

ИЗВЕСТИЯ
ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

*Северо-Кавказский
регион*

ЕСТЕСТВЕННЫЕ

НАУКИ

2026

1

Журнал основан в 1972 г. Ю.А. Ждановым

Главная редакция:

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

Редакционная коллегия:

М.А. Боровская – главный редактор, 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 ВНЦ РАН, Россия
Г.Г. Матишов – академик РАН, доктор геол.-мин. наук, профессор, Федеральный исследовательский центр Южный научный центр РАН, Россия
В.И. Минкин – академик РАН, доктор хим. наук, профессор, Южный федеральный университет, Россия
М.Х. Рабаданов – доктор физ.-мат. наук, профессор, Дагестанский государственный университет, Россия
Е.В. Абакумов – доктор биол. наук, профессор, профессор РАН, Санкт-Петербургский 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 физ.-мат. наук, профессор, Южный федеральный университет, Россия
М.Ю. Жуков – доктор физ.-мат. наук, профессор, Южный федеральный университет, Россия
А.Н. Карапетянц – доктор физ.-мат. 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, Беларусь
В.С. Рабинович – доктор физ.-мат. наук, профессор, Национальный политехнический институт, Мексика
М.А. Сазыкина – доктор биол. наук, доцент, Южный федеральный университет, Россия
В.И. Силаев – доктор геол.-мин. наук, Институт геологии им. Н.П. Юшкина Коми НЦ УрО РАН, Россия
В.Н. Труфанов – доктор геол.-мин. наук, профессор, Южный федеральный университет, Россия
П. Фатталь – доктор наук, профессор, Университет Нанта, Франция
Ю.А. Федоров – доктор геогр. наук, профессор, Южный федеральный университет, Россия
А.Д. Хаванский – 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, Russian Academy of Sciences, Doctor of Geology and Mineralogy, Professor, Federal Research Center the Southern Scientific Center, Russian Academy of Sciences, Russia
V.I. Minkin - Academician, Russian Academy of Sciences, Doctor of Chemistry, Professor, Southern Federal University, Russia
M.H. Rabadanov - Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Dagestan State University, Russia
E.V. Abakumov - Doctor of Biology, Professor, Professor, Russian Academy of Sciences, St. Petersburg 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 Biology, 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
D.V. Karelin - Doctor of Biology, Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, Russia
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 Biology, Professor, Southern Federal University, Russia
Valerii I. Silaev - Doctor of Geology and Mineralogy, Komi Science Centre of the Ural Branch, 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. Khavanskiy - 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: 10.18522/1026-2237-2026-1

Регистрационный номер
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
№ 1 (229) 2026 г.

Registration number
PI No. FS 77 - 77252 dated 25.11.2019
issued Federal Service for Supervision
of Communications, Information Technology,
and Mass Media
Science magazine
Published since 1973.
4 issues per a year
No. 1 (229) 2026

ЕСТЕСТВЕННЫЕ НАУКИ

NATURAL SCIENCE

СОДЕРЖАНИЕ

CONTENTS

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ

PHYSICAL AND MATHEMATICAL SCIENCES

<i>Бараева Д.С., Сумбатян М.А.</i> Об эффективном алгоритме расчета акустических параметров в помещении на основе метода трассировки лучей 4	4
<i>Ерусалимский Я.М.</i> Об эквивалентных преобразованиях древовидных сетей 14	14
<i>Зубов Л.М.</i> Взаимодействие изолированной дислокации и распределенных винтовых дислокаций при больших деформациях упругого цилиндра 20	20
<i>Коханов П.В.</i> Численное исследование осесимметричных конвективных движений в вертикальном пористом цилиндре 27	27
<i>Чеголин А.П.</i> Применение гиперсингулярных интегралов для обращения интегральных операторов в неэллиптическом случае 36	36
<i>Vatulyan A.O., Dudarev V.V., Nesterov S.A.</i> Reconstruction of Thermomechanical Characteristics of Inhomogeneous Pipe in Classes of Linear and Quadratic Functions 44	44

<i>Baraeva D.S., Sumbatyan M.A.</i> On Efficient Algorithm for Calculation of Acoustical Parameters in Rooms on the Basis of the Ray Tracing Method 4	4
<i>Erusalimskiy Ia.M.</i> About Equivalent Transformations of Tree-Like Networks 14	14
<i>Zubov L.M.</i> Interaction Between an Isolated Dislocation and Distributed Screw Dislocations under Large Deformations of an Elastic Cylinder 20	20
<i>Kokhanov P.V.</i> Numerical Investigation of Axisymmetric Convective Motions in a Vertical Porous Cylinder 27	27
<i>Chegolin A.P.</i> Application of Hypersingular Integrals for the Inversion of Integral Operators in the Non-Elliptic Case 36	36
<i>Vatulyan A.O., Dudarev V.V., Nesterov S.A.</i> Reconstruction of Thermomechanical Characteristics of Inhomogeneous Pipe in Classes of Linear and Quadratic Functions 44	44

НАУКИ О ЗЕМЛЕ

SCIENCES OF EARTH

<i>Булгакова В.В.</i> Анализ многолетних метеорологических трендов в Республике Башкортостан (1980–2021 годы) 53	53
<i>Бутенко М.Н.</i> Содержание биогенных элементов (азот и фосфор) в литоральной зоне озера Арахлей (Забайкальский край) в 2017 году 66	66

<i>Bulgakova V.V.</i> Analysis of Long-Term Meteorological Trends in the Republic of Bashkortostan (1980-2021) 53	53
<i>Butenko M.N.</i> The Content of Biogenic Elements (Nitrogen and Phosphorus) in the Littoral Zone of Lake Arakhley (Trans-Baikal Territory) in 2017 66	66

Габова В.Н. Применение космических снимков высокого пространственного разрешения для изучения малых водохранилищ	76	Gabova V.N. The Use of High Spatial Resolution Satellite Images for Small Reservoirs Studying	76
Дорошенко В.В., Хованская А.А., Болгов И.А. Картографирование постпирогенного восстановления ленточного бора на песках	87	Doroshenko V.V., Khovanskaya A.A., Bolgov I.A. Mapping of Post-Pyrogenic Restoration of Ribbon Bor on Sands	87
Журавлева О.В., Каранин А.В., Сухова М.Г. Потенциал ландшафтов Республики Алтай для предоставления экосистемных услуг в условиях изменений окружающей среды	94	Zhuravleva O.V., Karanin A.V., Sukhova M.G. The Potential of Altai Republic Landscapes to Deliver Ecosystem Services under Environmental Changes	94
Леонтьева Е.В., Квачев В.Н. Гидрогеологическое районирование меловых подземных вод северо-восточной части Донецко-Донского артезианского бассейна.....	103	Leontyeva E.V., Kvachev V.N. Hydrogeological Zoning of Cretaceous Groundwaters in the North-eastern Part of the Donets-Don Artesian Basin.....	103
Филимонов В.Ю., Ловцкая О.В., Танакова А.Ю., Васильева И.Е. Определение массового расхода консервативных загрязнителей для участков малых рек с высокой антропогенной нагрузкой	118	Filimonov V.Yu., Lovtskaya O.V., Tanakova A.Yu., Vasilyeva I.E. Determination of Mass Flow Rate of Conservative Pollutants for Small River's Sections with High Anthropogenic Load.....	118
Zaburaeva Kh.Sh. Traditional Folk Crafts and Handicrafts of the North-East Caucasus in the Context of Ecotourism Development	133	Zaburaeva Kh.Sh. Traditional Folk Crafts and Handicrafts of the North-East Caucasus in the Context of Ecotourism Development.....	133

БИОЛОГИЧЕСКИЕ НАУКИ

Майорова Л.А., Варченко Л.И., Латышева Л.А. Оптимальные условия произрастания кедрово-широколиственных лесов в Приморском крае	144	Mayorova L.A., Varchenko L.I., Latysheva L.A. Optimal Growing Conditions Cedar-Broad-Leaved Forests in Primorsky Territory	144
Наими О.И., Матюгин В.А., Дубинина М.Н., Лыхман В.А. Влияние засоления на агрохимические свойства и ферментативную активность черноземных почв	155	Naimi O.I., Matyugin V.A. Dubinina M.N., Lykhtman V.A. The Influence of Salinization on Agrochemical Properties and Enzymatic Activity of Chernozem Soils.....	155

BIOLOGICAL SCIENCES

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ

PHYSICAL AND MATHEMATICAL SCIENCES

Научная статья

УДК 534.2

<https://doi.org/10.18522/1026-2237-2026-1-4-13>

ОБ ЭФФЕКТИВНОМ АЛГОРИТМЕ РАСЧЕТА АКУСТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ В ПОМЕЩЕНИИ НА ОСНОВЕ МЕТОДА ТРАССИРОВКИ ЛУЧЕЙ

Дарья Сергеевна Бараева¹, Межлум Альбертович Сумбатян²✉

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

¹baraeva@sfedu.ru

²masumbatyan@sfedu.ru✉, <https://orcid.org/0000-0003-3653-4867>

Аннотация. Изучается метод трассировки лучей (МТЛ) в задаче определения акустических параметров помещения. Подробно рассматривается инженерный подход, использующий теорию Сэбина – Эйринга для определения гулкости помещения (RT), а также осуществляется развитие данной теории на основе гипотезы баланса энергии ранних и поздних отражений. В этом приближении удается построить в явном виде выражение для прозрачности звука, разборчивости речи, характерного времени звучания. Приведено описание реализации одной из модификаций МТЛ – метода пересечения ячеек. Он позволяет существенно ускорить работу МТЛ, если на этапе предпроцессинга в рабочей области помещения разместить дискретную сетку с равными ячейками в форме параллелепипедов, размер которых зависит от геометрии и числа отражающих поверхностей. При распространении любого звукового луча в помещении такой подход позволяет при поиске точки последующего отражения вместо перебора всех имеющихся в помещении отражателей проверять только те, которые находятся в той же ячейке, что и луч. Заметим, что при отражении звукового луча от граничных плоскостей учитывается не только звукопоглощение, но и рассеяние (диффузия) звуковой волны. Это заметно улучшает точность расчетов акустических параметров. Одновременное развитие инженерного подхода и точного алгоритма позволяет провести сравнение между ними для лучшей оценки точности расчетов. Оба алгоритма тестируются в малой студии для прослушивания музыки, геометрия которой содержит 310 вершин и 164 отражателя.

Ключевые слова: акустика помещений, трассировка лучей, метод пересечения ячеек, акустические параметры

Для цитирования: Бараева Д.С., Сумбатян М.А. Об эффективном алгоритме расчета акустических параметров в помещении на основе метода трассировки лучей // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2026. № 1. С. 4–13. <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2026-1-4-13>

Благодарности: М.А. Сумбатян выражает признательность Российскому научному фонду (РНФ) за финансовую поддержку проекта № 25-21-00139, выполняющегося в Южном федеральном университете.

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

Original article

ON EFFICIENT ALGORITHM FOR CALCULATION OF ACOUSTICAL PARAMETERS IN ROOMS ON THE BASIS OF THE RAY TRACING METHOD

Daria S. Baraeva¹, Mezhlum A. Sumbatyan²✉

© Бараева Д.С., Сумбатян М.А., 2026

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

¹ baraeva@sfnu.ru

² masumbatyan@sfnu.ru[✉], <https://orcid.org/0000-0003-3653-4867>

Abstract. The present paper is devoted to the application of the ray-tracing method (RTM) to determine acoustic parameters of a room. We give a detailed examination of an engineering approach based on the Sabine-Eyring theory for calculating the reverberation time (RT) of rooms. Furthermore, we extend this theory to compute other acoustic parameters, based on the hypothesis of energy balance between early and late reflections. Within this framework, some explicit expressions are derived for sound clarity, speech intelligibility, and characteristic duration of the sound. The paper describes the implementation of a specific modification of the RTM - the cell-intersection method. This method significantly accelerates the RTM algorithm by introducing a discrete grid at the pre-processing stage across the room's working area, for example - with equal cells in the form of parallelepipeds, the size of which depends on the geometry and the number of reflecting surfaces. When a sound ray propagates through the room, this approach allows us to trace only for reflectors located within the same cell as the propagating ray - instead of iterating through all reflectors in the room, when determining the next reflection point. It is worth noticing that, when a sound ray reflects from the boundary planes, both sound absorption and sound scattering (diffusion) of the waves are taken into account. This considerably improves the accuracy of the calculations of acoustic parameters. The simultaneous development of the engineering approach and the accurate algorithm enables a comparative analysis, to better assess the precision of the calculations. Both algorithms are tested in a small music listening studio, whose geometry contains 310 vertices and 164 reflectors.

Keywords: room acoustics, ray tracing, cell intersection method, acoustic parameters

For citation: Baraeva D.S., Sumbatyan M.A. On Efficient Algorithm for Calculation of Acoustical Parameters in Rooms on the Basis of the Ray Tracing Method. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2026;(1):4-13. (In Russ.). <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2026-1-4-13>

Acknowledgments: M.A. Sumbatyan is thankful to the Russian Science Foundation (RSF) for the financial support by the project No. 25-21-00139, performing in 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

Одна из основных задач акустики помещений – определение ее акустических параметров. Их вычисление сводится к исследованию распространения звуковых волн в замкнутом пространстве известной формы и с заданными физическими свойствами отражающих поверхностей. При этом рассматриваются волны, частота которых достаточно близка к диапазону слышимых человеческим ухом, – шесть основных октавных частотных полос с центральными частотами от 125 Гц до 4 кГц [1, 2]. В данном случае длина волны $\lambda = c/f$, где c – скорость распространения звука в воздухе; f – частота, Гц, достаточно малая по сравнению с характерными размерами исследуемых помещений. Это позволяет использовать асимптотические коротковолновые методы, что даёт возможность осуществить расчеты в реальном масштабе времени на персональном компьютере. Точность такого подхода уменьшается в области низких частот, поскольку длина волны здесь сопоставима с размером помещения.

К асимптотическим коротковолновым методам относится лучевой [3]. В рамках данного подхода звуковые волны моделируются в виде прямолинейных звуковых лучей, которые при взаимодействии с любой поверхностью отражаются от нее с углом отражения, равным углу падения. Часть энергии звукового луча, определяемая коэффициентами звукопоглощения конкретной отражающей поверхности [4], может быть поглощена в процессе отражения. При этом отражающие поверхности задаются плоскими многоугольниками и любой имеющийся криволинейный отражатель должен быть приближен набором плоских. Это связано с тем, что отражение, учитывающее кривизну поверхности, ещё недостаточно исследовано. В этой области имеются отдельные публикации [5], однако пока еще нет надёжных алгоритмов для учета кривизны отражающих поверхностей.

В числе широко применяемых алгоритмов, относящихся к лучевому методу, – метод трассировки лучей (МТЛ, ray tracing method) [2, 6, 7]. Он осуществляет расчет как траектории лучей, так и переносимой ими волновой энергии, что позволяет произвести вычисление наиболее значимых акустических параметров [8–10].

Краткий обзор простейших моделей, приводящих к явным аналитическим результатам

Рассмотрим помещение объемом V с общей площадью отражающих поверхностей S . В инженерной практике гулкость помещения (RT) рассчитывают по приближенной инженерной формуле Сэбина – Эйринга, которая позволяет сделать быструю оценку гулкости без долгих компьютерных расчетов. Ее можно вывести следующим образом.

Пусть звуковой луч выпущен из точки A_0 , расположенной внутри помещения в виде простейшего прямоугольного параллелепипеда со сторонами a, b, d (рис. 1). Далее луч распространяется внутри помещения в некотором направлении так, что вдоль траектории своего движения он отражается зеркально в последовательных точках A_1, A_2, A_3, A_4, A_5 и т.д. Пусть для простоты коэффициент звукопоглощения всех отражающих поверхностей α ($0 < \alpha < 1$) один и тот же. Тогда после каждого отражения звуковая энергия луча уменьшится в $(1 - \alpha)$ раз. Соответственно, после n отражений она уменьшится в $(1 - \alpha)^n$ раз. Обозначим через ℓ_m среднюю длину пробега луча между двумя соседними отражениями. Тогда число отражений $n = cT/\ell_m$, где T – время пролета луча; c – скорость звука в воздухе.

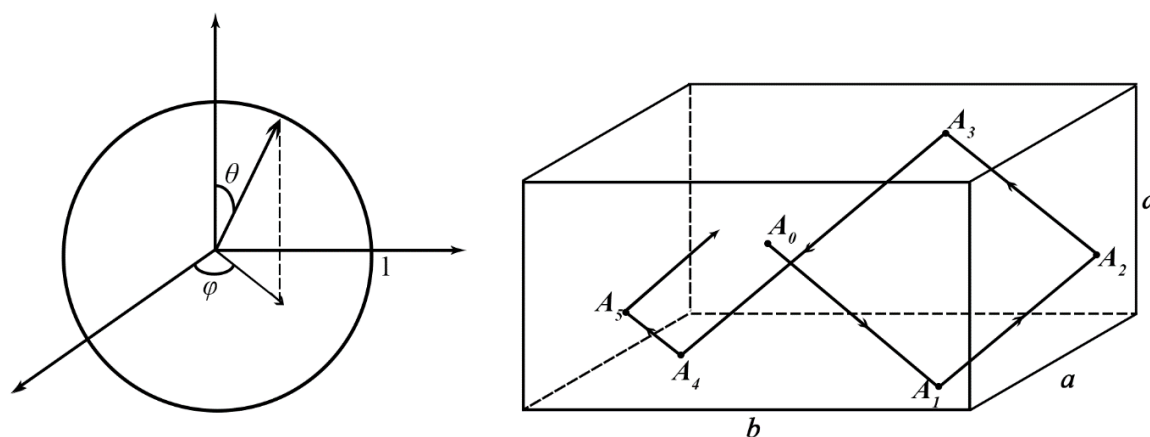


Рис. 1. Звуковой луч в проекциях на оси в системе координат, связанной с единичной сферой (слева).
 Схема распространения звуковых лучей в помещении в форме параллелепипеда (справа)
 / Fig. 1. Sound ray in projections on the axes in the coordinate system associated with the unit sphere (left).
 Scheme of sound ray propagation in a parallelepiped room (right)

Временем реверберации $T_{60} = RT$ (reverberation time) называется время, за которое энергия звукового сигнала уменьшается в 10^6 раз [1, 11]. Если ввести понятие децибела (дБ) любой положительной величины F как $10 \lg F$, то RT равно времени, за которое сигнал уменьшится на 60 дБ:

$$10 \lg[(1 - \alpha)^n] = -60, \sim n \lg(1 - \alpha) = -6, \sim \frac{cT_{60}}{\ell_m} = -\frac{6}{\lg(1 - \alpha)}, \sim T_{60} = -\frac{6\ell_m}{c \lg(1 - \alpha)}, \quad (1)$$

где \lg – десятичный логарифм.

Очевидно, для определения времени реверберации $RT = T_{60}$ в (1) нужно знать параметр ℓ_m , т.е. расчет гулкости сводится к определению среднего времени пролета звукового луча между двумя последовательными отражениями. Эта величина определяется геометрией помещения.

В статистической теории, разработанной У.К. Сэбином, среднее время пролета ℓ_m вычисляется согласно рис. 1. Свяжем с источником звука A_0 сферическую систему координат, в которой направление луча определяется сферическими углами (θ, φ) , где первый из них – азимутальный

угол между лучом и вертикальной осью, а второй – полярный угол в проекции на горизонтальную плоскость. Пусть из источника выходит $M = M_\theta M_\varphi$ лучей в полном секторе телесного угла 4π , который равен площади сферы единичного круга (рис. 1). Рассмотрим малый сектор с углами раствора $d\theta$ и $d\varphi$, который на сфере единичного радиуса вырезает малую область площадью $\sin \theta d\theta d\varphi$. Число лучей в этом секторе равно $M \sin \theta d\theta d\varphi / 4\pi$. На интервале времени t полный путь одного луча равен ct . Из рис. 1 видно, что для больших t число отражений луча от сторон параллелепипеда можно представить в виде $n = ct \left(\frac{\sin \theta \cos \varphi}{a} + \frac{\sin \theta \sin \varphi}{b} + \frac{\cos \theta}{d} \right)$.

При этом полное число отражений всех лучей, выпущенных в элементарный сектор $d\theta d\varphi$, равно $nM \sin \theta d\theta d\varphi / 4\pi$. В итоге полное число отражений в полном телесном угле раствора получается интегрированием этого выражения по углам θ и φ , оба из которых возьмем на интервале $(0, \pi/2)$, т.е. только в первом квадранте; при этом результат нужно умножить на число квадрантов, т.е. на 8. Таким образом, полное число отражений всех лучей за время t вычисляется по формуле

$$\begin{aligned} \frac{8M}{4\pi} \int_0^{\pi/2} \int_0^{\pi/2} n \sin \theta d\theta d\varphi &= \frac{2Mct}{\pi} \int_0^{\pi/2} \int_0^{\pi/2} \left(\frac{\sin \theta \cos \varphi}{a} + \frac{\sin \theta \sin \varphi}{b} + \frac{\cos \theta}{d} \right) \sin \theta d\theta d\varphi = \\ &= \frac{Mct}{2} \left(\frac{1}{a} + \frac{1}{b} + \frac{1}{d} \right) = \frac{MctS}{4V}, \end{aligned} \quad (2)$$

где $V = abd$ – объем помещения; $S = 2(ab + ad + bd)$ – полная площадь отражающих поверхностей. Теперь, когда известно полное число отражений всех лучей (2) и полный путь Mct , пройденный всеми лучами, средняя длина пробега луча находится как отношение второго из этих чисел к первому:

$$\ell_m = \frac{4V}{S}. \quad (3)$$

Подставляя (3) в (1), для времени реверберации получаем

$$T_{60} = -\frac{6\ell_m}{c \lg(1-\alpha)} = -\frac{24V}{cS \lg(1-\alpha)} = -\frac{24V \ln 10}{cS \lg(1-\alpha)} = -\frac{55,26V}{cS \lg(1-\alpha)} = -\frac{0,161V}{S \lg(1-\alpha)}, \quad (4)$$

если учесть, что скорость звука в воздухе при нормальных атмосферных условиях и температуре 22°C равна 344 м/с. Объем и площадь в (4) берутся в системе СИ. Считается, что формула (4) справедлива для помещений произвольной геометрии, если под величинами V и S понимать полный объем помещения и полную площадь отражающих поверхностей.

Формула (4) называется формулой Сэбина – Эйринга (S-E), так как сам Сэбин вывел её только в приближении малого коэффициента звукопоглощения α , когда $\ln(1 - \alpha) \approx -\alpha$. Вывод общего случая принадлежит К.Ф. Эйрингу. Если коэффициенты звукопоглощения различны для материалов разных поверхностей, то средний коэффициент звукопоглощения будет иметь вид $\alpha_0 = \frac{\sum_{j=1}^{n\alpha} \alpha_j S_j}{\sum_{j=1}^{n\alpha} S_j} = \frac{\sum_{j=1}^{n\alpha} \alpha_j S_j}{S}$, где $n\alpha$ – общее число различных материалов отделки; S – полная площадь отражающих поверхностей.

Пусть затухание энергии звукового луча происходит, помимо звукопоглощения при отражениях, также за счет вязкого трения в воздухе по закону $e^{-\mu ct}$, где μ – коэффициент вязкого трения, имеющий размерность м^{-1} . С включением дополнительного множителя в этом более общем случае, учитывая равенство $n = cT/\ell_m$, вместо (1) получим

$$\begin{aligned} (1 - \alpha)^n e^{-\mu ct} &= 10^{-6}, \sim n \lg(1 - \alpha) - \mu cT \lg e = -6 \sim \\ &\sim \frac{cT_{60}}{\ell_m} \lg(1 - \alpha) - \mu cT \lg e = -6, \sim T_{60} = \frac{6}{\mu c \lg e - \frac{c}{\ell_m} \lg(1-\alpha)}, \end{aligned}$$

что с учетом равенства (3) можно переписать в виде

$$T_{60} = \frac{6 \ln 10}{c \left[\mu - \frac{S}{4V} \ln(1-\alpha) \right]} = \frac{24V \ln 10}{c [4\mu V - S \ln(1-\alpha)]}, \sim T_{60} = \frac{0,161V}{4\mu V - S \ln(1-\alpha_0)}. \quad (5)$$

В [11] параметры α и μ зависят от частоты, при этом α – еще и от материала отделки, а μ – от влажности воздуха. Простейшие полуэмпирические приближения для μ при нормальной температуре имеют вид

$$\mu = \frac{170}{h} f^2 10^{-4} \text{М}^{-1}, \mu = \frac{275}{h} f^{1,7} 10^{-4} \text{М}^{-1}, \quad (6)$$

f – в килогерцах, h – в процентах. Сравнение двух приближений (6) для $h = 50\%$ – на рис. 2. На практике эти кривые близки.

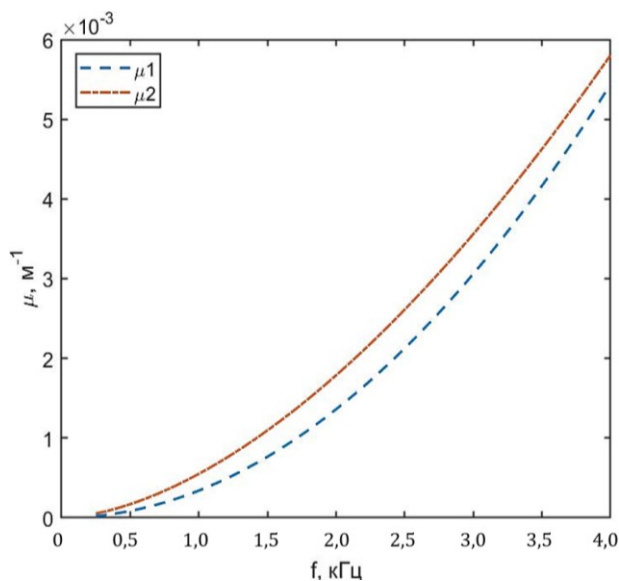


Рис. 2. Два варианта эмпирической зависимости коэффициента вязкого трения в воздухе от частоты при $h = 50\%$: кривые 1 и 2 в формуле (6) / Fig. 2. Two variants of the empirical dependence of the viscous friction coefficient versus frequency in air at $h = 50\%$: curves 1 and 2 in formula (6)

на многоугольнике с номером j еще две вершины – \mathbf{P}_{1j} и \mathbf{P}_{2j} , вычислим вектор нормали в данной вершине через векторное произведение двух векторов, лежащих в плоскости этого многоугольника:

$$\mathbf{N}_j = \{(\mathbf{P}_{1j} - \mathbf{P}_{0j}) \times (\mathbf{P}_{2j} - \mathbf{P}_{0j})\} / |(\mathbf{P}_{1j} - \mathbf{P}_{0j}) \times (\mathbf{P}_{2j} - \mathbf{P}_{0j})|. \quad (9)$$

Формула (9) справедлива при обходе вершин многоугольника против часовой стрелки, если смотреть с конца вектора нормали.

Подставив формулу (7) в (8), получим
$$V = \frac{1}{6} |[\sum_j (\mathbf{P}_{0j} \cdot \mathbf{N}_j) \mathbf{N}_j \cdot (\sum_k \mathbf{P}_k \times \mathbf{P}_{k+1})]|.$$

Очевидно, что при замене вектора \mathbf{N}_j на $-\mathbf{N}_j$ значение выражения не изменится.

Расчет акустических параметров на основе лучевого метода

Расчет времени реверберации по формуле S-E (5) является слишком грубым, так как она не учитывает геометрию помещения и рассеяние волн (диффузию) при отражениях, а также неравномерность звукопоглощения.

Если энергию падающей на поверхность акустической волны положить равной единице, то после отражения она равна сумме поглощённой (E_a) и отражённой (E_r) энергий: $E_a + E_r = 1$. Сама отражённая энергия состоит из зеркально отражённой (E_m) и диффузно отражённой (E_d): $E_m + E_d = E_r$. Энергия диффузно отражённой волны зависит от коэффициента диффузии δ ($0 < \delta < 1$), который, как и коэффициент звукопоглощения, определяется материалом отделки: $E_d = \delta E_r = \delta(1 - \alpha)$. Таким образом, энергия чисто зеркального отражения $E_m = (1 - \delta)(1 - \alpha)$. Закон диффузии принят в форме Ламбера [10, 11]. Обычно учет диффузии в расчётах уменьшает параметр гулкости, приближая расчеты на основе МТЛ к результатам натуральных измерений.

Построение импульсного отклика помещения состоит в записи в отдельном файле всех зарегистрированных в приемнике сигналов с соответствующим временем пролета луча $t = t_k$ и его энергией $E = E_k$. На основе импульсного отклика помещения для каждой из шести базовых частот находится время реверберации по кривой Шрёдера [13], которая связана с импульсным откликом, по формуле

$$E_S(t) = \int_t^\infty E(\tau) d\tau. \quad (10)$$

Формула (5) для расчета гулкости помещения – слишком грубая, ибо она не учитывает взаимное расположение источника и приемника звука.

Стоит отметить, что вычисление RT в теории S-E требует информации о площадях отражающих поверхностей и объеме. Приведем здесь известные в литературе быстрые методы вычисления этих характеристик.

Площадь j -го отражающего многоугольника выражается через его вершины, взятые последовательно при любом его обходе [12]:

$$S_j = \frac{1}{2} |\mathbf{N}_j \cdot (\sum_k \mathbf{P}_k \times \mathbf{P}_{k+1})|, \quad (7)$$

где \mathbf{P}_k — вектор, идущий из начала координат в вершину с номером k ; \mathbf{N}_j — вектор единичной нормали к плоскости многоугольника с номером j . Объём помещения [12]:

$$V = \frac{1}{3} |\sum_j (\mathbf{Q}_j \cdot \mathbf{N}_j) S_j|, \quad (8)$$

где \mathbf{Q}_j — произвольная вершина многоугольника с номером j .

Зафиксировав вершину $\mathbf{Q}_j = \mathbf{P}_{0j}$ и взяв

Очевидно, что кривая Шрёдера представляет собой монотонно убывающую функцию от времени. По ней вычисляется интервал времени t_{30} , за который $E_S(t)$ спадает на 30 дБ. Далее принимается, что t_{30} вдвое меньше, чем интервал, за который энергия Шрёдера спадает на 60 дБ. Так получается оценка времени реверберации RT:

$$RT = T_{60} \approx T_{30} = 2t_{30}. \quad (11)$$

Похожий смысл, что и параметр RT, имеет параметр EDT (early decay time) – время раннего затухания. Для него вычисляется время t_{10} спада кривой Шрёдера на 10 дБ, по нему делается оценка раннего затухания по формуле $EDT = 6T_{10}$.

Отметим другие акустические критерии помещений [14].

C80 – ясность (прозрачность) звучания. Он измеряется в децибелах и равен отношению энергии ранних отражений за первые 80 мс к энергии отражений после 80 мс:

$$C80 = 10 \lg \left[\int_0^{80} E(t) dt / \int_{80}^{\infty} E(t) dt \right]. \quad (12)$$

Считается, что для хорошей прозрачности звука энергии ранних и поздних отражений должны быть сбалансированы.

D50 – параметр, определяющий разборчивость речи. Он измеряется в процентах и равен отношению энергии ранних отражений за первые 50 мс к полной энергии сигнала импульсного отклика:

$$D50 = \int_0^{50} E(t) dt / \int_0^{\infty} E(t) dt. \quad (13)$$

Параметр TS – характерное время звучания. Он измеряется в миллисекундах и определяется как средневзвешенное время по графику импульса [15]:

$$TS = \int_0^{\infty} tE(t) dt / \int_0^{\infty} E(t) dt. \quad (14)$$

Параметр G – интенсивность (сила) звука в точке. Он измеряется в децибелах и равен отношению суммарной энергии всех отражений к уровню звукового сигнала, который был бы в данной точке приема, если бы она находилась в неограниченном пространстве на расстоянии $d = 10$ м от источника той же интенсивности.

$$G = 10 \lg \left[\int_0^{\infty} E(t) dt / \int_0^{\infty} E_d(t) dt \right]. \quad (15)$$

Многие из описанных акустических параметров в грубом приближении могут быть рассчитаны по статистической S-E-теории. Будем исходить из того, что, как было замечено при выводе формулы (4), в этой теории энергия импульсного отклика помещения – функция $E(t) = p^2(t)$ – убывает экспоненциально: $E(t) = e^{-\beta t}$ с показателем β , связанным с временем реверберации. Поскольку время реверберации $RT = T_{60}$ соответствует соотношению $10 \lg E = -60$, то $-10\beta T_{60} \lg e = -60$, откуда находится значение показателя $\beta = 6 / (T_{60} \lg e) = 13,82 / T_{60}$.

После этого прозрачность звука C80 в помещении (12) (в системе СИ) определяется по формуле

$$C80 = 10 \lg \left[\int_0^{0,08 \text{ сек}} e^{-\beta t} dt / \int_{0,08 \text{ с}}^{\infty} e^{-\beta t} dt \right] = 10 \lg (e^{0,08\beta} - 1).$$

Так, в помещении с балансом энергий ранних и поздних отражений, где числитель и знаменатель в (12) равны и, следовательно, $C80 = 0$, имеем

$$e^{0,08\beta} - 1 = 1, \sim e^{0,08\beta} = 2, \beta = \ln 2 / 0,08 \text{ с} = 8,664 \text{ с}^{-1} \Rightarrow T_{60} = 13,82 / \beta = 1,595 \text{ с}.$$

Тогда разборчивость речи (13) вычисляется в виде

$$D50 = \int_0^{0,05 \text{ с}} e^{-\beta t} dt / \int_0^{\infty} e^{-\beta t} dt = 1 - e^{-0,05 \cdot 8,664} = 1 - e^{-0,4332} = 0,352 = 35,2 \%,$$

что является довольно низким показателем. Таким образом, в рамках теории S-E помещение с хорошей прозрачностью звука имеет довольно низкую разборчивость речи. Этот вывод с должным обоснованием непросто найти в литературе. Фактически это означает, что музыкальные залы с хорошей акустикой малопригодны (без дополнительных мероприятий) в качестве драматических театров (и обратно), что более известно прикладным инженерам-акустикам, чем приведенный теоретический вывод.

Параметр TS в формуле (14) легко вычисляется в виде

$$TS = \int_0^{\infty} t e^{-\beta t} dt / \int_0^{\infty} e^{-\beta t} dt = \frac{1}{\beta} = \frac{1}{8,664 \text{ с}^{-1}} = 0,115 \text{ с} = 115 \text{ мс}.$$

Параметр G в формуле (15) в рамках принятого приближения экспоненциального затухания импульса также вычисляется в явном виде.

Численная реализация МТЛ

Моделируемое помещение представляет собой замкнутый многогранник, каждая грань которого является плоским отражателем. Внутри него находится ряд меньших отражателей – плоских многоугольников. Для всех отражателей заданы свойства звукопоглощения и диффузии, соответствующие определённым материалам. Внутри многогранника расположены точечные источник и приёмник звука.

Для практической реализации выбран метод пересечения ячеек – модификация МТЛ на основе [16, 17], в которой перемещение лучей отслеживается по трёхмерной сетке. Ускорение алгоритма достигается за счёт того, что созданная трёхмерная сетка хранит информацию обо всех отражающих поверхностях, причём каждая ячейка связана с областью фиксированного размера в исследуемом помещении. В связи с этим отслеживание перемещения лучей по сетке даёт возможность проверять пересечение с отражающей поверхностью только для отражателей, пересекающих пространство ячейки, в которой на момент проверки находится луч.

Для простоты программирования выбрано построение сетки, ячейки которой имеют форму прямоугольного параллелепипеда. Общий размер сетки соответствует максимальным линейным размерам помещения, а размеры ячеек подбираются исходя из характерных размеров и количества внутренних отражателей в модели. При этом источник является точечным (центр пучка звуковых лучей), тогда как приёмник звука задается в виде сферы малого радиуса. При пересечении сферы лучом его параметры регистрируются (записываются в соответствующие массивы).

Лежащим в ячейке сетки считается любой отражатель, имеющий хотя бы одну точку, находящуюся в пределах пространства, к которому привязана данная ячейка (включая границы). При этом один отражатель может принадлежать одновременно нескольким ячейкам.

Метод пересечения ячеек достаточно подробно описан [17]. Генерируется пучок лучей с началом в точке источника и с направляющими векторами, равномерно распределёнными в сферической системе координат. Алгоритм отслеживает каждый луч пучка независимо от остальных. При попадании луча в какую-либо ячейку, где имеются отражатели, из них выбирается ближайший от текущего начала луча. Ближайшая точка отражения становится новым началом луча. Для определения типа отражения вводится случайная величина $\xi \in (0,1)$, которая сравнивается с коэффициентом диффузии δ данной отражающей поверхности. Если $\xi \geq \delta$, то луч отражается зеркально, и новый направляющий вектор \mathbf{q}_1 определяется через старый \mathbf{q} по формуле: $\mathbf{q}_1 = \mathbf{q} - 2(\mathbf{n} \cdot \mathbf{q})\mathbf{n}$.

Если $\xi < \delta$, направление луча определяется стохастически в соответствии с законом Ламбера. Для этого вводятся две случайные величины $\xi_1, \xi_2 \in (0,1)$, задающие равномерное распределение полярного угла с новым направляющим вектором \mathbf{m}_1 по формуле $\varphi = 2\pi\xi_1 \in (0, 2\pi)$. Для азимутального угла θ равномерным на интервале $(0, 1)$ является распределение квадрата косинуса этого угла по энергии: $\cos^2 \theta = \xi_2 \in (0, 1)$, $\theta = \arccos \sqrt{\xi_2}$. Полученный вектор \mathbf{m}_1 создан в локальной системе координат, связанной с точкой отражения; его необходимо перенести в исходную систему координат по известной формуле перехода [18]: $\mathbf{m} = \begin{pmatrix} v_x & \tau_x & n_x \\ v_y & \tau_y & n_y \\ v_z & \tau_z & n_z \end{pmatrix} \cdot \mathbf{m}_1$.

Вне зависимости от типа отражения энергия луча после отражения E_1 изменяет энергию луча до отражения E по формуле: $E_1 = (1 - \alpha_i)E$.

В результате работы алгоритма получаем дискретную функцию зависимости энергии звукового луча в точке приёмника от времени.

Пример тестового помещения для оценки работы алгоритма МТЛ

Рассмотрим тестовую модель (рис. 3), представляющую собой небольшой зал для прослушивания музыки $5,2 \times 8,3 \times 3$ м³. Файл данных модели содержит информацию о 310 вершинах, 164 отражателях, точечных источнике и приёмнике. После проведения триангуляции число отражателей возросло до 365, однако это позволяет упростить процесс построения пространственной сетки и поиска отражений луча. Пусть частота звукового сигнала $f = 250$ Гц, максимальное число отражений – 100. Число выпущенных из источника звуковых лучей – 65 160, что соответствует генерации пучка с шагом в один градус по полярному и азимутальному углам.

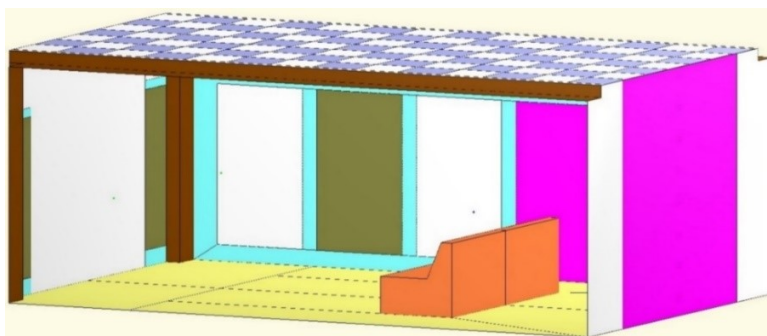


Рис. 3. Общий вид помещения изнутри / Fig. 3. General view of the room from the inside

После построения функции импульсного отклика (рис. 4) время реверберации определяем по кривой Шрёдера (10) (рис. 5), нормируя значение $E(0)$ к единице. Далее переходим к децибелам.

Исходя из диаграммы Шрёдера, построенный алгоритм определяет время, за которое значение энергии импульса сигнала E_S спадает на 30 дБ, с -5 до -35 дБ: $t_{30} = 0,1914$ с. При этом гулкость помещения T_{30} , согласно формуле (11), в два раза больше.

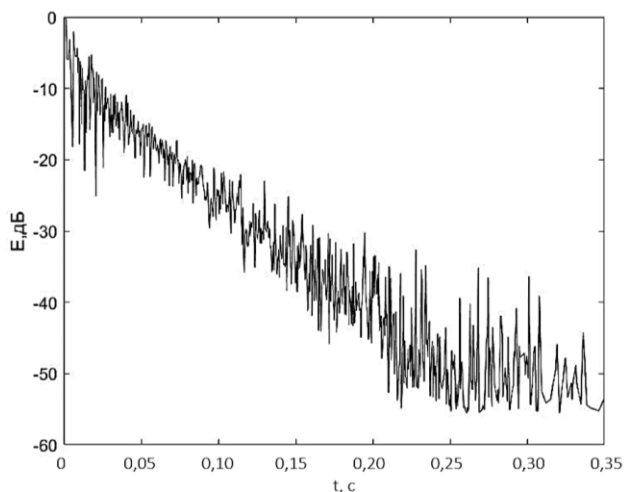


Рис. 4. График импульсного отклика тестового помещения: $f = 250$ Гц, максимальное число отражений – 100. Число лучей – 65 160 / Fig. 4. Graph of the impulse response for the test room: $f = 250$ Hz, the maximum number of reflections - 100. The number of rays - 65 160

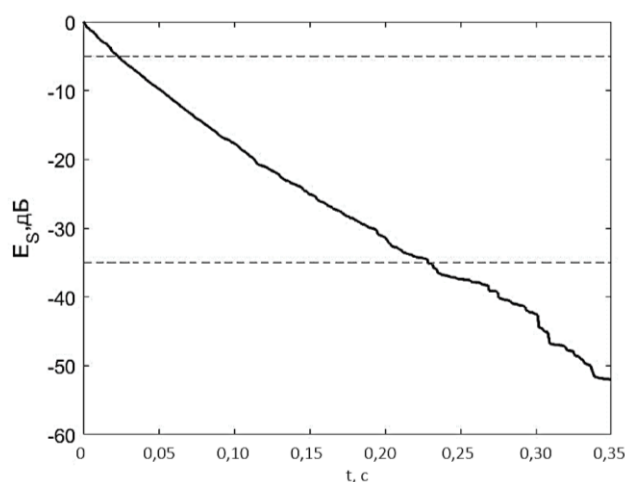


Рис. 5. График кривой Шрёдера для тестового помещения: $f = 250$ Гц, максимальное число отражений – 100. Число лучей – 65 160 / Fig. 5. Schroeder curve plot for the test room: $f = 250$ Hz, maximum number of reflections - 100. Number of rays - 65 160

В таблице представлены результаты значений некоторых акустических параметров, определяемых в стандарте ISO 3382 [14], рассчитанных в рамках разработанного алгоритма. Они вычисляются по кривым импульсного отклика помещения и Шрёдера. Расчет производился на персональном компьютере, на одном ядре процессора i7-10510U с тактовой частотой 1,8 ГГц, на языке программирования C++.

Результаты тестирования работы алгоритма МТЛ при разном числе сгенерированных лучей / Results of testing the MTL algorithm with various numbers of generated rays

Число лучей	Время вычисления, с	RT, с (по S-E)	T30, с (МТЛ)	C80, дБ	D50, %	TS, мс
648	11,80	0,30	0,4000	12,90	90	24
2664	46,51		0,4236	12,14	87	26
7200	118,00		0,4051	13,94	88	21
16 290	322,30		0,3629	14,08	89	22
65 160	1077,00		0,3829	14,63	89	21

Заключение

По результатам исследования можно сделать следующие выводы:

1. Простейшие инженерные модели позволяют найти лишь главный параметр гулкости – RT (по формуле Сэбина – Эйринга). Развиваемый авторами МТЛ позволяет в реальном масштабе времени на персональном компьютере получить информацию о распространении звуковых лучей, достаточную для определения не только функции акустического импульса, но и основных акустических параметров помещения.
2. Как правило, гулкость помещения по простейшей теории S-E занижена по сравнению с точным расчетом по МТЛ. В ситуациях, когда теория S-E предсказывает гулкость помещения, близкую к точным расчетам по МТЛ, качество звучания данного помещения считается хорошим. В этом смысле в тестовом помещении модель S-E дает на 22 % заниженное значение гулкости RT, что косвенно говорит о не очень высоком качестве звучания. С учетом того, что при этом получается очень хорошая разборчивость D50, качество звука в данном помещении можно признать удовлетворительным.

Список источников

1. *Pierce A.P.* Acoustics: An Introduction to Its Physical Principles and Applications. N. Y.: ASA Publ., 1991. 768 p.
2. *Kuttruff H.* Room Acoustics. 5th ed. N.Y.: Taylor & Francis, 2009. 392 p.
3. *Бабич В.М., Булдырев В.С.* Асимптотические методы в задачах дифракции коротких волн. М.: Наука, 1972. 436 с.
4. Acoustic Properties of Absorbing Materials. E.A. Piana, P. Bonfiglio, M. Rychtarikova (eds.). Basel: MDPI, 2022. 206 p.
5. *Bojev N.V., Sumbatyan M.A., Brigante M.* Explicit short-wave representations and ray tracing method for reflections from curved surfaces in room acoustics // J. Sound & Vibration. 2022. Vol. 523. Art. 116723. EDN: VTXTQJ. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2021.116723>
6. An Introduction to Ray Tracing. A.S. Glassner (ed.). Cambridge: Academic Press, 1989. 368 p.
7. *Buss S.R.* 3-D Computer Graphics: A Mathematical Introduction with OpenGL. Cambridge: Cambridge University Press, 2003. 371 p.
8. *Vorländer M.* Auralization: Fundamentals of Acoustics, Modelling, Simulation, Algorithms and Acoustic Virtual Reality. Berlin: Springer-Verlag, 2007. 335 p.
9. *Барабаишов Б.Г., Дрозан Ю.В., Пелевин О.Ю.* Расчет многолучевой структуры поля УКВ в городе // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2009. № 4. С. 42–44. EDN: KWLEFH.
10. *Сумбатян М.А., Ланэ М.Ю., Тодоров Н.Ф.* Численный метод расчета структуры звукового поля в помещении со скосом отражающей поверхности // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2011. № 1. С. 118–125.
11. *Kinsler L.E., Frey A.R., Coppens A.B., Sanders J.V.* Fundamentals of Acoustics. 4th ed. N. Y.: John Wiley, 2000. 569 p.
12. *Goldman R.N.* Area of Planar Polygons and Volume of Polyhedra // Graphics Gems II. J. Arvo (ed.). Cambridge: Academic Press, 1991. P. 170–171.
13. *Schroeder M.R.* New method of measuring reverberation time // J. Acoust. Soc. America. 1965. Vol. 37. P. 409–412.
14. International standard ISO 3382: Acoustics – measurement of reverberation time of rooms with reference to other acoustical parameters.
15. *Cremer L., Muller H.A.* Principles and Applications of Room Acoustics. N. Y.: Applied Science, 1982. Vol. 1. 235 p. Vol. 2. 434 p.
16. *Помпеи А., Сумбатян М.А., Тодоров Н.Ф.* Компьютерные модели в акустике помещений: метод лучевых траекторий и алгоритмы аурализации // Акуст. журн. 2009. Т. 55, № 6. С. 760–771. EDN: KXLFNH.
17. *Бараева Д.С., Сумбатян М.А.* Метод пересечения ячеек при трассировке лучей в задачах акустики помещений // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Техн. науки. 2022. № 3. С. 41–47. EDN: WNQUYH. <https://doi.org/10.17213/1560-3644-2022-3-41-47>
18. *Кряквин В.Д.* Линейная алгебра в задачах и упражнениях. СПб.: Лань, 2016. 592 с. EDN: WHYTFR.

