bhupinderpal-Singh, Nordgren A., Ottosson Löfvenius M., Högborg M.N., Mellander P.-E., Högborg P. Tree root and soil heterotrophic respiration as revealed by girdling of boreal Scots pine forest: extending observations beyond the first year. *Plant, Cell & Environment.* 2003;26(8):1287-1296. <https://doi.org/10.1046/j.1365-3040.2003.01053.x>
53. Brundrett M.C. Diversity and classification of mycorrhizal associations. *Biol. Rev.* 2004;79(3):473-495. <https://doi.org/10.1017/s1464793103006316>
54. Solaiman Z.M. Contribution of Arbuscular Mycorrhizal Fungi to Soil Carbon Sequestration. *Mycorrhizal fungi: use in sustainable agriculture and land restoration. Soil biology.* Berlin; Heidelberg: Springer; 2014;41:287-296. https://doi.org/10.1007/978-3-662-45370-4_18
55. Gupta Sh., Chaudhary S., Purushotham P., Aman A.S., Singh V. Exploring the Unseen: The Remarkable Role of Soil Microorganism. *Agri Articles.* 2023;3(6):651-655.
56. Berezhnaya V.V., Klykov A.G., Sidorenko M.L., Bykovskaya A.N., Bogdan P.M. The influence of bacterial complexes on the yield of spring wheat (*Triticum aestivum* L.). *Bulletin of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences.* 2019;(3):103-111. EDN: ISZTZK. <https://doi.org/10.25808/08697698.2019.205.3.018>
57. Rusakova D.A., Sidorenko M.L., Kim A.V. Characteristics of psychrotolerant *Pseudomonads* isolated from organogenic clay deposits of the Mramornaya cave (Primorskii krai). *Microbiology.* 2024;93(1):92-103. EDN: TMMDYM. <https://doi.org/10.1134/S0026261723603263>
58. Stone B.W., Li J., Koch B.J., Blazewicz S.J., Dijkstra P., Hayer M., Hofmockel K.S., Liu X.-J.A., Mau R.L., Morrissey E.M. et al. Nutrients cause consolidation of soil carbon flux to small proportion of bacterial community. *Nat. Commun.* 2021;12:3381. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-23676-x>
59. Sadunova A.V. General characteristics of bacteria of the genus *Bacillus*. *Student Scientific Forum. Proceedings of the 6th International Student Scientific Conference.* 2014. Available from: <https://scienceforum.ru/2014/article/2014001198?-ysclid=m64o2ridfe559064868> [Accessed 3rd September 2024]. (In Russ.).
60. Hoult J., ed. *Bergey's brief guide to bacteria.* Transl. from English by G.A. Zavarzin. 7th ed. Moscow: World; 1980. 495 p. (In Russ.).
61. Hartmans S., De Bont J.A.M. Stackebrandt E. The genus *Mycobacterium* - nonmedical. *The Prokaryotes.* New York: Springer; 2006:889-918. https://doi.org/10.1007/0-387-30743-5_33
62. Ivanov P.V. Changes in the composition, structure and properties of dispersed soils during activation of their natural microbial complex. Abstract of PhD thesis. Moscow, 2015. 24 p. (In Russ.). EDN: ZPYCKD.
63. Tsavkelova E.A., Egorova M.A., Petrova E.V., Netrusov A.I. Biogas production by microbial communities via decomposition of cellulose and food waste. *Appl. Biochem. Microbiol.* 2012;48(4):377-384. (In Russ.). EDN: RGBROJ. <https://doi.org/10.1134/s0003683812040126>
64. Zhou W., Wang J., Chen P., Ji C., Kang Q., Lu B., Li K., Liu J., Ruan R. Bio-mitigation of carbon dioxide using microalgal systems: advances and perspectives. *Renewable Sustainable Energy Rev.* 2017;76:1163-1175. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.065>
65. Cheah W.Y., Show P.L., Chang J.-S., Ling T.C., Juan J.C. Biosequestration of atmospheric CO₂ and flue gas-containing CO₂ by microalgae. *Bioresour. Technol.* 2015;184:190-201. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.11.026>
66. Mokronosov A.T. Global photosynthesis and vegetation biodiversity. *Carbon cycle in Russia.* Moscow: Moscow Branch of the State Scientific Research Center for Forecasting and Prevention of Geocological and Man-made Disasters at Kuban State University; 1999:19-62. (In Russ.).
67. Ivanovsky R.N., Lebedeva N.V., Keppen O.I., Chudnovskaya A.V. Release of photosynthetically fixed carbon as dissolved organic matter by anoxygenic phototrophic bacteria. *Microbiology.* 2020;89(1):28-34. EDN: FTHCKH. <https://doi.org/10.1134/S0026261720010075>
68. Mokronosov A.T., Gavrilenko V.F., Zhigalova T.V. *Photosynthesis. Physiological, ecological and biochemical aspects.* Moscow: Academia; 2006. 445 p. (In Russ.). EDN: QKOLXF.