References

1. Pierce A. P. *Acoustics: an introduction to its physical principles and applications*. New York: ASA Publ.; 1991. 768 p.
2. Kuttruff H. *Room acoustics*. 5th ed. New York: Taylor & Francis; 2009. 392 p.
3. Babich V.M., Buldyrev V.S. *Asymptotic methods in short-wave diffraction problems*. Moscow: Science; 1972. 436 p. (In Russ.).
4. Piana E.A., Bonfiglio P., Rychtarikova M., eds. *Acoustic properties of absorbing materials*. Basel: MDPI; 2022. 206 p.
5. Boyev N.V., Sumbatyan M.A., Brigante M. Explicit short-wave representations and ray tracing method for reflections from curved surfaces in room acoustics. *J. Sound & Vibration*. 2022;523:116723. EDN: VTXTQJ. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2021.116723>
6. Glassner A.S., ed. *An introduction to ray tracing*. Cambridge: Academic Press; 1989. 368 p.
7. Buss S.R. *3-D Computer graphics: a mathematical introduction with OpenGL*. Cambridge: Cambridge University Press; 2003. 371 p.
8. Vorländer M. *Auralization: fundamentals of acoustics, modelling, simulation, algorithms and acoustic virtual reality*. Berlin: Springer-Verlag; 2007. 335 p.
9. Barabashov B.G., Droган Yu.V., Pelevin O.Yu. Calculation of the multipath structure of the UHF field in the city. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science*. 2009;(4):42-44. (In Russ.). EDN: KWLEFH.
10. Sumbatyan M.A., Lane M.Yu., Todorov N.F. Numerical method for calculating the structure of the sound field in a room with a beveled reflecting surface. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science*. 2011;(1):118-125. (In Russ.). EDN: NDWJFH.
11. Kinsler L.E., Frey A.R., Coppens A.B., Sanders J.V. *Fundamentals of acoustics*. 4th ed. New York: John Wiley; 2000. 569 p.
12. Goldman R. N. Area of planar polygons and volume of polyhedra. *Graphics Gems II*. J. Arvo (ed.). Cambridge: Academic Press; 1991:170-171.
13. Schroeder M.R. New method of measuring reverberation time. *J. Acoust. Soc. America*. 1965;37:409-412.
14. *International standard ISO 3382: Acoustics - measurement of reverberation time of rooms with reference to other acoustical parameters*.
15. Cremer L., Muller H.A. *Principles and applications of room acoustics*. New York: Applied Science; 1982. Vol. 1. 235 p. Vol. 2. 434 p.
16. Pompeii A., Sumbatyan M.A., Todorov N.F. Computer models in room acoustics: ray-path method and aurality algorithms. *Acoustical J*. 2009;55(6):760-771. (In Russ.). EDN: KXLFNH.
17. Baraeva D.S., Sumbatyan M.A. The method of intersection of cells in ray tracing in room acoustics problems. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science*. 2022;(3):41-47. (In Russ.). EDN: WNQUYH. <https://doi.org/10.17213/1560-3644-2022-3-41-47>
18. Kryakvin V.D. *Linear algebra in problems and exercises*. St. Petersburg: Deer; 2016. 592 p. (In Russ.). EDN: WHYTFR.

Информация об авторах

Д.С. Бараева – ассистент кафедры теоретической и компьютерной гидроаэродинамики Института математики, механики и компьютерных наук им. И.И. Воровича ЮФУ.

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

Information about the authors

D.S. Baraeva – Assistant of the Department of Theoretical and Computational Hydroaerodynamics, Vorovich Institute of Mathematics, Mechanics and Computer Science, SFedU.

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.

Статья поступила в редакцию 14.10.2025; одобрена после рецензирования 24.10.2025; принята к публикации 11.11.2025.
The article was submitted 14.10.2025; approved after reviewing 24.10.2025; accepted for publication 11.11.2025.

Научная статья

УДК 519.852.35

<https://doi.org/10.18522/1026-2237-2026-1-14-19>

ОБ ЭКВИВАЛЕНТНЫХ ПРЕОБРАЗОВАНИЯХ ДРЕВОВИДНЫХ СЕТЕЙ

Яков Михайлович Ерусалимский

Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, Россия
ymerusalimskiy@sfedu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4858-6891>

Аннотация. Рассмотрены древовидные сети, фактически представляющие собой ориентированные деревья, растущие из корня, являющегося источником сети, и задача отыскания величины максимального потока в древовидной сети и самого максимального потока. Введено понятие потоково-эквивалентных сетей. Таковыми называются сети между множествами допустимых потоков, в которых существует взаимно однозначное соответствие. Задачи отыскания величины максимального потока и самого максимального потока в таких сетях эквивалентны. Предложена конструкция, названная концентрацией древовидной сети, которая потоково-эквивалентна исходной сети, но проще, чем исходная сеть. Далее концентрация древовидной сети подвергается процедуре балансировки, сохраняющей потоковую эквивалентность. Доказано, что в полученной сети задачи нахождения величины максимального потока и самого максимального потока эквивалентны. Таким образом, алгоритмически решена задача отыскания величины максимального потока и самого потока в древовидной сети.

Ключевые слова: сеть, поток в сети, древовидная сеть, концентрация сети, сбалансированная сеть

Для цитирования: Ерусалимский Я.М. Об эквивалентных преобразованиях древовидных сетей // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2026. № 1. С. 14–19. <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2026-1-14-19>

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

Original article

ABOUT EQUIVALENT TRANSFORMATIONS OF TREE-LIKE NETWORKS

Iakov M. Erusalimskiy

Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia
ymerusalimskiy@sfedu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4858-6891>

Abstract. The article studies tree-like networks, which are essentially oriented trees growing from the root, which is the source of the network. The problem of finding value of the maximum flow in a tree-like network and finding the maximum flow is considered. The concept of stream-equivalent networks is introduced. These are called networks between sets of available flows in which there is one-to-one correspondence. The problems of finding the value of the maximum flow and such maximum flow in stream-equivalent networks are equivalent. A called tree-like network concentration is proposed, which is stream-equivalent to the original network, but simpler than the original network. Next, the concentration of the tree network is subjected to a balancing procedure that preserves streaming equivalence. It is proved that the resulting network has trivial solving problem of finding value of the maximum flow and such maximum flow. Thus, the problem of finding the value of maximum flow and such flow itself in a tree-like network solved algorithmically.

Keywords: network, network flow, tree-like network, network concentration, balanced network

For citation: Erusalimskiy Ia.M. About Equivalent Transformations of Tree-Like Networks. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2026;(1):14-19. (In Russ.). <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2026-1-14-10>

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

© Ерусалимский Я.М., 2026

Введение

Рассмотрим задачу нахождения величины максимального потока в древовидной сети [1, 2] и самого максимального потока, при этом будем пользоваться определениями потока, допустимого потока, максимального потока и т.п. из [3].

Обратим ещё раз внимание, что рассматривается задача о максимальном потоке не на всем множестве сетей, а на его достаточно узком подмножестве – на множестве древовидных сетей.

Причин для этого две. Первая из них – полагаем, что древовидные сети естественным образом возникают в прикладных задачах, поскольку они не «избыточны» по количеству дуг. Вторая – в общем случае можно считать, что эта задача решена. Однако, несмотря на многочисленные улучшения оригинального алгоритма Форда – Фалкерсона [3], значительных продвижений по части снижения трудоемкости достигнуто не было, хотя этой проблемой занимались очень серьезные математики [4–13]. Полагаем, что продвижения в этом направлении ещё предстоят на пути рассмотрения задачи не на всем множестве сетей, а на некоторых их подклассах. Настоящая статья служит подтверждением сказанному.

Древовидные сети

Древовидные сети введены в рассмотрение в [1, 2]. Определение древовидной сети довольно просто. Классическая по Форду – Фалкерсону сеть (единственный источник и единственный сток) называется древовидной, если после её размыкания в стоке она представляет собой дерево, растущее из корня (источник).

Осталось пояснить, что такое размыкание сети в стоке. Вместо стока на размыкании имеется столько его дубликатов, сколько дуг заканчивается в стоке. Каждая дуга, заканчивающаяся в стоке, на размыкании является дугой, заканчивающейся в одном из дубликатов (разные дуги – в разных дубликатах). На рис. 1 представлена древовидная сеть (слева) и её размыкание (справа).

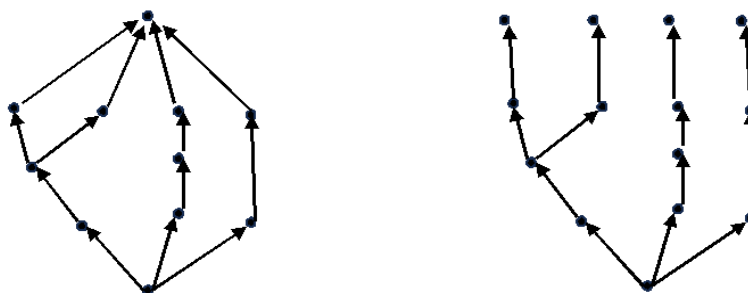


Рис. 1. Древовидная сеть (слева) и её размыкание (справа)
/ Fig. 1. Tree-like network (left) and its reopening (right)

Далее будем работать не с древовидной сетью, а с её размыканием, т.е. с деревом, растущим из корня.

Начнем с самого важного для нас в этой работе – понятия потоковой эквивалентности сетей.

Определение 1. Две сети G_1 и G_2 будем называть потоково-эквивалентными, если между их множествами допустимых путей существует взаимно однозначное соответствие.

Определение 2. Пусть x – вершина сети. Обозначим через $\text{deg}_{\text{out}}x$ количество дуг, выходящих из вершины x , а через $\text{deg}_{\text{in}}x$ – заканчивающихся в вершине x . Вершину x древовидной сети будем называть точкой ветвления, если $\text{deg}_{\text{out}}x \geq 2$. Значение $\text{deg}_{\text{out}}x$ будем называть кратностью точки ветвления.

На рис. 2 отмечены точки ветвления древовидной сети и указана их кратность.

Определение 3. Перегоном будем называть максимальный по количеству дуг участок цепи, представляющий собой простой путь, внутренние вершины которого не являются точками ветвления.

Ясно, что граничными вершинами перегона могут быть точки ветвления, источник и стоки. На рис. 3 выделены перегоны сети.

Из определения потока в сети следует, что на дугах перегона любой допустимый поток принимает одинаковые значения. В связи с этим дадим

Определение 4. Пропускной способностью перегона будем называть минимальную пропускную способность его дуг.

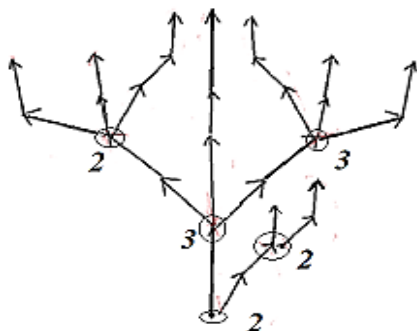


Рис. 2. Точки ветвления древовидной сети
 / Fig. 2. Branch points of the tree-like network

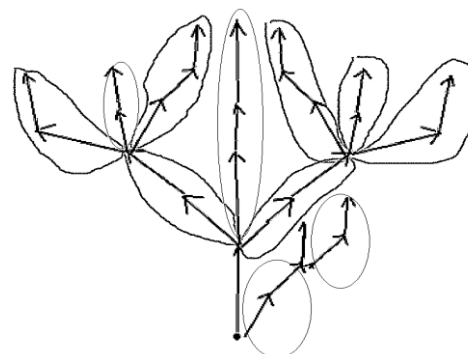


Рис. 3. Перегоны сети
 / Fig. 3. Network stages

Ясно, что имеет место

Утверждение 1. Любой допустимый поток в сети (в том числе и максимальный) принимает на дугах любого перегона одинаковые значения, не превосходящие его пропускной способности.

Замечание 1. В формулировке утверждения 1 не случайно опущено упоминание древовидной сети. Определения перегона и его пропускной способности можно дать и для произвольной сети. Утверждение 1 справедливо для любой сети.

Концентрация и балансировка древовидной сети

Определение 5. Пусть $G = G(X, U, f, \rho)$ – древовидная сеть; X – множество вершин; U – множество дуг; $f: U \rightarrow X \times X$ – отображение инцидентности; $\rho: U \rightarrow (0; +\infty)$ – отображение, задающее пропускную способность дуг сети. Концентрацией сети $G = G(X, U, f, \rho)$ будем называть древовидную сеть $G_c = G_c(X_c, U_c, f_c, \rho_c)$; множество X_c получается из множества X удалением внутренних вершин перегонов; U_c состоит из дуг множества U , соединяющих вершины множества X_c , причем на этих дугах $f_c(u) = f(u)$ и $\rho_c(u) = \rho(u)$, а также новых дуг, соединяющих граничные вершины перегонов в направлении от начала перегона к его концу и имеющих пропускную способность, равную пропускной способности удаленного перегона.

Фактически множество X_c состоит из источника, стоков исходной сети и точек ветвления.

На рис. 4. представлена исходная древовидная сеть (около дуг написаны их пропускные способности) и её концентрация.

Из утверждения 1 следует

Утверждение 2. Древовидная сеть G и её концентрация G_c потоково-эквивалентны.

Отметим одно очевидное свойство топологии концентрации древовидной сети. Для каждой промежуточной вершины x концентрации имеют место формулы

$$\text{deg}_{in}x = 1 \text{ и } \text{deg}_{out}x \geq 2. \quad (1)$$

Определение 5. Для внутренних вершин x концентрации G_c (т.е. внутренних точек ветвления исходной сети) введем две характеристики – входящую пропускную способность $\rho_{in}(x)$, равную пропускной способности заканчивающейся в ней дуги, и исходящую – $\rho_{out}(x)$, равную суммарной пропускной способности выходящих из неё дуг.

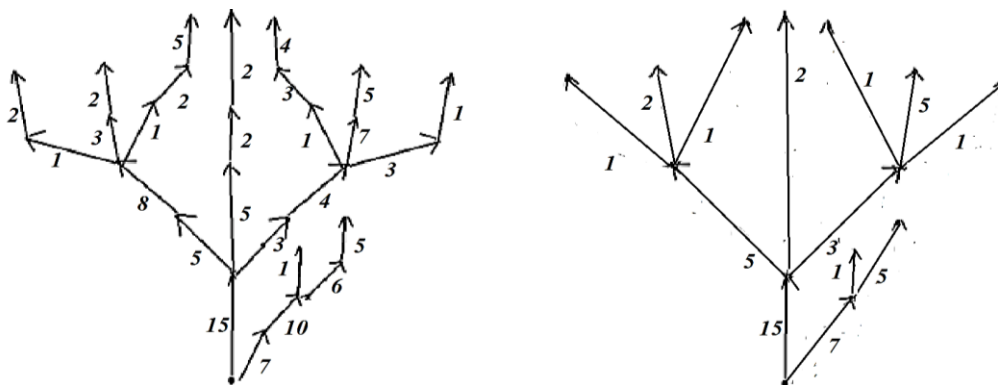


Рис. 4. Древовидная сеть (слева) и её концентрация (справа)
 / Fig. 4. Tree-like network (left) and its concentration (right)

Определение 6. Внутреннюю вершину x концентрации G_c будем называть сбалансированной, если $\rho_{in}(x) = \rho_{out}(x)$, и полусбалансированной, если $\rho_{out}(x) > \rho_{in}(x)$.

В противном случае вершина называется полностью несбалансированной. Таким образом, вершина x полностью несбалансирована, если

$$\rho_{out}(x) < \rho_{in}(x). \tag{2}$$

Очевидно, что справедливо

Утверждение 3. Если все внутренние точки концентрации G_c древовидной сети сбалансированы, то максимальный поток в G_c единствен и его величина на каждой дуге равна пропускной способности этой дуги.

Учитывая утверждение 2, утверждение 3 переносится и на исходную сеть.

Есть еще одно важное, но более слабое (без единственности)

Утверждение 4. Если среди внутренних вершин концентрации G_c древовидной сети G нет полностью несбалансированных вершин, то величина максимального потока в ней и исходной сети G равна суммарной пропускной способности дуг, выходящих из источника сети G_c .

Перейдем к вопросу о балансировке концентрации. Имеют место

Утверждение 5. Если внутренняя вершина x концентрации G_c древовидной сети полностью несбалансирована, то её можно сделать сбалансированной, заменив пропускную способность входящей в неё дуги на сумму пропускных способностей исходящих из неё дуг. При этом G_c и сеть, полученная из неё балансировкой, потоково-эквивалентны.

Это утверждение следует из формул (1) и (2) для топологии концентрации древовидной сети и определения потоковой эквивалентности.

Утверждение 6. За конечное число шагов балансировки сеть G_c может быть приведена к виду, где все промежуточные вершины сбалансированы или полусбалансированы, после чего величина максимального потока в исходной сети (до концентрации) равна суммарной пропускной способности дуг, выходящих из источника финальной сети, полученной из её концентрации G_c в процессе последовательной балансировки. В том случае, когда в финальной сети (после шагов балансировки) все внутренние вершины сбалансированы, максимальный поток в ней единствен (он насыщает все её дуги и однозначно определяет максимальный поток в исходной сети).

В примере на рис. 4 имеются внутренние вершины концентрации, которые полностью несбалансированы. На рис. 5 приведена финальная сеть, полученная из неё за конечное число шагов балансировки.

Учитывая приведенные выше утверждения, мы получили, что величина максимального потока в исходной древовидной сети равна 15, однако сам максимальный поток в этой сети не однозначен за счет наличия в финальной сети полусбалансированной вершины. Один из возможных максимальных потоков в исходной древовидной сети приведен на рис. 6 (его величина на каждой дуге указана в скобках).

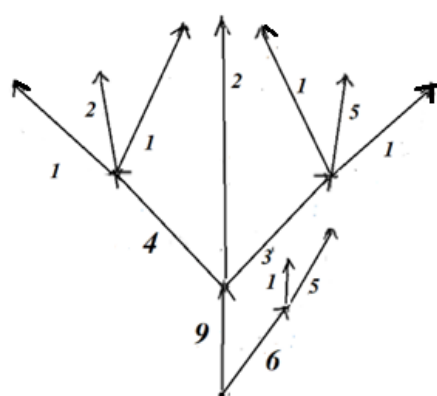


Рис. 5. Финальная сеть. Шрифтом большего размера указаны пропускные способности дуг, измененные при балансировке / Fig. 5. Final network. The larger font shows the bandwidth of the arcs that were changed during balancing

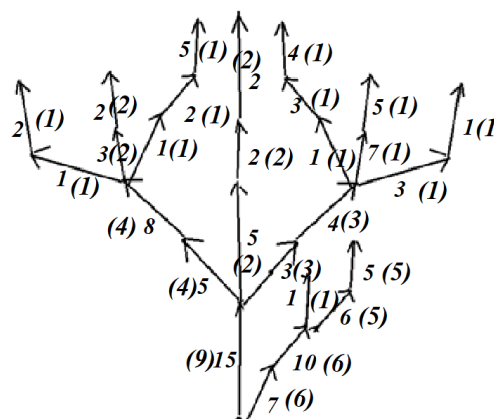


Рис. 6. Исходная древовидная сеть и максимальный поток в ней / Fig. 6. The original tree-like network and the maximum flow in it

Сделаем финальное замечание. Все, о чем написано выше, можно проделывать (находить, вычислять) на исходной древовидной сети, не строя её концентрацию.

Сделанное в этой работе продолжает исследования сетевых объектов, начатые в [14, 15].

Список источников

1. *Ерусалимский Я.М., Русаков В.А., Скороходов В.А.* Нахождение максимального потока в древовидной сети за линейное время // Актуальные проблемы прикладной математики, информатики и механики: тр. Междунар. науч. конф. Воронеж: Вэлборн, Науч.-исслед. публикации, 2024. С. 1540–1545. EDN: OMCSE.
2. *Русаков В.А.* Алгоритм нахождения максимального всплеска в древовидной сети // Современные методы теории краевых задач. Понрягинские чтения – XXXV: материалы Междунар. Воронежской весенней мат. школы. Воронеж: Изд. дом ВГУ, 2024. С. 299–301. EDN: ENXYWF.
3. *Форд Л.Р., Фалкерсон Д.Р.* Поток в сетях. М.: Мир, 1966. 276 с.
4. *Ford Jr. L.R., Fulkerson D.R.* Maximal flow through a network // *Canad. J. Math.* 1956. № 8. P. 399–404.
5. *Dinic E.A.* Algorithm for Solution of a Problem of Maximum Flow in Networks with Power Estimation // *Sov. Math. Dokl.* 1970. Vol. 11, № 5. P. 1277–1280.
6. *Edmonds J., Karp R.M.* Theoretical Improvements in Algorithmic Efficiency for Network Flow Problems // *J. ACM.* 1972. Vol. 19, № 2. P. 248–264.
7. *Gabow H.N.* Scaling algorithms for network problems // *J. Comput. Syst. Sci.* 1985. Vol. 31. P. 148–168.
8. *Galiil Z., Naamad A.* An $O(EV \log^2 V)$ Algorithm for the Maximal Flow Problem // *J. Comput. Syst. Sci.* 1980. Vol. 21, № 2. P. 203–217. [https://doi.org/10.1016/0022-0000\(80\)90035-5](https://doi.org/10.1016/0022-0000(80)90035-5)
9. *Goldberg A.V., Tarjan R.E.* A New Approach to the Maximum-Flow Problem // *J. ACM.* 1988. Vol. 35, № 4. P. 921–940.
10. *Karzanov A.V.* Determining the Maximal Flow in a Network by the Method of Preflows // *Sov. Math. Dokl.* 1974. Vol. 15. P. 434–474.
11. *King V., Rao S., Tarjan R.* A faster deterministic maximum flow algorithm // *J. Algorithms.* 1994. Vol. 17. P. 447–474.
12. *Malhorta V.M., Pramodh Kumar M., Maheshwari S.N.* An $O(|V|^3)$ Algorithm for Finding Maximum Flows in Networks // *Inf. Process. Lett.* 1978. Vol. 7, № 6. P. 277–278. [https://doi.org/10.1016/0020-0190\(78\)90016-9](https://doi.org/10.1016/0020-0190(78)90016-9)
13. *Tarjan R.E.* A Simple Version of Karzanov’s Blocking Flow Algorithm // *Oper. Res. Lett.* 1984. Vol. 2, № 6. P. 265–268. [https://doi.org/10.1016/0167-6377\(84\)90076-2](https://doi.org/10.1016/0167-6377(84)90076-2)
14. *Ерусалимский Я.М., Скороходов В.А., Русаков В.А.* Balanced Networks and Graphs // *J. Math. Sci.* 2025. EDN: AHXUSD. <https://doi.org/10.1007/s10958-025-07812-2>
15. *Ерусалимский Я.М., Абдулрахман Х.Н., Скороходов В.А.* Балансировка сетевых объектов // Таврический вестн. информатики и математики. 2025. № 1 (66). С. 58–69. EDN: TKEIWF.

References

1. *Erusalimskiy Ya.M., Rusakov V.A., Skorokhodov V.A.* Finding the maximum flow in a tree-like network in linear time. *Actual problems of applied mathematics, informatics and mechanics*. Proceedings of the International Scientific Conference. Voronezh: Valborn, Research Publications; 2024:1540-1545. (In Russ.). EDN: OMCSE.
2. *Rusakov V.A.* Algorithm for finding the maximum splash in a tree-like network. *Modern methods of the theory of boundary value problems. 35th Pontryagin Readings*. Materials of the International Voronezh Spring Mathematical School. Voronezh: Publishing House of Voronezh State University; 2024:299-301. (In Russ.). EDN: ENXYWF.
3. *Ford L.R., Fulkerson D.R.* *Flows in networks*. Moscow: World; 1966. 276 p. (In Russ.).
4. *Ford Jr. L.R., Fulkerson D.R.* Maximal flow through a network. *Canad. J. Math.* 1956;(8):399-404.
5. *Dinic E.A.* Algorithm for solution of a problem of maximum flow in networks with power estimation. *Sov. Math. Dokl.* 1970;11(5):1277-1280.
6. *Edmonds J., Karp R.M.* Theoretical improvements in algorithmic efficiency for network flow problems. *J. ACM.* 1972;19(2):248-264.
7. *Gabow H.N.* Scaling algorithms for network problems. *J. Comput. Syst. Sci.* 1985;31:148-168.
8. *Galiil Z., Naamad A.* An $O(EV \log^2 V)$ algorithm for the maximal flow problem. *J. Comput. Syst. Sci.* 1980;21(2):203-217. [https://doi.org/10.1016/0022-0000\(80\)90035-5](https://doi.org/10.1016/0022-0000(80)90035-5)
9. *Goldberg A.V., Tarjan R.E.* A new approach to the maximum-flow problem. *J. ACM.* 1988;35(4):921-940.
10. *Karzanov A.V.* Determining the maximal flow in a network by the method of preflows. *Sov. Math. Dokl.* 1974;15:434-474.

11. King V., Rao S., Tarjan R. A faster deterministic maximum flow algorithm. *J. Algorithms*. 1994;17:447-474.
12. Malhorta V.M., Pramodh Kumar M., Maheshwari S.N. An $O(|V|^3)$ algorithm for finding maximum flows in networks. *Inf. Process. Lett.* 1978;7(6):277-278. [https://doi.org/10.1016/0020-0190\(78\)90016-9](https://doi.org/10.1016/0020-0190(78)90016-9)
13. Tarjan R.E. A simple version of Karzanov's blocking flow algorithm. *Oper. Res. Lett.* 1984;2(6):265-268. [https://doi.org/10.1016/0167-6377\(84\)90076-2](https://doi.org/10.1016/0167-6377(84)90076-2)
14. Erusalimskiy I.M., Skorokhodov V.A., Rusakov V.A. Balanced networks and graphs. *J. Math. Sci.* 2025. EDN: AHXUSD. <https://doi.org/10.1007/s10958-025-07812-2>
15. Erusalimskiy I.M., Abdulrahman H.N., Skorokhodov V.A. Balancing network objects. *Taurida J. of Computer Sciences Theory and Mathematics*. 2025;(1):58-69. (In Russ.). EDN: TKEIWF.

Информация об авторе

Я.М. Ерусалимский – доктор технических наук, кандидат физико-математических наук, профессор, профессор кафедры алгебры и дискретной математики Института математики, механики и компьютерных наук им. И.И. Воровича ЮФУ.

Information about the author

Ia.M. Erusalimskiy – Doctor of Science (Technical), Candidate of Science (Physics and Mathematics), Professor, Professor of the Department of Algebra and Discrete Mathematics, Vorovich Institute of Mathematics, Mechanics and Computer Sciences, SFedU.

Статья поступила в редакцию 07.09.2025; одобрена после рецензирования 24.09.2025; принята к публикации 11.11.2025.
The article was submitted 07.09.2025; approved after reviewing 24.09.2025; accepted for publication 11.11.2025.

Научная статья

УДК 539.3

<https://doi.org/10.18522/1026-2237-2026-1-20-26>

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ИЗОЛИРОВАННОЙ ДИСКЛИНАЦИИ И РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ВИНТОВЫХ ДИСЛОКАЦИЙ ПРИ БОЛЬШИХ ДЕФОРМАЦИЯХ УПРУГОГО ЦИЛИНДРА

Леонид Михайлович Зубов

Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, Россия
zubovl@yandex.ru

Аннотация. На основе нелинейной теории упругости исследовано влияние дефектов внутреннего строения материала на механическое поведение полого цилиндра при больших деформациях. Рассмотрена комбинация двух типов дефектов: изолированная дисклинация с вектором Франка, параллельным оси цилиндра, и распределенные винтовые дислокации радиального направления. Состояние упругого тела с дефектами описывается системой нелинейных дифференциальных уравнений с частными производными. Система состоит из уравнений равновесия, уравнений несовместности и определяющих соотношений материала. На внутренней и внешней поверхностях цилиндра действуют равномерные гидростатические давления. К торцам трубы приложены продольная сила и крутящий момент. Благодаря специальной подстановке в системе разрешающих уравнений исходная трехмерная задача сведена к нелинейной краевой задаче для системы обыкновенных дифференциальных уравнений. В рамках модели изотропного несжимаемого упругого тела найдено точное решение в квадратурах задачи о больших деформациях раздувания, кручения и осевого растяжения-сжатия полого кругового цилиндра с изолированной дисклинацией и распределенными дислокациями. Это решение универсально в классе несжимаемых изотропных тел в том смысле, что оно справедливо для несжимаемого материала, удельная энергия которого – произвольная функция инвариантов деформации. В случае сплошного цилиндра из несжимаемого материала выведены простые, явные и универсальные формулы для зависимостей продольной силы и крутящего момента от угла закручивания и осевого удлинения. Эти зависимости содержат параметры, характеризующие мощности дисклинации и распределенных дислокаций, и отражают комбинированное влияние двух типов дефектов на нелинейное сопротивление цилиндрического стержня внешним нагрузкам. Результаты могут быть использованы при расчетах конструкций атомной энергетики и в задачах наномеханики.

Ключевые слова: нелинейная упругость, плотность дислокаций, несжимаемый материал, универсальное решение

Для цитирования: Зубов Л.М. Взаимодействие изолированной дисклинации и распределенных винтовых дислокаций при больших деформациях упругого цилиндра // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2026. № 1. С. 20–26. <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2026-1-20-26>

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

Original article

INTERACTION BETWEEN AN ISOLATED DISCLINATION AND DISTRIBUTED SCREW DISLOCATIONS UNDER LARGE DEFORMATIONS OF AN ELASTIC CYLINDER

Leonid M. Zubov

Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia
zubovl@yandex.ru

© Зубов Л.М., 2026

Abstract. The influence of internal structural defects on the mechanical behavior of a hollow cylinder under large deformations is studied based on the nonlinear theory of elasticity. The combination of two types of defects: an isolated disclination with a Frank vector parallel to the cylinder axis and distributed screw dislocations oriented in the radial direction, is studied. The state of the elastic body containing these defects is described by a system of nonlinear partial differential equations comprising equilibrium equations, incompatibility equations, and constitutive relations for the material. Uniform hydrostatic pressures are applied on the inner and outer lateral surfaces of cylinder, while axial force and torque are applied to the end faces of the tube. By introducing a suitable substitution into the system of governing equations, the original three-dimensional problem is reduced to the study of a nonlinear boundary-value problem for a system of ordinary differential equations. Within the framework of an isotropic incompressible elastic solid model, an exact solution in quadratures for the problem of large deformations involving inflation, torsion, and axial extension/compression of a hollow circular cylinder containing both an isolated disclination and distributed dislocations is obtained. This solution is universal within the class of incompressible isotropic materials, in the sense that it holds for any incompressible material whose strain energy density is an arbitrary function of the deformation invariants. For the case of a solid cylinder made of an incompressible material, simple, explicit, and universal formulas that relate the axial force and torque to the axial stretch and angle of twist, respectively, are derived. These relations include parameters characterizing the strengths of the disclination and the distributed dislocations, thereby reflecting the combined influence of both defect types on the nonlinear resistance of the cylindrical rod to external loading. The results can be applied to the design and analysis of structures in nuclear engineering and to problems in nanomechanics.

Keywords: nonlinear elasticity, dislocation density, incompressible material, universal solution

For citation: Zubov L.M. Interaction Between an Isolated Disclination and Distributed Screw Dislocations Under Large Deformations of an Elastic Cylinder. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2026;(1):20-26. (In Russ.). <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2026-1-20-26>

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

Введение

Дефекты кристаллической структуры твердых тел в виде дислокаций и дисклинаций в значительной мере определяют прочностные, упругопластические, деформационные и другие свойства многих конструкционных и наноструктурных материалов. Одной из распространенных математических моделей твердых тел с дефектами является континуальная теория дислокаций [1–8]. В настоящее время известно лишь ограниченное число точных решений краевых задач пространственной нелинейной теории упругости для тел с дислокациями, распределенными с заданной тензорной плотностью [5–12]. В представленной работе найдены новые точные решения нелинейной континуальной теории дислокаций для полого цилиндра, содержащего изолированную дисклинацию. Построенные решения обладают свойством универсальности в классе изотропных несжимаемых материалов.

Исходные соотношения

Состояние равновесия упругого тела, испытывающего большие деформации, описывается системой уравнений [13], состоящей из уравнения равновесия для напряжений без учета массовых сил:

$$\operatorname{div} \mathbf{D} = 0, \quad (1)$$

определяющих соотношений материала:

$$\mathbf{D} = \frac{dW}{d\mathbf{C}}, \quad W = W(\mathbf{C} \cdot \mathbf{C}^T), \quad (2)$$

геометрических соотношений

$$\mathbf{C} = \operatorname{grad} \mathbf{R}. \quad (3)$$

Здесь \mathbf{D} – несимметричный тензор напряжений Пиоли; \mathbf{R} – радиус-вектор точки упругого тела в деформированной конфигурации; \mathbf{C} – градиент деформации; W – удельная энергия деформации. Дифференциальные операторы градиента, ротора и дивергенции в отсчетной конфигурации вводятся формулами [14]:

$$\begin{aligned} \operatorname{grad} \mathbf{A} &= \mathbf{r}^s \otimes \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial q^s}, & \operatorname{rot} \mathbf{A} &= \mathbf{r}^s \times \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial q^s}, \\ \operatorname{div} \mathbf{A} &= \mathbf{r}^s \cdot \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial q^s}, & \mathbf{r}^s &= \mathbf{i}_k \frac{\partial q^s}{\partial x_k}, \quad s, k = 1, 2, 3, \end{aligned}$$

где \mathbf{i}_k – постоянные орты декартовых координат x_k отсчетной конфигурации тела; q^s – некоторые криволинейные лагранжевы координаты; \mathbf{A} – некоторое дифференцируемое тензорное поле произвольного ранга.

Если в упругом теле имеется непрерывное распределение трансляционных дислокаций, то векторное поле $\mathbf{R}(q^s)$ не существует, так же как не существует поле перемещений $\mathbf{u} = \mathbf{R} - x_k \mathbf{i}_k$. В этом случае соотношение (3) заменяется уравнением несовместности

$$\operatorname{rot} \mathbf{C} = \boldsymbol{\alpha}, \quad (4)$$

где $\boldsymbol{\alpha}$ – тензор плотности дислокаций, который должен удовлетворять уравнению соленоидальности

$$\operatorname{div} \boldsymbol{\alpha} = 0. \quad (5)$$

Вывод уравнения несовместности (4) и введение тензора плотности дислокаций изложены в [5–8]. Понятие тензора плотности дислокаций возникает в результате предельного перехода от дискретного набора дислокаций к их непрерывному распределению. С физической точки зрения плотность дислокаций можно интерпретировать как тензорное поле второго ранга $\boldsymbol{\alpha}$, поток которого через любую поверхность дает суммарный вектор Бюргера дислокаций, пересекающих эту поверхность [15]. При наличии в теле распределенных дислокаций тензор \mathbf{C} называется тензором дисторсии.

Упругий материал в дальнейшем будем считать изотропным. Тогда удельная энергия W задается как функция инвариантов I_1, I_2, I_3 метрического тензора $\mathbf{G} = \mathbf{C} \cdot \mathbf{C}^T$ [13], или меры деформации Коши. Инварианты деформации выражаются через тензор \mathbf{G} формулами

$$I_1 = \operatorname{tr} \mathbf{G}, \quad I_2 = \frac{1}{2} (\operatorname{tr}^2 \mathbf{G} - \operatorname{tr} \mathbf{G}^2), \quad I_3 = \det \mathbf{G}. \quad (6)$$

Определяющее соотношение изотропного материала в силу (2), (6) принимает вид

$$\mathbf{D} = 2 \left(\frac{\partial W}{\partial I_1} + I_1 \frac{\partial W}{\partial I_2} \right) \mathbf{C} - 2 \frac{\partial W}{\partial I_2} \mathbf{G} \cdot \mathbf{C} + 2 I_3 \frac{\partial W}{\partial I_3} \mathbf{C}^{-T}, \quad (7)$$

где $\mathbf{C}^{-T} = (\mathbf{C}^{-1})^T = (\mathbf{C}^T)^{-1}$.

Распределенные винтовые дислокации в полом круговом цилиндре с изолированной дисклинацией

Рассмотрим упругое тело в форме полого кругового цилиндра, ось которого имеет направление орта \mathbf{i}_3 . Введем в отсчетной конфигурации (недеформированное состояние) цилиндрические координаты $q^1 = r, q^2 = \varphi, q^3 = z$ по формулам $x_1 = r \cos \varphi, x_2 = r \sin \varphi, x_3 = z$. Область, занимаемая телом, задается неравенствами $r_1 \leq r \leq r_0, 0 \leq \varphi \leq 2\pi, 0 \leq z \leq l$. Единичные векторы, касательные к координатным линиям, обозначим $\mathbf{e}_r, \mathbf{e}_\varphi, \mathbf{e}_z$. Справедливы соотношения

$$\mathbf{e}_r = \mathbf{i}_1 \cos \varphi + \mathbf{i}_2 \sin \varphi, \quad \mathbf{e}_\varphi = -\mathbf{i}_1 \sin \varphi + \mathbf{i}_2 \cos \varphi, \quad \mathbf{e}_z = \mathbf{i}_3. \quad (8)$$

Как известно [8], конечные деформации цилиндра с изолированной дисклинацией в сочетании с кручением, осевым растяжением и раздуванием описываются преобразованием

$$R = R(r), \quad \Phi = \kappa \varphi + \psi z, \quad Z = \lambda z. \quad (9)$$

Здесь R, Φ, Z – цилиндрические координаты точек цилиндра после деформации, т.е. эйлеровы координаты; ψ, λ, κ – постоянные, причем ψ – угол закручивания, $\lambda > 0$ – кратность осевого удлинения, $\kappa > 0$ – параметр, характеризующий мощность дисклинации. Вектор Франка [8] направлен по оси цилиндра.

Градиент деформации, соответствующий преобразованию координат (9), имеет вид

$$\mathbf{C} = \frac{dR}{dr} \mathbf{e}_r \otimes \mathbf{e}_r + \frac{\kappa R}{r} \mathbf{e}_\varphi \otimes \mathbf{e}_\varphi + \psi R \mathbf{e}_z \otimes \mathbf{e}_\varphi + \lambda \mathbf{e}_z \otimes \mathbf{e}_z, \quad (10)$$

где

$$\begin{aligned} \mathbf{e}_R &= \mathbf{i}_1 \cos(\kappa \varphi + \psi z) + \mathbf{i}_2 \sin(\kappa \varphi + \psi z), \\ \mathbf{e}_\Phi &= -\mathbf{i}_1 \sin(\kappa \varphi + \psi z) + \mathbf{i}_2 \cos(\kappa \varphi + \psi z), \\ \mathbf{e}_Z &= \mathbf{e}_z = \mathbf{i}_3. \end{aligned} \quad (11)$$

Тензорное поле (10) удовлетворяет уравнению совместности деформации $\operatorname{rot} \mathbf{C} = 0$.

Предположим, что в упругом цилиндре с изолированной дисклинацией распределены винтовые дислокации с радиальной осью. Тензор плотности дислокаций предполагается заданным в виде $\alpha = \gamma(r)\mathbf{e}_r \otimes \mathbf{e}_R$. Можно проверить, что требование соленоидальности (5) приводит к ограничению на функцию γ : $\gamma(r) = \gamma_0 r^{-1}$, $\gamma_0 = \text{const}$.

Таким образом, тензор плотности дислокаций принимается в виде

$$\alpha = \gamma_0 r^{-1} \mathbf{e}_r \otimes \mathbf{e}_R. \quad (12)$$

При наличии распределенных дислокаций тензор дисторсии должен удовлетворять тензорному уравнению несовместности (4). Будем разыскивать тензорное поле дисторсии в виде, обобщающем выражение (10):

$$\mathbf{C} = \frac{dR(r)}{dr} \mathbf{e}_r \otimes \mathbf{e}_R + \frac{\kappa R(r)}{r} \mathbf{e}_\varphi \otimes \mathbf{e}_\varphi + C_{23}(r) \mathbf{e}_\varphi \otimes \mathbf{e}_z + C_{32}(r) \mathbf{e}_z \otimes \mathbf{e}_\varphi + \lambda \mathbf{e}_z \otimes \mathbf{e}_z.$$

Подставляя это представление в (4) и учитывая (12), находим

$$C_{23}(r) = 0, \quad C_{32}(r) = \psi R(r) - a, \quad a = \gamma_0 \kappa^{-1}.$$

Следовательно, тензор дисторсии, удовлетворяющий уравнению несовместности, будет иметь вид

$$\mathbf{C} = \frac{dR(r)}{dr} \mathbf{e}_r \otimes \mathbf{e}_R + \frac{\kappa R(r)}{r} \mathbf{e}_\varphi \otimes \mathbf{e}_\varphi + (\psi R(r) - a) \mathbf{e}_z \otimes \mathbf{e}_\varphi + \lambda \mathbf{e}_z \otimes \mathbf{e}_z. \quad (13)$$

Отметим, что хотя в теле с распределенными дислокациями поле перемещений, вообще говоря, определить невозможно, в рассматриваемом частном случае распределения дислокаций вида (12) существует радиальная компонента перемещений, поэтому функция $R(r)$ в представлении (13) сохраняет смысл радиальной координаты точек деформированного цилиндра.

Приведение задачи о равновесии цилиндра к нелинейной краевой задаче для обыкновенных дифференциальных уравнений

Для определения неизвестной функции $R(r)$ следует обратиться к уравнениям равновесия (1). На основании (13) найдем выражение метрического тензора \mathbf{G} и тензора \mathbf{C}^{-T} :

$$\mathbf{G} = \left(\frac{dR}{dr}\right)^2 \mathbf{e}_r \otimes \mathbf{e}_r + \frac{\kappa^2 R^2}{r^2} \mathbf{e}_\varphi \otimes \mathbf{e}_\varphi + \frac{\kappa R(\psi R - a)}{r} (\mathbf{e}_\varphi \otimes \mathbf{e}_z + \mathbf{e}_z \otimes \mathbf{e}_\varphi) + [(\psi R - a)^2 + \lambda^2] \mathbf{e}_z \otimes \mathbf{e}_z; \quad (14)$$

$$\mathbf{C}^{-T} = \left(\frac{dR}{dr}\right)^{-1} \mathbf{e}_r \otimes \mathbf{e}_R + \frac{r}{\lambda \kappa R} \left[\lambda \mathbf{e}_\varphi \otimes \mathbf{e}_\varphi - (\psi R - a) \mathbf{e}_\varphi \otimes \mathbf{e}_z + \frac{\kappa R}{r} \mathbf{e}_z \otimes \mathbf{e}_z \right]. \quad (15)$$

Инварианты деформации в соответствии с (6), (14) примут вид

$$\begin{aligned} I_1 &= \left(\frac{dR}{dr}\right)^2 + \frac{\kappa^2 R^2}{r^2} + (\psi R - a)^2 + \lambda^2, \\ I_2 &= \left(\frac{dR}{dr}\right)^2 \left[\frac{\kappa^2 R^2}{r^2} + (\psi R - a)^2 + \lambda^2 \right] + \left(\frac{\lambda \kappa R}{r}\right)^2, \\ I_3 &= \left(\frac{\lambda \kappa R}{r}\right)^2 \left(\frac{dR}{dr}\right)^2. \end{aligned} \quad (16)$$

Из (13)–(16) видно, что компоненты тензоров \mathbf{C} , \mathbf{G} , \mathbf{C}^{-T} и инварианты деформации не зависят от координат φ , z и являются функциями одной переменной r . Отсюда и из (7) вытекает, что для однородного материала тензор напряжений Пиолы при рассматриваемой деформации цилиндра имеет представление

$$\mathbf{D} = D_{11}(r) \mathbf{e}_r \otimes \mathbf{e}_R + D_{22}(r) \mathbf{e}_\varphi \otimes \mathbf{e}_\varphi + D_{23}(r) \mathbf{e}_\varphi \otimes \mathbf{e}_z + D_{32}(r) \mathbf{e}_z \otimes \mathbf{e}_\varphi + D_{33} \mathbf{e}_z \otimes \mathbf{e}_z. \quad (17)$$

При помощи (8), (11), (17) доказывается, что векторное уравнение равновесия (1) сводится к одному скалярному

$$\frac{dD_{11}}{dr} + \frac{D_{11} - \kappa D_{22}}{r} - \psi D_{32} = 0. \quad (18)$$

Компоненты тензора напряжений D_{sk} , согласно (7), (10), (14)–(16), выражаются через функцию $R(r)$ и ее производную. Поэтому равенство (18) представляет собой нелинейное обыкновенное дифференциальное уравнение второго порядка относительно $R(r)$. Если цилиндрическая труба снаружи нагружена равномерным гидростатическим давлением q_0 , а изнутри – давлением q_1 , то граничные условия для уравнения (18) записываются в виде

$$D_{11}(r_0) = -q_0 \frac{\kappa \lambda R(r_0)}{r_0}, \quad D_{11}(r_1) = -q_1 \frac{\kappa \lambda R(r_1)}{r_1}. \quad (19)$$

В рамках построенного решения краевые условия на торцах цилиндра $z = 0$ и $z = l$ можно выполнить только приближенно, в интегральном смысле Сен-Венана. На основании (17) можно

доказать, что система напряжений, действующих в любом сечении $z = \text{const}$, статически эквивалентна продольной силе Q и крутящему моменту M :

$$Q = 2\pi \int_{r_1}^{r_0} D_{33}(r)rdr, \quad M = 2\pi \int_{r_1}^{r_0} D_{32}(r)R(r)rdr. \quad (20)$$

После решения краевой задачи (18), (19) Q и M становятся известными функциями угла закручивания ψ и кратности удлинения λ , которые считаются активными переменными:

$$Q = Q(\lambda, \psi), \quad M = M(\lambda, \psi). \quad (21)$$

В качестве параметров (пассивных переменных) в выражения функций (21) входят характеристики дисклинации и распределенных дислокаций κ и γ_0 . Зависимость функций (21) от этих параметров отражает влияние и нелинейное взаимодействие дефектов двух типов на напряженно-деформированное состояние трубы.

Отметим, что причиной закручивания трубы является не только крутящий момент M , но и распределение винтовых дислокаций. Если $\gamma_0 \neq 0$, то при $M = 0$ угол закручивания ψ будет отличен от нуля.

Таким образом, благодаря подстановке (13) задача о больших деформациях полого цилиндра с дисклинацией и распределенными дислокациями сведена к одномерной нелинейной краевой задаче.

Несжимаемый упругий материал

Если изотропный материал цилиндра несжимаем, то функция $R(r)$ определяется из условия несжимаемости $I_3 = \det \mathbf{C} = 1$, а соотношение (7) видоизменяется следующим образом [13]:

$$\mathbf{D} = (\tau_1 + I_2\tau_2)\mathbf{C} - \tau_2\mathbf{G} \cdot \mathbf{C} - p\mathbf{C}^{-T}, \quad (22)$$

где $\tau_\beta(I_1, I_2) = 2 \frac{\partial W(I_1, I_2)}{\partial I_\beta}$, $\beta = 1, 2$; p – давление в несжимаемом теле, не выражаемое через деформацию. В рассматриваемой нами задаче о цилиндре $p = p(r)$ – неизвестная функция, определяемая из уравнения равновесия (18).

Согласно (16), уравнение несжимаемости записывается в виде $\lambda\kappa R \frac{dR}{dr} = r$ и имеет решение

$$R(r) = \sqrt{R_1^2 + (\lambda\kappa)^{-1}(r^2 - r_1^2)}, \quad (23)$$

где R_1 – неизвестная постоянная, которая представляет собой внутренний радиус деформированной трубы. Внешний радиус цилиндра после деформации $R_0 = R(r_0)$ выражается через R_1 при помощи (23): $R_0 = \sqrt{R_1^2 + (\lambda\kappa)^{-1}(r_0^2 - r_1^2)}$.

Выражения (13) и (15) в случае несжимаемого материала принимают более простой вид

$$\begin{aligned} \mathbf{C} &= \frac{r}{\lambda\kappa R} \mathbf{e}_r \otimes \mathbf{e}_R + \frac{\kappa R}{r} \mathbf{e}_\varphi \otimes \mathbf{e}_\varphi + (\psi R - a) \mathbf{e}_z \otimes \mathbf{e}_\varphi + \lambda \mathbf{e}_z \otimes \mathbf{e}_z, \\ \mathbf{C}^{-T} &= \frac{\lambda\kappa R}{r} \mathbf{e}_r \otimes \mathbf{e}_R + \frac{r}{\kappa R} \mathbf{e}_\varphi \otimes \mathbf{e}_\varphi + \frac{(a - \psi R)r}{\lambda\kappa R} \mathbf{e}_\varphi \otimes \mathbf{e}_z + \frac{1}{\lambda} \mathbf{e}_z \otimes \mathbf{e}_z. \end{aligned} \quad (24)$$

Введя обозначение $\mathbf{D}^* = (\tau_1 + I_1\tau_2)\mathbf{C} - \tau_2\mathbf{G} \cdot \mathbf{C} = D_{11}^* \mathbf{e}_r \otimes \mathbf{e}_R + D_{22}^* \mathbf{e}_\varphi \otimes \mathbf{e}_\varphi + D_{23}^* \mathbf{e}_\varphi \otimes \mathbf{e}_z + D_{32}^* \mathbf{e}_z \otimes \mathbf{e}_\varphi + D_{33}^* \mathbf{e}_z \otimes \mathbf{e}_z$, на основании (22) получим

$$\mathbf{D} = \mathbf{D}^* - p\mathbf{C}^{-T}. \quad (25)$$

В силу (23), (24) компоненты тензора \mathbf{D}^* для несжимаемого материала – известные функции переменной r . Непосредственным вычислением можно проверить, что тензор \mathbf{C}^{-T} в (24) удовлетворяет равенству $\text{div}(\mathbf{C}^{-T}) = 0$.

Поэтому (18) дает следующее уравнение для функции $p(r)$:

$$\frac{dp}{dr} = \frac{r}{\lambda\kappa R} \left(\frac{dD_{11}^*}{dr} + \frac{D_{11}^* - \kappa D_{22}^*}{r} - \psi D_{32}^* \right). \quad (26)$$

Поскольку правая часть в (26) – известная функция, давление $p(r)$ находится простым интегрированием с точностью до неизвестной постоянной $p(r_0)$. Постоянные $p(r_0)$ и R_1 определяются из граничных условий (19).

Таким образом, в случае несжимаемого изотропного материала общего вида найдено точное решение в квадратурах задачи о больших деформациях растяжения-сжатия, раздувания и кручения полого упругого цилиндра, содержащего изолированную дисклинацию и распределенные дислокации.

Сплошной цилиндр с дисклинацией и распределенными дислокациями

Предполагая, что сплошной цилиндр, для которого $r_1 = 0$, остается сплошным и после деформации, имеем $R_1 = 0$. Тогда, согласно (23), функция $R(r)$ для несжимаемого материала, тензор дисторсии и инварианты деформации будут иметь вид

$$\begin{aligned} R &= (\lambda\kappa)^{-1/2}r, \\ \mathbf{C} &= \frac{1}{\sqrt{\lambda\kappa}}\mathbf{e}_r \otimes \mathbf{e}_r + \sqrt{\frac{\kappa}{\lambda}}\mathbf{e}_\varphi \otimes \mathbf{e}_\varphi + \left(\frac{\psi r}{\sqrt{\lambda\kappa}} - a\right)\mathbf{e}_z \otimes \mathbf{e}_z + \lambda\mathbf{e}_z \otimes \mathbf{e}_z, \\ I_1 &= \frac{1}{\lambda\kappa} + \frac{\kappa}{\lambda} + \lambda^2 + \left(\frac{\psi r}{\sqrt{\lambda\kappa}} - a\right)^2, \\ I_2 &= \frac{1}{\lambda^2} + \frac{\lambda}{\kappa} + \lambda\kappa + \frac{1}{\lambda\kappa}\left(\frac{\psi r}{\sqrt{\lambda\kappa}} - a\right)^2. \end{aligned} \quad (27)$$

Функция давления $p(r)$ определяется из уравнения (26), после чего при помощи (25) находятся все компоненты тензора напряжений и, согласно (20), вычисляются продольная сила Q и крутящий момент M .

Если боковая поверхность цилиндрического стержня свободна от нагрузки ($D_{11}(r_0) = 0$), то можно показать, что для величин Q и M справедливы простые явные формулы:

$$\begin{aligned} Q(\lambda, \psi, \kappa, \gamma_0) &= \pi \int_0^{r_0} \left(\tau_1 \frac{\partial I_1}{\partial \lambda} + \tau_2 \frac{\partial I_2}{\partial \lambda} \right) r dr, \\ M(\lambda, \psi, \kappa, \gamma_0) &= \pi \int_0^{r_0} \left(\tau_1 \frac{\partial I_1}{\partial \psi} + \tau_2 \frac{\partial I_2}{\partial \psi} \right) r dr. \end{aligned} \quad (28)$$

Входящие в (28) производные от инвариантов легко вычисляются при помощи (27). Формулы (28) отражают влияние параметров дефектов κ и γ_0 на сопротивление цилиндрического стержня внешним нагрузкам при кручении и растяжении-сжатии. Эти формулы пригодны для произвольного изотропного несжимаемого материала, т.е. универсальны в указанном классе упругих тел.

Заключение

Решена новая задача нелинейной теории дислокаций. Исследовано комбинированное влияние двух типов дефектов кристаллической структуры материала на большие деформации цилиндрической толстостенной трубы. Полуобратным методом найдены точные решения нелинейной задачи кручения и растяжения полого и сплошного цилиндров, содержащих изолированную дисклинацию и распределенные дислокации. Получены явные формулы, отражающие влияние дефектов на упругое сопротивление цилиндрического стержня действию внешних нагрузок при больших деформациях. Основные результаты представлены в форме, допускающей экспериментальную проверку.

Список источников

1. Kondo K. On the geometrical and physical foundations in the theory of yielding // Proc. 2nd Jap. Nat. Congress of Appl. Mechanics. Tokyo, 1952. P. 41–47.
2. Bilby B.A., Bullough R., Smith E. Continuous distributions of dislocations: a new application of the methods of non-Riemannian geometry // Proc. R. Soc. Lond. A. 1955. Vol. 231. P. 263–273.
3. Yavary A., Goriely A. Riemann-Cartan geometry of nonlinear dislocation mechanics // Arch. Ration. Mech. Anal. 2012. Vol. 205. P. 59–118. EDN: PHCDGV. <https://doi.org/10.1007/s00205-012-0500-0>
4. Nye J.F. Some geometrical relations in dislocated crystals // Acta Metall. 1953. Vol. 1, № 2. P. 153–162.
5. Kröner E. Allgemeine Kontinuumstheorie der Versetzungen und Eigenspannungen // Arch. Ration. Mech. Anal. 1959. Vol. 4. P. 273–334. EDN: NFVSVB. <https://doi.org/10.1007/bf00281393>
6. Eshelby J.D. The continuum theory of lattice defects // Solid state physics. F. Seitz, D. Turnbull (eds.). N.Y.: Academic Press, 1956. Vol. 3. P. 79–144.
7. Derezin S.V., Zubov L.M. Disclinations in nonlinear elasticity // ZAMM. 2011. Vol. 91, № 6. P. 433–442. EDN: OHUFRL. <https://doi.org/10.1002/zamm.201000174>
8. Zubov L.M. Nonlinear theory of dislocations and disclinations in elastic bodies. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 1997. 205 p. EDN: CUFQOQ. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-68430-5>
9. Zelenina A.A., Zubov L.M. Nonlinear effects during the tension, bend and torsion of elastic bodies with distributed dislocations // Dokl. Phys. 2013. Vol. 58. P. 354–357. EDN: RFPXHH. <https://doi.org/10.1134/S1028335813080089>

10. Zubov L.M. Spherically symmetric solutions in the nonlinear theory of dislocations // *Dokl. Phys.* 2014. Vol. 59, № 9. P. 419–422. EDN: UFHOBH. <https://doi.org/10.1134/S1028335814090079>
11. Zubov L.M. Universal solutions of nonlinear dislocation theory for elastic cylinder // *Mech. Solids.* 2020. Vol. 55. P. 701–709. EDN: QQLDAI. <https://doi.org/10.3103/S002564420050167>
12. Goloveshkina E.V., Zubov L.M. Spherically symmetric tensor fields and their application in nonlinear theory of dislocations // *Symmetry.* 2021. Vol. 13. Art. 830. EDN: LDKLBP. <https://doi.org/10.3390/sym13050830>
13. Lurie A.I. *Nonlinear Theory of Elasticity.* Amsterdam: North-Holland Publishing Co, 1990. 617 p.
14. Зубов Л.М., Карякин М.И. Тензорное исчисление. Основы теории. М.: Вузовская книга, 2025. 146 с.
15. Вакуленко А.А. Связь микро- и макросвойств в упругопластических средах. М.: ВИНТИ, 1991. 133 с.

References

1. Kondo K. On the geometrical and physical foundations in the theory of yielding. *Proc. 2nd Jap. Nat. Congress of Appl. Mechanics.* Tokyo, 1952. P. 41–47.
2. Bilby B.A., Bullough R., Smith E. Continuous distributions of dislocations: a new application of the methods of non-Riemannian geometry. *Proc. R. Soc. Lond. A.* 1955;231:263-273.
3. Yavary A., Goriely A. Riemann-Cartan geometry of nonlinear dislocation mechanics. *Arch. Ration. Mech. Anal.* 2012;205:59-118. EDN: PHCDGV. <https://doi.org/10.1007/s00205-012-0500-0>
4. Nye J.F. Some geometrical relations in dislocated crystals. *Acta Metall.* 1953;1(2):153-162.
5. Kröner E. General continuum theory of dislocations and residual stresses. *Arch. Ration. Mech. Anal.* 1959;4:273-334. (In German). EDN: NFVSVB. <https://doi.org/10.1007/bf00281393>
6. Eshelby J.D. The continuum theory of lattice defects. *Solid state physics.* F. Seitz, D. Turnbull (eds.). New York: Academic Press; 1956;3:79-144.
7. Derezin S.V., Zubov L.M. Disclinations in nonlinear elasticity. *ZAMM.* 2011;91(6):433-442. EDN: OHUFRL. <https://doi.org/10.1002/zamm.201000174>
8. Zubov L.M. *Nonlinear theory of dislocations and disclinations in elastic bodies.* Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag; 1997. 205 p. EDN: CUFQOQ. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-68430-5>
9. Zelenina A.A., Zubov L.M. Nonlinear effects during the tension, bend and torsion of elastic bodies with distributed dislocations. *Dokl. Phys.* 2013;58:354-357. EDN: RFPXHH. <https://doi.org/10.1134/S1028335813080089>
10. Zubov L.M. Spherically symmetric solutions in the nonlinear theory of dislocations. *Dokl. Phys.* 2014;59(9):419-422. EDN: UFHOBH. <https://doi.org/10.1134/S1028335814090079>
11. Zubov L.M. Universal solutions of nonlinear dislocation theory for elastic cylinder. *Mech. Solids.* 2020;55:701-709. EDN: QQLDAI. <https://doi.org/10.3103/S002564420050167>
12. Goloveshkina E.V, Zubov L.M. Spherically symmetric tensor fields and their application in nonlinear theory of dislocations. *Symmetry.* 2021;13:830. EDN: LDKLBP. <https://doi.org/10.3390/sym13050830>
13. Lurie A.I. *Nonlinear theory of elasticity.* Amsterdam: North-Holland Publishing Co; 1990. 617 p.
14. Zubov L.M., Karyakin M.I. *Tensor calculus: basic theory.* Moscow: University Book; 2025. 146 p. (In Russ.).
15. Vakulenko A.A. *Relationship between micro- and macroproperties in elastic media.* Moscow: All-Russian Institute of Scientific and Technical Information of the Russian Academy of Sciences; 1991. 133 p. (In Russ.).

Информация об авторе

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

Information about the author

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

Статья поступила в редакцию 03.11.2025; одобрена после рецензирования 08.11.2025; принята к публикации 11.11.2025.
The article was submitted 03.11.2025; approved after reviewing 08.11.2025; accepted for publication 11.11.2025.

Научная статья

УДК 532.546:519.6

<https://doi.org/10.18522/1026-2237-2026-1-27-35>

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ОСЕСИММЕТРИЧНЫХ КОНВЕКТИВНЫХ ДВИЖЕНИЙ В ВЕРТИКАЛЬНОМ ПОРИСТОМ ЦИЛИНДРЕ

Павел Владимирович Коханов

Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, Россия
kohanov@sfedu.ru, <https://orcid.org/0009-0005-7668-9646>

Аннотация. На основе метода конечных разностей разработаны численные схемы для исследования задачи о возникновении конвекции несжимаемой теплопроводной жидкости, насыщающей вертикальный цилиндр, заполненный пористой средой. Рассматриваются уравнения Дарси – Буссинеска в цилиндрических координатах для естественных переменных и относительно функции тока и температуры. Для дискретизации используются смещённые сетки и специальные аппроксимации в окрестности осевой линии. Проведены вычисления критических чисел Рэлея для задачи с линейным по высоте распределением температуры на границе. Представлены результаты для различных дискретизаций и рассчитаны ответвляющиеся от механического равновесия конвективные режимы.

Ключевые слова: фильтрационная конвекция, модель Дарси – Буссинеска, цилиндрические координаты, метод конечных разностей

Для цитирования: Коханов П.В. Численное исследование осесимметричных конвективных движений в вертикальном пористом цилиндре // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2026. № 1. С. 27–35. <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2026-1-27-35>

Благодарности: автор выражает благодарность доктору физико-математических наук, профессору В.Г. Цибулину за помощь и внимание к работе, а также рецензенту за полезные замечания и ценные предложения.

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

Original article

NUMERICAL INVESTIGATION OF AXISYMMETRIC CONVECTIVE MOTIONS IN A VERTICAL POROUS CYLINDER

Pavel V. Kokhanov

Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia
kohanov@sfedu.ru, <https://orcid.org/0009-0005-7668-9646>

Abstract. Numerical schemes for studying the problem of occurrence of convection of an incompressible heat-conducting fluid saturating a vertical cylinder filled with a porous medium are developed based on the finite difference method. The Darcy - Boussinesque equations are considered in cylindrical coordinates for natural variables and with respect to the stream function and temperature. Shifted grids and special approximations in the vicinity of the axial line are used for discretization. Critical Rayleigh numbers are calculated for the problem with a linear temperature distribution at the boundary. Results are presented for various discretizations and convective regimes branching off from mechanical equilibrium are calculated.

Keywords: filtration convection, Darcy - Boussinesque model, cylindrical coordinates, finite difference method

© Коханов П.В., 2026

For citation: Kokhanov P.V. Numerical Investigation of Axisymmetric Convective Motions in a Vertical Porous Cylinder. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2026;(1):27-35. (In Russ.). <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2026-1-27-35>

Acknowledgments: the author expresses gratitude to Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor V.G. Tsybulin for his help and attention to the work, as well as to the reviewer for useful comments and valuable suggestions.

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

Введение

Математическое моделирование конвективных движений в пористой среде требуется для решения различных задач геофизики и энергетики [1]. Для конвекции Дарси – Буссинеска в [2] дан обзор исследований, где анализировались задачи со свойством косимметрии, при котором формируются непрерывные семейства стационарных режимов. В основном рассматривались уравнения плоской задачи в декартовых координатах, полярные координаты применялись при анализе кольцевых областей, не включавших полюс [3]. При использовании криволинейных координат возникает вопрос об аппроксимации осевых линий и точек полюса. В [4, 5] описан метод конечных разностей для уравнений в цилиндрических координатах и исследована конвекция с неоднородным распределением тепловых источников на границе горизонтального цилиндра. Построена специальная аппроксимация вблизи осевой линии, позволяющая при линейном распределении температуры по границе цилиндра сохранить косимметрию задачи [4]. Фильтрационная конвекция в вертикальных коаксиальных цилиндрах изучалась в [6, 7], но вопрос о существовании косимметрии не ставился. В данной работе проводится численное исследование осесимметричной задачи термогравитационной конвекции в вертикальном пористом цилиндре с линейным профилем температуры на боковой границе. Рассчитываются критические числа Рэлея и конвективные режимы с учётом двух вариантов введения функции тока. Показано, что имеется дискретная симметрия по осевой координате, но характерной для косимметрии двукратности критических значений числа Рэлея нет.

Постановка задачи

При анализе осесимметричной задачи фильтрационной конвекции в вертикально расположенном цилиндре азимутальная компонента скорости равна нулю и переменные не зависят от азимутальной координаты. На рис. 1 представлена схема вертикального сечения сплошного цилиндра с высотой H и радиусом R , где $T_1 > T_2$ – температуры при значениях по осевой координате $z = 0$ и $z = H$ соответственно; g – ускорение свободного падения.

Температура T в каждой точке области для любого момента времени t определяется как сумма линейного распределения температуры по высоте и девиации θ : $T(r, z, t) = T_1 - z\delta T + \theta(r, z, t)$, где $r \in [0, R]$ – радиальная координата; $\delta T = (T_1 - T_2)/H$ – градиент температуры по высоте.

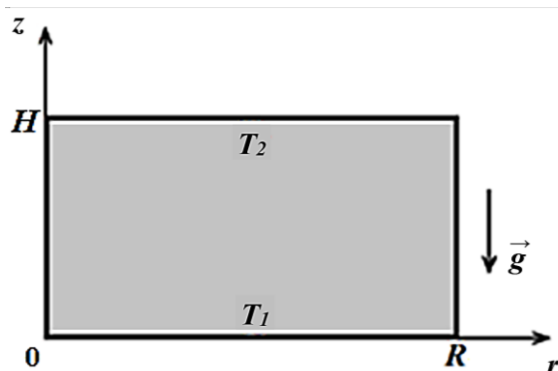


Рис. 1. Сечение вертикального цилиндра / Fig. 1. Section of a vertical cylinder

На основе уравнений Дарси – Буссинеска рассматривается задача о конвективных движениях несжимаемой теплопроводной жидкости в вертикальной цилиндрической области, заполненной пористой средой и подогреваемой снизу [1]. Система безразмерных дифференциальных уравнений в частных производных и естественных переменных для цилиндрических координат записывается в следующем виде:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (rU) + \frac{\partial W}{\partial z} = 0, \quad \frac{\partial P}{\partial r} + U = 0, \quad \frac{\partial P}{\partial z} + W - \lambda \theta = 0, \\ \frac{\partial \theta}{\partial t} = \Delta \theta + W - \left(U \frac{\partial \theta}{\partial r} + W \frac{\partial \theta}{\partial z} \right), \quad \Delta \theta = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \theta}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2}. \quad (1)$$

Здесь U, W – скорости по радиальной и осевой координатам; P – давление; ∂ – частная производная; Δ – оператор Лапласа. Для задачи о подогреве в случае линейного по высоте температурного профиля получается единственный безразмерный параметр – число Рэлея λ , которое прямо пропорционально градиенту температуры $\delta T > 0$.

Для системы (1) на осевой линии цилиндра обнуляются радиальная скорость и плотность теплового потока:

$$U(0, z, t) = 0, \quad \frac{\partial \theta(0, z, t)}{\partial r} = 0. \quad (2)$$

На боковой стенке и торцах цилиндра выполняются условия непроницаемости и изотермичности:

$$U(R, z, t) = 0, \quad \theta(R, z, t) = 0, \\ W(r, 0, t) = W(r, H, t) = 0, \quad \theta(r, 0, t) = \theta(r, H, t) = 0. \quad (3)$$

Задача (1)–(3) дополняется начальным условием только для температуры:

$$\theta(r, z, 0) = \theta^0(r, z). \quad (4)$$

Задачу термогравитационной конвекции в пористой среде (1)–(4) можно записать относительно температуры θ и функции тока ψ , которая вводится различными способами. Формулы с сингулярностью представлены в [8]:

$$U = \frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial z}, \quad W = -\frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial r}. \quad (5)$$

В результате подстановки (5) в (1) получается следующая система:

$$\Delta \psi = \frac{2}{r} \frac{\partial \psi}{\partial r} - \lambda r \frac{\partial \theta}{\partial r}, \quad \frac{\partial \theta}{\partial t} = \Delta \theta - \frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial r} - \frac{1}{r} \left[\frac{\partial \psi}{\partial z} \frac{\partial \theta}{\partial r} - \frac{\partial \psi}{\partial r} \frac{\partial \theta}{\partial z} \right]. \quad (6)$$

Второй вариант введения функции тока дается формулами

$$U = \frac{\partial \psi}{\partial z}, \quad W = -\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r\psi). \quad (7)$$

В этом случае система уравнений фильтрационной конвекции относительно температуры и функции тока имеет вид

$$\Delta \psi = \frac{\psi}{r^2} - \lambda \frac{\partial \theta}{\partial r}, \quad \frac{\partial \theta}{\partial t} = \Delta \theta - \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r\psi) - \left[\frac{\partial \psi}{\partial z} \frac{\partial \theta}{\partial r} - \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r\psi) \frac{\partial \theta}{\partial z} \right]. \quad (8)$$

Для систем (6) и (8) краевые условия (2), (3) переписываются в переменных функция тока и температуры:

$$\psi|_{r=0} = 0, \quad \psi|_{r=R} = 0, \quad \psi|_{z=0} = \psi|_{z=H} = 0, \\ \frac{\partial \theta}{\partial r}|_{r=0} = 0, \quad \theta|_{r=R} = 0, \quad \theta|_{z=0} = \theta|_{z=H} = 0. \quad (9)$$

Отметим, что для систем (6) и (8) с краевыми условиями (9) имеется инвариантность относительно замены

$$\theta(r, z) \rightarrow -\theta(r, H - z), \quad \psi(r, z) \rightarrow -\psi(r, H - z). \quad (10)$$

Далее в численных расчетах будут представлены режимы, которые получаются в силу данной дискретной симметрии по осевой координате z .

Численная схема в естественных переменных

При проведении расчетов в осесимметричной задаче фильтрационной конвекции в вертикальной цилиндрической области развивается численная схема с применением метода конечных разностей [9]. Для уравнений в естественных переменных с использованием смещённых сеток строится аппроксимация второго порядка точности.

По координатам r и z вводятся основные сетки, состоящие из узлов: $0 < r_1 < r_2 < \dots < r_j < \dots < r_{N_r} = R$, $0 = z_1 < z_2 \dots < z_k < \dots < z_{N_z} = H$, где N_r, N_z – число узлов; j, k – порядковые номера. Далее используются сетки со смещёнными узлами: $r_{j-1/2} = (r_j + r_{j-1})/2$, $j = \overline{2, N_r}$, $r_{1/2} = 0$, $z_{k+1/2} = (z_{k+1} + z_k)/2$, $k = \overline{2, N_z} - 1$.

В случае равномерного распределения узлов формируются сетки с постоянными шагами по радиальной h_r и осевой h_z координатам: $r_j = (j - \frac{1}{2})h_r$, $j = \overline{1, N_r}$, $h_r = \frac{R}{(N_r - \frac{1}{2})}$, $z_k = (k - 1)h_z$, $k = \overline{1, N_z}$, $h_z = H/(N_z - 1)$.

На двухточечных и трёхточечных шаблонах по обеим координатам строятся разностные операторы первых производных δ и D , а также операторы вычисления среднего δ^0 для целых и полужелых индексов j, k . Например, ниже представлены конечно-разностные операторы для z :

$$(\delta_z \theta)_j^{k-1/2} = \frac{\theta_j^k - \theta_j^{k-1}}{h_z}, \quad (\delta_z^0 \theta)_j^{k-1/2} = \frac{\theta_j^k + \theta_j^{k-1}}{2}, \quad (D_r \theta)_j^k = \frac{\theta_{j+1}^k - \theta_{j-1}^k}{2h_r}.$$

Для аппроксимации задачи в естественных переменных (1)–(4) используется интегро-интерполяционный метод и формулы численного интегрирования [9]. В результате получается система уравнений конвекции, записанная через введённые конечно-разностные операторы:

$$\left[\frac{1}{r} \delta_r (rU) + \delta_z W \right]_{j-1/2}^{k-1/2} = 0, \quad [\delta_r P + U]_j^{k-1/2} = 0, \quad \left[\delta_z P + W - \frac{\lambda}{r} \delta_r^0 (r\theta) \right]_{j-1/2}^k = 0,$$

$$\left[\frac{\partial \theta}{\partial t} \right]_j^k = [\Delta \theta + G(W) - J(\theta, U, W)]_j^k, \quad \Delta \theta = \frac{1}{r} \delta_r (r \delta_r \theta) + \delta_z^2 \theta.$$

Для аппроксимации уравнения движения по осевой координате также может быть использовано уравнение $[\delta_z P + W - \lambda \delta_r^0 \theta]_{j-1/2}^k = 0$; при дискретизации уравнения теплопроводности – два варианта аппроксимации силы Архимеда $G(W)$:

$$G(W) = \frac{G_1 + G_2}{2}, \quad G_1 = \delta_r^0 W, \quad G_2 = \frac{1}{r} \delta_r^0 (rW)$$

и три – конвективного слагаемого $J(\theta, U, W)$:

$$J(\theta, U, W) = \frac{J_1 + J_2 + J_3}{3}, \quad J_1 = \delta_z^0 U D_r \theta + \delta_r^0 W D_z \theta,$$

$$J_2 = \frac{1}{r} D_r (r \theta \delta_z^0 U) + D_z (\theta \delta_r^0 W), \quad J_3 = D_z (D_r \theta \delta_z^0 U) + D_r (D_z \theta \delta_r^0 W).$$

Дискретные аналоги краевых условий (3)–(5) записываются в узлах с номерами $k = \overline{1, N_z}$ и $j = \overline{1, N_r}$: $\frac{U_1^{k-1/2} + U_0^{k-1/2}}{2} = 0$, $\frac{\theta_1^k - \theta_0^k}{h_r} = 0$, $U_{N_r}^{k-1/2} = 0$, $\theta_{N_r}^k = 0$, $W_{j-1/2}^1 = W_{j-1/2}^{N_z} = 0$, $\theta_j^1 = \theta_j^{N_z} = 0$, где $U_0^{k-1/2} = -U_1^{k-1/2}$ и $\theta_0^k = \theta_1^k$ – значения в законтурных узлах.

Конечно-разностные уравнения относительно девиации температуры и функции тока

На основе полученной системы уравнений проводится дискретный переход от разностных уравнений осесимметричной задачи фильтрационной конвекции в естественных переменных к задаче относительно температуры и функции тока. Конечно-разностные аналоги для функции тока (5) даются формулами

$$U_j^{k-1/2} = \left(\frac{1}{r} \delta_z \psi \right)_j^{k-1/2}, \quad W_{j-1/2}^k = - \left(\frac{1}{r} \delta_r \psi \right)_{j-1/2}^k.$$

В результате для внутренних узлов основной сетки получаются следующие уравнения:

$$[\Delta \psi]_j^k = \left[\frac{2}{r} D_r \psi - \lambda r D_r \theta \right]_j^k, \tag{11}$$

$$\left[\frac{\partial \theta}{\partial t} \right]_j^k = \left[\Delta \theta - \frac{1}{r} D_r \psi - \frac{1}{r} (D_z \psi D_r \theta - D_r \psi D_z \theta) \right]_j^k. \tag{12}$$

Аналогичная система получается также посредством применения интегро-интерполяционного метода для аппроксимации уравнений (6).

Для второго варианта введения функции тока (7) имеем

$$U_j^{k-1/2} = (\delta_z \psi)_j^{k-1/2}, \quad W_{j-1/2}^k = - \left[\frac{1}{r} \delta_r (r\psi) \right]_{j-1/2}^k$$

и систему уравнений, являющуюся дискретным аналогом (8):

$$[\Delta\psi]_j^k = \left[\frac{\psi}{r^2} - \lambda D_r \theta \right]_j^k, \quad (13)$$

$$\left[\frac{\partial\theta}{\partial t} \right]_j^k = \left[\Delta\theta - \frac{1}{r} \delta_r (r \delta_r^0 \psi) - \left(D_r \theta D_z \psi - D_z \theta \frac{1}{r} \delta_r (r \delta_r^0 \psi) \right) \right]_j^k. \quad (14)$$

В окрестности осевой линии ($r = 0$) для уравнений (13), (14) использовались следующие аппроксимации:

$$[\Delta\psi]_1^k = \left[\frac{\psi}{r^2} \right]_1^k - \frac{\lambda}{2} (\delta_r \theta)_{3/2}^k,$$

$$\left[\frac{\partial\theta}{\partial t} \right]_1^k = \left[\Delta\theta - \frac{1}{r} \delta_r (r \psi) \right]_1^k - \frac{1}{2} (\delta_r \theta)_{3/2}^k (D_z \psi)_1^k + \frac{1}{2} (D_z \theta)_1^k \left(\frac{1}{r} \delta_r (r \psi) \right)_{3/2}^k.$$

Краевые условия (9) переписуются:

$$\frac{\psi_0^k + \psi_1^k}{2} = 0, (\delta_r \theta)_{1/2}^k = 0, \psi_{N_r}^k = 0, \theta_{N_r}^k = 0, \psi_j^0 = \psi_j^{N_z} = 0, \theta_j^0 = \theta_j^{N_z} = 0,$$

где в силу осевого условия $\psi_0^k = -\psi_1^k$.

Для численного исследования задачи фильтрационной конвекции Дарси – Буссинеска системы (11), (12) и (13), (14) представляются в матрично-векторном виде. Для первого варианта введения ψ имеем

$$A\Psi = 2C_1\Psi - \lambda B_1\Theta, \dot{\Theta} = A\Theta - C_1\Psi - F_1, \quad (15)$$

а для второго –

$$A\Psi = C_2\Psi - \lambda B_2\Theta, \dot{\Theta} = A\Theta - D\Psi - F_2. \quad (16)$$

Ленточная матрица A соответствует дискретному аналогу оператора Лапласа; B_1 и B_2 – силе Архимеда; матрицы C_1, C_2, D – линейным членам (содержат ψ); вектор-столбцы F_1 и F_2 – нелинейным членам в правой части уравнения теплопроводности (12) и (14). Массивы Θ и Ψ имеют размерность $[(1: N_r - 1) \times (2: N_z - 1)]$ и содержат узловые значения θ, ψ :

$$\Theta = \{\theta_1^2, \theta_2^2, \dots, \theta_j^k, \dots, \theta_{N_r-1}^{N_z-1}\}, \Psi = \{\psi_1^2, \psi_2^2, \dots, \psi_j^k, \dots, \psi_{N_r-1}^{N_z-1}\}.$$

Численные эксперименты и моделирование конвективных движений

Для проведения вычислительного эксперимента и анализа конвекции теплопроводной жидкости в пористых цилиндрах разработан программный комплекс в среде MATLAB на платформе Engee (URL: <https://start.engee.com>). Проводится численное решение соответствующих спектральных задач для определения порога возникновения конвекции и прямое – нелинейных уравнений для расчёта конвективных режимов.

Из (15) и (16) при нулевых $\dot{\Theta}$ и F получаются две задачи на собственные числа – критические значения числа Рэлея. В табл. 1 приведены результаты расчёта спектральной задачи (16) для широкого ($H < R$) сплошного цилиндра. На основе второго варианта задания функции тока (без сингулярности) вычислены первые пять критических значений числа Рэлея λ_{cr}^m ($m = \overline{1,5}$) для разных сеток. По каждому столбцу таблицы наблюдается численная сходимость критических чисел с увеличением числа узлов по радиальной и осевой координатам.

Таблица 1 / Table 1

Критические значения числа Рэлея $\lambda_{cr}^m, R = 2, H = 1$
 / Critical values of the Rayleigh number $\lambda_{cr}^m, R = 2, H = 1$

Сетка $N_r \times N_z$	Критические значения числа Рэлея (λ_{cr}^m)				
	λ_{cr}^1	λ_{cr}^2	λ_{cr}^3	λ_{cr}^4	λ_{cr}^5
12 × 8	44,09	54,91	72,76	103,45	153,5
18 × 12	42,89	51,86	66,24	88,19	119,4
24 × 16	42,47	50,83	64,21	83,79	110,5
36 × 24	42,18	50,10	62,83	80,90	104,9
48 × 32	42,08	49,85	62,37	79,94	103,1

В табл. 2 представлены результаты вычисления порога возникновения конвекции для двух вариантов введения функции тока (I / II). Расчёты проведены на различных сетках. С увеличением числа узлов наблюдается численная сходимость для обоих вариантов, при этом критические значения незначительно отличаются друг от друга. Для осесимметричной задачи при разных отношениях высоты и радиуса вертикального цилиндра критические числа – не кратные. Это подтверждает, что в случае сплошного вертикального цилиндра соответствующие начально-краевые задачи фильтрационной конвекции не являются косимметричными в смысле определения В.И. Юдовича [10].

Таблица 2 / Table 2

Вычисление λ_{cr}^m ($m = \overline{1, 3}$) на разных сетках; $R = 2, H = 1$
 / Calculation of λ_{cr}^m ($m = \overline{1, 3}$) on different grids; $R = 2, H = 1$

Сетка $N_r \times N_z$	Критические значения числа Рэлея ($\lambda_{cr}^m(I / II)$)		
	$\lambda_{cr}^1(I / II)$	$\lambda_{cr}^2(I / II)$	$\lambda_{cr}^3(I / II)$
12 × 8	44,09 / 45,73	54,91 / 53,88	72,76 / 80,35
24 × 16	42,47 / 42,85	50,83 / 50,59	64,21 / 65,55
48 × 32	42,08 / 42,17	49,85 / 49,79	62,37 / 62,68

Далее представлены результаты моделирования конвективных режимов для второго варианта введения функции тока на основе численной схемы п. 3. Для расчёта движений используется сетка 24×16 узлов. Сравнения с расчётами на более детальной сетке не выявили существенных отличий в моделировании конвекции.

При превышении порогового значения $\lambda_{cr}^1 = 42,85$ наступает конвекция и формируются стационарные режимы (рис. 2), где для половины вертикального сечения цилиндра показано развитие конвективного режима с ростом числа Рэлея.

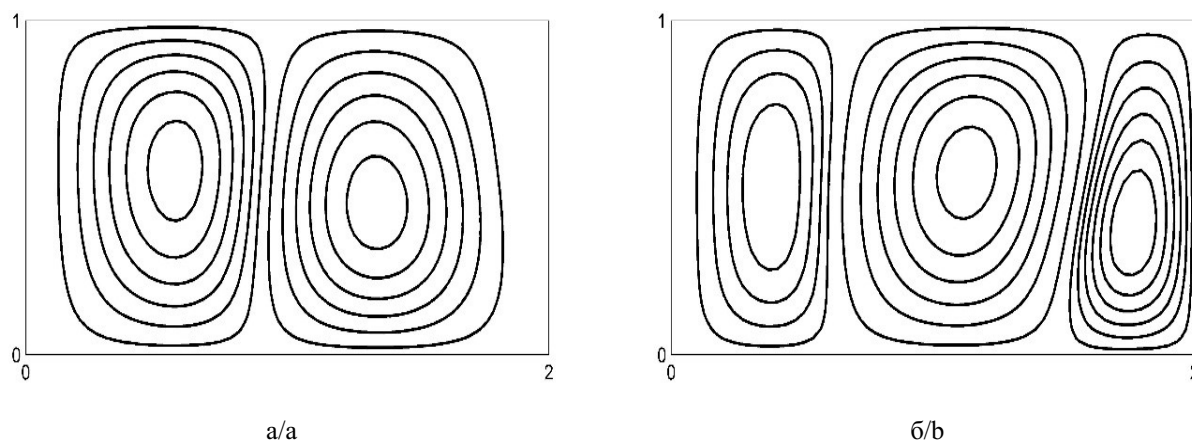


Рис. 2. Изменение стационарного конвективного режима с ростом числа Рэлея:
 а – $\lambda = 60$, б – $\lambda = 70$, $R = 2, H = 1$ / Fig. 2. Change in the stationary convective regime
 with increasing Rayleigh number: a - $\lambda = 60$, b - $\lambda = 70$, $R = 2, H = 1$

Вследствие имеющейся в задаче симметрии (10) в зависимости от начальных условий могут реализовываться стационарные конвективные режимы с восходящим или нисходящим потоком тепла по осевой линии. На рис. 3 представлены распределения температуры (слева) и функций тока (справа) таких движений, вычисленные при $\lambda = 60$. Видно, что режимы имеют по два основных конвективных вала (рис. 3б и 3г). Например, для рис. 3б прилегающий к осевой линии вал вращается по часовой стрелке, а соседний – против. Для симметричного режима наблюдается противоположная структура течения жидкости.

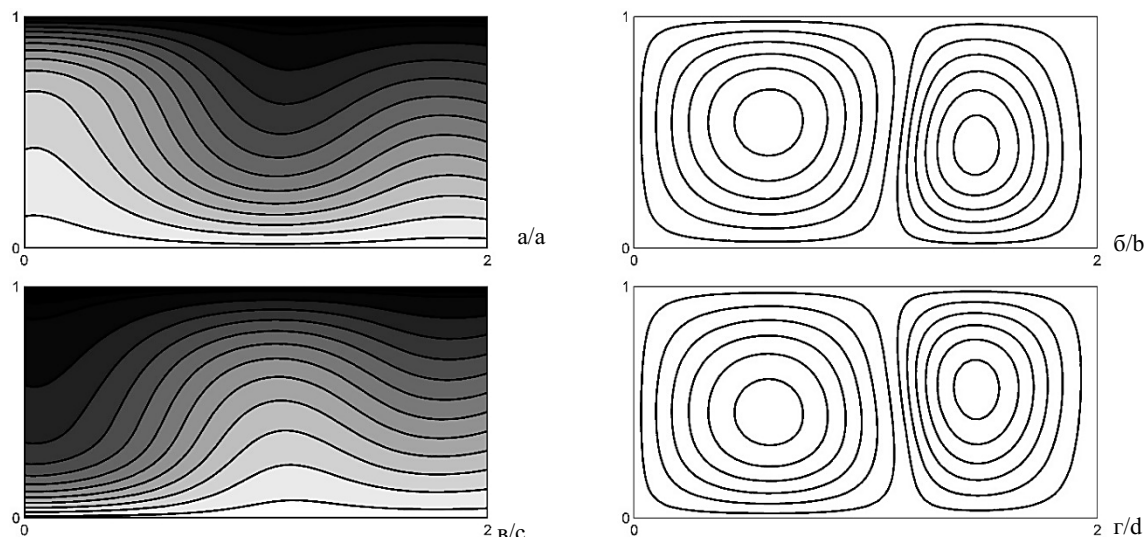


Рис. 3. Стационарные конвективные режимы при $\lambda = 60$, распределения температуры (а, в) и функции тока (б, г); $R = 2, H = 1$ / Fig. 3. Stationary convective regimes at $\lambda = 60$, temperature distributions (a, c) and stream functions (b, d); $R = 2, H = 1$

При достаточно больших числах Рейля появляются нестационарные движения. Для цилиндра $R = 2, H = 1$ колебательные режимы возникают при $\lambda \geq 80$. На рис. 5 отмечены точки, для которых на рис. 4 даны соответствующие этим моментам времени линии тока.

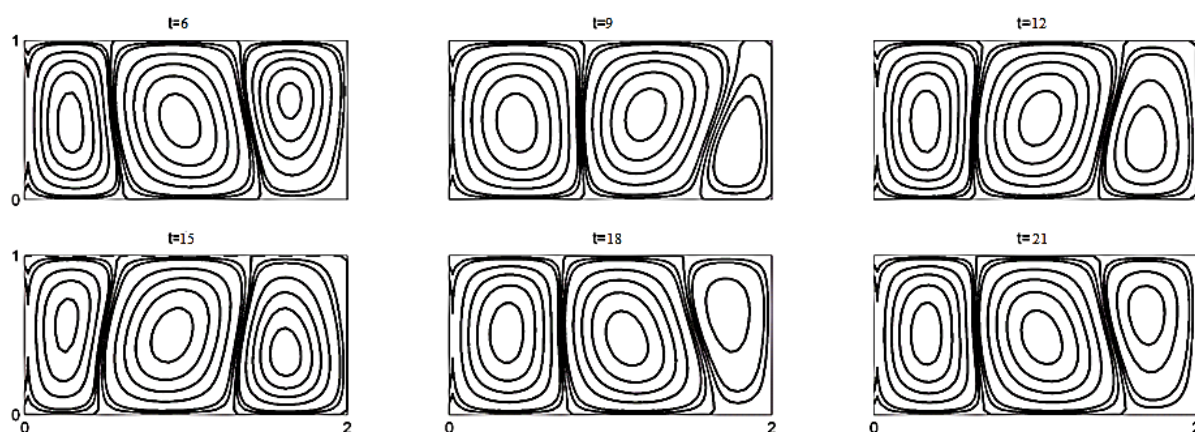


Рис. 4. Колебательный режим при $\lambda = 90$ / Fig. 4. Oscillatory mode at $\lambda = 90$

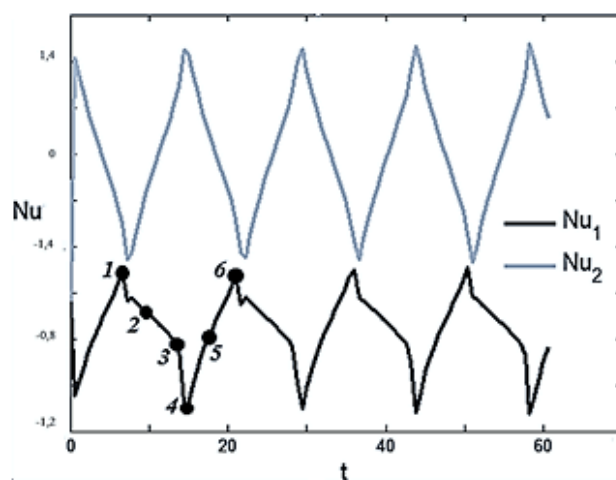


Рис. 5. Изменение чисел Нуссельта от времени / Fig. 5. Change in Nusselt numbers over time

Заключение

Рассмотрена осесимметричная задача о возникновении гравитационной конвекции несжимаемой теплопроводной жидкости в вертикальном цилиндре, заполненном пористой средой и подогреваемом снизу. На основе модели Дарси – Буссинеска и уравнений в цилиндрических координатах разработана численная схема со смещёнными сетками и специальной аппроксимацией в окрестности осевой линии. Проведена дискретизация для уравнений в естественных переменных, а также для систем относительно функции тока (с учётом двух вариантов введения) и девиации температуры. Представлены результаты вычисления критических чисел Рэлея, рассчитаны отвечающие от механического равновесия конвективные стационарные и колебательные режимы. В отличие от задач фильтрационной конвекции для горизонтальных цилиндров, в которых имеются семейства стационарных движений, для рассмотренной системы эффекта косимметрии не обнаружено.

Список источников

1. Nield D.A., Bejan A. *Convection in porous media*. Cham: Springer, 2017. 988 p. EDN: EKFFNI. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-49562-0>
2. Govorukhin V.N., Sumbatyan M.A., Tsybulin V.G. Multistability of convective flows in a porous enclosure // *Sixty Shades of Generalized Continua. Advanced Structured Materials*. 2023. Vol. 170. P. 305–320. EDN: LCHYIB. https://doi.org/10.1007/978-3-031-26186-2_19
3. Трофимова А.В., Цибулин В.Г. Фильтрационная конвекция в кольцевой области и ответвление семейства стационарных режимов // *Изв. РАН. Механика жидкости и газа*. 2014. № 4. С. 73–83. EDN: SJHVBV.
4. Коханов П.В., Цибулин В.Г. Моделирование фильтрационной конвекции в полярных координатах на неравномерной сетке // *Мат. моделирование*. 2025. Т. 37, № 3. С. 127–143. EDN: KATMSV. <https://doi.org/10.20948/mm-2025-03-09>
5. Kokhanov P.V., Tsybulin V.G. Modeling of Convective flows in a porous circular enclosure // *Current Developments in Solid Mechanics and Their Applications. Advanced Structured Materials*. 2025. Vol. 223. P. 337–348. https://doi.org/10.1007/978-3-031-90022-8_23
6. Barletta A., Rees D.A.S., Pulvirenti B. Buoyant flow instability induced by a uniform internal heat source in a vertical annular porous layer // *Int. J. of Heat and Mass Transfer*. 2022. Vol. 194. Art. 122935. EDN: ADZEGO. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2022.122935>
7. Hamtiaux V., Ruyer P., Bartosiewicz Y. Natural convection through and over a Heating Porous Medium: Towards High Fidelity Simulations of Nuclear Spent Fuel Pools // *Int. J. of Heat and Fluid Flow*. 2025. Vol. 112. Art. 109724. EDN: RUZGSU. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatfluidflow.2024.109724>
8. Кочин Н.Е., Кибель И.А., Розе Н.В. *Теоретическая гидромеханика*. М.: ФИЗМАТЛИТ, 1963. Ч. 1. 584 с.
9. Самарский А.А. *Теория разностных схем*. М.: Наука, 1977. 656 с.
10. Юдович В.И. Косимметрия, вырождение решений операторных уравнений, возникновение фильтрационной конвекции // *Мат. заметки*. 1991. Т. 49, вып. 5. С. 142–148.

References

1. Nield D.A., Bejan A. *Convection in porous media*. Cham: Springer; 2017. 988 p. EDN: EKFFNI. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-49562-0>
2. Govorukhin V.N., Sumbatyan M.A., Tsybulin V.G. Multistability of convective flows in a porous enclosure. *Sixty Shades of Generalized Continua. Advanced Structured Materials*. 2023;170:305-320. EDN: LCHYIB. https://doi.org/10.1007/978-3-031-26186-2_19
3. Trofimova A.V., Tsybulin V.G. Filtration convection in an annular domain and branching of a family of steady-state regimes. *Fluid Dynamics*. 2014;49(4):481-490. EDN: UEVZDV. <https://doi.org/10.1134/S0015462814040085>
4. Kokhanov P.V., Tsybulin V.G. Simulation of the convection in a porous medium in polar coordinates on a nonuniform grid. *Mathematical Models and Computer Simulations*. 2025;17(5):592-603. EDN: TKNWVP. <https://doi.org/10.1134/S2070048225700334>
5. Kokhanov P.V., Tsybulin V.G. Modeling of convective flows in a porous circular enclosure. *Current Developments in Solid Mechanics and Their Applications. Advanced Structured Materials*. 2025;223:337-348. https://doi.org/10.1007/978-3-031-90022-8_23

6. Barletta A., Rees D.A.S., Pulvirenti B. Buoyant flow instability induced by a uniform internal heat source in a vertical annular porous layer. *Int. J. of Heat and Mass Transfer*. 2022;194:122935. EDN: ADZEGO. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2022.122935>

7. Hamtiaux V., Ruyer P., Bartosiewicz Y. Natural convection through and over a heating porous medium: towards high fidelity simulations of nuclear spent fuel pools. *Int. J. of Heat and Fluid Flow*. 2025;112:109724. EDN: RUZGSU. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatfluidflow.2024.109724>

8. Kochin N.E., Kibel I.A., Rose N.V. *Theoretical hydromechanics*. Moscow: Physical and Mathematical Literature; 1963. Part 1. 584 p. (In Russ.).

9. Samarsky A.A. *Theory of difference schemes*. Moscow: Science; 1977. 656 p. (In Russ.).

10. Yudovich V.I. Cosymmetry, degeneration of solutions of operator equations, and onset of a filtration convection. *Mathematical Notes of the Academy of Sciences of the USSR*. 1991;49:540-545. EDN: XPYCEP. <https://doi.org/10.1007/BF01142654>

Информация об авторе

П.В. Коханов – аспирант Института математики, механики и компьютерных наук им. И.И. Воровича ЮФУ, преподаватель физического факультета ЮФУ.

Information about the author

P.V. Kokhanov – Postgraduate Student, Vorovich Institute of Mathematics, Mechanics and Computer Science, SFedU, Lecturer of the Physics Department, SFedU.

Статья поступила в редакцию 07.09.2025; одобрена после рецензирования 24.09.2025; принята к публикации 11.11.2025.
The article was submitted 07.09.2025; approved after reviewing 24.09.2025; accepted for publication 11.11.2025.

Научная статья

УДК 517.983

<https://doi.org/10.18522/1026-2237-2026-1-36-43>

ПРИМЕНЕНИЕ ГИПЕРСИНГУЛЯРНЫХ ИНТЕГРАЛОВ ДЛЯ ОБРАЩЕНИЯ ИНТЕГРАЛЬНЫХ ОПЕРАТОРОВ В НЕЭЛЛИПТИЧЕСКОМ СЛУЧАЕ

Андрей Петрович Чеголин

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

Аннотация. Исследуется вопрос применимости гиперсингулярных интегралов для построения положительных комплексных степеней дифференциальных операторов в неэллиптическом случае. Рассматриваемый класс дифференциальных операторов содержит многомерный телеграфный оператор. Отрицательные комплексные степени дифференциальных операторов реализуются как операторы типа потенциала с особенностью ядер на световом конусе будущего. Для последующего аналитического продолжения интегралов, зависящих от параметра, получены оценки для указанных ядер. Положительные степени определяются как операторы, которые обращают указанные восстановленные операторы типа потенциала. По характеру особенности их ядер подбираются модифицированные обобщенные разности, порождающие гиперсингулярные интегралы. Основной результат работы – теорема об обращении этими интегралами положительных комплексных степеней рассматриваемых дифференциальных операторов на функциях из специальных классов. Теорема позволяет говорить о том, что положительные комплексные степени операторов реализуются в виде гиперсингулярных интегралов. Доказательство этого утверждения получено строгим переходом к образам Фурье и базируется на полученной до этого в данной работе теореме о возможности построения аналитического продолжения интегральных операторов в предельно широкую область изменения порядка комплексных степеней дифференциального оператора.

Ключевые слова: гиперсингулярные интегралы, операторы типа потенциала, комплексные степени дифференциального оператора, аналитическое продолжение интегрального оператора, световой конус будущего

Для цитирования: Чеголин А.П. Применение гиперсингулярных интегралов для обращения интегральных операторов в неэллиптическом случае // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2026. № 1. С. 36–43. <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2026-1-36-43>

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

Original article

APPLICATION OF HYPERSINGULAR INTEGRALS FOR THE INVERSION OF INTEGRAL OPERATORS IN THE NON-ELLIPTIC CASE

Andrei P. Chegolin

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

Abstract. This work is devoted to the study of the applicability of hypersingular integrals for constructing positive complex powers of differential operators in the non-elliptic case. The class of differential operators considered here contains the multidimensional telegraph operator, in particular. The negative complex powers of the considered differential operators are realized as potential-type operators with a singularity of the kernels on the light cone of

© Чеголин А.П., 2026

the future. Estimates for these kernels are obtained for the subsequent analytic continuation of the integrals depending on the parameter. The positive powers are defined as operators that invert the restored potential-type operators. According to the nature of the singularities of their kernels, modified generalized differences are selected that generate hypersingular integrals. The main result of this work is the theorem on the inversion of positive complex powers of the differential operators under consideration by these integrals on functions from special classes. This theorem allows us to say that positive complex powers of these operators are realized as hypersingular integrals. The proof of this statement is obtained by a rigorous transition to Fourier images and is based on the theorem obtained earlier in this work on the possibility of constructing an analytical continuation of integral operators into an extremely wide domain of changing the order of complex powers of a differential operator.