69. Adachi O., Moonmangmee D., Toyama H., Yamada M., Shinagawa E., Matsushita K. New developments in oxidative fermentation. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 2003;60:643-653. <https://doi.org/10.1007/s00253-002-1155-9>
70. Kadyseva A.A., Bezukhova S.V., Gilmutdinov R.M. Biochemical oxidation of organic substances under anaerobic conditions. *Bulletin of Omsk State Agrarian University.* 2014;(1):42-46. (In Russ.). EDN: SYNTEB.
71. Kallistova A.Y., Merkel A.Y., Tarnovetskii I.Y., Pimenov N.V. Methane formation and oxidation by prokaryotes. *Microbiology.* 2017;86(6):671-691. EDN: RYGPKR. <https://doi.org/10.1134/S0026261717060091>
72. Jagadamma S., Mayes M.A., Steinweg M.J., Schaeffer S.M. Substrate quality alters microbial mineralization of added substrate and soil organic carbon. *Biogeosci.* 2014;11(17):4665-4678. <https://doi.org/10.5194/bg-11-4665-2014>
73. Paterson E., Gebbing T., Abel C., Sim A., Telfer G. Rhizodeposition shapes rhizosphere microbial community structure in organic soil. *New Phytol.* 2007;173(3):600-610. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2006.01931.x>
74. Rousk J., Bååth E. Growth of saprotrophic fungi and bacteria in soil. *FEMS Microbiol. Ecol.* 2011;78(1):17-30. <https://doi.org/10.1111/j.1574-6941.2011.01106.x>
75. Chen R., Senbayram M., Blagodatsky S., Myachina O., Dittert K., Lin X., Blagodatskaya E., Kuzyakov Y. Soil C and N availability determine the priming effect: microbial N mining and stoichiometric decomposition theories. *Glob. Chang. Biol.* 2014;20(7):2356-2367. <https://doi.org/10.1111/gcb.12475>
76. Hessen D.O., Ågren G.I., Anderson T.R., Elser J.J., De Ruiter P.C. Carbon sequestration in ecosystems: the role of stoichiometry. *Ecol.* 2004;85(5):1179-1192. <https://doi.org/10.1890/02-0251>
77. Kuzyakov Y., Friedel J.K., Stahr K. Review of mechanisms and quantification of priming effects. *Soil Biol. Biochem.* 2000;(11-12):1485-1498. [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(00\)00084-5](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(00)00084-5)
78. Shevtsova L.K., Chernikov V.A., Sychev V.G., Belichenko M.V., Rukhovich O.V., Ivanova O.I. Effect of long-term application of fertilizers on the composition, properties and structural characteristics of humic acids of the main soil types. Message 1. *Agrochemistry.* 2019;(10):3-15. (In Russ.). EDN: UAPMMI. <https://doi.org/10.1134/S0002188119100120>
79. Deng S., Zheng X., Chen X., Zheng Sh., He X., Ge T., Kuzyakov Y., Wu J., Su Y., Hu Y. Divergent mineralization of hydrophilic and hydrophobic organic substrates and their priming effect in soils depending on their preferential utilization by bacteria and fungi. *Biol Fertil Soils.* 2021;57:65-76. <https://doi.org/10.1007/s00374-020-01503-7>
80. Ananyeva N.D., Polyanskaya L.M., Stolnikova E.V., Zvyagintsev D.G. Ratio of fungal and bacterial biomass in forest soil profiles. *Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Biological Series.* 2010;(3):308-317. (In Russ.). EDN: LRGAEB
81. Tian X., Zhang Y., Liang Y., Fu R., Sun L., Yu Zh., Shi J., Sailike A., Hao H., Zhang W. Differential response of soil bacteria and fungi to carbon and respiration components in abandoned grasslands on the Loess Plateau, China. *Plant Soil.* 2024;504:347-365. <https://doi.org/10.1007/s11104-024-06628-4>