Keywords: hypersingular integrals, potential-type operators, complex powers of a differential operator, analytical continuation of the integral operator, the light cone of the future

For citation: Chegolin A.P. Application of Hypersingular Integrals for the Inversion of Integral Operators in the Non-Elliptic Case. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2026;(1):36-43. (In Russ.). <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2026-1-36-43>

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

Введение и постановка задачи

При рассмотрении дифференциальных уравнений в прикладных задачах, сводящихся к уравнениям в частных производных, значительная роль отводится построению комплексных степеней известных дифференциальных операторов и их обобщений. Среди них особенно часто изучаются классические операторы математической физики, такие как операторы Лапласа, теплопроводности, Гельмгольца, волновой, операторы Клейна – Гордона – Фока, Шрёдингера и др. Отрицательные комплексные степени (с отрицательной действительной частью порядка) реализуются как операторы типа потенциала

$$\left(I_{\theta}^{\alpha}\varphi\right)(x)=\int_{R^n}\frac{\theta(t)}{|t|^{n-\alpha}}\varphi(x-t)dt,$$

а также более общие операторы с особенностями ядер на различных множествах в R^n . Положительные степени (с положительной действительной частью порядка) определяются как операторы, которые обращают соответствующие операторы типа потенциала. Гиперсингулярные интегралы (ГСИ) являются одной из моделей такого обращения.

Первые работы в этом направлении принадлежат С.Г. Самко, построившему обращение потенциалов Рисса и обобщенных потенциалов Рисса с однородными характеристиками с помощью ГСИ-метода [1, 2]. В более общем смысле оператор типа потенциала

$$\left(K_{\theta}^{\alpha}\varphi\right)(x)=\int_{R^n}\frac{\theta\left(\frac{t}{|t|}\right)}{|t|^{n-\alpha}}\varphi(x-t)dt,$$

ядро которого имеет достаточно гладкую и однородную характеристику $\theta\left(\frac{t}{|t|}\right)$, обратим в эллиптическом случае (случай невырождающегося символа) с помощью ГСИ:

$$\left(D_{\Omega}^{\alpha}f\right)(x)=\int_{R^n}\Omega\left(\frac{y}{|y|}\right)\frac{\left(A_y f\right)(x)}{|y|^{n+\alpha}}dt,$$

где однородная характеристика $\Omega\left(\frac{y}{|y|}\right)$ может быть явно вычислена через ядро $\theta\left(\frac{t}{|t|}\right)$ исходного оператора типа потенциала K_{θ}^{α} [3].

Далее обращение операторов типа потенциала в эллиптическом случае с достаточно гладкими характеристиками методом ГСИ было построено в работах С.Г. Самко, Б.С. Рубина, В.А. Ногина, А.П. Чеголина и др. [4–12]. В рамках этого метода также получено обращение некоторых модифицированных потенциалов, в [6, 8] рассмотрены односторонние потенциалы Рисса. Реализация метода ГСИ, успешно зарекомендовавшего себя в эллиптическом случае, оказалась затруднена в неэллиптическом случае, когда символ

$$k_{\theta}^{\alpha}(\xi) = \left(F \frac{\theta(t)}{|t|^{n-\alpha}} \right) (\xi)$$

оператора типа потенциала вырождается на некотором множестве в R^n . Тогда в отдельных частных случаях удастся построить ГСИ, реализующие положительные комплексные степени дифференциального оператора [13]. При этом необходимо учитывать характер вырождения символа и особенности поведения ядер на бесконечности, что влияет на построение ГСИ на этапе построения конечных разностей. В частности, в данной работе это приводит к построению модификаций стандартных обобщенных конечных разностей, подстраиваемых под конкретный характер вырождения символа.

Здесь приведена реализация метода ГСИ в неэллиптическом случае, где за основу взят достаточно широкий класс n -мерных интегральных операторов H_a^{α} , задаваемых в образах Фурье символами

$$\left(-r^2(\xi) + \frac{1-a^2}{4} - i\xi_1 \right)^{-\alpha/2},$$

где $r(\xi) = \sqrt{\xi_1^2 - \xi_2^2 - \dots - \xi_n^2}$ – лоренцева метрика (псевдоевклидова метрика пространства Минковского), $0 \leq a \leq 1$, $\text{Re } \alpha > n - 2$. Обращение такого рода операторов в терминах ГСИ представляет особый интерес, поскольку позволяет напрямую описывать решения классического уравнения в частных производных и их модификаций, возникающих в приложениях. В частности, рассмотренные здесь операторы при $a = 1$ реализуют отрицательные степени многомерного аналога телеграфного оператора

$$\frac{\partial^2}{\partial x_1^2} - \frac{\partial^2}{\partial x_2^2} - \dots - \frac{\partial^2}{\partial x_n^2} + \frac{\partial}{\partial x_1}.$$

Этот оператор является неоднородным и неэллиптическим. Такая ситуация сложна для нахождения комплексных степеней дифференциального оператора, особенно для построения конструкций, обращающих операторы типа потенциала. Двумерный телеграфный оператор

$$T\phi = \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} - LC \frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} - (RC + GL) \frac{\partial \phi}{\partial t},$$

построенный по классическому телеграфному уравнению

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} = LC \frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} + (RC + GL) \frac{\partial \phi}{\partial t} + GR\phi,$$

относится к классу таких операторов [13]. Здесь рассматривается обобщение этих операторов, перенесенных на случай большей размерности ($n > 2$).

Отрицательные комплексные степени рассматриваемых дифференциальных операторов

Восстановим явный вид ядер операторов, реализующих отрицательные комплексные степени рассматриваемого дифференциального оператора типа потенциала с символом

$$\left(-r^2(\xi) + \frac{1-a^2}{4} - i\xi_1 \right)^{-\alpha/2}, \quad 0 \leq a \leq 1, \text{Re } \alpha > n - 2. \text{ Это можно сделать следующим образом. К}$$

данному символу формально применяется обратное преобразование Фурье. В результате получаем ядра, имеющие особенность на световом конусе будущего:

$$K_+^\alpha = \{y \in R^n : y_1^2 - y_2^2 - \dots - y_n^2 \geq 0, y_1 \geq 0\};$$

$$h_a^\alpha(y) = \begin{cases} c_{n,a}(\alpha) e^{-\frac{y_1}{2}} g_a^\alpha(y) r^{\alpha-n}, & \text{если } y \in K_+^\alpha, \\ 0, & \text{если } y \notin K_+^\alpha, \end{cases}$$

где $g_a^\alpha(y) = \begin{cases} \frac{I_{\alpha-n} \left(\frac{ar(y)}{2} \right)}{r^{\frac{\alpha-n}{2}}}, & \text{если } 0 < a \leq 1, \\ 1, & \text{если } a = 0. \end{cases}$

Предполагаем, что на данном этапе интегральные операторы $(H_a^\alpha \varphi)(x) = \int_{R^n} h_a^\alpha(t) \varphi(x-t) dt$,

$0 \leq a \leq 1, \operatorname{Re} \alpha > n - 2$, реализуют отрицательные степени данного дифференциального оператора. Этот факт будет иметь строгое обоснование, если мы получим формулу преобразования Фурье для оператора H_a^α с плотностями из инвариантных пространств. Ядра $h_a^\alpha(y)$ интегрируемы для $0 \leq a < 1$, поэтому формула преобразования Фурье для соответствующего интегрального оператора очевидна для интегрируемых плотностей.

Если $a = 1$, то необходимо сузить класс плотностей: рассмотрим плотности из пространств Φ_V типа Лизоркина – Самко [14], которые являются обобщениями пространства Лизоркина Φ [15] в случае, когда функции Шварца обращаются в нуль вместе со всеми своими производными не в начале координат, а на некотором замкнутом множестве V . Тогда множество V выбирается в соответствии со множеством вырожденности символа. Если бы предполагалось, что комплексные степени дифференциального оператора будут рассматриваться и на функциях

из пространств $L_p = L_p(R^n) = \left\{ \varphi : \int_{R^n} |\varphi(x)| dx < \infty \right\}$, то для построения множества V также было

бы необходимым следующее условие: оно должно быть квазиломанным, если $1 < p < \infty$, т.е. в любом конечном шаре оно должно быть вложено в объединение конечного числа гиперподпространств размерности не выше $n - 1$. В крайнем случае – множеством нулевой меры при выполнении условия $2 \leq p < \infty$. Эти требования связаны с достаточным условием плотности класса Φ_V в L_p . Для операторов H_1^α в качестве такого класса можно взять класс

$$V = \{ \xi \in R^n : \xi_2 = \dots = \xi_n = 0 \}.$$

Сначала формула преобразования Фурье в слабом смысле

$$(H_1^\alpha \varphi)(x) = \frac{1}{(2\pi)^n} \int_{R^n} \frac{(F\varphi)(\xi)}{\left(-r^2(\xi) - i\xi_1^2 \right)^{\frac{\alpha}{2}}} e^{-ix \cdot \xi} d\xi$$

доказывается для функций из класса Φ_V . Затем она распространяется на класс Φ за счет построения аппроксимирующей последовательности функций из пространства Φ_V с учетом того, что символ является мультипликатором в классе образов Фурье функций из пространства Φ . Эта последовательность должна обладать специальными свойствами, в частности возможностью перехода к образам Фурье [14].

На основании полученной формулы преобразования Фурье в слабом смысле доказывается следующее утверждение, строго обосновывающее тот факт, что операторы H_a^α при $\operatorname{Re} \alpha > n - 2$ реализуют отрицательные комплексные степени рассматриваемого дифференциального оператора.

Теорема 1. Пусть $\operatorname{Re} \alpha > n - 2$, $0 \leq a \leq 1$. Тогда

$$(FH_a^\alpha \varphi)(\xi) = \frac{(F\varphi)(\xi)}{\left(-r^2(\xi) + \frac{1-a^2}{4} - i\xi_1\right)^{\alpha/2}},$$

где $\varphi \in L_1(\mathbb{R}^n)$ для $0 \leq a < 1$ и $\varphi \in \Phi$ для $a = 1$.

Аналитическое продолжение операторов типа потенциала

Для получения более общего результата – построения комплексных степеней рассматриваемого оператора в наиболее широком диапазоне изменения порядка α – обе части формулы преобразования Фурье в слабом смысле должны быть продолжены по аналитичности. Для этого используется теорема об аналитичности интеграла по параметру [8], требующая наличия суммируемой мажоранты по α для ядра интегрального оператора. Доказательство такой мажоранты было бы невозможно без его явной записи. В данном случае этот факт следует из представления ядра оператора H_a^α в терминах модифицированных функций Бесселя и из равномерных оценок для этих специальных функций относительно индекса.

Построим расширение полуплоскости $\operatorname{Re} \alpha > n - 2$ следующим образом: зафиксируем любое число $l \in \mathbb{N}$ и будем рассматривать все целые числа $k = 2 - n, \dots, 0, 1, \dots, l - 1$ ($n \geq 2$). Теперь введем в рассмотрение область

$$G_l = \left\{ \alpha \in \mathbb{C} : \operatorname{Re} \alpha > -l, \alpha \neq -k - i \frac{2\pi p}{\ln q} \right\},$$

где $p \in \mathbb{N}$, $q \in \mathbb{N} \setminus \{1\}$. ГСИ будем строить с использованием модификации стандартной обобщенной разности, учитывающей поведение ядра оператора H_a^α . В этом случае необходимо смоделировать эту модифицированную разность так, чтобы в образах Фурье оператор, построенный как соответствующее аналитическое продолжение, имел тот же символ, что и оператор H_a^α , что представляет трудность с технической точки зрения и делает эту задачу неразрешимой в неэллиптическом случае.

Будем рассматривать ГСИ вида

$$(J_a^\alpha \varphi)(x) = \frac{1}{d_{n,l}(\alpha)} \int_{R_+^n} \frac{(\tilde{\Delta}_y^l \varphi)(x, \alpha)}{y_1^{1-\alpha} (y_2^2 + \dots + y_n^2)^{\frac{2n-3-\alpha}{2}}} dy,$$

где $R_+^n = \{y \in \mathbb{R}^n : y_1 > 0\}$; $d_{n,l}(\alpha)$ – нормирующий коэффициент, соответствующий рассматриваемому символу.

Опишем принцип построения модифицированной обобщенной разности в случае $a = 0$. Выберем номер $q \in \mathbb{N} \setminus \{1\}$ так, что $\alpha \neq k + \frac{2\pi p}{\ln q}$, где $k \in \mathbb{N}$, $p \in \mathbb{Z} \setminus \{0\}$. Определим обобщенную разность следующим образом:

$$(\tilde{\Delta}_y^l \varphi)(x) = \sum_{k=0}^{n-2} d_k \frac{\left(1 - q^{2k} (y_2^2 + \dots + y_n^2)\right)_+^{\frac{n-3}{2}}}{e^{\frac{y_1}{2}}} \varphi(x_1 - y_1, x_2 - \delta_k^q y_2, \dots, x_n - \delta_k^q y_n),$$

где $\delta_k^q = y_1 \sqrt{\frac{\left(1 - q^{2k} (y_2^2 + \dots + y_n^2)\right)_+}{y_2^2 + \dots + y_n^2}}$; d_k – нормирующие коэффициенты, а

$$(f(y))_+ = \begin{cases} f(y), & \text{если } f(y) \geq 0 \\ 0, & \text{если } f(y) < 0. \end{cases}$$

Аналогичным образом (с учетом характера особенности ядра) происходит построение модификаций обобщенных разностей в случае других значений параметра a .

Формула преобразования Фурье в слабом смысле для рассматриваемого оператора типа потенциала доказана при $\operatorname{Re} \alpha > n - 2$, но по теореме о единственности в теории аналитических функций она остается справедливой в области G_l . Факту аналитического продолжения интеграла $(H_a^\alpha \varphi)(x)$ предшествует следующее утверждение о совпадении символов операторов H_a^α и J_a^α на функциях из соответствующих инвариантных пространств:

Лемма 1. Пусть $\alpha \in G_l$; $\varphi \in S$, где S – класс Шварца, если $0 \leq a < 1$, и $\varphi \in \Phi$, если $a = 1$. Тогда справедлива формула

$$(FJ_a^\alpha \varphi)(\xi) = \frac{(F\varphi)(\xi)}{\left(-r^2(\xi) + \frac{1-a^2}{4} - i\xi_1\right)^{\alpha/2}}.$$

Из леммы следует основное утверждение, описывающее отрицательные комплексные степени данного дифференциального оператора в предельно широкой области изменения параметра α .

Теорема 2. Пусть $\varphi \in S$, если $0 \leq a < 1$, и $\varphi \in \Phi$, если $a = 1$. Тогда интеграл $(J_a^\alpha \varphi)(x)$ абсолютно сходится в области G_l и представляет собой аналитическое продолжение интеграла $(H_a^\alpha \varphi)(x)$ из полуплоскости $\operatorname{Re} \alpha > n - 2$ в область G_l .

Положительные комплексные степени рассматриваемых дифференциальных операторов

Перейдем к построению ГСИ, которые обращают операторы H_a^α . Номер $q \in N \setminus \{1\}$, $\alpha \neq k + \frac{2\pi p}{\ln q}$, где $k \in N$, $p \in Z \setminus \{0\}$. Оператор D_a^α , обратный к H_a^α , может быть построен на основе оператора J_a^α за счет замены параметра α на $-\alpha$

$$(D_a^\alpha \varphi)(x) = (J_a^{-\alpha} \varphi)(x) = \frac{1}{d_{n,l}(-\alpha)} \int_{R_+^n} \frac{(\tilde{\Delta}_y^l \varphi)(x, -\alpha)}{y_1^{1+\alpha} (y_2^2 + \dots + y_n^2)^{\frac{2n-3+\alpha}{2}}} dy,$$

где $\operatorname{Re} \alpha < l$. Основным результатом является факт обращения операторов H_a^α операторами D_a^α на функциях из инвариантных пространств. Этот факт описан в следующем утверждении, проверяемом точным переходом к образам Фурье на соответствующих пространствах инвариантных функций на основе леммы 1 и теоремы 1.

Теорема 3. Пусть $0 < \operatorname{Re} \alpha < l$, $\alpha \notin N$; $\varphi \in S$, если $0 \leq a < 1$, и $\varphi \in \Phi$, если $a = 1$. Тогда справедлива формула $(D_a^\alpha H_a^\alpha \varphi)(x) = (H_a^\alpha D_a^\alpha \varphi)(x) = \varphi(x)$.

Заключение

На основании проведенных исследований с комплексными степенями данного дифференциального оператора сформулируем некоторые общие требования для применимости метода ГСИ в задаче обращения операторов типа потенциала. Это позволит систематизировать подходы для дальнейших постановок задач, связанных с рассмотрением комплексных степеней неэллиптических дифференциальных операторов с использованием этого метода.

1. Необходимо иметь технические возможности для восстановления явного вида ядер операторов типа потенциала. При этом на построение ГСИ существенно влияют свойства ядер, в частности особенности на бесконечности и на различных множествах в R^n .

2. Должна быть возможность получения суммируемой мажоранты для восстановленных ядер на соответствующем множестве в R^n .

3. Для того чтобы ядра были свертывателями, необходимо построить классы «достаточно хороших» функций для плотностей операторов типа потенциала так, чтобы в пространствах образов Фурье изначально заданные символы были мультипликаторами.

4. Должна существовать возможность построения аналитического продолжения потенциалов, реализующих положительные комплексные степени дифференциального оператора в более широкой области, захватывающей отрицательные действительные части порядка, за исключением, возможно, изолированных точек. При этом для построенного оператора, представляющего аналитическое продолжение, не должен меняться символ в образах Фурье.

Список источников

1. Самко С.Г. О пространствах риссовых потенциалов // Изв. АН СССР. Сер. мат. 1976. Т. 40, вып. 5. С. 1143–1172.
2. Самко С.Г. Обобщенные риссовые потенциалы и гиперсингулярные интегралы с однородными характеристиками, их символы и обращение // Исследования по теории дифференцируемых функций многих переменных и ее приложениям. Ч. 8 : сб. работ. Тр. МИАН СССР. 1980. Т. 156. С. 157–222.
3. Самко С.Г. О преобразовании Фурье функций $\frac{y_m(\frac{x}{|x|})}{|x|^{n+\alpha}}$ // Изв. вузов. Математика. 1978. № 7. С. 73–78.
4. Ногин В.А., Самко С.Г. О сходимости в $L_p(R^n)$ гиперсингулярных интегралов с однородной характеристикой. 47 с. Деп. в ВИНТИ, № 179-81. 1981.
5. Рубин Б.С. О риссовых потенциалах и операторах типа Римана – Лиувилля в полупространстве // Докл. АН СССР. 1984. Т. 279, № 1. С. 30–34.
6. Рубин Б.С. Мультипликаторные операторы и гиперсингулярные интегралы, связанные с задачей Коши для волнового уравнения // Докл. АН СССР. 1988. Т. 302, № 1. С. 20–23.
7. Самко С.Г., Килбас А.А., Маричев О.И. Интегралы и производные дробного порядка и их приложения. Минск: Наука и техника, 1987. 688 с.
8. Samko S.G. Hypersingular integrals and their applications. L.: Taylor&Francis, 2002. 359 p.
9. Алисултанова Э.Д., Ногин В.А. Обращение и описание обобщенных потенциалов Рисса с квадратными характеристиками // Изв. вузов. Математика. 1993. № 2. С. 3–11.
10. Chegolin A.P., Nogin V.A. Multidimensional potential integral transforms and description of L-characteristic of multiplier operators // Integral Transforms & Special Functions. 2002. Vol. 13, № 3. P. 193–197. EDN: KDSXJK. <https://doi.org/10.1080/10652460213512>
11. Чеголин А.П. Классы $L_{p,r}^\alpha$ типа Лизоркина – Самко, связанные с комплексными степенями телеграфного оператора // Изв. вузов. Математика. 2002. № 7. С. 58–64.
12. Ногин В.А., Чеголин А.П. Комплексные степени телеграфного и близких к нему операторов в L_p -пространствах // Диф. уравнения. 2003. Т. 39, № 3. С. 402–409.
13. Чеголин А.П. Отрицательные комплексные степени классического двумерного телеграфного оператора в пространствах $L_p(R^2)$ // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2017. № 4-1. С. 58–62. EDN: YKUNYI.
14. Самко С. Г. О плотности в $L_p(R^n)$ пространств Φ_V типа Лизоркина // Мат. заметки. 1982. Т. 31, № 6. С. 855–865.
15. Лизоркин П. И. Обобщенное лиувиллевское дифференцирование и метод мультипликаторов в теории вложений классов дифференцируемых функций // Тр. МИАН СССР. 1969. Т. 105. С. 89–167.

References

1. Samko S.G. On the spaces of Riesz potentials. *Mathematics of the USSR-Izvestiya*. 1976;10(5):1089-1117. <https://doi.org/10.1070/IM1976v010n05ABEH001827>
2. Samko S.G. Generalized Riesz potentials and hypersingular integrals with homogeneous characteristics, their symbols, and inversion. *Proc. Steklov Inst. Math.* 1983;156:173-243.
3. Samko S.G. On the Fourier transform of functions $\frac{y_m(\frac{x}{|x|})}{|x|^{n+\alpha}}$. *Soviet Math. (Iz. VUZ)*. 1978;22(7):60-64.
4. Nogin V.A., Samko S.G. *On convergence in $L_p(R^n)$ of hypersingular integrals with homogeneous characteristic*. 47 p. Deposited in VINITI. 1981;(179-81). (In Russ.).

5. Rubin B.S. On Riss potentials and Riemann-Liouville-type operators in the half-space. *Dokl. AN SSSR*. 1984;279(1):30-34. (In Russ.).
6. Rubin B.S. Multiplicative operators and hypersingular integrals associated with the Cauchy problem for the wave equation. *Dokl. AN SSSR*. 1988;302(1):20-23. (In Russ.).
7. Samko S.G., Kilbas A.A., Marichev O.I. *Integrals and derivatives of fractional order and their applications*. Minsk: Science and Technology; 1987. 688 p. (In Russ.).
8. Samko S.G. *Hypersingular integrals and their applications*. London: Taylor & Francis; 2002. 359 p.
9. Alisultanova E.D., Nogin V.A. Conversion and description of generalized Riss potentials with square characteristics. *Russian Math. (Iz. VUZ)*. 1993;37(2):1-9.
10. Chegolin A.P., Nogin V.A. Multidimensional potential integral transforms and description of L-characteristic of multiplier operators. *Integral Transforms & Special Functions*. 2002;13(3):193-197. EDN: KDSXJK. <https://doi.org/10.1080/10652460213512>
11. Chegolin A.P. Classes $L_{p,r}^\alpha$ of the Lizorkin-Samko type associated with complex powers of the telegraph operator. *Bulletin of Higher Educational Institutions. Mathematics*. 2002;(7):58-64. (In Russ.).
12. Nogin V.A., Chegolin A.P. Complex degrees of the telegraph and similar operators in L_p spaces. *Differ. Equ.* 2003;39(3):435-443. <https://doi.org/10.1023/A:1026086121389>
13. Chegolin A.P. Negative complex degrees of the classical two-dimensional telegraph operator in L_p (R^2) spaces. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science*. 2017;(4-1):58-62. (In Russ.). EDN: YKUNYI.
14. Samko S.G. Denseness of the Lizorkin-type spaces φ_v in $L_p(R^n)$. *Mat. Notes*. 1982;31(6):432-437. <https://doi.org/10.1007/BF01372352>
15. Lizorkin P.I. Generalized Liouville differentiation and the method of multipliers in the theory of embeddings of classes of differentiable functions. *Proc. Steklov Inst. Math.* 1969;105:105-202.

Информация об авторе

А.П. Чеголин – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры дифференциальных и интегральных уравнений Института математики, механики и компьютерных наук им. И.И. Воровича ЮФУ.

Information about the author

A.P. Chegolin – Candidate of Science (Physics and Mathematics), Associate Professor of the Department of Differential and Integral Equations, Vorovich Institute of Mathematics, Mechanics and Computer Science, SFedU.

Статья поступила в редакцию 28.09.2025; одобрена после рецензирования 24.10.2025; принята к публикации 11.11.2025.
The article was submitted 28.09.2025; approved after reviewing 24.10.2025; accepted for publication 11.11.2025.

Original article

UDC 539.3

<https://doi.org/10.18522/1026-2237-2026-1-44-52>

RECONSTRUCTION OF THERMOMECHANICAL CHARACTERISTICS OF INHOMOGENEOUS PIPE IN CLASSES OF LINEAR AND QUADRATIC FUNCTIONS

Alexander O. Vatulyan¹, Vladimir V. Dudarev², Sergey A. Nesterov³

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

³ Southern Mathematical Institute - Branch of the Vladikavkaz Scientific Center, Russian Academy of Sciences, Vladikavkaz, Russia

¹aovatulyan@srfedu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0444-4496>

²dudarev_vv@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2378-7574>

³1079@list.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3780-5104>

Abstract. Recently, functionally graded materials have been introduced in order to optimize structures. Functionally graded materials are composites consisting of two components, the volume fractions of which smoothly change according to a given gradient. A simplified scheme for identification the thermomechanical property of materials whose manufacturing technology varies within the class of power functions is required. The problem of reconstructing the variable physical and mechanical characteristics of an inhomogeneous thermoelastic pipe is investigated. The inner surface of the pipe is stress-free, and an unsteady load acts on the outer surface. Additional information is removed in the load region. To solve the direct problem, the finite element FlexPDE package is used. The direct problem solution is verified, and the influence of power laws of change in physical and mechanical properties on temperature and displacement is investigated. Based on the operator equations obtained earlier, a projection-iterative approach was applied to solve the inverse problem. The search class of reconstructed characteristics is narrowed down to polynomial functions. The coefficients of the polynomials were refined by solving a system of algebraic equations resulting from the discretization of operator equations. During the iterative process, the physical and mechanical characteristics were refined first among constants, then linear, and then quadratic functions.

Keywords: physical and mechanical properties, pipe, thermoelasticity, inhomogeneous material, coefficient inverse problem, FlexPDE package, Fredholm integral equation of the first kind, projection-iterative approach

For citation: Vatulyan A.O., Dudarev V.V., Nesterov S.A. Reconstruction of Thermomechanical Characteristics of Inhomogeneous Pipe in Classes of Linear and Quadratic Functions. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2026;(1):44-52. <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2026-1-44-52>

Acknowledgments: the study was supported by the grant of the Russian Science Foundation No. 22-11-00265-P, <https://rscf.ru/en/project/22-11-00265/>, 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).

Научная статья

РЕКОНСТРУКЦИЯ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК НЕОДНОРОДНОЙ ТРУБЫ В КЛАССАХ ЛИНЕЙНЫХ И КВАДРАТИЧНЫХ ФУНКЦИЙ

*Александр Ованесович Ватульян*¹, *Владимир Владимирович Дударев*²,
Сергей Анатольевич Нестеров^{3✉}

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

³ Южный математический институт – филиал Владикавказского научного центра РАН, Владикавказ, Россия

¹ aovatulyan@sfedu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0444-4496>

² dudarev_vv@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2378-7574>

³ 1079@list.ru[✉], <https://orcid.org/0000-0003-3780-5104>

Аннотация. В последнее время с целью оптимизации конструкций стали внедряться функционально-градиентные материалы – композиты, состоящие из двух компонентов, объемные доли которых плавно изменяются по заданному градиенту. Требуется создание упрощенной схемы идентификации материальных свойств материалов, которые, согласно технологии изготовления, изменяются в классе степенных функций. Исследована задача реконструкции переменных физико-механических характеристик неоднородной термоупругой трубы. Внутренняя поверхность трубы свободна от напряжений, а на внешней поверхности действует нестационарная нагрузка. Дополнительная информация снимается в области действия нагрузки. Для решения прямой задачи применяется конечно-элементный пакет FlexPDE. Проведена верификация решения прямой задачи и исследовано влияние степенных законов изменения физико-механических характеристик на температуру и смещение. Опираясь на полученные ранее операторные уравнения, для решения обратной задачи применен проекционно-итерационный подход. Проведено сужение класса поиска реконструируемых характеристик до полиномиальных функций. Коэффициенты полиномов уточнялись путем решения системы алгебраических уравнений, возникшей в результате дискретизации операторных уравнений. Физико-механические характеристики в ходе итерационного процесса уточнялись сначала среди констант, затем линейных, а потом – квадратичных функций.

Ключевые слова: физико-механические характеристики, труба, термоупругость, неоднородный материал, коэффициентная обратная задача, пакет FlexPDE, интегральное уравнение Фредгольма 1-го рода, проекционно-итерационный подход

Для цитирования: Vatulyan A.O., Dudarev V.V., Nesterov S.A. Reconstruction of Thermomechanical Characteristics of Inhomogeneous Pipe in Classes of Linear and Quadratic Functions // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2026. № 1. С. 44–52. <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2026-1-44-52>

Благодарности: исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-11-00265-П, <https://rscf.ru/en/project/22-11-00265/>, в Южном федеральном университете.

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

Introduction

Functionally graded materials (FGM) are widely used in high-temperature environments [1, 2]. FGM are composite materials consisting of two components, the volume fractions of which smoothly change along a given gradient [1-3].

Various technologies are used to create FGM with specified properties, including additive manufacturing [4, 5], also known as 3-D printing. From a practical point of view, for the efficient and convenient implementation of such a process, it is desirable for the properties of FGM objects to have fairly simple laws of change along coordinates, such as power or exponential functions [5]. However, the production of FGM faces some problems, for example, the instability of the connection of materials due to different

physical and chemical properties. Therefore, it is important to control the obtained laws of inhomogeneity by solving coefficient inverse problems (CIP) of thermoelasticity.

When solving inverse problems, it is necessary to repeatedly solve the direct problem. Currently, a sufficient number of works have been conducted on the thermomechanical behavior of inhomogeneous cylindrical bodies under exponential and power-law laws of changes in their properties [6-8].

A large number of works have been devoted to solving the CIP within the framework of models of thermal conductivity [9-12], thermoelasticity [13-15] and thermoelectroelasticity [16]. In this case, the main solution method is to minimize the residual functional using gradient methods [10, 12, 13] or artificial neural networks [11, 17]. However, this approach requires multiple attempts to solve the direct problem, which often leads to a large expenditure of machine time. An iterative approach to solving the inverse problem of thermoelasticity is proposed in [18-20], which allows for the reconstruction of material property at points on a grid of radial coordinate. However, this approach is difficult for engineering applications. Recent studies have focused on developing more practical identification schemes. For instance, [21] explored specific challenges in identifying physical and mechanical characteristics of inhomogeneous bodies under thermal loading, highlighting the need for robust methods. Furthermore, [22] advanced this field by proposing an identification technique for variable thermomechanical characteristics of rod specifically within the class of polynomials, demonstrating the potential for reconstructing properties in a form directly applicable to engineering analysis.

This paper presents a modification of the iterative approach previously developed in [20] by using a projection scheme [22] for solving operator equations and solving a direct problem using the finite element method (FEM) in the FlexPDE package.

Solution of the direct problem

Consider an inhomogeneous thermoelastic pipe, the inner surface of which is free from loads, and an unsteady thermal or mechanical load acts on the outer surface.

The dimensionless formulation of the problem, describing the unsteady oscillations of an inhomogeneous thermoelastic pipe, is given by [19]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial \xi} \left((\bar{\lambda} + 2\bar{\mu}) \frac{\partial U}{\partial \xi} + \bar{\lambda} \frac{U}{\xi} - \bar{\gamma} \mathcal{G} \right) + \frac{2\bar{\mu}}{\xi} \left(\frac{\partial U}{\partial \xi} - \frac{U}{\xi} \right) &= \bar{\rho} \frac{\partial^2 U}{\partial \tau^2}, \quad \xi_0 \leq \xi \leq 1, \quad \tau \geq 0, \\ \frac{1}{\xi} \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\bar{k}(\xi) \xi \frac{\partial \mathcal{G}}{\partial \xi} \right) &= \bar{c}(\xi) \frac{\partial \mathcal{G}}{\partial \tau} + \delta_0 \bar{\gamma}(\xi) \left(\frac{\partial^2 U}{\partial \xi \partial \tau} + \frac{1}{\xi} \frac{\partial U}{\partial \tau} \right), \quad \xi_0 \leq \xi \leq 1, \quad \tau \geq 0, \\ \mathcal{G}(\xi_0, \tau) &= 0, \quad (\bar{\lambda}(\xi_0) + 2\bar{\mu}(\xi_0)) \frac{\partial U}{\partial \xi}(\xi_0, \tau) + \bar{\lambda}(\xi_0) \frac{U(\xi_0, \tau)}{\xi_0} - \\ &- \bar{\gamma}(\xi_0) \mathcal{G}(\xi_0, \tau) = 0, \quad -\bar{k}(1) \frac{\partial \mathcal{G}}{\partial \xi}(1, \tau) = \chi(\tau), \\ (\bar{\lambda}(1) + 2\bar{\mu}(1)) \frac{\partial U}{\partial \xi}(1, \tau) + \bar{\lambda}(1) U(1, \tau) - \bar{\gamma}(1) \mathcal{G}(1, \tau) &= \psi(\tau), \quad \mathcal{G}(\xi, 0) = U(\xi, 0) = \frac{\partial U}{\partial \tau}(\xi, 0) = 0. \end{aligned} \tag{1}$$

Here, ξ is the radial coordinate; τ is the time; U is the radial displacement; \mathcal{G} is the temperature increment; $\bar{\lambda}$ and $\bar{\mu}$ are the Lamé module; $\bar{\rho}$ is the density; \bar{k} is the thermal conductivity coefficient; \bar{c} is the specific heat capacity; $\bar{\gamma}$ is the temperature stress coefficient; δ_0 is the connectivity parameter; $\chi(\tau)$ and $\psi(\tau)$ are the laws of change of thermal and mechanical load over time.

The direct thermoelasticity problem for a pipe consists of finding the displacement and temperature fields by solving the initial-boundary value problem (1) under given laws of the thermomechanical characteristics.

In this paper, the solution to the direct problem is implemented using the FlexPDE finite element package. To verify the accuracy of the numerical solution to the direct problem (1) in FlexPDE, a comparison is made with the analytical solution for a homogeneous pipe in the case of an uncoupled problem. It is found that the relative error of the finite element solution under thermal loading does not exceed 0.4 %, and under mechanical loading, 0.8 %.

The influence of thermomechanical properties on temperature and displacement in the load region is investigated. It was found that both $\bar{k}(\xi)$ and $\bar{\mu}(\xi)$ have a large effect on temperature and radial displacement; the influence $\bar{\lambda}(\xi)$ is much weaker; the influence $\bar{\gamma}(\xi)$ is proportional to the parameter δ_0 .

Solution of the inverse problem

In the inverse problem, it is necessary to restore the laws of change of material characteristics \bar{a} ($\bar{\lambda}$, $\bar{\mu}$, $\bar{\rho}$, \bar{k} , \bar{c} , $\bar{\gamma}$) from (1) according to additional information:

$$\begin{aligned} \mathcal{G}(1, \tau) &= f_1(\tau), \quad \tau \in [a_1, a_2], \\ U(1, \tau) &= f_2(\tau), \quad \tau \in [a_3, a_4]. \end{aligned} \quad (2)$$

CIP (1), (2) is a nonlinear problem in the mechanics of coupled fields. To solve it in [19, 20] in the case of loads $\chi(\tau) = H(\tau)$, $\psi(\tau) = H(\tau)$, two operator equations of the 1st kind were obtained:

$$\begin{aligned} & \int_{\xi_0}^1 \delta \bar{k}^{(n-1)} R_1(\xi, \tau) \xi d\xi + \int_{\xi_0}^1 \delta \bar{\gamma}^{(n-1)} R_2(\xi, \tau) \xi d\xi + \int_{\xi_0}^1 \delta \bar{c}^{(n-1)} R_3(\xi, \tau) \xi d\xi = \\ & = f_1(\tau) - \mathcal{G}^{(n-1)}(1, \tau), \quad \tau \in [a_1, a_2], \\ & \int_{\xi_0}^1 \delta \bar{\lambda}^{(n-1)} R_4(\xi, \tau) \xi d\xi + \int_{\xi_0}^1 \delta \bar{\mu}^{(n-1)} R_5(\xi, \tau) \xi d\xi + \int_{\xi_0}^1 \delta \bar{\rho}^{(n-1)} R_6(\xi, \tau) \xi d\xi - \\ & - \int_{\xi_0}^1 \delta \bar{\gamma}^{(n-1)} R_7(\xi, \tau) \xi d\xi = -(f_2(\tau) - U^{(n-1)}(1, \tau)), \quad \tau \in [a_3, a_4]. \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \text{Here, } R_1(\xi, \tau) &= \left(\frac{\partial \mathcal{G}^{(n-1)}}{\partial \xi} \right)^2, \quad R_2(\xi, \tau) = \delta_0 \left(\frac{\partial U^{(n-1)}}{\partial \xi} + \frac{U^{(n-1)}}{\xi} \right) \frac{\partial \mathcal{G}^{(n-1)}}{\partial \tau}, \quad R_3(\xi, \tau) = \frac{\partial \mathcal{G}^{(n-1)}}{\partial \tau} \mathcal{G}^{(n-1)}, \\ R_4(\xi, \tau) &= \left(\frac{\partial U^{(n-1)}}{\partial \xi} + \frac{U^{(n-1)}}{\xi} \right)^2, \quad R_5(\xi, \tau) = \left(\frac{\partial U^{(n-1)}}{\partial \xi} \right)^2 + \left(\frac{U^{(n-1)}}{\xi} \right)^2, \quad R_6(\xi, \tau) = \frac{\partial^2 U^{(n-1)}}{\partial \tau^2} U^{(n-1)}, \\ R_7(\xi, \tau) &= \left(\frac{\partial U^{(n-1)}}{\partial \xi} + \frac{U^{(n-1)}}{\xi} \right) \mathcal{G}^{(n-1)}. \end{aligned}$$

Expressions (3) are Fredholm integral equations (FIEs) of the 1st kind for finding corrections to the physical and mechanical characteristics $\delta \bar{a}$ ($\delta \bar{\lambda}$, $\delta \bar{\mu}$, $\delta \bar{\rho}$, $\delta \bar{k}$, $\delta \bar{c}$, $\delta \bar{\gamma}$) at the $(n-1)$ -th iteration.

In the case of separate identification of material characteristics, we obtain simplified equations in the form:

$$\int_{\xi_0}^1 \delta \bar{a}^{(n-1)} R_s(\xi, \tau) \xi d\xi = F(\tau). \quad (4)$$

Here, $R_s(\xi, \tau)$ are the kernels, and $F(\tau)$ and is the right side of the integral equations (4).

According to the manufacturing technology, it is advisable to restore the physical and mechanical properties of the FGM in the class of polynomials. Let us present the laws of change of physical and mechanical characteristics in the form of decomposition by power functions:

$$\delta \bar{a}^{(n-1)}(\xi) = \sum_{i=1}^N c_i^{(n-1)} \eta_i(\xi), \quad \eta_i(\xi) = \xi^{i-1}, \quad i = 1..N. \quad (5)$$

Taking into account the representation (5), we write the integral equations (4) for a set of m points τ_j :

$$\sum_{i=1}^N c_i^{(n-1)} \int_{\xi_0}^1 \eta_i(\xi) R_s^{(n-1)}(\xi, \tau_j) \xi d\xi = F^{(n-1)}(\tau_j), \quad \tau_j \in [a_1, a_2], \quad j = 1..m. \quad (6)$$

Then expression (6) can be written in the form of a system of linear algebraic equations (SLAEs) with respect to the unknown expansion coefficients c_i at the $(n-1)$ th iteration:

$$\sum_{i=1}^N c_i^{(n-1)} M_{ij}^{(n-1)} = B_j^{(n-1)}, \quad j = 1..m. \quad (7)$$

Here, $M_{ij}^{(n-1)} = \int_{\xi_0}^1 \eta_i(\xi) R_s^{(n-1)}(\xi, \tau_j) \xi d\xi$, $B_j^{(n-1)} = F^{(n-1)}(\tau_j)$, $i = 1..N$, $j = 1..m$.

Solving the ill-conditioned SLAE (7) is an ill-posed problem. To ensure stability, the Tikhonov regularization method [23] is employed.

The exit criteria for the iterative process at each reconstruction stage are: a) reaching the maximum number of iterations $n = 20$; b) achieving the limiting value κ of the residual functional. Two types

of residual functionals are used: a) $J_1 = \int_{a_1}^{a_2} (f_1(\tau) - \mathcal{G}^{(n-1)}(1, \tau))^2 d\tau$ for thermal load;

b) $J_2 = \int_{a_3}^{a_4} (f_2(\tau) - U^{(n-1)}(1, \tau))^2 d\tau$ for mechanical load.

Let us consider the stages of the projection-iteration scheme for reconstructing the physical and mechanical characteristics of a pipe.

At the first stage, based on a priori information about the desired characteristic, an initial approximation $\bar{a}^{(0)} = \frac{\bar{a}_- + \bar{a}_+}{2}$ is found. Here, \bar{a}_- and \bar{a}_+ are the minimum and maximum values of the desired function, respectively.

At the second stage, the function $\bar{a}(\xi)$ is reconstructed among the constants at $\kappa = 10^{-2}$. To do this, the regularized SLAEs (7) is solved for $N = 1$, and refinement $\bar{a}(\xi)$ is performed at the $(n - 1)$ -th iteration according to the rule:

$$\bar{a}^{(n)}(\xi) = \bar{a}^{(n-1)}(\xi) + \delta \bar{a}^{(n-1)}(\xi).$$

At the third stage, the function $\bar{a}(\xi)$ is reconstructed in the class of linear functions for $N = 2$ at (7) and $\kappa = 10^{-4}$. The constant found in the second stage is used as an initial approximation.

At the fourth stage, the function $\bar{a}(\xi)$ is reconstructed in the class of quadratic functions for $N = 3$ at (7) and $\kappa = 10^{-5}$.

Results of reconstruction

Let us consider the results of separate reconstruction of the thermomechanical characteristics of a pipe based on the projection-iterative approach at $\xi_0 = 0,5$, $\delta_0 = 0,05$. The input information was modeled by solving the direct problem (1) in the FlexPDE package with an exact law of the desired characteristic.

The maximum reconstruction error was determined by the formula $\varepsilon = \frac{|\bar{a}_{ex}(\xi) - \bar{a}_{rec}(\xi)|}{\max_{\xi \in [\xi_0, 1]} \bar{a}_{ex}(\xi)} \cdot 100\%$,

where $\bar{a}_{ex}(\xi)$ is the exact law, $\bar{a}_{rec}(\xi)$ is the reconstructed one.

As a result of computational experiments, it was found that the error in reconstructing thermomechanical characteristics, except for $\bar{\gamma}(\xi)$ and $\bar{\lambda}(\xi)$ in the class of quadratic functions, does not exceed 3 %.

Fig. 1, 2 shows the exact characteristic (solid line) and the reconstructed characteristic in the form of a linear function (dashed line) and a quadratic function (dots).

Fig. 1 shows the graphs of the reconstruction of functions: a) $\bar{\rho}(\xi) = 2,14 - 1,56(\xi - \xi_0)^2$; b) $\bar{c}(\xi) = 1,4 - 2,4\xi + 1,6\xi^2$. The observation intervals were $[a_1; a_2] = [0.02; 0.88]$, $[a_3; a_4] = [0.01; 0.26]$. The input information was measured at 5 points within the selected intervals.

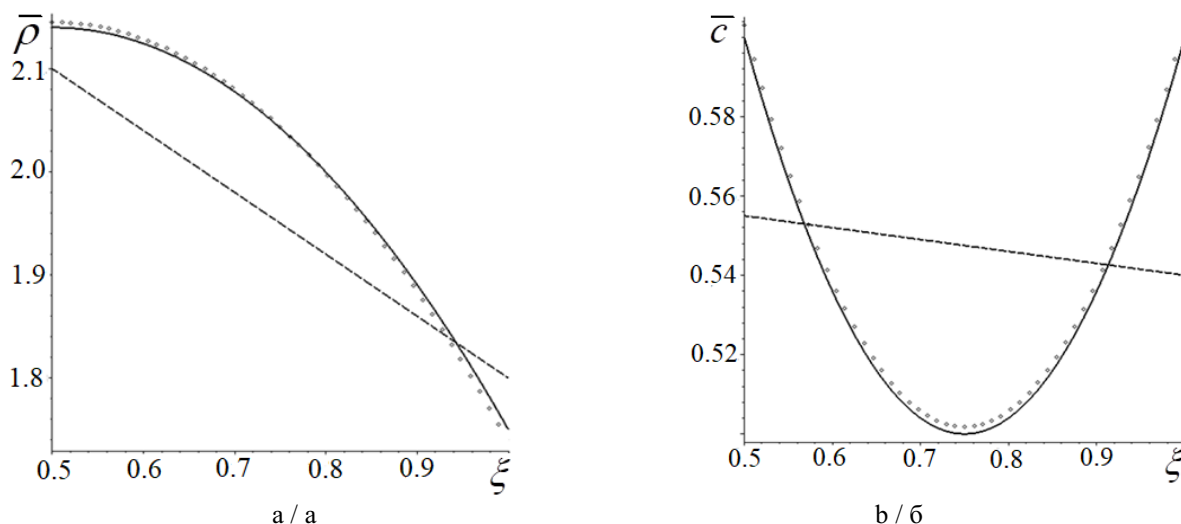


Fig. 1. Results of reconstruction of functions: a - $\bar{\rho}(\xi) = 2.14 - 1.56(\xi - \xi_0)^2$; b - $\bar{c}(\xi) = 1.4 - 2.4\xi + 1.6\xi^2$ /
 Рис. 1. Результаты реконструкции функций: а - $\bar{\rho}(\xi) = 2,14 - 1,56(\xi - \xi_0)^2$; б - $\bar{c}(\xi) = 1,4 - 2,4\xi + 1,6\xi^2$

From Fig. 1 it follows that, when using the projection-iterative approach, there is no large error in the reconstruction of the specific heat capacity in the region of the inner surface of the pipe, as in [19].

Fig. 2 shows the results of the reconstruction of functions: a) $\bar{\lambda}(\xi) = 0.76 + 0.48 \left(\frac{\xi - \xi_0}{1 - \xi_0} \right)^2$; b) $\bar{\gamma}(\xi) = 1.38 - 0.95(\xi - \xi_0)^2$ for $\delta_0 = 0.4$. The observation intervals were: $[a_1, a_2] = [0.09, 0.78]$, $[a_3, a_4] = [0.05, 0.35]$. The input information was measured at 6 points within the intervals.

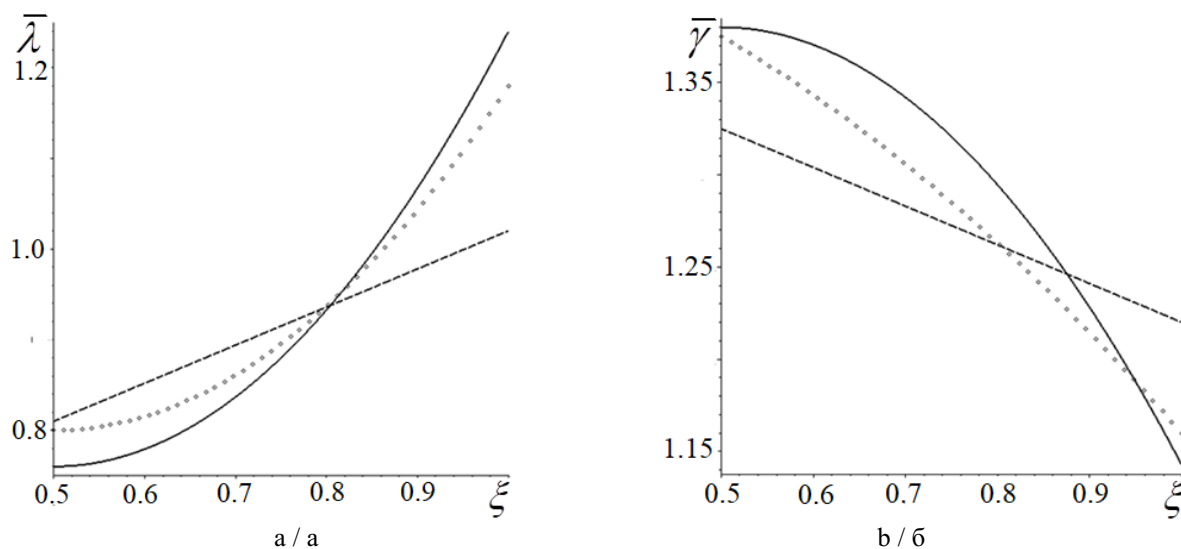


Fig. 2. Results of reconstruction of functions: a - $\bar{\lambda}(\xi) = 0.76 + 0.48 \left(\frac{\xi - \xi_0}{1 - \xi_0} \right)^2$;

b - $\bar{\gamma}(\xi) = 1.38 - 0.95(\xi - \xi_0)^2$ / Рис. 2. Результаты реконструкции функций:

$$а - \bar{\lambda}(\xi) = 0,76 + 0,48 \left(\frac{\xi - \xi_0}{1 - \xi_0} \right)^2 ; б - \bar{\gamma}(\xi) = 1,38 - 0,95(\xi - \xi_0)^2$$

From Fig. 2 it follows that the coefficients $\bar{\gamma}(\xi)$ and $\bar{\lambda}(\xi)$ are restored significantly worse than other modules, which is associated with their lesser influence on the input information.

A study of reconstruction error was conducted with varying levels of input noise. It was found that with 1 % noise, the error in reconstructing physical and mechanical characteristics increases by 3-6 %.

Conclusion

A projection-iterative approach to the identification of variable physical and mechanical characteristics of a thermoelastic pipe in the class of linear and quadratic functions is proposed. The error in reconstructing the shear modulus, density, thermal conductivity, and specific heat capacity in the absence of noise did not exceed 3 %. The modules $\bar{\gamma}(\xi)$ and $\bar{\lambda}(\xi)$ recovered significantly worse, which is consistent with the findings of the sensitivity analysis about their weak influence on additional information. With 1 % noise of the input information, the error in restoring the physical and mechanical characteristics increases by 3-6 %. As a limitation of the proposed approach, it can be noted that it is effective only for restoring smooth functions, which is consistent with the intended class of polynomial inhomogeneity laws typical for FGM. Future work will focus on extending the approach to a wider class of functions and boundary conditions.

References

1. Noda N. Thermal stresses in functionally graded materials. *J. of Thermal Stresses*. 1999;22(4-5):477-512. <https://doi.org/10.1080/014957399280841>
2. Majid M., Masoud R., Majid G. Functionally graded materials (FGMs): a review of classifications, fabrication methods and their applications. *Processing and Application of Ceramics*. 2021;15(4):319-343. EDN: UMMQAO. <https://doi.org/10.2298/PAC2104319M>
3. Naebe M., Shirvanimoghaddam K. Functionally graded materials: a review of fabrication and properties. *Applied Materials Today*. 2016;5:223-245. EDN: YFCZGK. <https://doi.org/10.1016/j.apmt.2016.10.001>
4. Ghanavati R., Naffakh-Moosavy H. Additive manufacturing of functionally graded metallic materials: a review of experimental and numerical studies. *J. of Materials Research and Technology*. 2021;13:1628-1664. EDN: ZHBOZP. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.05.022>
5. Karimzadeh M., Basvoju D., Vakanski A., Charit I., Xu F., Zhang X. Machine learning for additive manufacturing of functionally graded materials. *Materials*. 2024;17(15):3673. EDN: YLBSGG. <https://doi.org/10.3390/ma17153673>
6. Reddy J.N., Chin C.D. Thermomechanical analysis of functionally graded cylinders and plates. *J. of Thermal Stresses*. 1998;21(6):593-626. <https://doi.org/10.1080/01495739808956165>
7. Ootao Y., Tanigawa Y. Transient thermoelastic analysis for a functionally graded hollow cylinder. *J. of Thermal Stresses*. 2006;29(11):1031-1046. <http://dx.doi.org/10.1080/01495730600710356>
8. Hosseini S.M., Sladek J., Sladek V. Meshless local Petrov-Galerkin method or coupled thermoelasticity analysis of a functionally graded thick hollow cylinder. *Eng. Anal. Bound. Elem.* 2011;35(6):827-835. EDN: ONBGGF. <https://doi.org/10.1016/j.enganabound.2011.02.001>
9. Vatulyan A.O., Nesterov S.A. Some analytical solutions to the problems of optimization of variable heat conductivity coefficient. *Siberian Mathematical J.* 2025;66(1):225-234. EDN: MDWLRK. <https://doi.org/10.1134/S0037446625010185>
10. Chen W.-L., Chou H.-M., Yang Y.-C. An inverse problem in estimating the space-dependent thermal conductivity of a functionally graded hollow cylinder. *Composites. Part B: Engineering*. 2013;50:112-119. EDN: YAXQZK. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2013.02.010>
11. He Z., Ni F., Wang W., Zhang J. A physics-informed deep learning method for solving direct and inverse heat conduction problems of materials. *Materials Today Communications*. 2021;28:102719. EDN: VNWDXC. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2021.102719>
12. Alifanov O.M., Budnik S.A., Nenarokomov A.V., Netelev A.V., Okhapkin A.S., Chumakov V.A. Investigation of thermophysical properties of gradient materials by the method of inverse problems. *J. of Engineering Physics and Thermophysics*. 2022;95(4):1015-1025. EDN: MGCUIX. <https://doi.org/10.1007/s10891-022-02560-5>
13. Lukasiewicz S.A., Babaei R., Qian R.E. Detection of material properties in a layered body by means of thermal effects. *J. of Thermal Stresses*. 2003;26(1):13-23. <https://doi.org/10.1080/713855763>
14. Sinita A.V., Capsoni A. Design of novel inverse analysis methodology for exact estimation of elasticity parameters in thermoelastic stress model. *International Communication in Heat and Mass Transfer*. 2022;135:106096. EDN: DKDHHV. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2022.106096>

15. Pashaev A.M., Iskenderov A.D., Musaeva M.A. Method of inverse problems for thermal diagnostics of thermoelastic structures. *J. of Engineering Physics and Thermophysics*. 2023;96:1407-1415. EDN: NMIBRK. <https://doi.org/10.1007/s10891-023-02808-8>
16. Vatulyan A., Nesterov S., Nedin R. Variable properties reconstruction for functionally graded thermoelectro-elastic cylinder. *Continuum Mechanics and Thermodynamics*. 2024;36(4):745-762. EDN: SXXPPH. <https://doi.org/10.1007/s00161-024-01292-6>
17. Diligenskaya A., Samokish A. Parametric identification of technological thermophysics processes based on neural network approach. *J. Vibroeng.* 2021;23(6):1407-1417. EDN: JPONLQ. <https://doi.org/10.21595/jve.2021.22075>
18. Vatulyan A.O., Nesterov S.A. On one approach to restoring non-uniform properties of thermoelastic bodies. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science*. 2012;(4):25-29. (In Russ.). EDN: PCIYLT.
19. Vatul'yan A.O., Nesterov S.A. On determination of inhomogeneous thermomechanical characteristics of a pipe. *J. of Engineering Physics and Thermophysics*. 2015;88(4):984-993. EDN: YULOVJ. <https://doi.org/10.1007/s10891-015-1274-7>
20. Vatulyan A.O., Nesterov S.A. Study of the inverse problems of thermoelasticity for inhomogeneous materials. *Siberian Mathematical J.* 2023;64(3):699-706. EDN: UJUPXN. <https://doi.org/10.1134/s0037446623030175>
21. Nesterov S.A. Some problems of identification of physical and mechanical characteristics of inhomogeneous bodies under thermal loading. *Ecological Bulletin of Research Centers of the Black Sea Economic Cooperation*. 2025;22(3):13-23. (In Russ.). EDN: HVZNRK. <https://doi.org/10.31429/vestnik-2>
22. Vatulyan A.O., Dudarev V.V., Nesterov S.A. Identification of variable thermomechanical characteristics in the class of polynomials for the thermoelasticity model. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science*. 2025;(4):4-13. (In Russ.). EDN: WCZQDZ. <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2025-4-4-13>
23. Tikhonov A.N., Goncharsky A.V., Stepanov V.V., Yagola A.G. *Numerical methods for solving ill-posed problems*. Moscow: Science; 1990. 232 p. (In Russ.).

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Noda N. Thermal stresses in functionally graded materials // *J. of Thermal Stresses*. 1999. Vol. 22, № 4-5. P. 477–512. <https://doi.org/10.1080/014957399280841>
2. Majid M., Masoud R., Majid G. Functionally graded materials (FGMs): A review of classifications, fabrication methods and their applications // *Processing and Application of Ceramics*. 2021. Vol. 15, № 4. P. 319–343. EDN: UMMQAO. <https://doi.org/10.2298/PAC2104319M>
3. Naebe M., Shirvanimoghaddam K. Functionally graded materials: a review of fabrication and properties // *Applied Materials Today*. 2016. Vol. 5. P. 223–245. EDN: YFCZGK. <https://doi.org/10.1016/j.apmt.2016.10.001>
4. Ghanavati R., Naffakh-Moosavy H. Additive Manufacturing of Functionally Graded Metallic Materials: A Review of Experimental and Numerical Studies // *J. of Materials Research and Technology*. 2021. Vol. 13. P. 1628–1664. EDN: ZHBOZP. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.05.022>
5. Karimzadeh M., Basvoju D., Vakanski A., Charit I., Xu F., Zhang X. Machine Learning for Additive Manufacturing of Functionally Graded Materials // *Materials*. 2024. Vol. 17, № 15. Art. 3673. EDN: YLBSGG. <https://doi.org/10.3390/ma17153673>
6. Reddy J.N., Chin C.D. Thermomechanical analysis of functionally graded cylinders and plates // *J. of Thermal Stresses*. 1998. Vol. 21, № 6. P. 593–626. <https://doi.org/10.1080/01495739808956165>
7. Ootao Y., Tanigawa Y. Transient Thermoelastic Analysis for a Functionally Graded Hollow Cylinder // *J. of Thermal Stresses*. 2006. Vol. 29, № 11. P. 1031–1046. <http://dx.doi.org/10.1080/01495730600710356>
8. Hosseini S.M., Sladek J., Sladek V. Meshless local Petrov-Galerkin method or coupled thermoelasticity analysis of a functionally graded thick hollow cylinder // *Eng. Anal. Bound. Elem.* 2011. Vol. 35, № 6. P. 827–835. EDN: ONBGFF. <https://doi.org/10.1016/j.enganabound.2011.02.001>
9. Vatulyan A.O., Nesterov S.A. Some analytical solutions to the problems of optimization of variable heat conductivity coefficient // *Siberian Mathematical J.* 2025. Vol. 66, № 1. P. 225–234. EDN: MDWLRK. <https://doi.org/10.1134/S0037446625010185>
10. Chen W.-L., Chou H.-M., Yang Y.-C. An inverse problem in estimating the space-dependent thermal conductivity of a functionally graded hollow cylinder // *Composites Part B: Engineering*. 2013. Vol. 50. P. 112–119. EDN: YAXQZK. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2013.02.010>
11. He Z., Ni F., Wang W., Zhang J. A physics-informed deep learning method for solving direct and inverse heat conduction problems of materials // *Materials Today Communications*. 2021. Vol. 28. Art. 102719. EDN: VNWDXC. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2021.102719>

12. Алифанов О.М., Будник С.А., Ненарокомов А.В., Нетелеев А.В., Охапкин А.С., Чумаков В.А. Исследование теплофизических свойств градиентных материалов методом обратных задач // Инжен.-физ. журн. 2022. Т. 95, № 4. С. 1031–1041. EDN: HSNYYX.

13. Lukasiewicz S.A., Babaei R., Qian R.E. Detection of material properties in a layered body by means of thermal effects // J. of Thermal Stresses. 2003. Vol. 26, № 1. P. 13–23. <https://doi.org/10.1080/713855763>

14. Sinitsa A.V., Capsoni A. Design of novel inverse analysis methodology for exact estimation of elasticity parameters in thermoelastic stress model // International Communication in Heat and Mass Transfer. 2022. Vol. 135. Art. 106096. EDN: DKDHHV. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2022.106096>

15. Пашаев А.М., Искендеров А.Д., Мусаева М.А. Метод обратных задач тепловой диагностики термоупругих конструкций // Инжен.-физ. журн. 2023. Т. 96, № 6. С. 1419–1428. EDN: VWECNL.

16. Vatulyan A., Nesterov S., Nedin R. Variable properties reconstruction for functionally graded thermoelectroelastic cylinder // Continuum Mechanics and Thermodynamics. 2024. Vol. 36, № 4. P. 745–762. EDN: SXXPPH. <https://doi.org/10.1007/s00161-024-01292-6>

17. Diligenskaya A., Samokish A. Parametric Identification of Technological Thermophysics Processes Based on Neural Network Approach // J. Vibroeng. 2021. Vol. 23, № 6. P. 1407–1417. EDN: JPONLQ. <https://doi.org/10.21595/jve.2021.22075>

18. Ватульян А.О., Нестеров С.А. Об одном подходе к восстановлению неоднородных свойств термоупругих тел // Изв. вузов. Сев.-Кав. регион. Естеств. науки. 2012. № 4 (170). С. 25–29. EDN: PCIYLT.

19. Ватульян А.О., Нестеров С.А. К определению неоднородных термомеханических характеристик трубы // Инжен.-физ. журн. 2015. Т. 88, № 4. С. 951–959. EDN: UARYWV.

20. Vatulyan A.O., Nesterov S.A. Study of the inverse problems of thermoelasticity for inhomogeneous materials // Siberian Mathematical J. 2023. Vol. 64, № 3. P. 699–706. EDN: UJUPXN. <https://doi.org/10.1134/s0037446623030175>

21. Нестеров С.А. Некоторые задачи идентификации физико-механических характеристик неоднородных тел при тепловом нагружении // Экол. вестн. науч. центров Черномор. эконом. сотрудничества. 2025. Т. 22, № 3. С. 13–23. EDN: HVZNRK. <https://doi.org/10.31429/vestnik-22-3-13-23>

22. Ватульян А.О., Дударев В.В., Нестеров С.А. Идентификация переменных термомеханических характеристик в классе полиномов для модели термоупругости // Изв. вузов. Сев.-Кав. регион. Естеств. науки. 2025. № 4 (228). С. 4–13. EDN: WCZQDZ. <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2025-4-4-13>

23. Тихонов А.Н., Гончарский А.В., Степанов В.В., Ягола А.Г. Численные методы решения некорректных задач. М.: Наука, 1990. 232 с.

Information about the authors

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

V.V. Dudarev – Candidate of Science (Physics and Mathematics), Associate Professor of the Department of Elasticity Theory, Vorovich Institute of Mathematics, Mechanics and Computer Sciences, SFedU.

S.A. Nesterov – Doctor of Science (Physics and Mathematics), Leading Researcher of the Department of Differential Equations, SMI - Branch of the VSC RAS.

Информация об авторах

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

В.В. Дударев – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры теории упругости Института математики, механики и компьютерных наук им. И.И. Воровича ЮФУ.

С.А. Нестеров – доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник отдела дифференциальных уравнений ЮМИ – филиала ВНИЦ РАН.

Статья поступила в редакцию 13.10.2025; одобрена после рецензирования 24.10.2025; принята к публикации 11.11.2025.
The article was submitted 13.10.2025; approved after reviewing 24.10.2025; accepted for publication 11.11.2025.

НАУКИ О ЗЕМЛЕ SCIENCES OF EARTH

Научная статья
УДК 551.582
<https://doi.org/10.18522/1026-2237-2026-1-53-65>

АНАЛИЗ МНОГОЛЕТНИХ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ТРЕНДОВ В РЕСПУБЛИКЕ БАШКОРТОСТАН (1980–2021 годы)

Вероника Валерьевна Булгакова

Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации им. главного маршала авиации А.А. Новикова, Санкт-Петербург, Россия
bu_veron@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1023-7779>

Аннотация. Республика Башкортостан характеризуется умеренно континентальным климатом. Представлен анализ многолетних метеорологических данных по пяти станциям региона за период 1980–2021 гг. Установлено стабильное повышение среднегодовой температуры воздуха, особенно весной и летом. На отдельных станциях прирост температуры превышает 3 °С. Отмечается межгодовая изменчивость количества атмосферных осадков без выраженного общего тренда. Наиболее влажным районом остаётся Красный Яр, где влияние орографии существенно. В последние десятилетия в отдельных пунктах отмечено снижение летних и осенних осадков, при этом весенние значения в ряде случаев увеличиваются.

Ключевые слова: Башкортостан, температура воздуха, атмосферные осадки, климат, потепление, тренды

Для цитирования: Булгакова В.В. Анализ многолетних метеорологических трендов в Республике Башкортостан (1980–2021 годы) // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2026. № 1. С. 53–65. <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2026-1-53-65>

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

Original article

ANALYSIS OF LONG-TERM METEOROLOGICAL TRENDS IN THE REPUBLIC OF BASHKORTOSTAN (1980-2021)

Veronika V. Bulgakova

Chief Marshal of Aviation A.A. Novikov Saint Petersburg State University of Civil Aviation, Saint Petersburg, Russia
bu_veron@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1023-7779>

Abstract. The Republic of Bashkortostan is characterized by a moderately continental climate. This study presents an analysis of long-term meteorological data from five stations in the region for the period 1980-2021. A consistent increase in the annual mean air temperature was identified, particularly pronounced in spring and summer. At some stations, the temperature rise exceeded 3 °C. Precipitation shows high interannual variability

© Булгакова В.В., 2026

without a clear overall trend. The wettest area remains Krasny Yar, where orographic effects are significant. In recent decades, a decrease in summer and autumn precipitation has been observed at several locations, accompanied by an increase in spring precipitation.

Keywords: *Bashkortostan, air temperature, precipitation, climate, warming, trends*

For citation: Bulgakova V.V. Analysis of Long-Term Meteorological Trends in the Republic of Bashkortostan (1980–2021). *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2026;(1):53–65. (In Russ.). <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2026-1-53-65>

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

Введение

Республика Башкортостан расположена в восточной части европейской территории России, на границе Восточно-Европейской равнины и Уральских гор. Регион характеризуется умеренно континентальным климатом, формирующимся под воздействием разнообразных воздушных масс. Атлантические воздушные потоки способствуют увлажнению территории и формированию западного переноса, тогда как континентальные массы усиливают температурные колебания [1, 2].

Существенно влияние на климат региона оказывает рельеф. Уральские горы, вытянутые с севера на юг, формируют неравномерное распределение осадков: на западных склонах выпадает 700–900 мм в год, на восточных – 400–600 мм. Среднегодовая температура варьируется от 0,3 до 2,8 °С, самый холодный месяц – январь (до –16 °С на равнине). Продолжительность холодного периода составляет 165–190 дней в зависимости от высоты местности [3].

В летний период температурный режим определяется радиационными и циркуляционными факторами, а также рельефом. Самый тёплый месяц – июль (средняя температура около 18 °С). Основной объем осадков (60–70 % от годовой суммы) выпадает с апреля по октябрь. Климатообразующие факторы, климатическое районирование и динамика изменений в регионе подробно рассмотрены в ряде исследований [4–10].

В последние десятилетия наблюдается рост среднегодовой температуры и изменение режима осадков, что соответствует глобальным процессам потепления. По данным [11], 2024 г. стал самым тёплым за 175 лет наблюдений, превысив доиндустриальный уровень глобальной температуры на 1,5 °С. Согласно региональным данным Башкирского управления по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, среднегодовая температура воздуха в регионе в 2024 г. составила +4,2 °С, что на 0,6 °С выше климатической нормы, а установление устойчивого снежного покрова произошло на две недели позже обычных сроков.

Значительное влияние на климат и экологическую обстановку оказывает антропогенное загрязнение атмосферы. Основными источниками выбросов в регионе являются предприятия топливно-энергетического комплекса. Преобладающие загрязнители – оксид углерода, углеводороды, сернистый ангидрид и диоксид азота – ухудшают качество воздуха и влияют на здоровье населения [12–14].

В связи с изменением климата отмечается тенденция к развитию процессов аридизации – увеличению количества засушливых дней, снижению осадков и сокращению водных ресурсов. Они влекут за собой существенные последствия для экосистем региона и требуют комплексного изучения [15–18].

Цель данной работы – анализ изменений температурного режима и количества осадков в Республике Башкортостан за 1980–2021 гг. Исследование основано на базе архивных данных Всероссийского научно-исследовательского института гидрометеорологической информации – Мирового центра данных [19]. Для определения территориальных различий температурного и осадочного режима выбраны метеостанции, представляющие различные природно-климатические условия региона: равнинную часть (Уфа, Стерлитамак, Аксаково, Янаул) и горную зону (Красный Яр). Для анализа использован период 1980–2021 гг., обеспечивающий достаточную полноту и продолжительность рядов наблюдений. Его длительность соответствует климатологическим рекомендациям, требующим анализа не менее трёх климатических десятилетий для выявления устойчивых трендов.

Первичная обработка данных и статистические расчёты осуществлялись в программной среде Microsoft Excel 2019, построение графиков и оценка линейных трендов выполнялись в Google Colab с использованием языка программирования Python 3.10. Перед анализом временные ряды подвергались проверке качества: выявлялись и удалялись явные ошибки ввода, вычислялись доли пропусков; ряды с превышением допустимого уровня пропусков (>10 %) не включались в статистические расчёты. Линейные тренды определялись методом наименьших квадратов с вычислением коэффициента корреляции и уравнения регрессии. Статистическая значимость трендов оценивалась по критерию достоверности наклона ($\alpha = 0,05$).

Результаты и обсуждение

Анализ изменения метеорологических показателей проводился по пяти метеостанциям Республики Башкортостан: Уфа, Стерлитамак, Янаул, Аксаково и Красный Яр за 1980–2021 гг. Уфа расположена на границе Прибельской равнины в 100 км к западу от передовых хребтов Южного Урала на высоте 212 м. Стерлитамак (150 м) и Аксаково (220 м) находятся на Предуральской возвышенности, Янаул (130 м) – на южной окраине Верхнекамской возвышенности, Красный Яр – на западных склонах Южного Урала на высоте 90 м. По климатическому районированию станции относятся к Западной равнинной (Уфа, Стерлитамак, Аксаково, Янаул) и Уральской горной (Красный Яр) провинциям [3, 4].

Рассмотрим изменения среднегодовой температуры воздуха в г. Уфе за 1980–2021 гг. (рис. 1). За исследуемый период наблюдается стабильная положительная тенденция изменения среднегодовой температуры. В 1980 г. она составляла 2,4 °С, а к 2021 г. увеличилась до 5,8 °С, что соответствует повышению на 3,4 °С.

Несмотря на общий тренд роста, температурные значения демонстрируют колебания, включая локальные минимумы, зафиксированные в 1984 (2,3 °С), 1986 (2,1 °С) и 1993 гг. (2,2 °С). Анализ линейного тренда по уравнению регрессии $y = 0,0476x + 3,08$ подтверждает стабильный рост температуры.

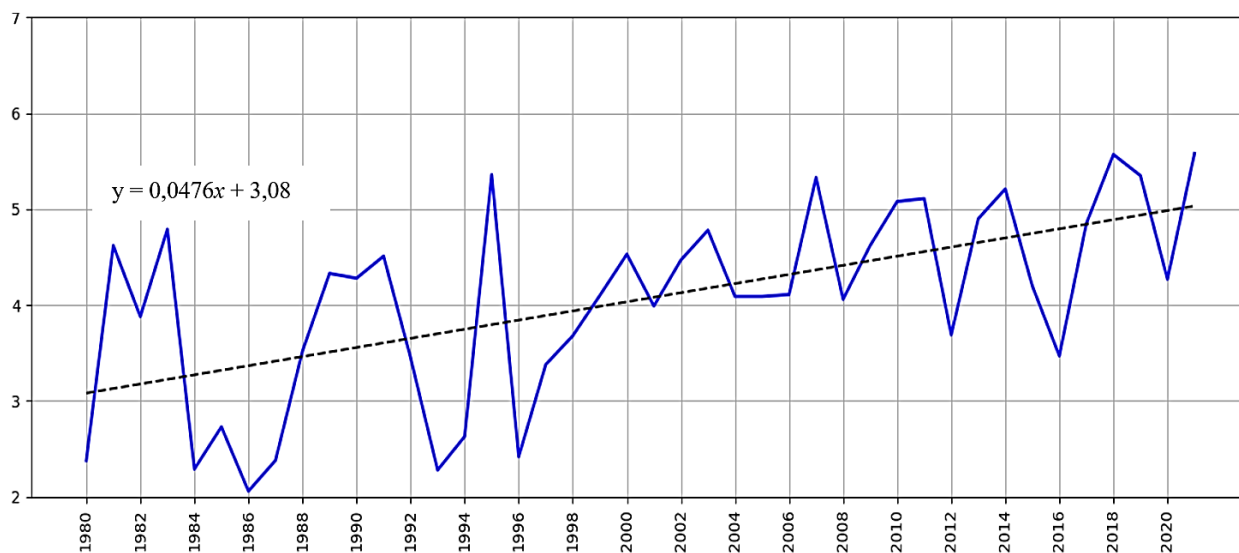


Рис. 1. Динамика среднегодовых температур воздуха, °С, за период 1980–2021 гг. [19], г. Уфа
/ Fig. 1. Dynamics of average annual air temperatures, °С, for the period 1980-2021 (according to [19]), Ufa

Аналогичные тенденции в изменении температуры выявлены и для других метеорологических станций Республики Башкортостан (рис. 2–5). В Стерлитамаке среднегодовая температура в 1980 г. составляла 2,3 °С, а к 2021 г. достигла 5,7 °С, что на 3,4 °С выше.

Наименьшие значения, как и в Уфе, наблюдались в 1984 (2,4 °С), 1986 (2,3 °С) и 1993 гг. (2,5 °С). Начиная с 2000-х гг. наблюдается снижение амплитуды колебаний между экстремально холодными и аномально тёплыми годами, что свидетельствует о стабилизации температурного режима при общем тренде на потепление.

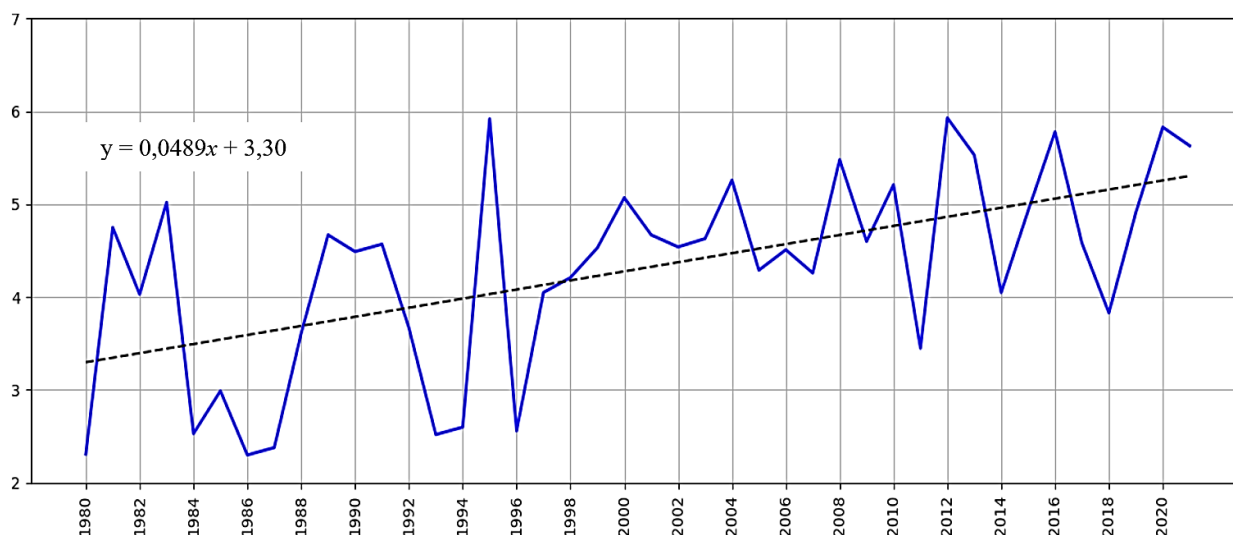


Рис. 2. Динамика среднегодовых температур воздуха, °С, за период 1980–2021 гг. [19], г. Стерлитамак / Fig. 2. Dynamics of average annual air temperatures, °С, for the period 1980-2021 (according to [19]), Sterlitamak

Существенное потепление отмечается и в с. Красный Яр. В начале наблюдений, в 1980 г., среднегодовая температура составляла всего 0,28 °С. К 2021 г. данный показатель вырос до 2,22 °С, что соответствует увеличению на 1,94 °С.

Несмотря на выраженные межгодовые колебания, общая тенденция остаётся положительной. Минимальные значения температуры наблюдались в 1987 (–0,13 °С) и 1994 гг. (–0,78 °С), тогда как максимальные значения зафиксированы в 2020 (2,26 °С) и 2021 гг. (2,22 °С). С 2000-х гг. среднегодовые значения стабильно превышают 1 °С, а в последние годы приближаются к 2 °С, что отражает общий тренд потепления и возможное влияние региональных климатических факторов.

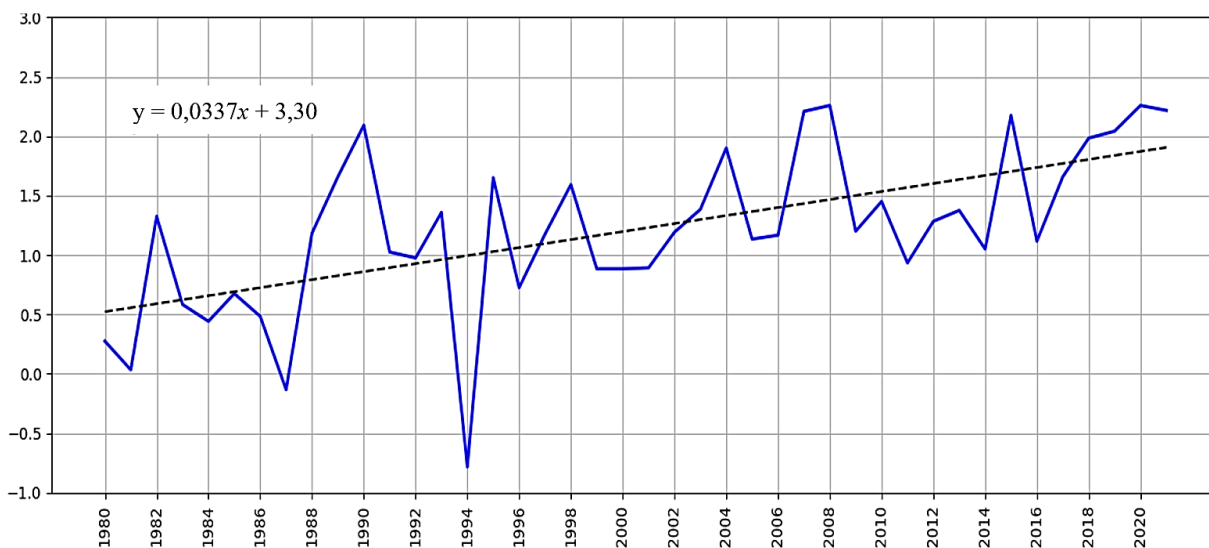


Рис. 3. Динамика среднегодовых температур воздуха, °С, за период 1980–2021 гг. [19], с. Красный Яр / Fig. 3. Dynamics of average annual air temperatures, °С, for the period 1980-2021 (according to [19]), Krasny Yar

Анализ данных станции с. Аксаково показывает более высокий уровень среднегодовой температуры по сравнению с Красным Яром. В 1980 г. температура составляла 1,64 °С, к 2021 г. – 4,38 °С, что соответствует увеличению на 2,74 °С.

Температурные значения характеризуются значительными колебаниями с пиками в 1981 (3,98 °С), 1995 (4,96 °С) и 2015 гг. (4,56 °С) и минимальными значениями в 1987 (1,29 °С) и 1994 гг. (1,55 °С).

С середины 1990-х гг. среднегодовые температуры стабильно превышают 3 °С, что отражает потепление и стабилизацию температурного режима. Результаты регрессионного анализа подтверждают наличие стабильного положительного тренда.

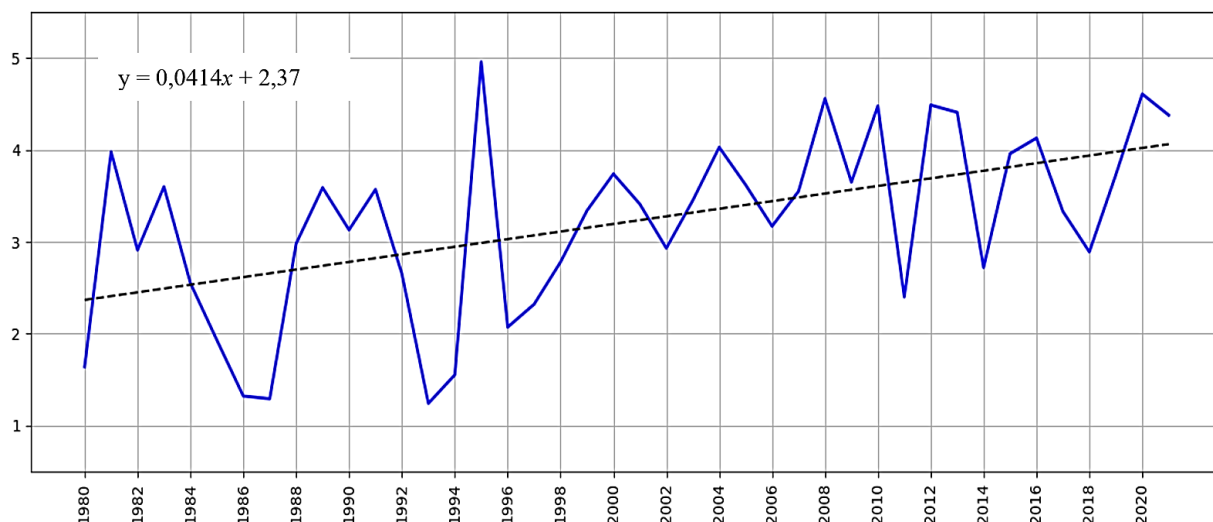


Рис. 4. Динамика среднегодовых температур воздуха, °С, за период 1980–2021 гг. [19], с. Аксаково / Fig. 4. Dynamics of average annual air temperatures, °С, for the period 1980-2021 (according to [19]), Aksakovo

Значения температуры в г. Янауле демонстрируют схожие с Аксаково тенденции, но с меньшей амплитудой колебаний. В 1980 г. средняя температура составляла 1,87 °С, а к 2021 г. выросла до 3,92 °С, что соответствует увеличению на 2,05 °С. Температурные показатели колеблются в диапазоне от 1,23 (1986 г.) до 4,78 °С (2020 г.). С конца 1990-х гг. среднегодовые температуры превышают 2,5 °С, что подтверждает стабильный тренд на потепление.

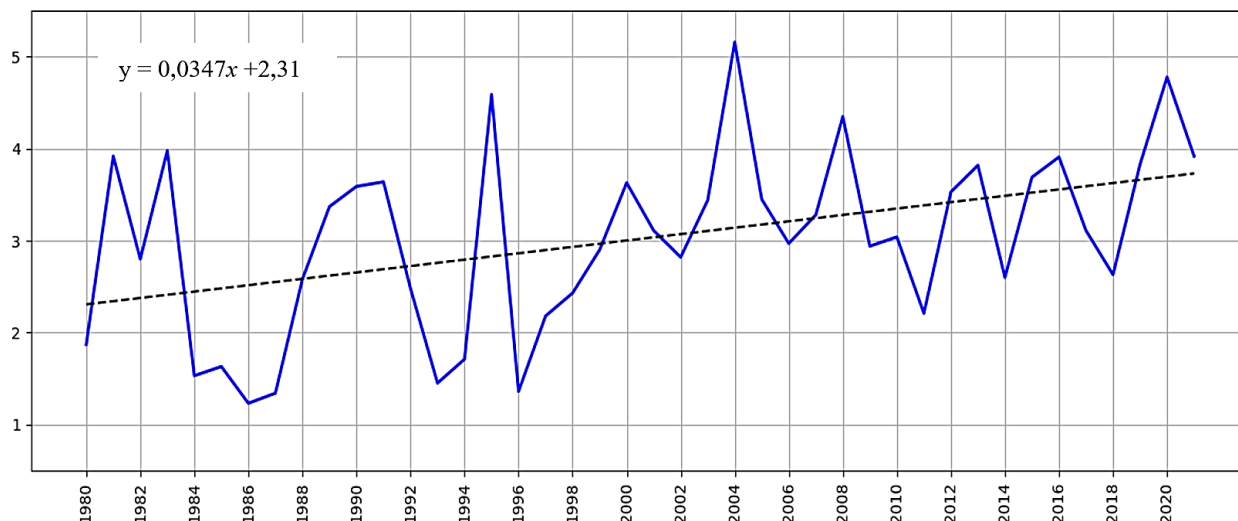


Рис. 5. Динамика среднегодовых температур воздуха, °С, за период 1980–2021 гг. (по [19]), г. Янаул / Fig. 5. Dynamics of average annual air temperatures, °С, for the period 1980-2021 (according to [19]), Yanaul

Обобщенные данные средних многолетних значений среднегодовой температуры воздуха представлены в табл. 1 и 2. Наибольший рост среднегодовой температуры наблюдается в Уфе и Стерлитамаке, где она увеличилась с 3,3 и 3,46 °С в 1980–1989 гг. до 4,77 и 4,97 °С в 2010–2021 гг. соответственно (табл. 1). Красный Яр сохраняет наиболее низкие значения температуры, при этом также отмечается постепенное повышение.

Анализ средних многолетних значений температуры воздуха по сезонам выявил выраженную сезонную динамику и региональные особенности (табл. 2). Зимний период характеризуется самой низкой температурой, при этом наиболее холодным остаётся Красный Яр с темпе-

ратурами около -20°C , остальные населённые пункты имеют зимние температуры в диапазоне от -12 до -11°C . В течение исследуемого периода зимние температуры демонстрируют незначительную положительную динамику, однако в некоторых населённых пунктах (например, Янаул) наблюдается флуктуация без чёткой тенденции.

Таблица 1 / Table 1

Средние многолетние значения среднегодовой температуры воздуха, $^{\circ}\text{C}$ / Average temperature, $^{\circ}\text{C}$

Период	У	С	К	А	Я
1980–1989	3,30	3,46	0,65	2,58	2,43
1990–1999	3,61	3,91	1,07	2,76	2,63
2000–2009	4,41	4,73	1,42	3,61	3,51
2010–2021	4,77	4,97	1,63	3,79	3,42
1980–2021	4,06	4,30	1,21	3,22	3,02
1990–2021	4,30	4,57	1,39	3,41	3,20
2000–2021	4,61	4,86	1,53	3,71	3,46

Примечание. У – Уфа; С – Стерлитамак; К – Красный Яр; А – Аксаково; Я – Янаул.

Таблица 2 / Table 2

**Средние многолетние значения среднегодовой температуры воздуха по сезонам, $^{\circ}\text{C}$
 / Average temperature by season, $^{\circ}\text{C}$**

Населенный пункт	Период						
	1980–1989	1990–1999	2000–2009	2010–2021	1980–2021	1990–2021	2000–2021
Зима							
Уфа	-12,03	-11,68	-11,00	-11,40	-11,52	-11,36	-11,22
Стерлитамак	-12,02	-11,62	-10,69	-11,14	-11,36	-11,15	-10,93
Красный Яр	-20,34	-19,29	-19,29	-19,47	-19,59	-19,36	-19,39
Аксаково	-12,13	-12,01	-11,10	-11,62	-11,71	-11,58	-11,39
Янаул	-12,29	-11,86	-11,73	-12,17	-11,96	-11,99	-11,95
Весна							
Уфа	3,44	4,42	5,11	5,62	4,70	5,09	5,39
Стерлитамак	3,62	4,74	5,51	6,01	5,02	5,46	5,78
Красный Яр	2,13	2,55	3,13	3,31	2,81	3,02	3,23
Аксаково	2,72	3,3	3,96	4,47	3,65	3,94	4,24
Янаул	2,20	3,1	3,67	4,08	3,20	3,70	3,87
Лето							
Уфа	18,27	17,89	18,29	19,15	18,43	18,49	18,76
Стерлитамак	18,77	18,64	19,06	20,11	19,19	19,32	19,63
Красный Яр	18,95	18,11	19,14	19,48	18,95	18,95	19,33
Аксаково	17,47	17,1	17,53	18,62	17,73	17,81	18,13
Янаул	17,00	17,32	17,50	17,96	17,5	17,64	17,73
Осень							
Уфа	3,17	5,53	4,72	4,54	4,02	4,28	4,62
Стерлитамак	3,45	3,88	5,04	4,90	4,35	4,62	4,96
Красный Яр	1,87	2,90	2,71	3,19	2,69	2,95	2,97
Аксаково	2,25	2,65	4,05	3,70	3,19	3,48	3,86
Янаул	2,46	2,92	4,01	3,76	3,23	3,58	3,85

Весной отмечается наиболее выраженное повышение температур. Например, в Стерлитамаке средняя температура весной выросла с 3,62 (1980–1989 гг.) до 6,01 °С (2010–2021 гг.). Летние температуры стабильно повышаются во всех населённых пунктах с наибольшим ростом в Стерлитамаке и Красном Яре, где средняя летняя температура превышает 19 °С. Осенний период показывает умеренный рост температур с 1980-х гг. с небольшими колебаниями в разных районах.

Анализ абсолютных экстремумов за период 1980–2021 гг. показывает: абсолютные минимумы температур зафиксированы в середине 1980-х – начале 1990-х гг., абсолютные максимумы – в XXI в. (2019–2021 гг.). Наибольшие среднегодовые температуры зарегистрированы в равнинных пунктах в последние годы (Уфа – 5,8 °С в 2021 г.; Стерлитамак – 5,7 °С в 2021 г.), тогда как минимальные значения отмечены в 1980-х гг. (Уфа – 2,1 °С, 1986 г.; Янаул – 1,23 °С, 1986 г.).

В условиях стабильного повышения температурного фона особую роль в функционировании природных комплексов региона играют атмосферные осадки как основной источник влагообеспечения. На рис. 6–10 представлена многолетняя динамика годовых сумм осадков за 1980–2021 гг. по метеостанциям Уфа, Стерлитамак, Красный Яр, Аксаково и Янаул.

Среднегодовое количество осадков в Уфе за 1980–2021 гг. составило около 580 мм. Минимальные значения зафиксированы в 2021 (401 мм), 1996 (401 мм) и 2010 гг. (414 мм), максимальные – в 1990 (767 мм), 1997 (745 мм) и 2017 гг. (741 мм).

Осадки распределяются неравномерно: на фоне общего переменчивого фона выделяются как засушливые, так и чрезмерно влажные годы. Во второй половине 2010-х годов наблюдается постепенное снижение годовых сумм осадков – от 606 в 2015 г. до 401 мм в 2021 г.

Значимого линейного тренда за весь период не выявлено, что свидетельствует о преобладании естественных колебаний (рис. 6).

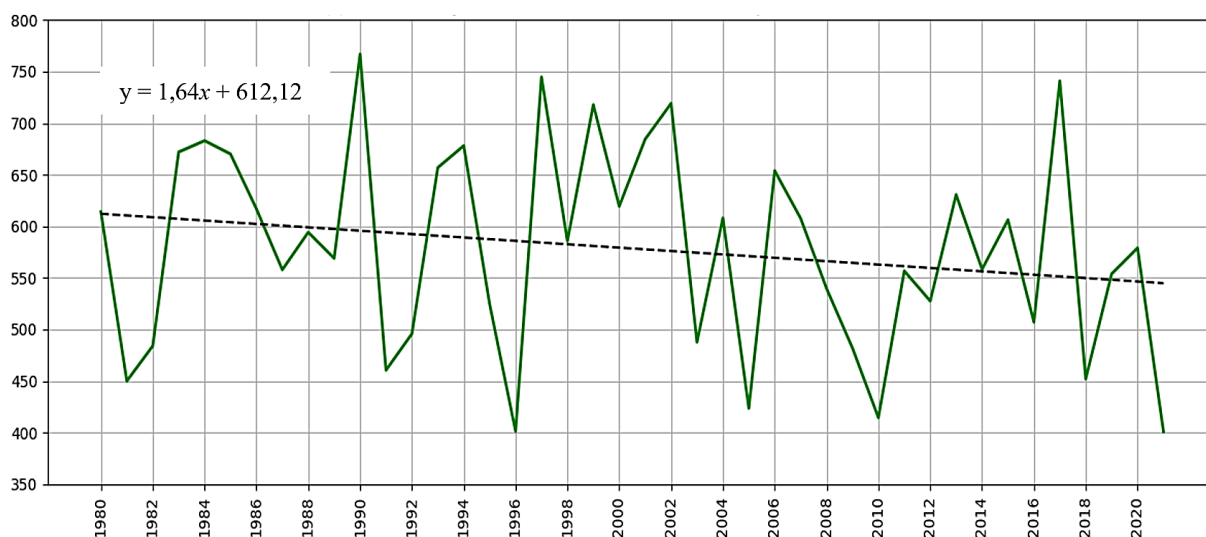


Рис. 6. Динамика сумм осадков за год, мм, за период 1980–2021 гг. [19], г. Уфа
/ Fig. 6. Dynamics of annual precipitation amounts, mm, for the period 1980–2021 (according to [19]), Ufa

Среднее годовое количество атмосферных осадков в Стерлитамаке за 1980–2021 гг. составило около 543 мм, что сопоставимо с климатической нормой региона. Самыми засушливыми годами стали 1981 (357,7 мм), 1996 (357,6 мм) и 2010 гг. (395,6 мм). Также ниже 450 мм осадков выпало в 2005, 2009 и 2013 гг.

Максимальные значения зарегистрированы в 1990 (793,0 мм), 1997 (776,5 мм), 2002 гг. (691,9 мм), а также в 2017 и 2016 гг. (648,2 и 646,1 мм соответственно). Колебания осадков в межгодовом разрезе значительны: разница между самым влажным и самым сухим годом превышает 430 мм (рис. 7).

Красный Яр характеризуется наибольшими суммами осадков среди рассмотренных пунктов. В среднем за период 1980–2021 гг. здесь выпадало около 880 мм в год, что связано с географическим положением в пределах Уральской горной провинции.

Максимальные годовые суммы зафиксированы в 1981 (1179,5 мм), 2019 (1084,2 мм) и 2002 гг. (1078,7 мм). Минимальные значения отмечены в 1986 (505,4 мм), 2001 (618,3 мм) и 2003 гг.

(669,1 мм). Колебания осадков носят ярко выраженный межгодовой характер, амплитуда превышает 670 мм. Несмотря на высокую вариабельность, статистически значимого тренда по осадкам не выявлено. Существенное превышение годовых сумм по сравнению с Уфой и Стерлитамаком подтверждает влияние орографических факторов (рис. 8).

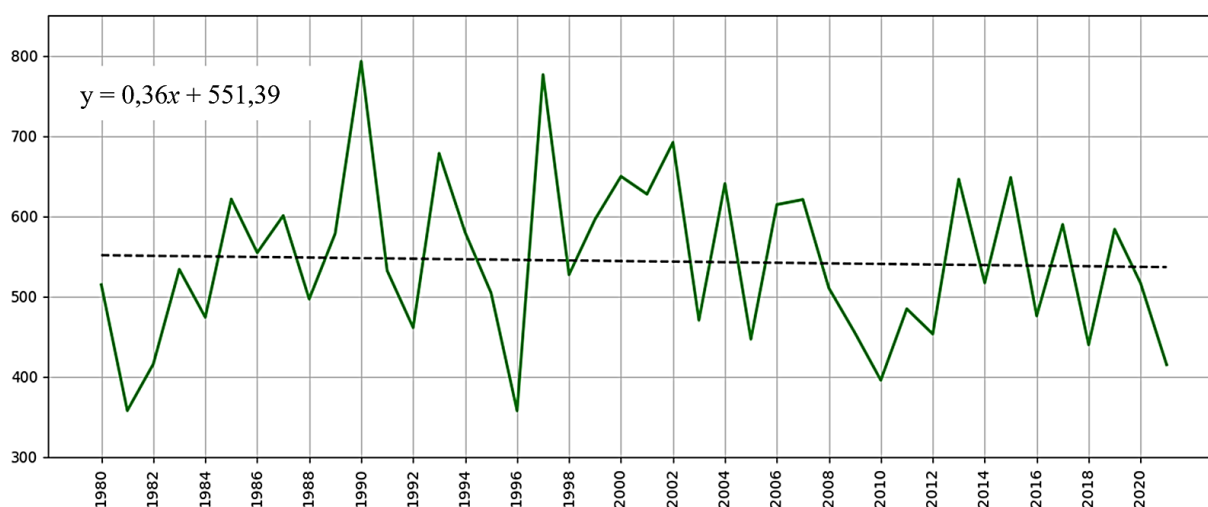


Рис. 7. Динамика сумм осадков за год, мм, за период 1980–2021 гг. [19], г. Стерлитамак / Fig. 7. Dynamics of annual precipitation amounts, mm, for the period 1980-2021 (according to [19]), Sterlitamak

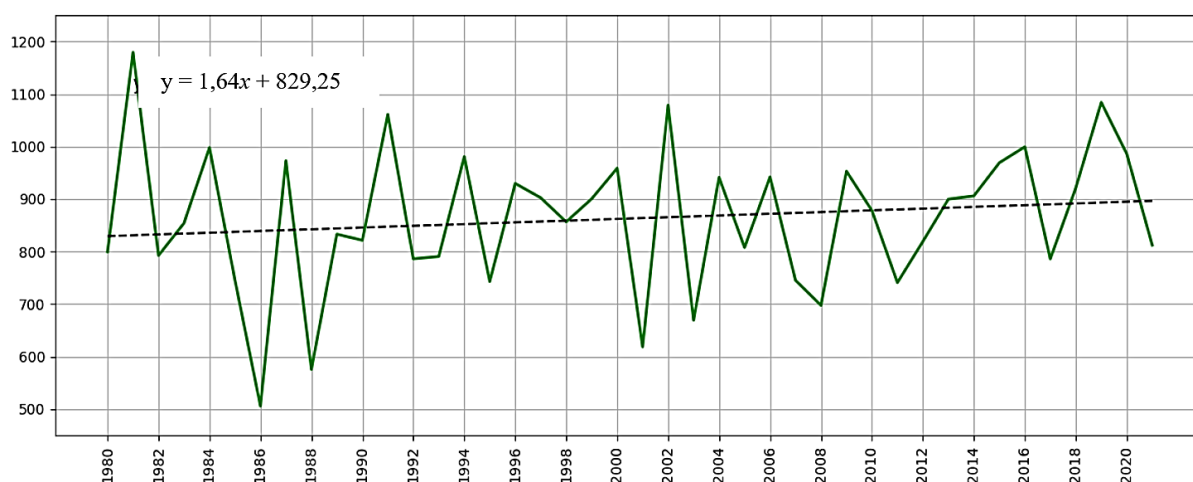


Рис. 8. Динамика сумм осадков за год, мм, за период 1980–2021 гг. (по [19]), с. Красный Яр / Fig. 8. Dynamics of annual precipitation amounts, mm, for the period 1980-2021 (according to [19]), Krasny Yar

В с. Аксаково среднегодовая сумма осадков за 1980–2021 гг. составила около 560 мм. Значения варьируют в широких пределах – от 334,6 в 1992 г. до 740,2 мм в 1983 г., что указывает на выраженную межгодовую изменчивость.