Информация об авторах

М.Л. Сидоренко – кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории почвоведения и экологии почв ФНЦ ДВО РАН.

О.В. Нестерова – кандидат биологических наук, заведующая Дальневосточной лабораторией системного контроля за глобальным изменением климата ДВФУ.

Information about the authors

M.L. Sidorenko – Candidate of Science (Biology), Leading Researcher, Laboratory of Soil Science and Soil Ecology, FSC FEB RAS.

O.V. Nesterova – Candidate of Science (Biology), Head of the Far Eastern Laboratory of Systematic Control of Global Climate Change, FEFU.

Статья поступила в редакцию 25.10.2024; одобрена после рецензирования 26.02.2025; принята к публикации 23.04.2025. The article was submitted 25.10.2024; approved after reviewing 26.02.2025; accepted for publication 23.04.2025.

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ

Редакция принимает рукописи статей с оригинальными результатами теоретических и экспериментальных исследований на русском, английском или французском языке. Объем рукописи строго не регламентируется. Рукописи проходят процедуру анонимного внешнего рецензирования и рекомендуются к печати редколлегией журнала на конкурсной основе. Оплата публикации производится после получения положительной рецензии и утверждения очередного номера на редколлегии. Не допускаются следующие нарушения правил публикационной этики: 1) фабрикация и фальсификация данных; 2) плагиат и самоплагиат; 3) подача рукописи в несколько журналов одновременно.

Материалы, предназначенные для публикации, могут быть представлены в редакцию одним из вариантов:

- присланы по электронной почте: izvestiya@sfedu.ru;
- принесены в редакцию лично по адресу: г. Ростов-на-Дону, пр. Стачки, 200/1, корп. 2, к. 110.

Все материалы проходят анонимное рецензирование. Рукопись, направленная авторам на доработку, должна быть возвращена в исправленном виде в течение одного месяца. По истечении этого срока она рассматривается как вновь поступившая. К переработанной рукописи необходимо приложить письмо от авторов, описывающее сделанные исправления и содержащее ответы на замечания рецензента. Рукописи авторам не возвращаются. Редколлегия вправе не вступать в переписку с автором относительно причин отказа в публикации статьи. После выхода номера высылается один авторский экземпляр журнала на статью. Дополнительные экземпляры могут быть высланы по заявке авторов за отдельную плату. По вопросам, связанным с подготовкой и рассмотрением статей, можно обращаться в редакцию: тел. +7 (863) 218 40 00 доб. 11093, доб. 11094; e-mail: izvestiya@sfedu.ru

Статья оформляется в формате .doc или .docx (MS Word) через 1,5 интервала, шрифтом Times New Roman размером 14 пт. Поля со всех сторон – 2,5 см. Не следует использовать знаки принудительного переноса и дополнительных пробелов, смешивать русские и латинские буквы в одном слове, набирать кириллицу сходными по начертанию латинскими буквами и наоборот. Текст должен быть написан ясным языком с понятной логикой изложения. Следует соблюдать единообразие в терминах, обозначениях, системах единиц измерения. Рекомендуется не перегружать текст сокращениями и аббревиатурами. Все сокращения должны быть расшифрованы в тексте при их первом упоминании.