Среди наиболее засушливых лет можно отметить 1992 (334,6 мм), 1996 (366,8 мм) и 2021 гг. (402,6 мм). Максимальные значения зафиксированы в 1983 (740,2 мм), 2002 (720,0 мм) и 2001 гг. (719,5 мм). Также выделяются 1994 и 1993 гг., в которые выпадало свыше 650 мм осадков. Общий тренд за рассматриваемый период остаётся незначительным. Фиксируется некоторое снижение осадков после 2015 г.

Для метеостанции Янаул среднегодовая сумма осадков за 1980–2021 гг. составила около 500 мм. Это один из наиболее сухих пунктов среди рассмотренных, с выраженной межгодовой изменчивостью.

Минимальные значения отмечаются в 2003 (339,2 мм), 2005 (373,0 мм) и 1996 гг. (397,9 мм). Самыми влажными стали 1990 (679,4 мм), 2019 (636,7 мм) и 1984 гг. (647,9 мм). После 2010 г. осадки в основном колеблются в пределах 450–550 мм, за исключением нескольких более влажных лет.

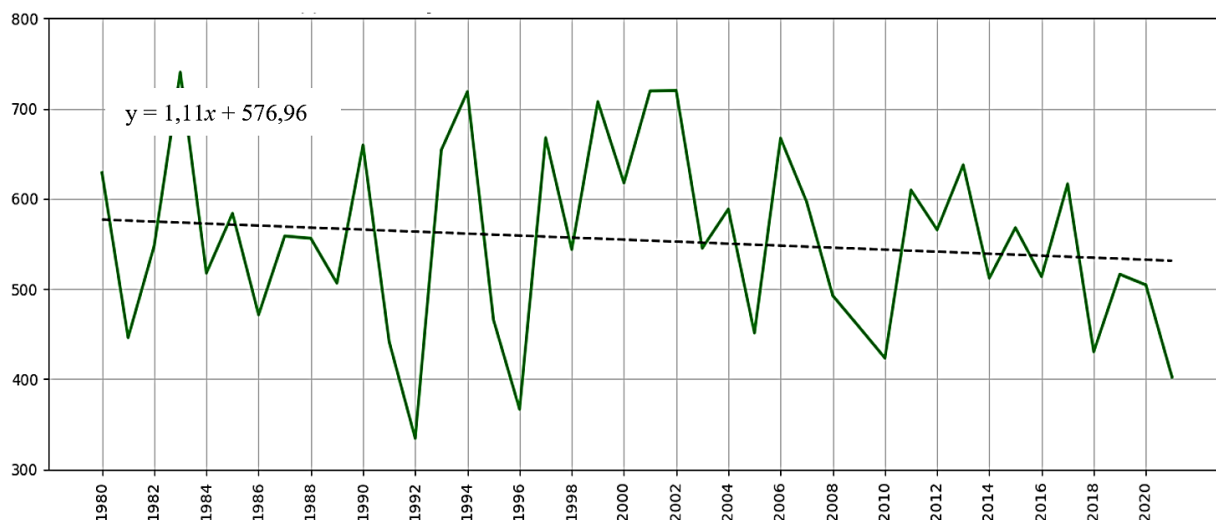


Рис. 9. Динамика сумм осадков за год, мм, за период 1980–2021 гг. (по [19]), с. Аксаково
 / Fig. 9. Dynamics of annual precipitation amounts, mm, for the period 1980–2021 (according to [19]), Aksakovo

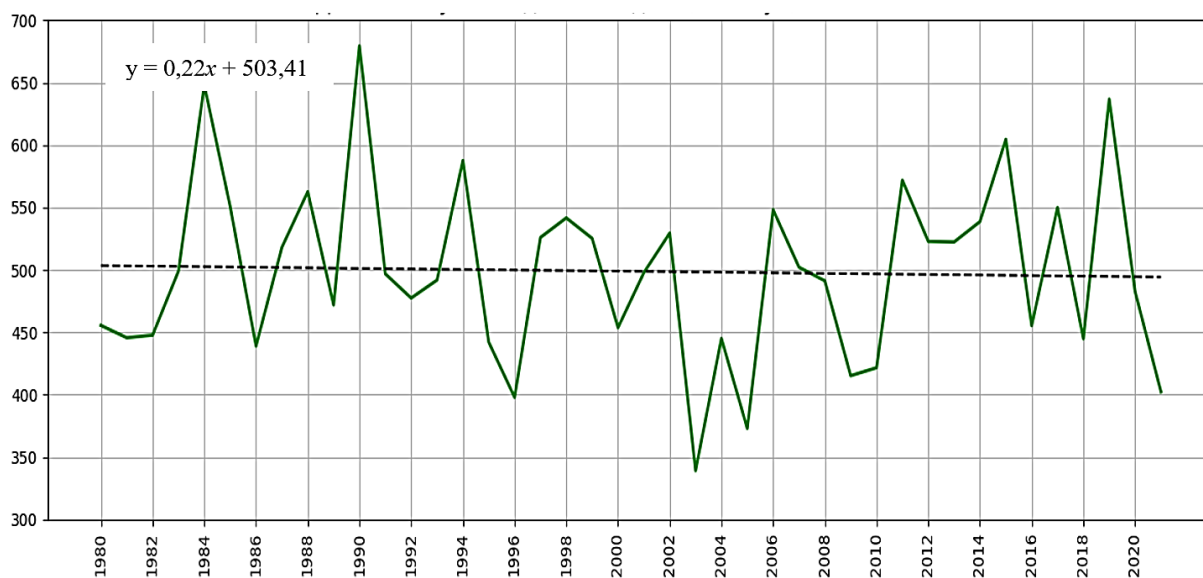


Рис. 10. Динамика сумм осадков за год, мм, за период 1980–2021 гг. [19], г. Янаул
 / Fig. 10. Dynamics of annual precipitation amounts, mm, for the period 1980–2021 (according to [19]), Yanaul

Средние многолетние значения годовых сумм осадков по всем метеостанциям представлены в табл. 3, 4. Анализ обобщённых данных показывает, что наибольшее количество осадков стабильно фиксируется в Красном Яре. В остальных пунктах значения варьируют в пределах 500–600 мм, при этом в последние десятилетия (2010–2021 гг.) отмечается некоторое снижение осадков в Уфе, Стерлитамаке и Аксакове. Минимальные средние значения в последние годы зафиксированы в Янауле (около 513 мм).

В зимний период наибольшие суммы осадков зафиксированы в Уфе (133,6 мм), тогда как Красный Яр получает в 2 раза меньше (67,2 мм). Весной отмечается рост осадков в Уфе с 99,7 (1980–1989) до 127,5 мм (2000–2021), что составляет увеличение примерно на 28 %. Летом максимальные осадки сосредоточены в Красном Яре – 405,3 мм за весь период, при этом в Уфе наблюдается снижение с 190,4 в 1980-х до 151,5 мм в 2000–2021 гг. (около 20 %). Осенью тенденции менее выражены, но наблюдается небольшое снижение осадков в Уфе – с 175,6 до 149,7 мм. Различия между районами остаются значительными: Красный Яр стабильно получает почти в 3 раза больше летних осадков, чем Уфа или Стерлитамак.

Таблица 3 / Table 3

Средние многолетние значения количества осадков, мм / Average precipitation, mm

Период	У	С	К	А	Я
1980–1989	591,1	514,7	825,6	555,7	503,8
1990–1999	603,2	580,6	877,2	556,0	516,6
2000–2009	582,5	572,8	841,1	585,7	459,5
2010–2021	544,0	513,8	900,2	525,0	512,8
1980–2021	578,5	544,0	862,9	554,2	498,8
1990–2021	574,6	553,1	874,5	553,7	497,3
2000–2021	561,5	540,6	873,3	552,6	488,6

Примечание. У – Уфа; С – Стерлитамак; К – Красный Яр; А – Аксаково; Я – Янаул.

Таблица 4 / Table 4

Средние многолетние значения количества осадков по сезонам, мм
/ Average precipitation by season, mm

Населенный пункт	Период						
	1980–1989	1990–1999	2000–2009	2010–2021	1980–2021	1990–2021	2000–2021
Зима							
Уфа	125,4	143,4	138,6	128,1	133,6	136,2	132,9
Стерлитамак	114,9	142,2	139,2	117,1	127,8	131,9	127,2
Красный Яр	53,5	71,6	69,5	74,3	67,2	72,3	72,6
Аксаково	111,6	122,7	121,1	119,9	119,1	120,7	120,5
Янаул	80,4	84,4	76,5	92,4	83,6	85,3	84,4
Весна							
Уфа	99,7	101,3	135,7	120,6	114,6	119,3	127,5
Стерлитамак	80,6	100,8	137,6	108,1	106,8	115,0	121,6
Красный Яр	150,5	165,2	155,1	171,4	160,3	164,8	164,3
Аксаково	96,4	91,6	122,1	118,0	107,6	108,2	118,1
Янаул	79,9	83,3	91,4	102,6	89,4	92,0	96,5
Лето							
Уфа	190,4	193,7	165,6	139,7	170,8	164,7	151,5
Стерлитамак	180,4	198,9	156,7	150,6	170,7	167,6	153,4
Красный Яр	385,2	401,7	420,4	412,5	405,3	411,4	415,0
Аксаково	171,7	168,3	168,8	144,3	163,6	158,0	155,4
Янаул	203,7	187,0	145,9	158,0	173,2	164,5	152,6
Осень							
Уфа	175,6	164,8	142,7	155,6	159,5	154,4	149,7
Стерлитамак	138,8	138,8	139,2	137,8	138,6	138,6	138,5
Красный Яр	221,8	229,4	211,4	234,0	227,4	229,1	225,5
Аксаково	173,6	158,4	149,2	155,7	159,3	155,4	152,3
Янаул	148,0	149,4	133,4	148,2	144,4	143,7	140,0

По осадкам отмечается выраженная межгодовая изменчивость: влажные годы приходятся на 1980–1990-е гг., засушливые – на 1992, 1996, 2010 и 2021 гг. После 2010 г. наблюдается тенденция к увеличению частоты сухих лет, особенно в южных районах (Стерлитамак, Аксаково, Янаул). Максимальные годовые суммы – до 1179,5 мм (Красный Яр, 1981 г.), минимальные – 334,6 мм (Аксаково, 1992 г.).

Сравнение полученных результатов с современными исследованиями [16–18] показывает общую согласованность наблюдаемых тенденций. Анализ среднегодовой температуры по пяти метеостанциям Республики Башкортостан (Уфа, Стерлитамак, Аксаково, Янаул, Красный Яр) за

1980–2021 гг. выявил стабильный рост температуры на 1,9–3,4 °С (рис. 1–5, табл. 1, 2). Указанные значения соответствуют результатам работ [16, 17], согласно которым среднегодовое повышение температуры за 1966–2015 гг. составило около 0,43 °С/10 лет с наибольшими темпами роста в зимний период. При этом наибольшие межгодовые колебания температур отмечаются в равнинных районах.

По показателям осадков прослеживаются умеренные колебания годовых сумм и локальное снижение количества осадков на равнинных станциях (Уфа, Стерлитамак, Аксаково, Янаул), тогда Красный Яр стабильно характеризуется максимальными значениями (до 880 мм/год; рис. 6–10, табл. 3, 4). Полученные результаты согласуются с выводами [16–18], согласно которым для территории республики отмечается увеличение осадков холодного периода и рост числа лет с пониженной влагообеспеченностью в южных природно-сельскохозяйственных районах.

Заключение

В результате проведенного анализа установлено, что для территории Республики Башкортостан характерно устойчивое повышение среднегодовой температуры воздуха. В период 1980–2021 гг. среднегодовая температура выросла на 1,9–3,4 °С в зависимости от метеостанции, при этом наибольший рост наблюдается весной и летом, а наименьший – зимой и осенью. С начала 2000-х гг. отмечается стабилизация температурного режима при продолжающемся общем росте температуры. Эти региональные тренды согласуются с глобальной тенденцией потепления климата по данным Всемирной метеорологической организации и отражают её локальные проявления в условиях континентального климата региона.

Изменения температурного фона сопровождаются высокой межгодовой вариабельностью осадков. Хотя статистически значимый общий тренд по осадкам не выявлен, в отдельных пунктах с 2010-х гг. отмечается снижение летних и осенних сумм. На фоне региональных различий выделяется метеостанция Красный Яр, где осадков выпадает значительно больше, чем на равнинных станциях, что связано с орографическими особенностями.

Рост частоты экстремально тёплых и сухих лет в последние десятилетия подтверждает усиление регионального проявления глобальных климатических тенденций, что согласуется с выявленными трендами температурного режима и изменчивости осадков.

Полученные результаты имеют прикладное значение и могут быть использованы при оценке климатических рисков, прогнозировании состояния агроэкосистем, водных ресурсов и в разработке адаптационных мер к изменяющимся климатическим условиям на территории Республики Башкортостан.

Список источников

1. Шакиров А.В. Эколого-географическое районирование Башкортостана. М.: Химия, 2003. 356 с. EDN: NNLXGN.
2. Каианов Р.Ш. Геоэкологическое состояние территории Республики Башкортостан // Вестн. НВГУ. 2011. № 2. С. 45–50. EDN: OXYRAB.
3. Агроклиматические ресурсы Башкирской АССР: справочник / подгот. Г.С. Халевицкая, М.И. Бабакина, В.В. Кузнецова и др. Л.: Гидрометеиздат, 1976. 235 с.
4. Кильметова Ф.Ш. Районирование территории БАССР по условиям увлажнения и генезису осадков // Проблемы комплексного изучения, освоения и охраны ландшафтов Урала: тез. докл. / отв. ред. Ф.А. Максютов. Уфа, 1980. С. 57–58.
5. Гареев А.М. Географо-экологические основы комплексного использования и охраны водных ресурсов бассейна реки бассейна реки: учеб. пособие. Челябинск, 1989. 123 с. EDN: UYSWPF.
6. Шамкаева В.В., Заманова Н.А. Рельеф Республики Башкортостан // Форум молодых ученых. 2018. № 12. С. 4–28. EDN: MBVNJK.
7. Галимова Р.Г. Современный климатический режим атмосферных осадков на территории Республики Башкортостан // Геогр. вестн. 2020. № 2. С. 111–119. EDN: UVLKIM. <https://doi.org/10.17072/2079-7877-2020-2-111-119>
8. Переведенцев Ю.П., Гурьянов В.В., Шанталинский К.М., Аухадеев Т.Р. Динамика тропосферы и стратосферы в умеренных широтах Северного полушария и современные изменения климата в Приволжском федеральном округе. Казань: Изд-во Казан. ун-та, 2017. 186 с. EDN: YXLJXQ.

9. Черенкова Е.А. Сезонные осадки на территории Восточно-Европейской равнины в периоды теплых и холодных аномалий температуры поверхности северной Атлантики // Изв. РАН. Сер. геогр. 2017. № 5. С. 72–81. EDN: ZMMSXT. <https://doi.org/10.7868/S0373244417050061>
10. Псянчин А.В. История географических исследований на территории Республики Башкортостан с древнейших времен до наших дней. Уфа: Башкирский гос. ун-т, 2021. 114 с. EDN: FGJXVX.
11. World Meteorological Organization. State of the Global Climate 2024: Climate Services Supplement. Geneva: WMO, 2025. 42 p.
12. Курамишина Н.Г., Елизарьев А.Н., Нафикова Э.В., Вдовина И.В., Смирнова Т.П., Кутлин Н.Г. Геоэкологическая оценка риска биологического загрязнения территории Республики Башкортостан по природно-очаговым факторам // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2021. № 3. С. 64–73. EDN: OBEZQR. <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2021-3-64-73>
13. Государственный доклад о состоянии природных ресурсов и окружающей среды Республики Башкортостан в 2023 году. Уфа, 2024. 330 с.
14. Сафонов А.Н. Энерго- и ресурсосбережение – стратегия технической политики АНК «Башнефть» // Нефтяное хозяйство. 1996. № 2. С. 7–9.
15. Доклад о климатических рисках на территории Российской Федерации / под ред. В.М. Катцова. СПб.: ГГО им. А.И. Воейкова, 2017. 106 с.
16. Галимова Р.Г. Анализ изменений температурно-влажностного режима на территории Республики Башкортостан в современный период // Вестн. Удмуртского ун-та. Биология. Науки о Земле. 2020. № 1. С. 83–93. EDN: SIZVGV. <https://doi.org/10.35634/2412-9518-2020-30-1-83-93>
17. Галимова Р.Г. Оценка влияния современных климатических изменений в природных зонах Республики Башкортостан // Региональные геосистемы. 2020. № 2. С. 125–137. EDN: PYWVES. <https://doi.org/10.18413/2712-7443-2020-44-2-125-137>
18. Камалова Р.Г., Козлова А.С., Фирстов А.О. Современные изменения агроклиматических ресурсов в природно-сельскохозяйственных зонах Республики Башкортостан в тёплый период // Вестн. Удмуртского ун-та. Биология. Науки о Земле. 2023. № 4. С. 434–444. EDN: LCLTRM. <https://doi.org/10.35634/2412-9518-2023-33-4-434-444>
19. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2014620942. Описание массива данных суточной температуры воздуха и количества осадков на метеорологических станциях России и бывшего СССР (ТТТР) / О.Н. Булыгина, В.Н. Разуваев, Т.М. Александрова. 2014.

References

1. Shakirov A.V. *Ecological and geographical zoning of Bashkortostan*. Moscow: Chemistry; 2003. 356 p. (In Russ.). EDN: NNLXGN.
2. Kashapov R.Sh. Geoeological condition of the territory of the Republic of Bashkortostan. *Bulletin of Nizhnevartovsk State University*. 2011;(2):45-50. (In Russ.). EDN: OXYRAB.
3. Khalevitskaya G.S., Babkina M.I., Kuznetsova V.V. et al., prep. *Agroclimatic resources of the Bashkir ASSR*. Handbook. Leningrad: Hydrometeorological Publishing House; 1976. 235 p. (In Russ.).
4. Kilmetova F.Sh. Zoning of the territory of the BASSR by moisture conditions and genesis of precipitation. *Problems of complex study, development and protection of Urals landscapes*. Abstracts of reports. F.A. Maksutov (ed.). Ufa, 1980:57-58. (In Russ.).
5. Gareev A.M. *Geographical and ecological foundations for the integrated use and protection of water resources in the river basin*. Textbook. Chelyabinsk, 1989. 123 p. (In Russ.). EDN: UYSWPF.
6. Shamkaeva V.V., Zamanova N.A. Relief of the Republic of Bashkortostan. *Forum of Young Scientists*. 2018;(12):4-28. (In Russ.). EDN: MBVNJK.
7. Galimova R.G. Modern climatic regime of atmospheric precipitation in the Republic of Bashkortostan. *Geographical Bulletin*. 2020;(2):111-119. (In Russ.). EDN: UVLKIM. <https://doi.org/10.17072/2079-7877-2020-2-111-119>
8. Perevedentsev Yu.P., Guryanov V.V., Shantalinsky K.M., Aukhadayev T.R. *Troposphere and stratosphere dynamics in the mid-latitudes of the Northern hemisphere and current climate changes in the Volga Federal District*. Kazan: Kazan University Press; 2017. 186 p. (In Russ.). EDN: YXLJXQ.
9. Cherenkova E.A. Seasonal precipitation on the East European Plain during warm and cold SST anomalies in the North Atlantic. *Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Geography*. 2017;(5):72-81. (In Russ.). EDN: ZMMSXT. <https://doi.org/10.7868/S0373244417050061>
10. Pсянчин А.В. *History of geographical research in the territory of the Republic of Bashkortostan from ancient times to the present day: textbook for geography teachers and students of natural-geographical programs*. Ufa: Bashkir State University, 2021. 114 p. (In Russ.). EDN: FGJXVX.
11. World Meteorological Organization. State of the Global Climate 2024: Climate Services Supplement. Geneva: WMO, 2025. 42 p.

12. Kuramshina N.G., Elizaryev A.N., Nafikova E.V., Vdovina I.V., Smirnova T.P., Kutlin N.G. Geocological assessment of the risk of biological contamination in the Republic of Bashkortostan based on natural focal factors. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science*. 2021;(3):64-73. (In Russ.). EDN: OBEZQR. <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2021-3-64-73>

13. *State report on the state of natural resources and the environment of the Republic of Bashkortostan in 2023*. Ufa, 2024. 330 p. (In Russ.).

14. Safonov E.N. Energy and resource conservation as the technical policy strategy of Bashneft Oil Company. *Oil Industry*. 1996;(2):7-9. (In Russ.).

15. Kattsov V.M., ed. *Report on climate risks in the territory of the Russian Federation*. St. Petersburg: Voeikov Main Geophysical Observatory; 2017. 106 p. (In Russ.).

16. Galimova R.G. Analysis of changes in temperature and humidity regime in the Republic of Bashkortostan in the modern period. *Bulletin of Udmurt University. Series: Biology. Earth Sciences*. 2020;(1):83-93. (In Russ.). EDN: SIZVGV. <https://doi.org/10.35634/2412-9518-2020-30-1-83-93>

17. Galimova R.G. Assessment of the impact of modern climate changes in the natural zones of the Republic of Bashkortostan. *Regional Geosystems*. 2020;(2):125-137. (In Russ.). EDN: PYWVES. <https://doi.org/10.18413/2712-7443-2020-44-2-125-137>

18. Kamalova R.G., Kozlova A.S., Firstov A.O. Modern changes of agroclimatic resources in the natural-agricultural zones of the Republic of Bashkortostan during the warm period. *Bulletin of Udmurt University. Series: Biology. Earth Sciences*. 2023;(4):434-444. (In Russ.). EDN: LCLTRM. <https://doi.org/10.35634/2412-9518-2023-33-4-434-444>

19. Bulygina O.N., Razuvaev V.N., Aleksandrova T.M. *Description of the dataset of daily air temperature and precipitation at meteorological stations of Russia and the former USSR (TTTR)*. Patent No. 2014620942. (In Russ.).

Информация об авторе

В.В. Булгакова – аспирант кафедры авиационной метеорологии и экологии СПбГУГА.

Information about the author

V.V. Bulgakova – Postgraduate Student, Department of the Aviation Meteorology and Ecology, SPSUCA.

*Статья поступила в редакцию 15.08.2025; одобрена после рецензирования 10.10.2025; принята к публикации 11.11.2025.
The article was submitted 15.08.2025; approved after reviewing 10.10.2025; accepted for publication 11.11.2025.*

Научная статья

УДК 504.455

<https://doi.org/10.18522/1026-2237-2026-1-66-75>

СОДЕРЖАНИЕ БИОГЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ (АЗОТ И ФОСФОР) В ЛИТОРАЛЬНОЙ ЗОНЕ ОЗЕРА АРАХЛЕЙ (ЗАБАЙКАЛЬСКИЙ КРАЙ) В 2017 ГОДУ

Мария Николаевна Бутенко

*Институт природных ресурсов, экологии и криологии Сибирского отделения Российской академии наук,
Чита, Россия*

44mary44@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6847-5545>

Аннотация. Цель исследования – анализ количественного содержания и распределения форм азота и фосфора в литоральной зоне оз. Арахлей (Забайкальский край) в 2017 г. и оценка трофического статуса водоёма по содержанию биогенных элементов в условиях антропогенной нагрузки. Представлены результаты химического анализа проб воды оз. Арахлей в период открытой воды 2017 г. В исследовании использованы потенциометрический и колориметрический гидрохимические методы. Определено количественное содержание нитратов, нитритов, аммонийного иона, фосфатов и общего фосфора. Проанализирован режим биогенных элементов в весенний, летний и осенний биологические сезоны 2017 г. Выделены факторы, определяющие развитие экосистемы водоёма. Результаты гидрохимических исследований показали, что распределение в литоральной зоне биогенных элементов неравномерно на всем исследуемом участке. Воды оз. Арахлей соответствуют мезотрофному типу. Несмотря на низкие концентрации биогенов, необходимо продолжать мониторинг за состоянием водоёма, так как изучение оз. Арахлей имеет научное и региональное значение. Полученные данные позволяют лучше понять процессы, происходящие в пресноводных мезотрофных экосистемах в условиях антропогенной нагрузки, особенно в прибрежной зоне.

Ключевые слова: нитраты, нитриты, аммонийный ион, фосфор, литораль, озеро Арахлей, Забайкальский край

Для цитирования: Бутенко М.Н. Содержание биогенных элементов (азот и фосфор) в литоральной зоне озера Арахлей (Забайкальский край) в 2017 году // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2026. № 1. С. 66–75. <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2026-1-66-75>

Благодарности: работа выполнена в рамках государственного задания Института природных ресурсов, экологии и криологии Сибирского отделения РАН № 126020216344-7.

Автор выражает благодарность м.н.с. А.Б. Шойдокову и с.н.с. к.б.н. Н.А. Ташлыковой.

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

Original article

THE CONTENT OF BIOGENIC ELEMENTS (NITROGEN AND PHOSPHORUS) IN THE LITTORAL ZONE OF LAKE ARAKHLEY (TRANS-BAIKAL TERRITORY) IN 2017

Maria N. Butenko

*Institute of Natural Resources, Ecology and Cryology of the Siberian Branch of the Russian Academy
of Sciences, Chita, Russia*

44mary44@mail.ru, <http://orcid./0000-0001-6847-5545>

© Бутенко М.Н., 2026

Abstract. The aim is to analyze the quantitative content and distribution of nitrogen and phosphorus forms in the littoral zone of Lake Arakhley (Trans-Baikal Territory) in 2017, and to assess the trophic status of the reservoir in terms of the content of biogenic elements under anthropogenic stress. The results of chemical analyses of water samples from Lake Arakhley during the open water period of 2017 are presented. The potentiometric and colorimetric hydrochemical methods were used in the study. The quantitative content of nitrates, nitrites, ammonium ion, phosphates and total phosphorus was determined. The regime of biogenic elements in the Spring, Summer and Autumn biological seasons of 2017 is analyzed. The factors determining the development of the ecosystem of the reservoir are highlighted. The results of hydrochemical studies have shown that the distribution of biogenic elements in the littoral zone is not uniform throughout the study area. The waters of Lake Arakhley correspond to the mesotrophic type. Despite the low concentrations of biogens, it is necessary to continue monitoring the condition of the reservoir, since the study of Lake Arakhley is of scientific and regional importance. The data obtained make it possible to better understand the processes occurring in freshwater mesotrophic ecosystems under anthropogenic influence, especially in the coastal zone.

Keywords: nitrates, nitrites, ammonium ion, phosphorus, littoral, Lake Arakhley, Trans-Baikal Territory

For citation: Butenko M.N. The Content of Biogenic Elements (Nitrogen and Phosphorus) in the Littoral Zone of Lake Arakhley (Trans-Baikal Territory) in 2017. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2026;(1):66-75. (In Russ.). <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2026-1-66-75>

Acknowledgements: the study was carried out within the framework of the state assignment of Institute of Natural Resources, Ecology and Cryology of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, No. 126020216344-7.

The author expresses his gratitude to A.B. Shoydakov, Junior Researcher, and N.A. Tashlykova, Senior Researcher, Candidate of Sciences (Biology).

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

Введение

Изучение озёр, направленное на их использование в хозяйственной деятельности человека в качестве источника промышленного и бытового водоснабжения, рыболовства, рекреации, бальнеологии и т.д., актуально во всем мире [1].

Озеро Арахлей является одним из наиболее крупных по площади водоёмов Забайкальского края, а также единственным за Байкалом и в границах Байкальского региона, на котором ведутся наиболее длительные мониторинговые гидробиологические и гидрохимические исследования [2–6]. Оно представляет интерес в силу специфических черт данного региона, так как находится в условиях резко континентального климата, что оказывает влияние на биологические процессы в водоёме [7].

Водоём находится на территории Ивано-Арахлейского государственного природного парка и имеет рыбохозяйственное, туристическое и культурно-бытовое значение. Воды озера являются средой обитания многочисленных и разнообразных гидробионтов, которые должны быть обеспечены достаточным количеством питательных и других необходимых для нормальной жизнедеятельности химических компонентов. К таким компонентам относятся биогенные элементы азот и фосфор, присутствующие в природных водах в форме минеральных и органических соединений. Их концентрация в воде зависит от процессов поступления, потребления их водными организмами и разложения органических веществ в совокупности с физическими параметрами (температура, минерализация, рН, мутность и др.). Количество данных элементов служит одним из первых показателей загрязнения воды и определения класса трофности водоёма [2, 8–14].

Особое внимание при исследовании водоёма уделяется литоральной зоне, так как это прибрежный экотон, наиболее чувствительный к колебаниям уровня воды. При этом меняется скорость внутриводоёмных процессов, что отражается на изменении концентрации биогенных веществ и сообществ гидробионтов. Эта зона также выполняет функцию барьера между водосборной территорией и пелагической зоной водоёма [2, 4, 6, 15, 16].

Литораль наиболее подвержена антропогенному влиянию, так как на прибрежной территории водоёма находятся многочисленные туристические базы и гостевые дома, дачные участки, жилые дома жителей сельских поселений. Антропогенные источники загрязнения оз. Арахлей нахо-

дятся на водосборном бассейне Ивано-Арахлейских озёр. Это сельскохозяйственные угодья, животноводческие объекты, органические удобрения, население и рекреанты [2, 17]. Дополнительное количество органических веществ и биогенных элементов оказывают влияние на естественный биохимический фон и распределение организмов в водоёме [18, 19]. Поэтому мониторинг литоральной зоны необходим, чтобы выявить предупреждающие факторы смены стабильных состояний экосистемы водоёма [5].

Исходя из вышеизложенного, цель данной работы – анализ количественного содержания и вертикального (поверхностный и придонный слои) распределения нитратов, нитритов, аммонийного иона, фосфатов и общего фосфора в литоральной зоне оз. Арахлей и оценка трофического статуса водоёма по содержанию биогенных элементов.

Контроль за содержанием биогенных элементов остаётся актуальной задачей гидрохимии. Результаты работы могут быть использованы для проведения оценки качества вод, а также при планировании гидрохимических и гидробиологических исследований озера.

Объекты и методы исследования

Объектом исследования является оз. Арахлей (N 52.20597, E 112.86735) (рис. 1а). Территориально находится на юге Витимского плоскогорья, вдоль тектонической впадины между Яблонным и Осинным хребтами. Расположено в лесостепной зоне. Это самый крупный водоём Ивано-Арахлейской системы озёр. Площадь его зеркала равна 58,2 км², объём водных масс – 0,63 км³, максимальная глубина достигала 17 м, средняя – 10,4 м. Воды озера гидрокарбонатно-кальциевого типа с низкой минерализацией [20].

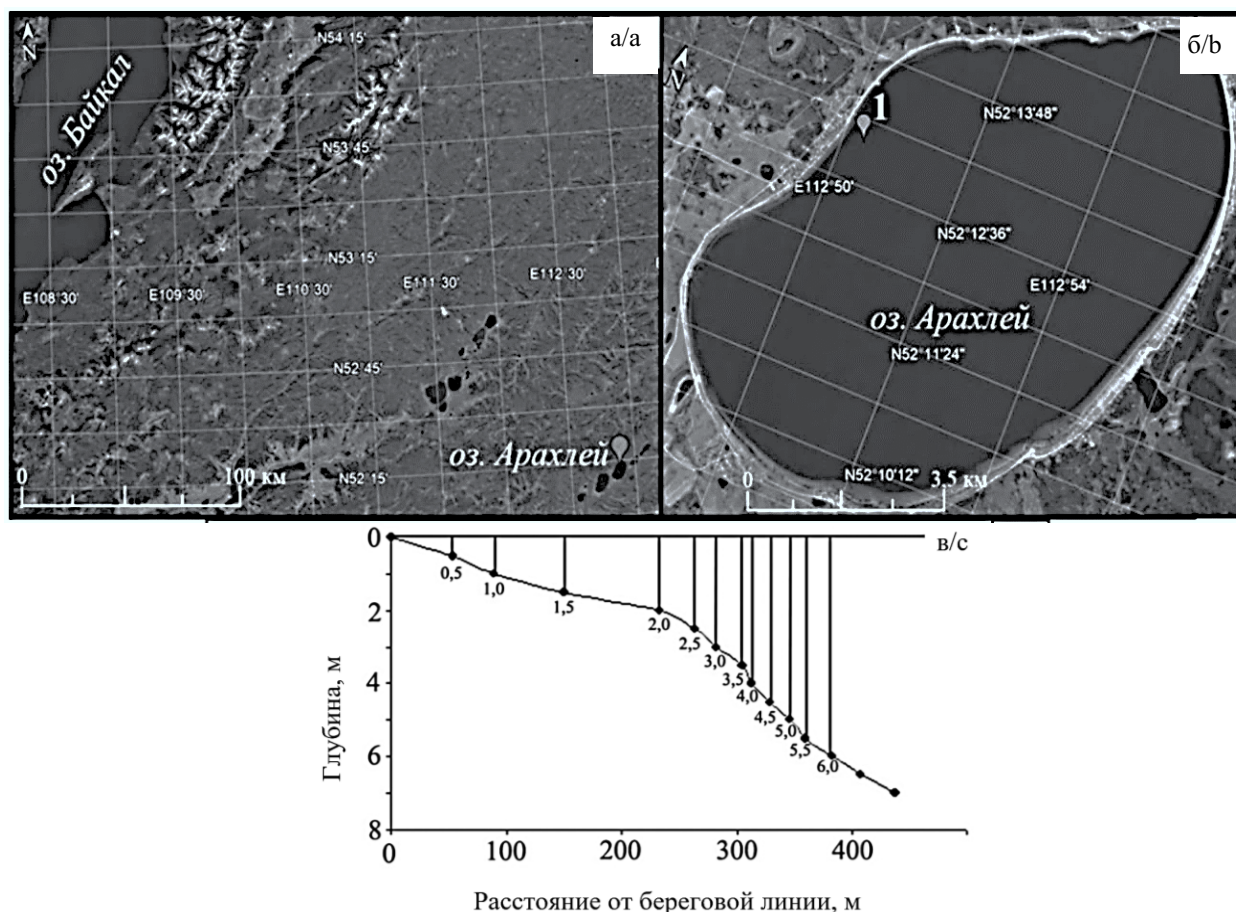


Рис. 1. Карта-схема расположения точек отбора проб: а – местоположение оз. Арахлей относительно оз. Байкал; б – оз. Арахлей; 1 – район исследования литоральной зоны; в – горизонты отбора проб в прибрежной части оз. Арахлей / Fig. 1. The map-diagram of the location of sampling points: а - location of Lake Arakhley relative to Lake Baikal; б - Lake Arakhley; 1 - the study area of the littoral zone; в - sampling horizons in the coastal part of the Lake Arakhley

Материалом для исследования послужили пробы воды оз. Арахлей. Отбор проб проводился в 2017 г. в период открытой воды: весной (последняя декада мая – первая декада июня), летом (последняя декада июля – первая декада августа), осенью (первая декада октября), согласно общепринятым методам [21]. Сбор материала осуществляли в литоральной зоне озера (N 52.21703, E 112.83352) (рис. 1б) на станциях отбора на глубине от 0,05 до 2,00 м – в поверхностном слое, а на станциях на глубине от 2,50 до 6,00 м – в поверхностном и придонном слоях. Сетка станций отбора проб представлена на рис. 1в.

Согласно рекомендациям [22], граница литорали в озере определяется зоной распространения водной растительности. В период исследований на выбранном участке водная растительность распространялась на расстояние до 400 м от берега, где глубина достигала 6 м.

Каждый биологический сезон сбор материала осуществлялся на одних и тех же станциях, по 20 проб за сезон. Всего было отобрано 60 проб воды.

Для определения содержания биогенных элементов пробы фиксировали и доставляли в лабораторию ИПРЭК СО РАН. Анализ форм азота проводили по ГОСТ 33045-2014 и РД 52.24.367-2010, фосфора – по ГОСТ 183-09-2014 [23–25].

Одновременно с отбором проб исследовались некоторые физические параметры (глубина, температура, рН, электропроводность, минерализация, мутность, окислительно-восстановительный потенциал) воды с помощью многопараметрического прибора контроля качества воды AquaReader.

Полученные данные были подвергнуты статистической и математической обработке с использованием пакета программ Microsoft Excel 2010 и надстройки для программы Microsoft Excel XLSTAT (Addinsoft, США). Для изучения взаимосвязей содержания биогенных элементов и абиотических факторов среды применяли метод главных компонент (Principal Component Analysis, PCA). Абсолютное значение нагрузки 0,7 и выше принимается за существенную связь, ниже 0,7 – предполагается отсутствие связи [26].

Результаты и обсуждение

Полученные данные свидетельствуют о незначительных изменениях концентраций форм азота и фосфора в литоральной зоне оз. Арахлей (рис. 2). В то же время более выраженные колебания отмечены в концентрации нитратов; максимальная в летний вегетационный период, она уменьшается к осени. Средняя концентрация нитритов в начале июня наименьшая по сравнению с октябрём. Сезонные колебания аммонийного азота характеризуются незначительными концентрациями и увеличением содержания к осени. Наибольшее количество фосфатов и общего фосфора наблюдается в летний период.

Согласно экологической классификации качества поверхностных вод [9–11, 13, 14], по концентрации биогенных веществ оз. Арахлей остаётся мезотрофным водоёмом, как ранее [2], так и в период наших исследований. Такое устойчивое состояние экосистемы поддерживается благодаря комплексу одновременно протекающих внутриводоёмных биохимических процессов, а также достаточной способности водоёма к саморегулированию и самоочищению [27].

На рис. 3 представлены графики распределения минерального азота и общего фосфора в прибрежной части оз. Арахлей.

Результаты показывают, что распределение этих элементов неравномерно на всём исследуемом участке. Небольшие количества отдельных биогенных элементов указывают на то, что в этих точках происходит активное потребление их гидробионтами в благоприятных физико-химических условиях [13].

Физико-химические параметры имеют большое значение для водных организмов и являются непременным условием жизни, определяя их рост и развитие [2, 20, 28]. В таблице представлены показатели некоторых из них.

В период наших исследований водородный показатель (рН) находился в пределах от 7 до 8,34. Следовательно, воды оз. Арахлей характеризуются нейтральной или слабощелочной реакцией среды, что соответствует характеристикам пресных вод [29].

Мутность (Turb) воды обусловлена присутствием тонкодисперсных примесей органического и неорганического происхождения. На обследованной территории этот показатель находился в пределах от 14 до 29,3 NTU, что считается низкой мутностью [29].

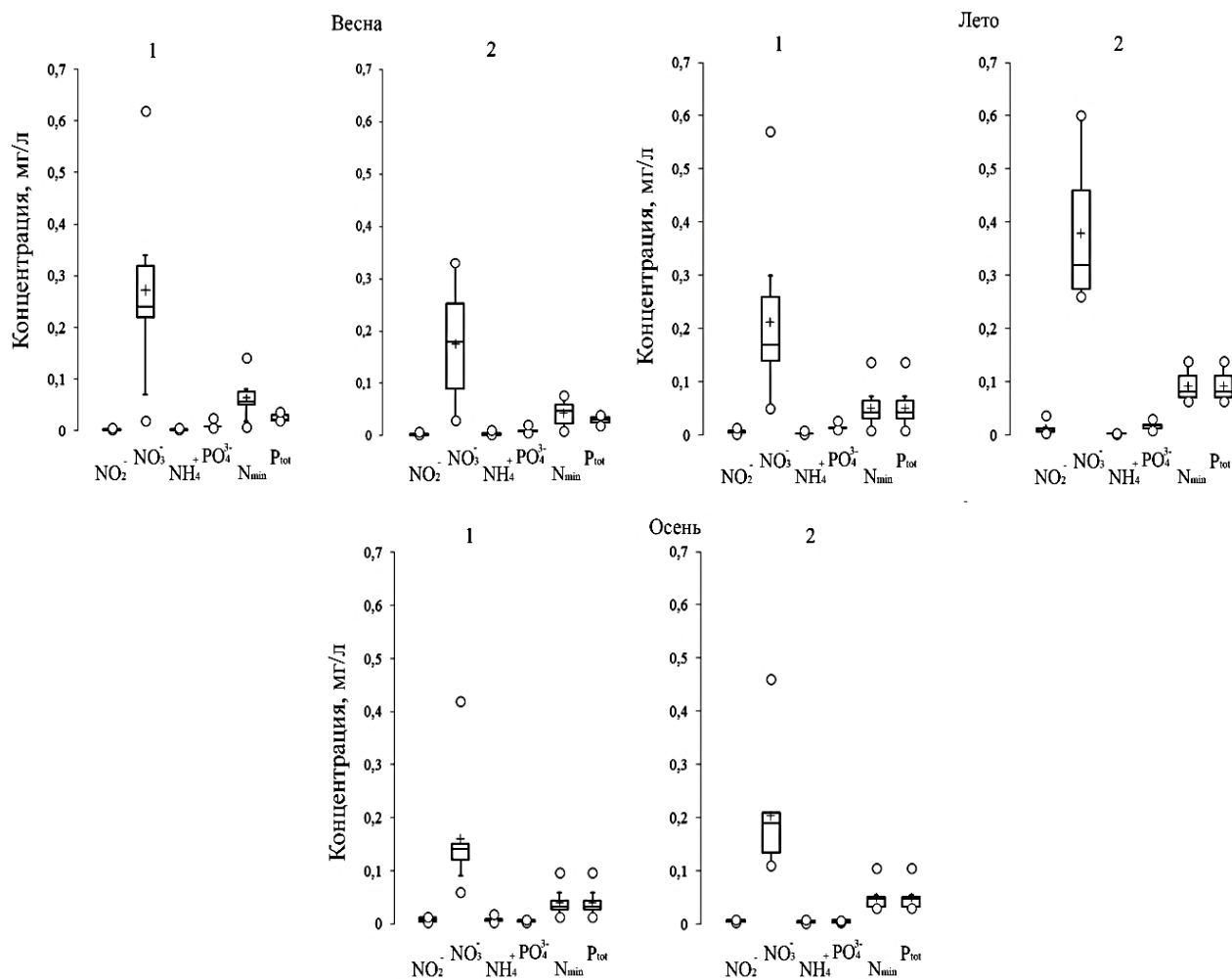


Рис. 2. Размах концентрации форм биогенных элементов в зоне литорали оз. Арахлей в исследуемые сезоны в 2017 г.: 1 – поверхностный слой; 2 – придонный слой; 0 – среднее значение; +, – — минимальное и максимальное значения / Fig. 2. Diagram of the concentration range of forms of biogenic elements in the littoral zone of the Lake Arakhley in the studied seasons in 2017: 1 - surface layer; 2 - bottom layer; 0 – mean; +, – - minimum and maximum values

Электропроводность (ЕС) зависит в основном от минерализации и температуры. Полученные значения (209–361 мкСм/см) указывают на присутствие в воде ряда элементов (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^-), что наиболее часто встречается в поверхностных водах [29].

Значения минерализации (TDS) вод оз. Арахлей находились в пределах от 135 до 234 мг/л, что является низкой минерализацией и соответствует пресным водам [29].

Окислительно-восстановительный потенциал (ORP) вместе с pH, температурой и содержанием солей в воде характеризует состояние стабильности воды. В норме ORP в природных водах колеблется от –500 до +700 мВ [29]. Значения этого показателя в оз. Арахлей изменялись в пределах от +92,4 до +294 мВ.

В целом показатели минерализации, электропроводности и окислительно-восстановительного потенциала изменялись незначительно на исследуемом участке, но отличались по сезонам. Среди точек отбора можно выделить зону заплеска (H – 0,05 м). Здесь отмечены несколько повышенные показатели этих параметров. Также в летний сезон с прогревом водных масс увеличиваются и показатели ЕС, TDS, ORP. С повышением температуры в условиях достаточного питания происходит активное развитие гидробионтов. В экосистеме озера в процессе жизнедеятельности организмов, отмирания и разложения, как следствие, растут показатели электропроводности, минерализации, окислительно-восстановительного потенциала. Такие биотические процессы в совокупности с абиотическими определяют химический состав воды, в том числе и количество биогенных элементов [1, 12, 16, 28].

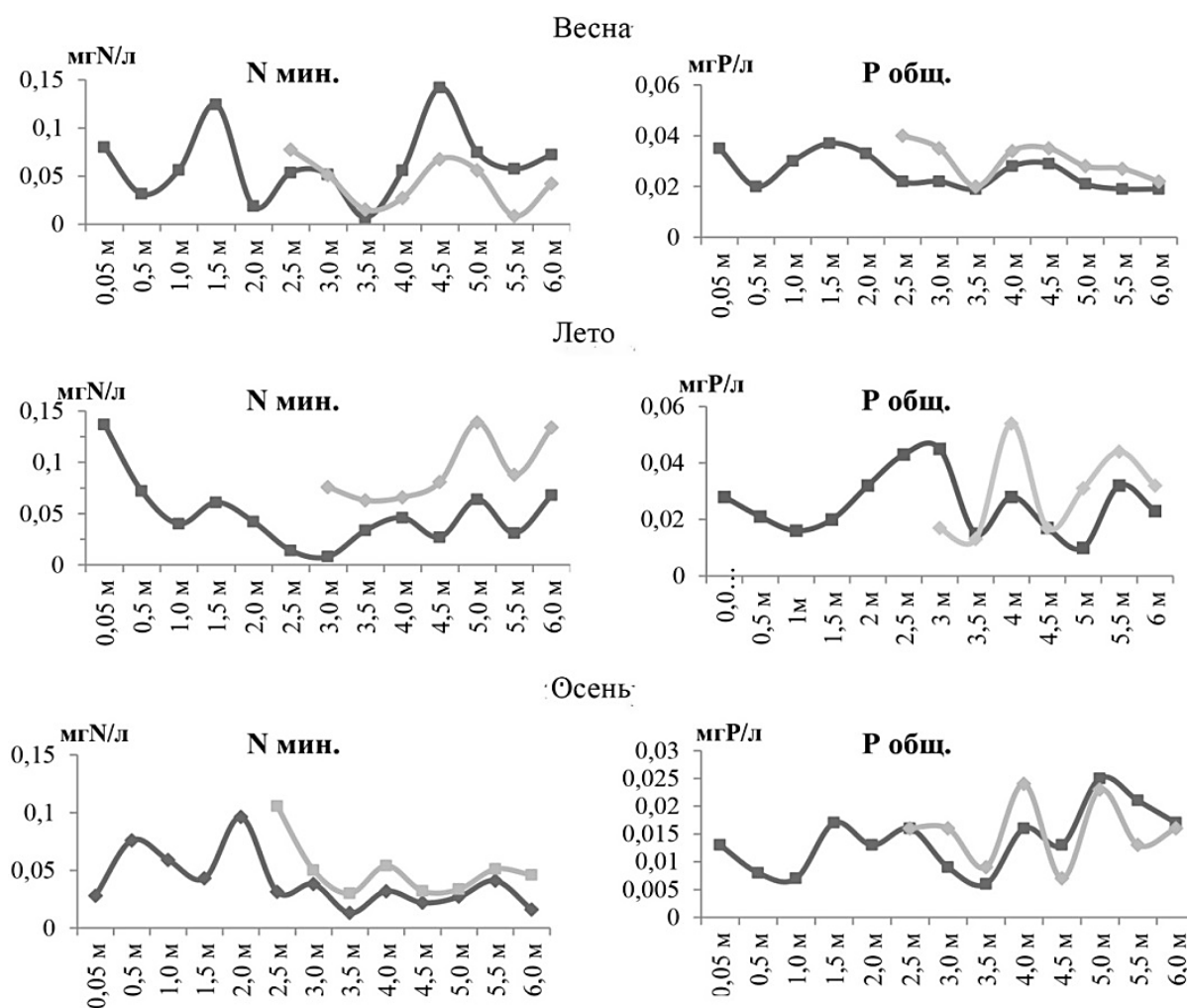


Рис. 3. Горизонтальное распределение минерального азота и общего фосфора в зоне литорали оз. Арахлей: —■— — поверхностный слой; —◆— — придонный слой / Fig. 3. Horizontal distribution of mineral nitrogen and total phosphorus in the littoral zone of the Lake Arakhley: —■— - surface layer; —◆— - bottom layer

Значения некоторых физико-химических параметров воды в литоральной зоне оз. Арахлей / The values of some physical and chemical parameters of water in the littoral zone of Lake Arakhley

Н	Т			ЕС			TDS			ORP			pH			Turb		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
0,05	18,2	23,4	5,4	237	223	211	154	144	135	148	294	201	8,1	8,3	8,0	29,3	25,3	—
0,5	10,8	22,8	5,7	215	256	209	139	167	135	141	245	195	8,2	7,3	8,4	18,7	27,0	—
1	11,1	22,1	6,2	214	235	210	139	152	136	210	246	199	8,1	7,0	8,3	23,3	—	—
1,5	10,1	21,1	6,0	210	233	208	136	—	135	198	—	183	8,2	7,4	8,2	21,4	—	—
2	10,0	21,1	6,7	210	257	211	136	—	137	205	—	194	8,0	8,3	8,3	21,5	—	—
2,5	9,6	21,1	6,8	209	274	214	136	177	139	175	213	194	8,2	7,4	8,3	18,6	—	21,7
3	9,5	22,3	7,1	208	219	210	135	142	135	148	—	181	8,1	7,9	7,9	19,1	—	18,3
3,5	9,1	24,0	6,9	210	—	214	136	—	139	137	—	191	8,1	7,8	8,2	14,3	—	20,4
4	9,6	22,5	7,2	209	—	217	135	—	139	92	—	173	8,1	7,6	8,3	19,7	—	19,1
4,5	9,2	22,5	7,4	211	—	211	137	—	137	137	—	190	7,9	7,9	8,1	15,9	—	22,3
5	9,9	22,4	7,5	216	—	214	141	—	140	153	—	192	8,2	7,4	7,9	15,8	—	20,9
5,5	11,1	22,5	7,3	216	—	211	139	—	138	206	—	222	8,2	7,2	7,9	14,0	—	21,9
6	10,5	22,4	9,4	206	—	217	138	—	141	184	—	201	8,2	7,4	7,6	15,2	—	13,7

Примечание. 1 – весенний сезон; 2 – летний сезон; 3 – осенний сезон; Н – глубина, м; Т, – температура, °С; ЕС – электропроводность, мкСм/см; TDS – минерализация, мг/л; ORP – окислительно-восстановительный потенциал, мВ; pH – водородный показатель; Turb – мутность, NTU.

В результате компонентного анализа для поверхностного и придонного слоев литоральной зоны было выделено по два фактора (компоненты), суммарный вклад которых в изменчивость составил 51,75 и 54,78 % соответственно (рис. 4). Другие факторы не рассматривались, так как их доля в общей дисперсии незначительна. Критерием выделения оптимального числа факторов служили собственные значения, являющиеся дисперсиями главных компонент.

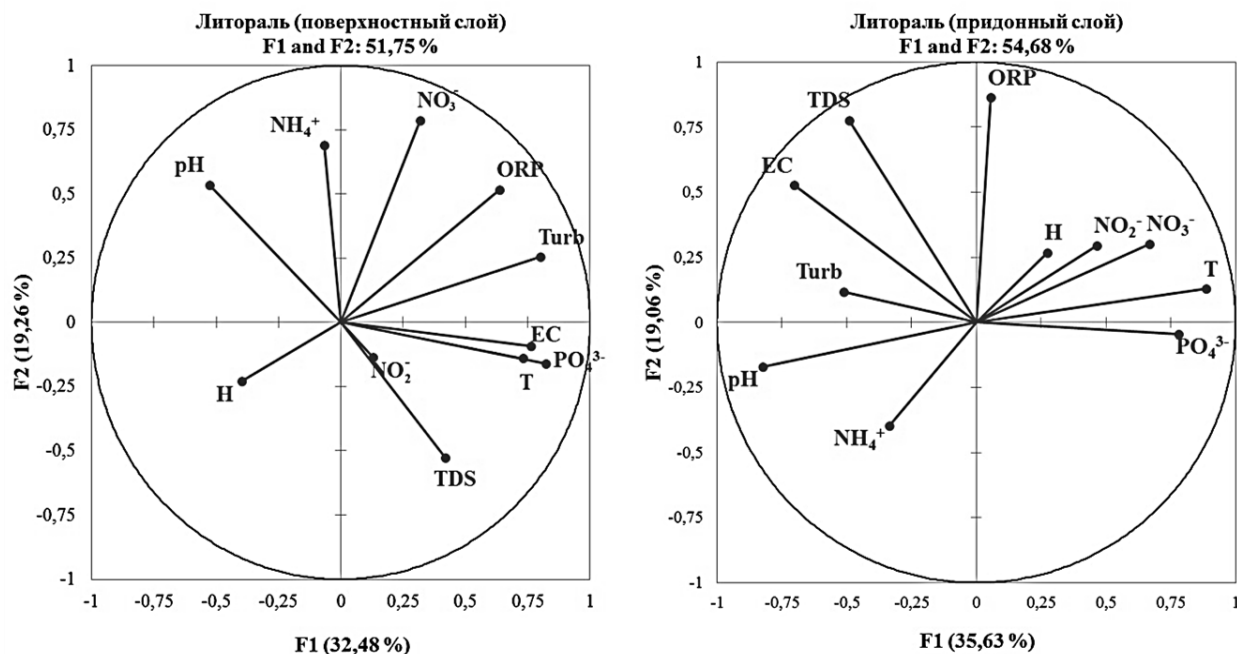


Рис. 4. Содержание биогенных элементов и некоторых физико-химических показателей в пространстве двух факторов: TDS – минерализация, мг/л; T – температура, °C; ORP – окислительно-восстановительный потенциал, мВ; EC – электропроводность, мкСм/см; H – глубина, м; Turb – мутность, NTU; pH – водородный показатель; NO₃⁻ – нитраты; NO₂⁻ – нитриты; NH₄⁺ – аммонийный ион; P_{общ.} – фосфор общий; PO₄³⁻ – фосфаты, мг/л / Fig. 4. Content of biogenic elements and some physical and chemical parameters in the space of two factors: TDS - mineralization, mg/l; T - temperature, °C; ORP - redox potential, mV; EC - electrical conductivity, mkSm/cm; H - depth, m; Turb - turbidity, NTU; pH - hydrogen index; NO₃⁻ - nitrates; NO₂⁻ - nitrites; NH₄⁺ - ammonium ion; P_{tot} - total phosphorus; PO₄³⁻ - phosphates, mg/l

Для поверхностного слоя первая главная компонента, описывающая 32,48 % изменчивости, в качестве параметров с наибольшими положительными весовыми нагрузками имеет содержание фосфатов (0,733), температуры (0,823) и мутности (0,799). Вклад второго фактора – 19,26 %. Положительные факторные нагрузки определяются содержанием нитратов (0,787).

Для придонного слоя вклад первой компоненты составил 35,63, второй – 19,06 %. С первой главной компонентой положительно связаны содержания нитратов (0,845) и фосфатов (0,807), а также температура (0,873) и pH (-0,809). Из абиотических факторов среды наибольшее влияние на вторую компоненту оказывают EC (0,734), TDS (0,908) и ORP (0,723).

Результаты компонентного анализа показывают, что определяющим фактором развития экосистемы озера в прибрежной части является нитрат-ион. Это может быть связано с активными процессами разложения органического вещества и трансформацией азотсодержащих элементов, которые зависят в большей степени от температуры и pH среды.

Выводы

Таким образом, пределы изменения концентраций биогенных элементов в литоральной зоне оз. Арахлей в период открытой воды в 2017 г. невелики. Распределение их на исследуемом участке неравномерно и зависит от характера грунта, развития высшей водной растительности и других гидробионтов. Определяющим фактором развития экосистемы является нитрат-ион.

Очевидно, что процессы эвтрофирования в водоёме происходят без смещения баланса цикла трансформации форм азота и фосфора, так как водоём по-прежнему остаётся мезотрофным. Для контроля качества вод необходимо продолжать мониторинг озера в комплексе с гидробиологическими характеристиками.

Список источников

1. *Веселков Г.О., Чечель Л.П.* Изменение параметров химического состава в водной толще озера Арахлей (Восточное Забайкалье) // Аспирант. Приложение к журн. «Вестник Забайкальского гос. ун-та». 2018. Т. 12, № 2. С. 29–35. EDN: YTACWT. <https://doi.org/10.21209/2074-9155-2018-12-2-29-35>
2. *Итигилова М.Ц., Пронин Н.М., Юргенсон Г.А., Птицын А.Б., Калугин И.А., Дарьин А.В., Решетова С.А., Обязов В.А., Помазкова Н.В., Цыбекмитова Г.Ц. и др.* Ивано-Арахлейские озера на рубеже веков (состояние и динамика). Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2013. 336 с. EDN: RVIPRL.
3. *Базарова Б.Б., Итигилова М.Ц.* Многолетняя динамика продуктивности водной растительности озера Арахлей (Восточное Забайкалье) // Изв. РАН. Серия биол. 2009. № 1. С. 81–85. EDN: HTAIRD.
4. *Куклин А.П.* Влияние изменения морфометрии котловины в разные фазы водности на процессы в литорали озера Арахлей // Междунар. журн. прикл. и фундам. исследований. 2018. № 11-1. С. 138–143. EDN: YOWPHV.
5. *Матафонов П.В.* Пространственное распределение литорального зообентоса в озере Арахлей в маловодный период // Междунар. журн. прикл. и фундам. исследований. 2018. № 5-1. С. 180–184. EDN: XQGAFV.
6. *Таилькова Н.А.* Состав и структура фитопланктона прибрежной и центральной частей оз. Арахлей (Забайкальский край) в весенне-летний сезон 2017 г. // Принципы экологии: науч. электр. журн. 2018. № 3. С. 75–90. EDN: YVZAZV. <https://doi.org/10.15393/j1.art.2018.7403>
7. *Корякина Е.А., Никитин В.М.* Оценка трофического статуса озера Арахлей // Вестн. МАНЭБ. 2008. Т. 14, № 3. С. 107–110. EDN: RTRDLR.
8. *Бутенко М.Н.* Динамика биогенных элементов оз. Арахлей в период 1988–2015 гг. // Перспективы и проблемы современной гидробиологии : материалы XVI Всерос. молод. гидробиол. конф. Ярославль: Филигрань, 2016. С. 33–34. EDN: XBRPRL.
9. *Неверова-Дзюпак Е.В., Цветкова Л.И.* Оценка трофического состояния поверхностных вод. СПб.: СПбГАСУ, 2020. 176 с. EDN: KOLTDW.
10. *Оксиук О.П., Жукинский В.Н., Брагинский Л.П., Линник П.Н., Кузьменко М.И., Кленус В.Г.* Комплексная экологическая классификация качества поверхностных вод суши // Гидробиол. журн. Санитарная гидробиология. 1993. Т. 29, № 4. С. 62–76.
11. *Петин А.Н., Лебедева М.Г., Крымская О.В.* Анализ и оценка качества поверхностных вод. Белгород: Изд-во БелГУ, 2006. 252 с. EDN: QKHSBV.
12. *Токарева И.В., Прокушкина М.П., Прокушкин А.С.* Пространственно-временная изменчивость содержания биогенных элементов в стоке рек Енисейского бассейна // Органическое вещество и биогенные элементы во внутренних водоёмах и морских водах : тр. VI Всерос. симп. с междунар. участием. Барнаул: Ин-т водных и экол. проблем СО РАН, 2017. С. 243–246. EDN: YOIHNF.
13. *Уколова Т.К., Свириденко В.Д.* Сезонная динамика биогенных элементов в оз. Курильском в 2005 г. // Исследования водных биологических ресурсов Камчатки и северо-западной части Тихого океана. 2009. № 15. С. 5–20. EDN: KYASCF.
14. *Vollenweider R.A.* Advances in defining critical loading levels for phosphorous in lake eutrophication // Mem. Ist. Ital. Idrobiol. 1976. Vol. 33. P. 53–83.
15. *Чекрыжева Т.А., Калинин Н.М.* Структура и сезонная динамика фитопланктонных сообществ в открытой и закрытой литорали Онежского озера (Пиньгуба, Пухтинская бухта) // Тр. Карельского науч. центра РАН. 2016. № 12. С. 86–95. EDN: XHGDKF. <https://doi.org/10.17076/eco363>
16. *DeCamps H., Pinay G., Naiman R.J., Petts G.E., McClain M.E., Hillbricht-Ilkowska A., Hanley T.A., Holmes R.M., Quinn J., Gibert J. et al.* Riparian zones: where biogeochemistry meets biodiversity in management practice // Polish J. of Ecology. 2004. Vol. 52, № 1. P. 3–18.
17. *Цыбекмитова Г.Ц., Фалейчик Л.М., Михеев И.Е.* Антропогенная нагрузка на водосборный бассейн Ивано-Арахлейских озёр (Восточное Забайкалье) // Вода: химия и экология. 2013. № 2 (56). С. 3–11. EDN: PWEUWV.
18. *Баженова О.П., Герман Л.В., Кренц О.О., Шаховал В.Е., Вахрушева А.А.* Экологическое состояние и рекреационная ценность разнотипных озёр Омской области // Омский науч. вестн. 2012. № 1 (108). С. 213–216. EDN: PCSCVL.
19. *Баянов Н.Г., Юлова Г.А.* К вопросу о происхождении и современном экологическом состоянии некоторых озёр Нижегородского Заволжья // Вестн. Нижегородского ун-та им. Н.И. Лобачевского. Биология. 2002. Т. 1, № 2. С. 91–102. EDN: HPOMUV.

20. Бекман М.Ю., Горлачев В.П. Биологическая продуктивность озера Арахлей (Забайкалье). Новосибирск: Наука, 1981. 147 с.
21. Алевин О.А., Семенов А.Д., Скопинцев Б.А. Руководство по химическому анализу вод суши. Л.: Гидрометеиздат, 1973. 269 с. EDN: BUNKNW.
22. Кутаев С.П. Основы лимнологии для гидробиологов и ихтиологов. Петрозаводск: Карельский науч. центр РАН, 2007. 395 с. EDN: QKQMEV.
23. ГОСТ 33045-2014. Вода. Методы определения азотсодержащих веществ. М.: Стандартинформ, 2016. 20 с.
24. РД 52.24.367-2010. Массовая концентрация нитратов в водах. Методика выполнения измерений потенциометрическим методом с ионселективным электродом. Ростов н/Д.: ГХИ, 2010. 35 с.
25. ГОСТ 183-09-2014. Вода. Методы определения фосфорсодержащих веществ. М.: Изд-во стандартов, 2016. 21 с.
26. Джемфферс Дж. Введение в системный анализ: применение в экологии. М.: Мир, 1981. 256 с.
27. Кривицкий С.В., Станис Е.В., Бирчак Т.Н. Экологическая реабилитация водоемов с использованием биоинженерных методов // Вестн. РУДН. Экология и безопасность жизнедеятельности. 2010. № 5. С. 77–82. EDN: JWMIRL.
28. Шаранов Н.М., Васильева А.Н. Анализ гидрологического и гидрохимического режимов поверхностных водных объектов Забайкальского края // Водные ресурсы и водопользование: сб. материалов II Междунар. науч.-практ. конф. Чита: ЗабГУ, 2018. С. 64–86. EDN: YADENN.
29. Беликова С.Е. Водоподготовка: справочник. М.: Аква-Терм, 2007. 240 с.

References

1. Veselkov G.O., Chechel L.P. Changes in chemical composition parameters in the water column of Lake Arakhley (Eastern Transbaikalia). *Postgraduate Student. Supplement to the journal "Bulletin of Transbaikalian State University"*. 2018;12(2):29-35. (In Russ.). EDN: YTACWT. <https://doi.org/10.21209/2074-9155-2018-12-2-29-35>
2. Itigilova M.Ts., Pronin N.M., Yurgenson G.A., Ptitsyn A.B., Kalugin I.A., Darin A.V., Reshetova S.A., Obyazov V.A., Pomazkova N.V., Tsybekmitova G.Ts. et al. *The Ivano-Arakhley lakes at the turn of the century. Status and dynamics*. Novosibirsk: Publishing House of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences; 2013. 337 p. (In Russ.). EDN: RVIPRL.
3. Bazarova B.B., Itigilova M.Ts. Long-term dynamics of productivity of aquatic vegetation of Lake Arakhley (Eastern Transbaikalia). *Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Biology*. 2009;(1):81-85. (In Russ.). EDN: HTAIRD.
4. Kuklin A.P. The influence of changes in the morphometry of the basin in different phases of water content on the processes in the littoral of Lake Arakhley. *International Journal of Applied and Fundamental Research*. 2018;(11-1):138-143. (In Russ.). EDN: YOWPHV.
5. Matafonov P.V. Spatial distribution of littoral zoobenthos in Lake Arakhley during the low-water period. *International Journal of Applied and Fundamental Research*. 2018;(5-1):180-184. (In Russ.). EDN: XQGAFV.
6. Tashlykova N.A. Composition and structure of phytoplankton of the coastal and central parts of the lake Arakhley (Zabaikalsky Region) in the spring-summer season of 2017. *Principles of Ecology: scientific electronic journal*. 2018;(3):75-90. (In Russ.). EDN: YVZAZV. <https://doi.org/10.15393/j1.art.2018.7403>
7. Koryakina E.A., Nikitin V.M. Assessment of the trophic status of lake Arakhley. *Bulletin of the International Academy of Ecology and Life Safety Sciences*. 2008;14(3):107-110. (In Russ.). EDN: RTRDLR.
8. Butenko M.N. Dynamics of biogenic elements of the of Lake Arakhley in the period 1988-2015. *Prospects and problems of modern hydrobiology: Materials of 16th All-Russian Youth Hydrobiological Conference*. Yaroslavl; Filigree; 2016:33-34. (In Russ.). EDN: XBRPRL.
9. Neverova-Dziopak E.V., Tsvetkova L.I. *Assessment of the trophic state of surface waters*. St. Petersburg: Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering; 2020. 176 p. (In Russ.). EDN: KOLTDW.
10. Oksiuk O.P., Zhukinsky V.N., Braginsky L.P., Linnik P.N., Kuzmenko M.I., Klenus V.G. Integrated ecological classification of the quality of surface waters of the land. *Hydrobiological Journal. Sanitary Hydrobiology*. 1993;29(4):62-76. (In Russ.).
11. Petin A.N., Lebedeva M.G., Krymskaya O.V. *Analysis and assessment of surface water quality*. Textbook. Belgorod: Belgorod State University Publishing House; 2006. 252 p. (In Russ.). EDN: QKHSBH.
12. Tokareva I.V., Prokushkina M.P., Prokushkin A.S. Spatial and temporal variability of the content of biogenic elements in the runoff of rivers of the Yenisei basin. *Organic matter and biogenic elements in inland waters and marine waters*. Proceedings of the 6th All-Russian Symposium with international participation. Barnaul: Institute of Water and Environmental Problems of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences; 2017:243-246. (In Russ.). EDN: YOIHNF.

13. Ukolova T.K., Sviridenko V.D. Seasonal dynamics of biogenic elements in Lake Kuril in 2005. *Research on the Aquatic Biological Resources of Kamchatka and the Northwestern Pacific Ocean*. 2009;(15):5-20. (In Russ.). EDN: KYASCF.

14. Vollenweider R.A. Advances in defining critical loading levels for phosphorous in lake eutrophication. *Mem. Ist. Ital. Idrobiol.* 1979;33:53-83.

15. Chekryzheva T.A., Kalinkina N.M. Structure and seasonal dynamics of phytoplankton communities in the open and closed littoral of Onega Lake (Pinghuba, Pukhtinskaya Bay). *Proceedings of the Karelian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2016;(12):86-95. (In Russ.). EDN: XHGDKF. <https://doi.jrg/10.17076/eco363>

16. Decamps H., Pinay G., Naiman R.J., Petts, G.E., McClain M.E., Hillbricht-Ilkowska A., Hanley T.A., Holmes R.M., Quinn J., Gibert J. et al. Riparian zones: where biogeochemistry meets biodiversity in management practice. *Polish Journal of Ecology*. 2004;52(1):3-18.

17. Tsybekmitova G.Ts., Faleychik L.M., Mikheev I.E. Anthropogenic load on the drainage basin of the Ivano-Arakhley lakes (Eastern Transbaikalia). *Water: Chemistry and Ecology*. 2013;(2):3-11. (In Russ.). EDN: PWEUWV.

18. Bazhenova O.P., German L.V., Krents O.O., Shakhoval V.E., Vakhrusheva A.A. Ecological status and recreational value of lakes of various types in the Omsk region. *Omsk Scientific Bulletin*. 2012;(1):213-216. (In Russ.). EDN: PCSCVL.

19. Bayanov N.G., Yulova G.A. On the origin and current ecological status of some lakes of the Nizhny Novgorod Trans-Volga region. *Bulletin of the Nizhny Novgorod Lobachevsky University. Series: Biology*. 2002;1(2):91-102. (In Russ.). EDN: HPOMUV.

20. Bekman M.Yu., Gorlacheva V.P. *Biological productivity of Arakhley Lake (Transbaikalia)*. Novosibirsk: Science; 1981. 147 p. (In Russ.).

21. Alekin O.A., Semenov A.D., Skopintsev B.A. *Handbook of chemical analysis of land waters*. Leningrad: Hydrometeorological Publishing House; 1973. 269 p. (In Russ.).

22. Kitaev S.P. *Fundamentals of limnology for hydrobiologists and ichthyologists*. Petrozavodsk: Karelian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences; 2007. 395 p. (In Russ.). EDN: QKQMEV.

23. *GOST 33045-2014. Water. Methods for determining nitrogen-containing substances*. Moscow: Standartinform; 2016. 20 p. (In Russ.).

24. *RD 52.24.367-2010. Mass concentration of nitrates in waters. Method for performing measurements using a potentiometric method with an ion-selective electrode*. Rostov-on-Don: State Research Institute of Chemistry and Technology; 2010. 35 p.

25. *GOST 183-09-2014. Water. Methods for determining phosphorus-containing substances*. Moscow: Standards Publishing House; 2016. 21 p.

26. Jeffers J. *Introduction to system analysis: application in ecology*. Moscow: World; 1981. 256 p. (In Russ.).

27. Krivitsky S.V., Stanis E.V., Burchak T.N. Ecological rehabilitation of reservoirs using bioengineering methods. *Bulletin of the RUDN University. Ecology and Life Safety*. 2010;(5):77-82. (In Russ.). EDN: JWMIRL.

28. Sharapov N.M., Vasilyeva A.N. Analysis of hydrological and hydrochemical regimes of surface water bodies in the Trans-Baikal Territory. *Water resources and water use*. Proceedings of the 2nd International Scientific and Practical Conference. Chita: Zabaykalsky State University; 2018:64-86. (In Russ.). EDN: YADENN.

29. Belikova S.E. *Water treatment*. A reference book. Moscow: Aqua-Term; 2007. 240 p. (In Russ.).

Информация об авторе

М.Н. Бутенко – кандидат биологических наук, младший научный сотрудник ИПРЭК СО РАН.

Information about the author

M.N. Butenko – Candidate of Science (Biology), Junior Researcher, INREC SB RAS.

Статья поступила в редакцию 04.06.2025; одобрена после рецензирования 27.10.2025; принята к публикации 11.11.2025.
The article was submitted 04.06.2025; approved after reviewing 27.10.2025; accepted for publication 11.11.2025.

Научная статья
УДК 528.88:556.55
<https://doi.org/10.18522/1026-2237-2026-1-76-86>

ПРИМЕНЕНИЕ КОСМИЧЕСКИХ СНИМКОВ ВЫСОКОГО ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАЗРЕШЕНИЯ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ МАЛЫХ ВОДОХРАНИЛИЩ

Валерия Николаевна Габова

Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, Россия
gabova@sfsedu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5655-8095>

Аннотация. В целях определения эффективного способа оконтуривания водного зеркала на основе снимка «Канопус-В6» (2,1 м) от 12.08.2020 произведена оценка морфометрических параметров Соколовского водохранилища – основного источника водоснабжения шахтерского района Ростовской области. Площадь зеркала и протяженность уреза воды, видимого на космическом снимке, получены тремя способами: классификацией с обучением, расчетом нормализованного разностного водного (NDWI) и вегетационного (NDVI) индексов с извлечением полигонов водной поверхности. Наибольшую точность показала маска, полученная с помощью компьютерного дешифрирования (каппа Коэна 0,73). Ошибки идентификации индексными растрами прослеживаются в правой прибрежной части. Слабая достоверность индексов, вероятно, связана с влиянием отмершей органики или прозрачностью прибрежных вод. Полученная площадь водохранилища меньше проектной на 1,28 км², что может быть связано с маловодностью 2020 г. или зарастанием участка. Выполнен подсчет площадей под прибрежной и водной растительностью для каждого участка Соколовского водохранилища. С помощью анализа серии спутниковых снимков с сервиса Google Earth прослежена динамика зарастания мелководного участка водохранилища с 2013 по 2019 г., выявившая переход от сезонного явления к устойчивому закреплению тростниковых зарослей.

Ключевые слова: Соколовское водохранилище, космоснимки высокого пространственного разрешения, морфометрические параметры, компьютерное дешифрирование, нормализованный разностный вегетационный индекс, нормализованный разностный водный индекс, зарастание водохранилища

Для цитирования: Габова В.Н. Применение космических снимков высокого пространственного разрешения для изучения малых водохранилищ // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2026. № 1. С. 76–86. <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2026-1-76-86>

Благодарности: исследование выполнено в Институте наук о Земле Южного федерального университета при поддержке гранта Российского научного фонда № 24-17-00038, <https://rscf.ru/project/24-17-00038/>

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

Original article

THE USE OF HIGH SPATIAL RESOLUTION SATELLITE IMAGES FOR SMALL RESERVOIRS STUDYING

Valeria N. Gabova

Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia
gabova@sfsedu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5655-8095>

Abstract. To determine an effective method of contouring a water surface based on the “Canopus-B6” (2,1 m) image from August 12, 2020, the morphometric parameters of the Sokolovskoe reservoir, the main source of water supply in the miner district of the Rostov region, were evaluated. The water surface area and the visible water edge length were obtained in three ways: supervised classification, calculation of the normalized difference water (NDWI) and vegetation (NDVI) indices with the water surface polygons extraction. The mask obtained by computer decryption showed the highest accuracy (Cohen's kappa 0.73). Identification errors by index rasters can be

© Габова В.Н., 2026

traced in the right coastal area. The low reliability of the indices is probably due to the influence of dead organics or the transparency of coastal waters. The resulting reservoir area is less than the design area by 1.28 km², which may be due to the lack of water in 2020 or the site overgrowth with vegetation. The areas under coastal and aquatic vegetation have been calculated for each section of the Sokolovskoe reservoir. Using a series of satellite images from Google Earth, the overgrowth dynamics in the shallow part of the reservoir from 2013 to 2019 was traced. The assessment revealed a transition from seasonal bottom outcropping to the reed beds steady anchoring.

Keywords: Sokolovskoe reservoir, high spatial resolution satellite images, morphometric parameters, computer decryption, normalized difference vegetation index, normalized difference water index, reservoir overgrowth

For citation: Gabova V.N. The Use of High Spatial Resolution Satellite Images for Small Reservoirs Studying. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2026;(1):76-86. (In Russ.). <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2026-1-76-86>

Acknowledgments: the study was conducted at the Institute of Earth Sciences, Southern Federal University, with the support of the Russian Science Foundation grant No. 24-17-00038, <https://rscf.ru/project/24-17-00038/>

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

Введение

Мониторинг динамики площади водного зеркала позволяет оценивать эффективность управления водными ресурсами, а также осуществлять прогноз экологического состояния водохранилищ. Совокупность антропогенных и климатических факторов, как известно, способна оказывать влияние на гидрологический режим водных объектов, что может выражаться в изменении поверхностного стока. Оценки возможных сокращений уровня воды, полезного объема и, соответственно, площади зеркала водохранилищ европейской территории России в условиях изменения климата отражены в работах [1, 2]. Поэтому определение масштабов изменений морфометрических параметров искусственных водоемов является важной задачей как с научной, так и с практической точки зрения.

Учитывая доступность архивов спутниковой съемки среднего пространственного разрешения, дистанционные методы позволяют получить информацию о морфометрических характеристиках водных объектов в широком временном охвате и в более краткие сроки, чем при проведении натурных измерений. Однако исследование водоемов с относительно небольшой площадью на основе космических изображений среднего пространственного разрешения (10–30 м) вызывает затруднения, так как границы этих объектов на таких снимках едва различимы. В данном случае более целесообразно использовать изображения высокого пространственного разрешения (от 1,0 до 2,5 м), минимизируя тем самым погрешности при картографировании.

Объектом исследования выступило Соколовское водохранилище, расположенное на р. Кундрючьей в западной части Ростовской области. Водоохранилище построено в 1952 г. для обеспечения хозяйственно-питьевого и промышленного водоснабжения городов Новшахтинск, Красный Сулин и прилегающих поселков [3]. Отмечается, что фактический расход воды значительно превышает проектный (34 тыс. м³ в сутки), достигая 55 тыс. м³ в сутки [4]. Поэтому комплексный мониторинг состояния Соколовского водохранилища является важным аспектом для поддержания и сохранения основных его функций. Предшествующее исследование [5] определило ключевые морфометрические параметры водосборного бассейна Соколовского водохранилища, такие как площадь водосбора (449,7 км²), густота эрозионной сети (1,1–16,7 км/км²), средняя высота (230,1 м) и уклон территории (2,5°). Данная работа стала продолжением определения морфометрических и гидрологических особенностей рассматриваемой акватории.

Цель исследования состоит в расчете морфометрических параметров Соколовского водохранилища на основе многозонального космического снимка высокого пространственного разрешения с применением трех различных способов: при помощи классификации с обучением и использованием спектральных индексов NDWI, NDVI, а также в выборе и обосновании наиболее подходящего способа оконтуривания водного зеркала из представленных. Результаты исследования необходимы для понимания эффективности дальнейшего применения этих методик в оценке динамики морфометрических параметров данного искусственного водоема.

Для достижения целей исследования были поставлены следующие задачи:

- классификация космического снимка с обучением и расчет спектральных индексов NDWI, NDVI для извлечения маски поверхности воды;
- оценка точности классификации;
- расчет площади зеркала и протяженности уреза Соколовского водохранилища на основе растров, полученных перечисленными выше способами;
- сравнение результатов и выбор наиболее достоверного из них;
- расчет площади зарослей водной и прибрежной растительности (тростник, осока и др.) в мелко-водных участках Соколовского водохранилища с применением компьютерного дешифрирования;
- визуальная оценка динамики зарастания верхнего участка водохранилища на основе серии разновременных снимков и выявление факторов, обуславливающих тенденции зарастания.

Материалы и методы исследования

Река Кундрючья протекает по восточному склону Донецкого кряжа и справа впадает в р. Северский Донец – главный приток р. Дон. Объект исследования расположен в западной подобласти атлантико-континентальной европейской (степной) области умеренного климатического пояса [6]. Для района характерно недостаточное увлажнение с жарким, сухим летом и относительно теплой зимой [3]. С 1980 г. отмечается увеличение значений температуры воздуха и ее климатической нормы, что сопровождается возрастанием длительности засушливых периодов на территории в летние месяцы [7, 8]. По морфологическому строению Соколовское водохранилище является долинным русловым. Водный объект вытянут с севера на юг и юго-восток. Нормальный подпорный уровень (НПУ) водохранилища равен 139,25 м, проектная площадь зеркала искусственного водоема при НПУ составляет 4,26 км² [4]. По данным [3], площадь зеркала Соколовского водохранилища – 3,9 км², протяженность – 8,5 км, объем при данном НПУ – 19,8 млн м³. Критерием для отнесения водохранилища к категории малых послужила площадь его акватории (менее 10 км²), принятая в работе [9]. Максимальная глубина водоема в районе плотины составляет 17,1 м, средняя глубина – 5 м. В верхней части водохранилища и в устье р. Галуты – правого притока Соколовского водохранилища – отмечается наименьшая глубина – 2 м. В устье р. Галуты образован залив длиной 1400 м и шириной до 300 м [3].

Для расчета площади зеркала и протяженности уреза Соколовского водохранилища использовано рап-sharp-изображение со спутника «Канопус-В6» с пространственным разрешением 2,1 м, дата съемки 12.08.2020. Снимок имеет уровень обработки L2, т.е. выполнена радиометрическая и геометрическая коррекция изображения, а также произведена трансформация в картографическую проекцию (универсальная поперечная проекция Меркатора UTM, система координат WGS 84) [10]. В дальнейшем данные спутниковой съемки трансформированы в локальную систему координат Pulkovo 1942, проекция Гаусса – Крюгера, зона 7. Некоторые технические характеристики съемочной аппаратуры «Канопус-В6» представлены в табл. 1.

Таблица 1 / Table 1

**Технические характеристики бортовой аппаратуры спутника «Канопус-В6» [13]
 / Technical characteristics of the “Canopus-B6” satellite on-board equipment [13]**

Параметр	Панспектральная съемка	Мультиспектральная съемка
Спектральные диапазоны, мкм	Панхроматический (0,45–0,85)	Синий (0,46–0,52) Зеленый (0,52–0,60) Красный (0,63–0,69) Ближний ИК (0,75–0,86)
Разрешение на местности, м	2,1	10,5
Ширина полосы захвата, км	23	40

Исходя из метаданных, снимок «Канопус-В6» был получен в 08:15 мск. По данным [11], в это время отмечался юго-западный ветер со скоростью 2 м/с, небо ясное, температура воздуха составляла +25,1 °С. Таким образом, погодные условия на момент съемки являются удовлетвори-

тельными для выполнения задач исследования, так как отсутствуют облачное перекрытие исследуемой акватории и выраженная рябь на водной поверхности в силу слабого ветра. Следует также отметить, что в районе Соколовского водохранилища, по данным метеостанции г. Шахты, в 2020 г. наблюдался засушливый период с июля по сентябрь [7, 8]. В целом 2020 г. отмечался как маловодный год редкой повторяемости. По дефициту водных ресурсов бассейн р. Дон находился на втором месте среди крупных бассейнов Южного федерального округа. Так, для Цимлянского водохранилища дефицит водных ресурсов по отношению к полезному объему (млн м³) составил почти 83 %. Для Краснодарского водохранилища на р. Кубани дефицит составил 100 % [12]. Дефицит водного стока в сложившихся природно-климатических условиях лета 2020 г. не мог не отразиться на площади Соколовского водохранилища, что и послужило основным фактором при выборе космического изображения от 12.08.2020.

Контролируемая классификация с обучением используется в том случае, когда исследуемая местность хорошо известна оператору. В основе процесса лежит сравнение спектральных характеристик пикселей (ячеек) с эталонными значениями, выделенными оператором, в каждом канале космического снимка, после чего происходит отнесение пикселя к определенному классу со схожими спектральными характеристиками. В качестве эталонов отмечены водная поверхность (с отдельным выделением прибрежной зоны), прибрежная растительность, древесная растительность, травянистая растительность, застройка (здания и дороги) и пашня. Для дальнейшей работы из результирующего растра извлечена маска воды и маска прибрежной и водной растительности, так как они являются ключевыми для данного исследования.

NDWI (Normalized Difference Water Index) – это нормализованный разностный водный индекс, позволяющий увеличить контраст водных объектов на основе разности яркости в видимом зеленом и ближнем инфракрасном спектрах. Индекс изменяется от –1 до 1, где ячейки водной поверхности на снимке принимают положительные значения [14]. NDWI рассчитывается по формуле $NDWI = (GREEN - NIR) / (GREEN + NIR)$, где NIR – ближний инфракрасный канал; GREEN – видимый зеленый канал.

Нормализованный разностный вегетационный индекс NDVI (normalized difference vegetation index) основан на соотношении ближнего инфракрасного и видимого красного канала [15]. Индекс широко используется для оценки состояния фитомассы, однако также может быть применен при изучении водных объектов, так как позволяет четко отделить водную гладь от других типов поверхности. Ячейки воды принимают отрицательные значения (около –0,25). NDVI рассчитывается по формуле $NDVI = (NIR - RED) / (NIR + RED)$, где NIR – ближний инфракрасный канал; RED – видимый красный канал.

В результате обработки спутникового изображения получены три растра, из которых в последующем для расчета морфометрических характеристик извлечены области, покрывающие исследуемую акваторию. Выполнено сравнение эффективности применяемых операций и выявлен наиболее подходящий для данного водного объекта способ получения информации о площади зеркала и протяженности уреза воды Соколовского водохранилища.

Оценка точности полученных слоев произведена при помощи матрицы ошибок, инструмент Confusion Matrix [16]. Этот способ оценки точности позволяет определить долю верно классифицированных точек и вычислить взвешенную каппу Коэна, представляющую собой меру согласия между наблюдаемыми параметрами. В данном случае объекты полученных растров сравниваются с исходным космоснимком. Для каждой из масок водной поверхности построена точечная сетка с шагом 50×50 м (всего 1185 точек), где атрибуты, отнесенные к водной поверхности, имеют значение 1, прочие атрибуты – 0. Аналогичным образом произведена оценка точности маски прибрежной и водной растительности (всего 294 точки).

Результаты и обсуждение

Все три примененных способа извлечения пространственной информации о водной поверхности показали различную точность оконтуривания водного зеркала. Наибольшую точность демонстрирует растр, полученный с помощью классификации с обучением. Каппа Коэна составляет 0,73, что говорит об устойчивой согласованности измерений (табл. 2).

Таблица 2/ Table 2

Матрица ошибок классифицированного изображения «Канопус-В6» для водной поверхности / Confusion matrix of the classified “Canopus-B6” image for the water surface

№	ClassValue	C_0	C_1	Total	U_Accuracy	Катта
1	C_0	19	12	31	0,61	0
2	C_1	2	1152	1154	0,998	0
3	Total	21	1164	1185	0	0
4	P_Accuracy	0,90	0,99	0	0,99	0
5	Катта	0	0	0	0	0,73

Примечание. C_0 – прочие классы; C_1 – класс водной поверхности; Total – общее количество точек; U_Accuracy – пользовательская точность; P_Accuracy – производственная точность; Катта – взвешенная капта Коэна.

Наименее достоверные результаты получены на основе расчета индексов NDWI и NDVI. Точность классификации составила 0,45 и 0,32 соответственно, что свидетельствует в первом случае об умеренной и во втором случае о малой согласованности между космическим снимком и классифицированным изображением.

Площадь под прибрежной и водной растительностью, полученная с помощью компьютерного дешифрирования, составила 0,77 км², взвешенная капта Коэна равна 0,76 (табл. 3).

Морфометрические характеристики Соколовского водохранилища, рассчитанные по результатам обработки снимка «Канопус-В6», представлены в табл. 4.

Таблица 3/ Table 3

Матрица ошибок классифицированного изображения «Канопус-В6» для прибрежной и водной растительности / Confusion matrix of the classified “Canopus-B6” image for the coastal and water vegetation

№	ClassValue	C_0	C_1	Total	U_Accuracy	Катта
1	C_0	122	13	135	0,90	0
2	C_1	22	137	159	0,86	0
3	Total	144	150	294	0	0
4	P_Accuracy	0,85	0,91	0	0,88	0
5	Катта	0	0	0	0	0,76

Прмечание. Обозначения те же, что и в табл. 2.

Таблица 4/ Table 4

Морфометрические характеристики Соколовского водохранилища / Morphometric characteristics of the Sokolovskoe reservoir

Способ определения	Площадь зеркала, км ²	Протяженность уреза воды, км	Катта	Площадь под прибрежной и водной растительностью, км ²	Итого площадь зеркала и прибрежной и водной растительности, км ²	Катта
NDVI	2,72	26,6	0,32	–	–	–
NDWI	2,85	26,0	0,45	–	–	–
Классификация с обучением	2,98	30,9	0,72	0,77	3,75	0,76

Невысокая точность растров, полученных на основе спектральных индексов NDWI и NDVI, обусловлена тем, что прибрежная зона местами вдоль левого и правого берега водохранилища идентифицировалась скорее как открытая почва (NDVI ≈ 0,02–0,3, NDWI < 0), вследствие чего

линия уреза смещена по отношению к ее видимому положению на момент съемки. Максимальное расстояние от уреза составило 43 м для растра на основе NDWI и 40 м для NDVI. На рис. 1 представлен усредненный спектральный профиль участков прибрежной зоны со значениями индексов, нетипичными для водной поверхности. Профиль демонстрирует постепенное увеличение яркости от синего к ближнему инфракрасному спектру. Кривая нетипична и для цветения воды, так как отсутствует провал в красной зоне спектра. Отметим, что цветение 12.08.2020 было визуально выражено слабо и отмечалось лишь в небольшой части верховья водохранилища, свободной от прибрежной и водной растительности.

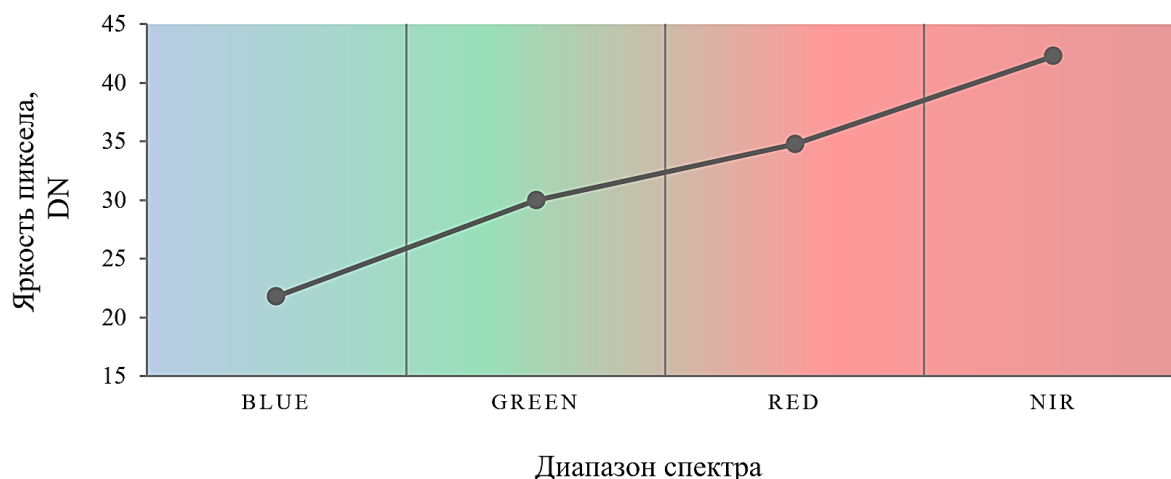


Рис. 1. Спектральный профиль прибрежных участков с нетипичными значениями NDVI и NDWI для водной поверхности / Fig. 1. Spectral profile of coastal areas with atypical NDVI and NDWI values for the water surface

Такая ситуация, по нашим предположениям, может быть связана с наличием частиц отмершей органики, образующих пленку агатовидной структуры на поверхности прибрежной зоны водохранилища, подобно той, что была описана в работе [17]. Одной из возможных причин ложного детектирования также может являться очень малая глубина и прозрачность прибрежных вод, поэтому на снимке, вероятно, прослеживается часть подводного берегового склона с песчаным дном.

Из рассматриваемых способов обработки снимка Соколовского водохранилища для расчета морфометрических характеристик наиболее эффективным стала классификация с обучением на основе спектральных характеристик пиксела. Полученная площадь зеркала водохранилища меньше проектной площади при НПУ на 1,28 км². Такая разница может быть связана не только с сокращением водности и, как следствие, изменением уровня воды в Соколовском водохранилище и площади под влиянием длительных засушливых периодов в районе исследования [7, 8], но и с увеличением покрытия отдельных участков прибрежной и водной растительностью. В работе [18] отмечается сильное зарастание тростником левого берега верхнего участка в пределах подпертого коренного русла р. Кундрючьей, в то время как верхний участок в пределах затопленной долины р. Кундрючьей свободен от тростниковой растительности. На космическом снимке 12.08.2020 (рис. 2а) и на фотографии, сделанной нами во время проведения рекогносцировки окрестностей Соколовского водохранилища 02.09.2022 (рис. 2б), видна зарастающая часть участка в пределах затопленной долины р. Кундрючьей.

Динамика многолетних снимков 2013–2019 гг. четко демонстрирует процесс трансформации рассматриваемого участка водохранилища (рис. 3). В мае 2013 г. участок был полностью затоплен (рис. 3а), а к августу 2014 года фиксируется понижение уровня воды с частичным обнажением дна в сопровождении интенсивного цветения воды (рис. 3б). Аналогичная ситуация наблюдается на снимке, полученном в июле 2016 г. (рис. 3в).

Регулярное сезонное обмеление и развитие фитопланктона предшествовали последующему закреплению тростниковой растительности на данном участке акватории. Так, в мае 2017 г., несмотря на восстановление уровня воды, на космическом снимке визуализируются первоначальные, разреженные заросли (рис. 3г).



Рис. 2. Верхний участок в пределах затопленной долины р. Кундрючьей: а – на космическом снимке со спутника «Канопус-В6» 12.08.2020; б – фотография участка, сделанная нами 02.09.2022 / Fig. 2. The upper section within the Kundryuchya river flooded valley: a - is shown in a satellite image from the “Canopus-B6” satellite on August 12, 2020; b - is a photograph of the site taken by the author on September 2, 2022

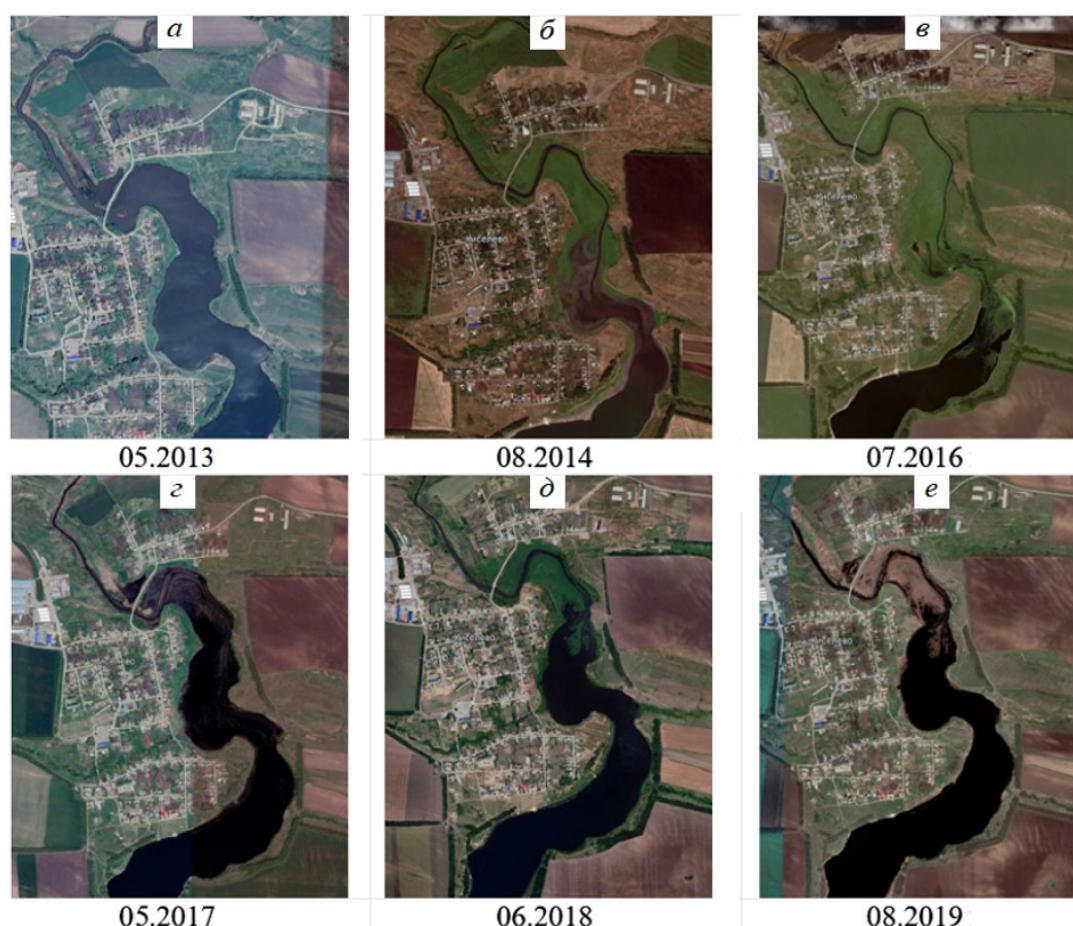


Рис. 3. Процесс трансформации участка Соколовского водохранилища в пределах затопленной долины р. Кундрючьей по данным космосъемки с сервиса Google Earth / Fig. 3. The transformation of the Sokolovskoe reservoir site within the flooded Kundryuchya river valley according to satellite imagery from Google Earth

Июнь 2018 и август 2019 гг. демонстрирует уже развитые и стабильные тростниковые заросли (рис. 3д, е). Развитие тростника после повышения уровня воды может свидетельствовать о необратимом процессе зарастания этой части акватории.