К статье прилагаются на русском и английском языках следующие данные:

- сведения о каждом из авторов (фамилия, имя, отчество, место работы, должность, учёная степень, звание, домашний, служебный и электронный адреса, ORCID, телефоны). Если авторов несколько, указать, с кем вести переписку;
- аннотация (1500–2000 знаков/150–200 слов);
- название статьи и фамилии авторов;
- ключевые слова (8–10);
- индекс УДК.

Единицы измерения следует давать в соответствии с Международной системой единиц (СИ).

Таблицы должны иметь заголовки на русском и английском языках; в них допускаются только общепринятые сокращения. Желательно, чтобы таблица не превышала одной страницы текста.

Надписи на рисунках должны быть на русском языке. Каждый рисунок должен иметь подрисуночную подпись на русском и английском языках. В печатной версии журнала публикуются черно-белые рисунки в градации серого тона. В электронном варианте они могут быть цветными, однако должны быть различимыми и понятными при конвертации в оттенки серого тона для печатной версии. Цветные рисунки могут быть размещены в печатной версии за дополнительную плату. На все рисунки и таблицы должны быть ссылки в тексте статьи.

Правила набора формул

Нумеруются только те формулы, на которые есть ссылки в тексте. Не допускается вставка формул в виде изображений. Все переменные, обозначаемые латинскими буквами, набираются курсивом. Векторы – прямым полужирным шрифтом без стрелочки. Матрицы – прописными буквами прямым полужирным шрифтом, если это не приводит к путанице обозначений. Греческие буквы и математические символы типа \sin , \ln , Re , \log , \max , \exp – прямым шрифтом. Десятичные дроби набираются с использованием запятой (а не точки).

Список источников

15–30 наименований – для обычных статей и 100 – для обзоров. Источники должны быть доступными для российских читателей и содержать DOI и EDN (при наличии). Все ссылки даются на языке оригинала и нумеруются в соответствии с порядком их появления в статье, ссылки в тексте – в квадратных скобках, общий список источников – в конце статьи. Допускаются ссылки только на опубликованные материалы. При ссылке на электронный ресурс указывается дата обращения. Каждый пункт списка должен содержать ссылку на один источник. Библиография оформляется согласно ГОСТ 7.0.5-2008. Список литературы следует продублировать на английском языке. Желательны ссылки на близкие по содержанию статьи в журнале «Известия вузов. Северо-Кавказский регион».

Более подробно правила для авторов см. на сайте: <https://izvestiya.sfedu.ru/>

Над номером работали: Т.А. Ватульян, Л.С. Ворович, Е.М. Колосова, О.В. Назаренко, М.С. Шипитко

Подписано в печать 19.06.2025. Выход в свет 24.06.2025. Формат 60×84 1/8. Бумага офсетная.
Шрифт Times. Усл. печ. л. 19,53. Уч.-изд. л. 19,92. Тираж 250 экз. Заказ № 10017.

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

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

Отпечатано в отделе полиграфической, корпоративной и сувенирной продукции
Издательско-полиграфического комплекса КИБИ МЕДИА ЦЕНТРА ЮФУ,
344090, г. Ростов-на-Дону, пр. Стачки, 200/1, корп. 1, к 104, тел. +7 (863) 243-41-66

Magazine released: T.A. Vatulyan, L.S. Vorovich, E.M. Kolosova, O.V. Nazarenko, M.S. Shipitko

Signed print June 19, 2025. The publication June 24, 2025. Format 60×84 1/8. Offset paper. Font Times.
Conv. print. sheets 19.53. Publ. sign. 19.92. Edition 250 copies. Order number 10017.

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