Так как заросли прибрежной и водной растительности, покрывающие мелководные части Соколовского водохранилища, являются препятствием для обнаружения водного зеркала, эти области были также извлечены из классифицированного изображения для подсчета их суммарной площади. Общая площадь прибрежных зарослей на рассматриваемом космоснимке составила 0,77 км². Следовательно, площадь водохранилища, включая водную поверхность и заросли прибрежной и водной растительности, – 3,74 км². Для каждого участка существующей схемы акваториального районирования [18] установлены площади тростниковых зарослей, показавшие существенную вариабельность значений. Как и предполагалось, наибольшая степень зарастания характерна для верхнего участка в пределах затопленной долины р. Кундрючьей. Площадь под прибрежной и водной растительностью составила 0,203 км². Аккумуляция наносов, обширная зона мелководья и плоское дно, обнажаемое в периоды понижения уровня воды [18], создают условия для активного зарастания этой части акватории Соколовского водохранилища. Значительное зарастание отмечается на среднем участке, расположенном выше устья р. Галуты (0,133 км²), и на левом берегу приплотинного участка (0,128 км²), что приурочено к пологому подводному склону и наличию небольших заливов, пересыхающих при низких уровнях воды. Умеренное зарастание зафиксировано на отдельных частях среднего участка ниже р. Галуты (0,102 км²) и нижнего участка в районе перехода газопровода через водохранилище (0,090 км²). Сравнительно минимальная степень зарастания отмечается на верхнем участке в пределах подпертого русла р. Кундрючьей (0,057 км²), а также в заливе р. Галуты (0,055 км²). Эти два участка отличаются наименее благоприятными для зарастания условиями: в первом случае – узкое глубокое русло р. Кундрючьей, во втором – ограниченная площадь и преобладание крутых берегов [18].

Полученная путем компьютерного дешифрирования маска зеркала Соколовского водохранилища, включая участки, покрытые прибрежной растительностью, представлена на рис. 4.

Оценка площадей зарослей на основе схемы акваториального районирования имеет практическую ценность не только для выявления ключевых факторов зарастания, но и для определения вклада прибрежной и водной растительности искусственных водоемов в образование потоков парниковых газов [19].

Заключение

По результатам обработки снимка высокого пространственного разрешения со спутника «Канопус-В6» автором получены данные о площади зеркала и протяженности уреза Соколовского водохранилища. Из рассматриваемых в работе способов расчета морфометрических характеристик исследуемого объекта наиболее эффективным показал себя расчет на основе компьютерной классификации с обучением. Его точность заметно превзошла точность расчетов на основе растров со значениями спектральных индексов NDWI и NDVI. Такая ситуация может быть связана с искажающим влиянием малых глубин и отмершей органики в прибрежной зоне водохранилища. Также одной из причин может являться прозрачность прибрежных вод. Площадь зеркала Соколовского водохранилища составила 2,98 км², протяженность береговой линии – 30,9 км². Различие фактической площади на 12.08.2020 с проектным значением может быть связано с уровнем воды ниже НПУ ввиду сокращения стока в засушливый и маловодный 2020 г. Помеху для идентификации водной поверхности также создало зарастание водохранилища прибрежной и водной растительностью. Учитывая заросшие поверхности, площадь Соколовского водохранилища на 2020 г. составила 3,74 км². Представленные в работе данные демонстрируют четкую связь между морфологией участков водохранилища и площадью зарастания. Сезонные колебания уровня воды, влекущие за собой частичное обнажение дна на мелководном участке, стали предпосылкой к формированию устойчивых зарослей верхнего участка водохранилища на затопленной долине р. Кундрючьей с 2013 по 2019 г. В наибольшей степени зарастанию подвержен верхний участок Соколовского водохранилища в пределах затопленной долины р. Кундрючьей.

Результаты геоинформационного анализа показали, что использованные в работе данные дистанционного зондирования Земли применимы для оценки морфометрических параметров малых равнинных водохранилищ и дальнейшего исследования их динамики, что подтверждается достаточной точностью результирующего растра, полученного путем компьютерного дешифрирования космоснимка с высоким пространственным разрешением. Методы изучения малых водохранилищ, предложенные в работе, также используются при изучении формирования, функционирования и эволюции озер юга европейской части России.

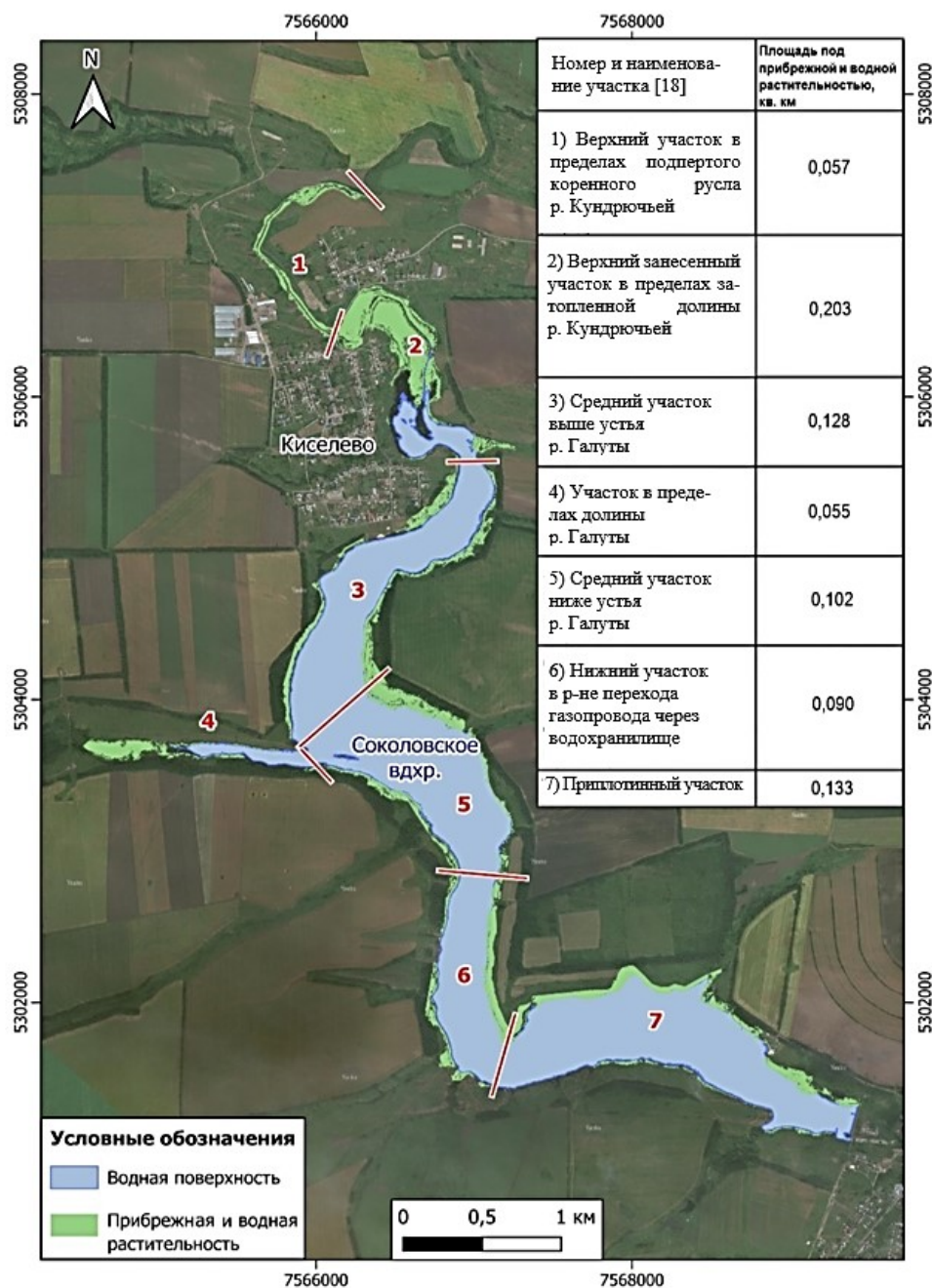


Рис. 4. Результат классификации водного зеркала Соколовского водохранилища, включая заросли прибрежной и водной растительности / Fig. 4. The classification result of the Sokolovskoe reservoir water surface, including coastal and aquatic vegetation thickets

Список источников

1. Гречушникова М.Г., Пуклакова Н.Г., Эдельштейн К.К. Возможное изменение гидрологического режима Цимлянского водохранилища при потеплении климата // Вестн. Московского ун-та. Серия 5: География. 2014. № 4. С. 17–25. EDN: TAVMXJ.
2. Гречушникова М.Г., Эдельштейн К.К. Возможные изменения гидрологического режима Рыбинского водохранилища при потеплении климата // Вестн. Московского ун-та. Серия 5: География. 2012. № 6. С. 61–67. EDN: PUZPKJ.
3. Лурье П.М., Панов В.Д. Река Дон: гидрография и режим стока. Ростов н/Д.: Донской изд. дом, 2018. 591 с.
4. Бреус А.В., Беспалов М.С., Усков И.В. Актуализированная схема водоснабжения и водоотведения города Новошахтинска Ростовской области. Новочеркасск, 2016. 239 с.

5. Габова В.Н., Кузнецов А.Н., Федоров Ю.А. Морфометрический анализ водосборного бассейна Соколовского водохранилища с применением ГИС-технологий // Вестн. Воронежского гос. ун-та. Серия: География. Геоэкология. 2024. № 4. С. 93–104. EDN: OYKOJJ. <https://doi.org/10.17308/geo/1609-0683/2024/4/93-104>
6. Алисов Б.А. Климат СССР. М.: МГУ, 1956. 127 с.
7. Габова В.Н., Федоров Ю.А., Бэллинджер О.Ю., Доценко И.В., Михайленко А.В. Динамика засушливых периодов на примере бассейнов Соколовского водохранилища и Таганрогского залива // Инженерный вестн. Дона. 2021. № 10. С. 226–239. EDN: JBXATJ.
8. Габова В.Н., Федоров Ю.А., Савицкий В.А., Доценко И.В. Динамика среднемесячных температур воздуха и атмосферных осадков в летний период в некоторых районах Ростовской области и Краснодарского края // Успехи соврем. естествознания. 2022. № 8. С. 25–38. EDN: DCNQOI. <https://doi.org/10.17513/use.37865>
9. Эдельштейн К.К. Морфология, водный режим и гидрологическая структура долинных водохранилищ: дис. ... д-ра геогр. наук. М., 1983. 403 с. EDN: VHVOGZ.
10. Руководство пользователя геопортала Роскосмоса. URL: <https://s3.gptl.ru/geoportal-public/user-guide/v0.1/index.html> (дата обращения: 09.06.2023).
11. Погода и климат: справ.-информ. портал. URL: <http://www.pogodaiklimat.ru/> (дата обращения: 09.06.2023).
12. Кузьмичёв А.А., Рыжаков А.Н., Мартынов Д.В. Анализ дефицита водных ресурсов и использования мелиорированных земель в Южном федеральном округе // Мелиорация и гидротехника. 2021. Т. 11, № 3. С. 19–35. EDN: MAZMYF. <https://doi.org/10.31774/2712-9357-2021-11-3-19-35>
13. Геопространственное агентство ИННОТЕР. URL: <https://innoter.com/sputniki/kanopus-v/> (дата обращения: 09.06.2023).
14. McFeeters S.K. The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features // Int. J. of Remote Sensing. 1996. Vol. 17, iss. 7. P. 1425–1432. <https://doi.org/10.1080/01431169608948714>
15. Tucker C.J., Sellers P.J. Satellite remote sensing of primary productivity // Int. J. of Remote Sensing. 1986. Vol. 11. P. 1395–1416.
16. Kulkarni A., Chong D., Batarseh F.A. Foundations of data imbalance and solutions for a data democracy // Data Democracy. Academic Press, 2020. P. 83–106. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818366-3.00005-8>
17. Федоров Ю.А., Гарькуша Д.Н., Трубник Р.Г., Талпа Б.В. Гидрохимия группы соленых озер Ставропольского края // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2018. № 4. С. 100–106. EDN: YSAVTF.
18. Дандара Н.Т., Немыкина Д.Е. Соколовское водохранилище на реке Кундрючья и его акваториальное районирование // Вестн. соврем. исследований. 2019. Т. 17, № 3. С. 32–38. EDN: JRGYUE.
19. Федоров Ю.А., Гарькуша Д.Н., Косолапов А.Е., Усова Е.В., Антилова Е.А., Верещагин М.А., Беляев А.И. Искусственные водоемы как очаги метаногенеза (на примере Цимлянского водохранилища) // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2024. № 3. С. 68–82. EDN: CXWKWU. <https://doi.org/10.35567/19994508-2024-3-68-72>

References

1. Grechushnikova M.G., Puklakova N.G., Edelshtein K.K. Possible transformation of the hydrological regime of the Tsimlyansk reservoir under climate warming. *Lomonosov Geography Journal. Series: Geography*. 2014;(4):17-25. (In Russ.). EDN: TAVMXJ.
2. Grechushnikova M.G., Edelshtein K.K. Possible transformation of the hydrological regime of the Rybinsk reservoir under climate warming. *Lomonosov Geography Journal. Series: Geography*. 2012;(6):61-67. (In Russ.). EDN: PUZPKJ.
3. Lurie P.M., Panov V.D. *Don River: hydrography and flow regime*. Rostov-on-Don: Don Publishing House; 2018. 591 p. (In Russ.).
4. Breus A.V., Bepalov M.S., Uskov I.V. *Updated water supply system in Novoshakhtinsk, Rostov Region*. Novocheerkassk, 2016. 239 p. (In Russ.).
5. Gabova V.N., Kuznetsov A.N., Fedorov Yu.A. Morphometric analysis of the Sokolovsky reservoir catchment area using GIS-technologies. *Proceedings of Voronezh State University. Series: Geography. Geoecology*. 2024;(4):93-104. (In Russ.). EDN: OYKOJJ. <https://doi.org/10.17308/geo/1609-0683/2024/4/93-104>
6. Alisov B.A. *Climate of the USSR*. Moscow: Moscow State University; 1956. 127 p. (In Russ.).
7. Gabova V.N., Fedorov Yu.A., Ballinger O.Yu., Dotsenko I.V., Mikhailenko A.V. Dynamics of dry periods on the example of the basins of the Sokolovsky reservoir and the Taganrog Bay. *Engineering Journal of Don*. 2021;(10):226-239. (In Russ.). EDN: JBXATJ.

8. Gabova V.N., Fedorov Yu.A., Savitsky V.A., Dotsenko I.V. Dynamics of average monthly air temperatures and precipitation in summer in some areas of the Rostov and Krasnodar regions. *Advances in Current Natural Sciences*. 2022;(8):25-38. (In Russ.). EDN: DCNQQI. <https://doi.org/10.17513/use.37865>
9. Edelstein K.K. *Morphology, water regime and hydrological structure of valley reservoirs*. PhD thesis. Moscow, 1983. 403 p. (In Russ.). EDN: VHVOGZ.
10. *User guide for the Roscosmos geoportal*. URL: <https://s3.gptl.ru/geoportal-public/user-guide/v0.1/index.html> [Accessed 9th June 2023]. (In Russ.).
11. *Weather and climate*: reference and information portal. URL: <http://www.pogodaiklimat.ru/> [Accessed 9th June 2023]. (In Russ.).
12. Kuzmichev A.A., Ryzhakov A.N., Martynov D.V. Analysis of water scarcity and the use of reclaimed land in the Southern federal district. *Land Reclamation and Hydraulic Engineering*. 2021;11(3):19-35. (In Russ.). EDN: MAZMYF. <https://doi.org/10.31774/2712-9357-2021-11-3-19-35>
13. *INNOTER Geospatial Agency*. URL: <https://innoter.com/sputniki/kanopus-v/> [Accessed 9th June 2023]. (In Russ.).
14. McFeeters S.K. The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. *International Journal of Remote Sensing*. 1996;17(7):1425-1432. <https://doi.org/10.1080/01431169608948714>
15. Tucker C.J., Sellers P.J. Satellite remote sensing of primary productivity. *International Journal of Remote Sensing*. 1986;11:1395-1416.
16. Kulkarni A., Chong D., Batarseh F.A. Foundations of data imbalance and solutions for a data democracy. *Data Democracy*. Academic Press; 2020:83-106. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818366-3.00005-8>
17. Fedorov Yu.A., Garkusha D.N., Trubnik R.G., Talpa B.V. The hydrochemistry a few salt lakes of the Stavropol region. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science*. 2018;(4):100-106. (In Russ.). EDN: YSAVTF.
18. Dandara N.T., Nemykina D.E. Sokolovskoye Reservoir on the Kundryuchya River and its aquatic zoning. *Bulletin of Modern Research*. 2019;17(3):32-38. (In Russ.). EDN: JRGYUE.
19. Fedorov Yu.A., Garkusha D.N., Kosolapov A.E., Usova E.V., Anpilova E.A., Vereshchagin M.A., Belyaev A.I. Artificial water bodies as methane genesis hotbeds (the Tsimlyansk reservoir as an example). *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2024;(3):68-82. (In Russ.). EDN: CXWKWU. <https://doi.org/10.35567/19994508-2024-3-68-72>

Информация об авторе

В.Н. Габова – преподаватель кафедры физической географии, экологии и охраны природы Института наук о Земле ЮФУ.

Information about the author

V.N. Gabova – Lecturer of the Department of Physical Geography, Ecology and Nature Conservation, Institute of Earth Sciences, SFedU.

Статья поступила в редакцию 27.05.2025; одобрена после рецензирования 02.09.2025; принята к публикации 11.11.2025.
The article was submitted 27.05.2025; approved after reviewing 02.09.2025; accepted for publication 11.11.2025.

Научная статья

УДК 528.88

<https://doi.org/10.18522/1026-2237-2026-1-87-93>

КАРТОГРАФИРОВАНИЕ ПОСТПИРОГЕННОГО ВОССТАНОВЛЕНИЯ ЛЕНТОЧНОГО БОРА НА ПЕСКАХ

**Валерия Витальевна Дорошенко¹, Анастасия Александровна Хованская^{2✉},
Иван Александрович Болгов³**

¹ Волгоградский государственный университет, Волгоград, Россия

^{2, 3} Федеральный научный центр агроэкологии, комплексных мелиораций и защитного лесоразведения
Российской академии наук, Волгоград, Россия

¹ doroshenko@volsu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3253-1132>

² hovanskaya-a@vfanc.ru✉, <https://orcid.org/0009-0006-8957-241X>

³ bolgov-ia@vfanc.ru, <https://orcid.org/0009-0003-3174-6382>

Аннотация. Представлены результаты картографирования динамики возобновления участка Барна-ульской ленты (ленточного бора) на территории Алтайского края после пожара в 1997 г. На основе спутниковых данных Landsat за 1996–1997 гг. определены контуры гари, по спутниковым данным Sentinel за 2016 и 2024 гг. – пространственные характеристики открытых и заросших песков, насаждений. Естественное возобновление сосновых насаждений проходит медленно в связи с ограничивающими факторами (отсутствие затенения и прямые солнечные лучи, пирогенное повреждение гумусового слоя, конкуренция с осинкой). Результаты дешифрирования показали увеличение площади открытых песков при уменьшении площади насаждений и значительном сокращении площади заросших песков. Своевременный дистанционный мониторинг участков, подвергавшихся горению, позволяет определять приоритетные для искусственного лесовосстановления участки, контролировать породный состав древесных насаждений и исключать остепнение пройденных пожаром территорий.

Ключевые слова: Алтайский край, геоинформационный анализ, картографирование, опустынивание, ленточный бор, лесной пожар, ГИС-технологии, дистанционное зондирование

Для цитирования: Дорошенко В.В., Хованская А.А., Болгов И.А. Картографирование постпирогенного восстановления ленточного бора на песках // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2026. № 1. С. 87–93. <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2026-1-87-93>

Благодарности: работа выполнена в рамках государственного задания ФНЦ агроэкологии РАН НИР FNFE-2024-0009 «Опустынивание территорий аридных, субаридных и сухих субгумидных регионов, картографирование современного состояния и динамики опустынивания земель, моделирование и прогнозирование процессов опустынивания для планирования восстановления деградированных земель с применением геоинформационных технологий и аэрокосмических методов в условиях усиливающихся засух, песчаных и пыльных бурь».

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

Original article

MAPPING OF POST-PYROGENIC RESTORATION OF RIBBON BOR ON SANDS

Valeria V. Doroshenko¹, Anastasia A. Khovanskaya^{2✉}, Ivan A. Bolgov³

¹ Volgograd State University, Volgograd, Russia

^{2, 3} Federal Scientific Center for Agroecology, Integrated Land Reclamation and Protective Afforestation of the Russian Academy of Sciences, Volgograd, Russia

¹ doroshenko@volsu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3253-1132>

² hovanskaya-a@vfanc.ru✉, <https://orcid.org/0009-0006-8957-241X>

³ bolgov-ia@vfanc.ru, <https://orcid.org/0009-0003-3174-6382>

© Дорошенко В.В., Хованская А.А., Болгов И.А., 2026

Abstract. The article presents the results of mapping the dynamics of the renewal of the Barnaul Ribbon (ribbon forest) section in the Altai Territory after the fire in 1997. Based on Landsat satellite data for 1996-1997, the contours of the burning were determined, and based on Sentinel satellite data for 2016 and 2024, the spatial characteristics of open and overgrown sands and plantings were determined. The natural renewal of pine plantations is slow due to limiting factors (lack of shading and direct sunlight, pyrogenic damage to the humus layer, competition with aspen), the results of decoding showed an increase in the area of open sands with a reduction in the area of plantations and a significant reduction in the area of open sands. Timely remote monitoring of areas that have been burned allows us to identify priority areas for artificial reforestation, monitor the species composition of tree stands and eliminate the settling of areas covered by fire.

Keywords: Altai Territory, geoinformation analysis, mapping, desertification, ribbon bor, forest fire, GIS technologies, remote sensing

For citation: Doroshenko V.V., Khovanskaya A.A., Bolgov I.A. Mapping of Post-Pyrogenic Restoration of Ribbon Bor on Sands. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2026;(1):87-93. (In Russ.). <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2026-1-87-93>

Acknowledgments: the work was performed within the framework of the state assignment of the Federal Research Center for Agroecology of the Russian Academy of Sciences FNFE-2024-0009 “Desertification of territories of arid, subarid and dry subhumid regions, mapping the current state and dynamics of land desertification, modeling and forecasting desertification processes, for planning the restoration of degraded lands using geoinformation technologies and aerospace methods in conditions of increasing droughts, sandy and dust storms.”

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

На территории Алтайского края располагаются примечательные участки интразональных экосистем – реликтовые ленточные боры (полосы светлехвойных лесов) в песчаных лощинах, образовавшихся в результате древнего движения и таяния ледников [1, 2]. Ленточные боры Западной Сибири имеют высокую ценность не только как источник древесины, но и как перспективное место для развития туристско-рекреационного комплекса [3]. Ранее здесь велись массовые вырубki в связи с малолесностью окружающих степных территорий, но в настоящее время для них установлена категория защитности «особо охраняемые лесные массивы» [1, 4].

Существенным фактором сокращения покрытой лесом площади в ленточных борах являются лесные пожары. Так, исследования подростa на территории ленточных боров показывают, что они часто подвергаются низовым пожарам, не затрагивающим спелые и перестойные насаждения [5].

Важность своевременного выявления пожаров в ленточных борах подчеркивает их положение на песчаных почвах, подверженных развеванию и дефляции в условиях отсутствия растительного покрова [6]. При этом естественное возобновление насаждений сосны после пожаров в значительной степени зависит от лесорастительных условий и в степной зоне оценивается как неудовлетворительное, представленное единичными экземплярами сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) [7, 8]. На различных участках гарей, в зависимости от типа леса, разная скорость возобновления – так, в зоне сухой степи подрост отсутствует даже спустя десятилетия после прохождения пожара, что требует проведения мероприятий по искусственному лесовосстановлению [9]. На территории Алтайского края горимость ленточных боров оценивалась ранее как общая пройденная пожарами площадь в разрезе лет, тогда как цель нашего исследования заключается в оценке возобновления насаждений на песках с определением их пространственных характеристик на основе данных дистанционного зондирования Земли. При этом отслеживание естественного возобновления сосны на гарях необходимо для своевременного планирования мероприятий по лесовосстановлению, так как в связи с пирогенными изменениями почвы и воздействием прямых солнечных лучей, а также отсутствием осеменителей возможно замещение сосняков осинниками или многолетнее существование только травянистых сообществ [10]. Применение дистанционных методов позволяет проводить оперативный и постоянный мониторинг значительных по площади и удаленных от населенных пунктов объектов и своевременно реагировать на изменения их состояния [11, 12].

Методы исследования

В качестве тестового участка для картографирования постпирогенной динамики выбран участок ленточного бора (67,8 тыс. га) на юго-западе Алтайского края – на границе Рубцовского и Угловского районов. Лента входит в состав Озеро-Кузнецовского и Ракитовского лесничеств [1].

Для тестового участка характерны маломощные, слабогумусированные почвы – темно-каштановые и боровые пески [6].

В работе использовалась методика полуавтоматического дешифрирования открытых и заросших песков и лесных насаждений, ранее применявшаяся для исследования растительного покрова и деградации почв в европейской части России [11, 13].

Дешифрирование песков происходило при помощи полуавтоматического метода [11]. Для полуавтоматического определения песков и растительности выбран 4-й (красный) канал мультиспектральных спутниковых снимков Sentinel-2 от 15.09.2016 и 02.08.2024, так как в красном участке спектра степень поглощения света растительностью максимальная, песками – минимальная, т.е. контраст между этими классами объектов максимальный [14]. Это позволило выделить участки деградации почв, включающие также полузаросшие пески, которые трудно идентифицировать визуально [13]. В связи с особенностями отображения данных на спутниковых снимках участки песков с разреженной растительностью при полуавтоматическом дешифрировании были отнесены к классу открытых песков и выделены в отдельный класс путем ручной корректировки на основе спутниковых данных сверхвысокого разрешения Google Earth [14]. Для выявления года прохождения пожара и его границ использовались архивные снимки Landsat-5 от 10.10.1996 и 04.10.1997 в композите «естественные цвета».

Для дешифрирования данных дистанционного зондирования Земли, обработки полученных векторных материалов, формирования картографических материалов применялась геоинформационная система QGIS 3.38. Достоверность данных, получаемых по описанной методике, подтверждена многолетними исследованиями и наземной верификацией результатов дешифрирования [11].

Результаты и обсуждение

По спутниковому снимку за 1997 г. определен контур выгоревшей территории (рис. 1): в результате пожара было уничтожено 25 872 га сосновых насаждений высокой сохранности. Корректность определения площади, пройденной пожаром, подтверждается данными полевых обследований [10].

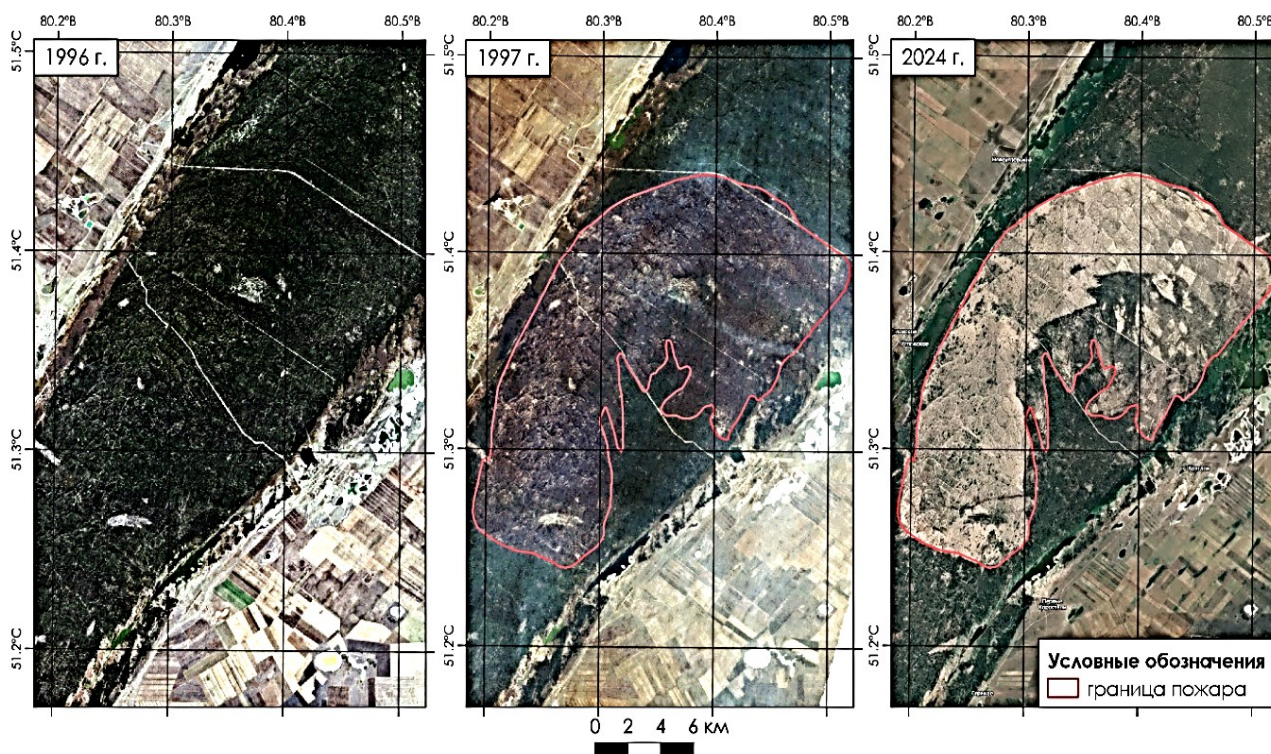


Рис. 1. Состояние исследуемого участка в 1996, 1997 и 2024 гг.
/ Fig. 1. The condition of the studied area in 1996, 1997 and 2024

**Площади групп объектов в 2016 и 2024 гг.
 / The area of the object groups in 2016 and 2024**

Группа объектов	S, га	
	2016	2024
Насаждения	3 704,9	3 651,2
Заросшие пески	18 635,7	17 663,7
Открытые пески	3 536,5	4 614,3

Заращение на исследуемом участке имеет естественный характер из-за отсутствия четко выраженной структуры в дешифрируемых насаждениях. Для отслеживания динамики зарастания на выгоревшей территории проведено дешифрирование состояния местности на 2016 и 2024 гг. (таблица) с разделением на следующие группы объектов: открытые пески, заросшие пески, насаждения (рис. 2).

За интервал 8 лет площадь открытых песков увеличилась в основном за счёт сокращения площади заросших участков. При этом возрос как размер наибольшего объекта (с 75 до 296 га), так и средний размер объекта (с 0,16 до 0,21 га), что уменьшает возможности возобновления травянистой растительности путем естественного обсеменения [10, 14].

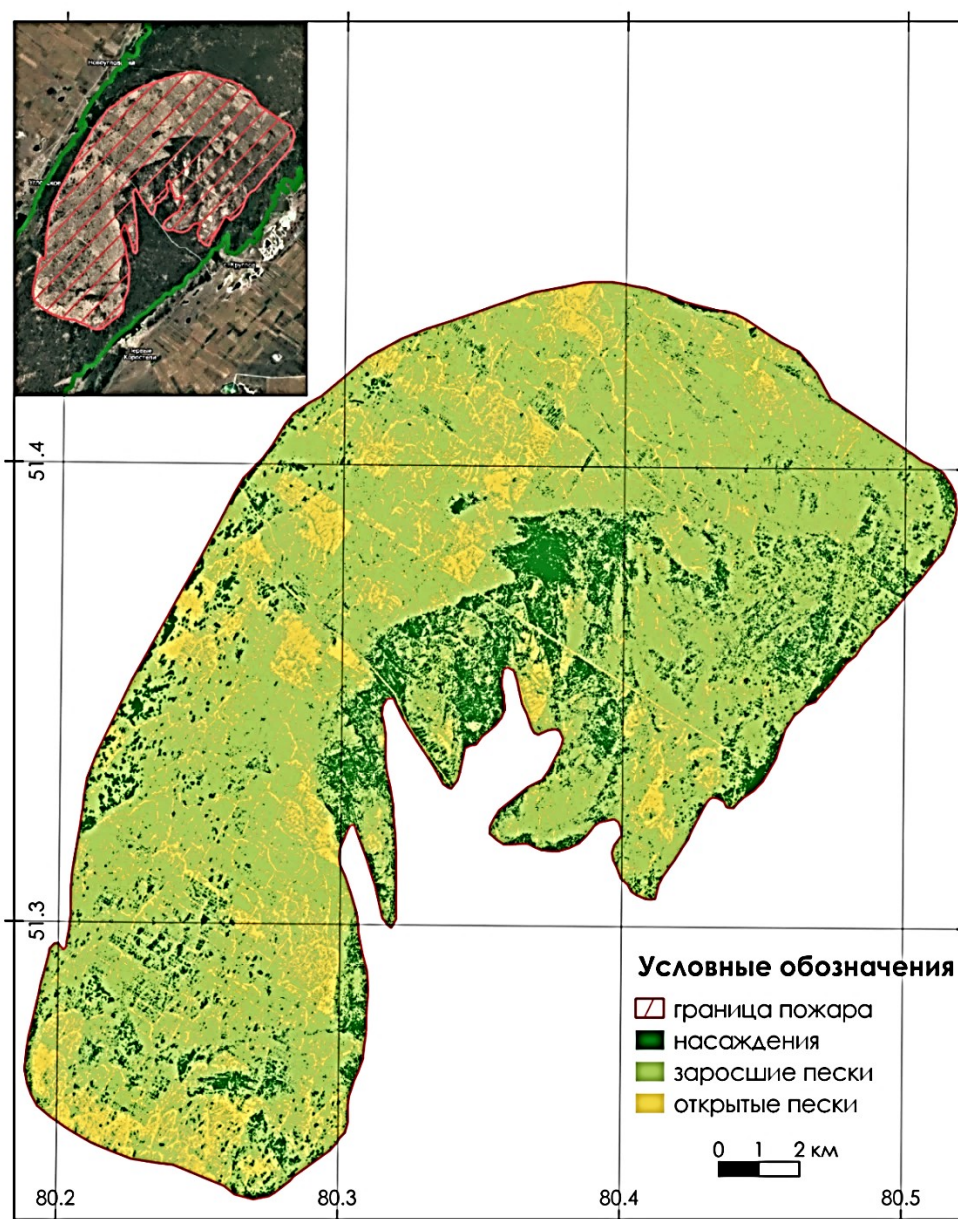


Рис. 2. Распределение гари по группам объектов в 2024 г.
 / Fig. 2. Distribution of objects by object groups in 2024

На заросших песках проективное покрытие растительности составляет около 25 %, растительность приурочена к пологим склонам и западинам рельефа и представлена в основном кипреями, осоками и другими псаммофитами [15]. Среди древесных видов пионером является осина, что требует мониторинга и при необходимости прореживания для сохранения структуры бора [9, 15]. Результатом такого прореживания выступают участки открытых песков с четкими границами, появившиеся в 2024 г., но отсутствовавшие в 2016 г., в связи с чем площадь насаждений по результатам дешифрирования сократилась на 53 га, а площадь открытых песков возросла на 1 тыс. га. При этом скорость естественного возобновления древесной растительности (особенно целевой породы) невелика из-за нагревания поверхности, отсутствия затенения, пирогенного нарушения тонкого гумусового слоя на песках, что может привести к остепнению выгоревшего участка, формированию благоприятных условий для накопления растительной ветоши в условиях отсутствия выпаса и, как следствие, к повторным пожарам [10, 16, 17]. Тенденция к остепнению подкреплена повышением аридизации климата и возрастанием горимости, в том числе связанным с антропогенной нагрузкой на интразональные ландшафты с высокой рекреационной ценностью [16, 18]. На песчаных участках возобновление сосны происходит почти исключительно под пологом леса, что приводит к угнетению молодняка и сокращению темпов или невозможности естественного возобновления [10, 19].

Заключение

Результаты картографирования показали, что естественное постпирогенное возобновление сосновых насаждений в ленточных борах на песчаных почвах замедлено или невозможно в связи с различными факторами природного характера – площади открытых песков увеличиваются на фоне сокращения площади заросших песков и сосновых насаждений. Во избежание остепнения и повторного выгорания участков особо охраняемых интразональных лесов необходим оперативный мониторинг и привлечение геоинформационного анализа состояния выгоревших участков для планирования мероприятий по искусственному лесовосстановлению.

Список источников

1. Мартынюк А.А., Сидоренков В.М., Желдак В.И., Лямцев Н.И., Рябцев О.В., Жафяров А.В. Ленточные боры Алтайского края – состояние и совершенствование хозяйства в них // Лесохоз. информация. 2019. № 1. С. 33–48. EDN: KRTLRS. <https://doi.org/10.24419/LHI.2304-3083.2019.1.03>
2. Казьмин С.П. Дистанционное зондирование ленточных боров Алтайского края при антропогенно-техногенном воздействии // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2021. Т. 4, № 2. С. 75–79. EDN: EGWZXS. <https://doi.org/10.33764/2618-981X-2021-4-2-75-79>
3. Козырева Ю.В., Ненашева Г.И. Ленточный бор как территориально-рекреационная система (на примере барнаульской ленты) // География и природопользование Сибири. 2019. № 26. С. 78–83. EDN: VOSOZO.
4. Соколова Г.Г., Сапронова О.Н. Характеристика ленточного соснового бора окрестностей города Барнаула // Бот. исследования Сибири и Казахстана. 1996. № 2. С. 164–172. EDN: UAXEYX.
5. Башегуров К.А., Залесова Е.С., Толстиков А.Ю., Усов М.В. Последствия группово-выборочных рубок в сосняках ленточных боров Алтая // Успехи современного естествознания. 2019. № 9. С. 13–18. EDN: ZFWCEH.
6. Почвенно-климатическая база данных России // Атлас почв России. URL: <https://soil-db.ru/soilatlas/razdel-8-ispolzovanie-zemelnyh-resursov-i-pochv/8-2-regiony-rossiyskoi-federacii/altayskiy-kray> (дата обращения: 30.05.2025).
7. Малиновских А.А., Савин М.А. Естественное лесовосстановление на гарях в ленточных борах Западной Сибири // Хвойные бореальной зоны. 2019. Т. 37, № 3–4. С. 223–228. EDN: OJTHMT.
8. Шубин Д.А., Осипенко А.Е. Анализ горимости ленточных боров Алтайского края за 68-летний период // Актуальные проблемы лесного комплекса. 2019. № 54. С. 76–79. EDN: ZSRPUL.
9. Башегуров К.А., Малиновских А.А., Савин М.А., Годовалов Г.А. Специфика накопления подроста на гарях в различных лесорастительных подзонах ленточных боров Алтая // Леса России и хозяйство в них. 2020. № 1 (72). С. 4–14. EDN: YGARYF.
10. Баранник Л.П., Зabloцкий В.И. Экологические проблемы восстановления ленточных боров после пожаров // Изв. Алтайского гос. ун-та. 1999. № 3 (13). С. 61–64. EDN: QOAVLS.
11. Юферов В.Г., Кулик К.Н., Пугачева А.М., Кузенко А.Н., Денисова Е.В., Берденгалиева А.Н., Дорошенко В.В., Синельникова К.П., Выприцкий А.А., Васильченко А.А., Мелихова А.В., Матвеев Ш. Геоинформационное картографирование опустынивания аридных, субаридных и сухих субгумидных регионов

Российской Федерации на основе данных дистанционного зондирования и полевых исследований: тестовая модель методики. Волгоград: ФНЦ агроэкологии РАН, 2024. 272 с. EDN: KQBZAY.

12. Кулик К.Н., Рулев А.С., Манаенкова Н.С. Аэрокосмические методы изучения динамики деградации и восстановления агроландшафтов степной и полупустынной зон // Степи Евразии. Сохранение природного разнообразия и мониторинг состояния экосистем: сб. ст. Оренбург: Оренбургский гос. ун-т, 1997. С. 155–156.

13. Дорошенко В.В. Динамика площади открытых песков на северо-востоке Ставропольского края в 2022 г. // Геогр. вестн. 2023. № 4 (67). С. 127–136. EDN: VNKGFB. <https://doi.org/10.17072/2079-7877-2023-4-127-136>

14. Дорошенко В.В. Оценка ежемесячной динамики площадей открытых песков на востоке Ставропольского края в 2023 г. // Геодезия и картография. 2024. Т. 85, № 4. С. 10–19. EDN: ECIZCT. <https://doi.org/10.22389/0016-7126-2024-1006-4-10-19>

15. Макарычев С.В. Особенности восстановления плодородия и охраны постпирогенных дерново-подзолистых почв в ленточных борах Алтайского Приобья // Вестн. Алтайского гос. агр. ун-та. 2020. № 3 (185). С. 47–52. EDN: HMRKAX.

16. Буряк Л.В., Каленская О.П., Пономарев Е.И., Сухинин А.И. Пожары и их последствия в ленточных борах юга Сибири // Хвойные бореальной зоны. 2007. Т. 24, № 4–5. С. 398–404. EDN: JUIKQV.

17. Шинкаренко С.С., Берденгалиева А.Н., Дорошенко В.В., Найчук Я.А. Анализ динамики площадей степных пожаров в Западном Казахстане по данным дистанционного зондирования Земли // Аридные экосистемы. 2023. Т. 29, № 1(94). С. 25–35. EDN: EНJGMV. <https://doi.org/10.24412/1993-3916-2023-1-25-35>

18. Максимова Н.Б., Морковкин Г.Г., Ненашева Г.И. Динамика сроков наступления вегетационного периода по природно-почвенным зонам Алтайского края за 1955–2020 годы // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2023. № 4 (220). С. 110–117. EDN: AHISQK. <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2023-4-110-117>

19. Зленко Л.В. Таксация естественного послепожарного возобновления сосны обыкновенной в ленточных борах Алтая // Лесная таксация и лесоустройство. 2010. № 2 (44). С. 49–51. EDN: RTEUEZ.

References

1. Martynyuk A.A., Sidorenkov V.M., Zheldak V.I., Lyamtsev N.I., Ryabtsev O.V., Zhafyarov A.V. The ribbon forests of the Altai Territory - the state and improvement of agriculture in them. *Forestry Information*. 2019;(1):33-48. (In Russ.). EDN: KRTLRS. <https://doi.org/10.24419/LHI.2304-3083.2019.1.03>

2. Kazmin S. P. Remote sensing of ribbon forests of the Altai Territory under anthropogenic and technogenic influence. *Interexpo Geo-Siberia*. 2021;4(2):75-79. (In Russ.). EDN: EGWZXS. <https://doi.org/10.33764/2618-981X-2021-4-2-75-79>

3. Kozyreva Yu.V., Nenasheva G.I. The Ribbon forest as a territorial and recreational system (on the example of the Barnaul ribbon). *Geography and Environmental Management of Siberia*. 2019;(26):78-83. (In Russ.). EDN: VOSOZO.

4. Sokolova G.G., Sapronova O.N. Characteristics of the ribbon pine forest in the vicinity of Barnaul. *Botanical Research of Siberia and Kazakhstan*. 1996;(2):164-172. (In Russ.). EDN: UAXEYX.

5. Bashegurov K.A., Zalesova E.S., Tolstikov A.Yu., Usov M.V. Consequences of group-selective logging in pine forests of ribbon forests of Altai. *Successes of Modern Natural Science*. 2019;(9):13-18. (In Russ.). EDN: ZFWCEH.

6. Soil and climatic database of Russia. *Atlas of soils of Russia*. URL: <https://soil-db.ru/soilatlas/razdel-8-ispolzovanie-zemelnyh-resursov-i-pochv/8-2-regiony-rossiyskoi-federacii/altayskiy-kray> [Accessed 30th May 2025]. (In Russ.).

7. Malinovskikh A. A., Savin M. A. Natural reforestation on fires in ribbon forests of Western Siberia. *Conifers of the Boreal Zone*. 2019;37(3-4):223-228. (In Russ.). EDN: OJTHMT.

8. Shubin D. A., Osipenko A. E. Analysis of the burning rate of ribbon forests of the Altai Territory over a 68-year period. *Actual Problems of the Forest Complex*. 2019;(54):76-79. (In Russ.). EDN: ZSRPUL.

9. Bashegurov K.A., Malinovskikh A.A., Savin M.A., Godovalov G.A. The specifics of undergrowth accumulation in burning areas in various forest-growing subzones of the Altai ribbon forests. *Forests of Russia and Their Management*. 2020;(1):4-14. (In Russ.). EDN: YGARYF.

10. Barannik L.P., Zablotsky V.I. Ecological problems of restoration of ribbon forests after fires. *Proceedings of the Altai State University*. 1999;(3):61-64. (In Russ.). EDN: QOAVLS.

11. Yuferev V.G., Kulik K.N., Pugacheva A.M., Kuzenko A.N., Denisova E.V., Berdengalieva A.N., Doroshenko V.V., Sinelnikova K.P., Vypritsky A.A., Vasilchenko A.A., Melikhova A.V., Matveyev Sh. *Geoinformation mapping of desertification in arid, subarid and dry subhumid regions of the Russian Federation based on remote sensing and field research data: a test model of the methodology*. Volgograd: Federal Scientific Center for

Agroecology, Integrated Land Reclamation and Protective Afforestation of the Russian Academy of Sciences; 2024. 272 p. (In Russ.). EDN: KQBZAY.

12. Kulik K.N., Rulev A.S., Manaenkova N.S. Aerospace methods for studying the dynamics of degradation and restoration of agro-landscapes of steppe and semi-desert zones. *Steppes of Eurasia. Conservation of natural diversity and ecosystem monitoring*. Orenburg: Orenburg State University; 1997:155-156. (In Russ.).

13. Doroshenko V.V. Dynamics of the area of open sands in the north-east of the Stavropol Territory in 2022. *Geographical Bulletin*. 2023;(4):127-136. (In Russ.). EDN: VNKGFB. <https://doi.org/10.17072/2079-7877-2023-4-127-136>

14. Doroshenko V.V. Assessment of the monthly dynamics of the areas of open sands in the east of the Stavropol Territory in 2023. *Geodesy and Cartography*. 2024;85(4):10-19. (In Russ.). EDN: ECIZCT. <https://doi.org/10.22389/0016-7126-2024-1006-4-10-19>

15. Makarychev S.V. Features of fertility restoration and protection of post-pyrogenic sod-podzolic soils in the belt forests of the Altai region. *Bulletin of the Altai State Agrarian University*. 2020;(3):47-52. (In Russ.). EDN: HMRKAX.

16. Buryak L.V., Kalenskaya O.P., Ponomarev E.I., Sukhinin A.I. Fires and their consequences in the ribbon forests of southern Siberia. *Conifers of the Boreal Zone*. 2007;24(4-5):398-404. (In Russ.). EDN: JUIKQV.

17. Shinkarenko S.S., Berdengalieva A.N., Doroshenko V.V., Naichuk Ya.A. Analysis of the dynamics of steppe fires in Western Kazakhstan according to remote sensing data. *Arid Ecosystems*. 2023;29(1):25-35. (In Russ.). EDN: EHJGMV. <https://doi.org/10.24412/1993-3916-2023-1-25-35>

18. Maksimova N.B., Morkovkin G.G., Nenasheva G.I. Dynamics of the timing of the onset of the growing season in the natural and soil zones of the Altai Territory in 1955-2020. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science*. 2023;(4):110-117. (In Russ.). EDN: AHISQK. <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2023-4-110-117>

19. Zlenko L. V. Taxation of natural post-fire regeneration of Scots pine in the ribbon forests of Altai. *Forest Taxation and Forest Management*. 2010;(2):49-51. (In Russ.). EDN: RTEUEZ.

Информация об авторах

В.В. Дорошенко – кандидат сельскохозяйственных наук, доцент кафедры географии и картографии Института естественных наук ВГУ.

А.А. Хованская – лаборант-исследователь лаборатории геоинформационного моделирования и картографирования агролесоландшафтов ФНЦ агроэкологии РАН.

И.А. Болгов – младший научный сотрудник лаборатории геоинформационного моделирования и картографирования агролесоландшафтов ФНЦ агроэкологии РАН.

Information about the authors

V.V. Doroshenko – Candidate of Science (Agricultural), Associate Professor of the Department of Geography and Cartography, Institute of Natural Sciences, VSU.

A.A. Khovanskaya – Laboratory Assistant of the Laboratory of Geoinformation Modeling and Mapping of Agroforestry Landscapes, FSCA RAS.

I.A. Bolgov – Junior Researcher of the Laboratory of Geoinformation Modeling and Mapping of Agroforestry Landscapes, FSCA RAS.

Статья поступила в редакцию 27.06.2025; одобрена после рецензирования 29.10.2025; принята к публикации 11.11.2025. The article was submitted 27.06.2025; approved after reviewing 29.10.2025; accepted for publication 11.11.2025.

Научная статья
УДК 502.53
<https://doi.org/10.18522/1026-2237-2026-1-94-102>

ПОТЕНЦИАЛ ЛАНДШАФТОВ РЕСПУБЛИКИ АЛТАЙ ДЛЯ ПРЕДОСТАВЛЕНИЯ ЭКОСИСТЕМНЫХ УСЛУГ В УСЛОВИЯХ ИЗМЕНЕНИЙ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

**Ольга Валерьевна Журавлева^{1✉}, Андрей Владимирович Каранин²,
Мария Геннадьевна Сухова³**

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

³ Институт водных и экологических проблем Сибирского отделения Российской академии наук, Барнаул, Россия

¹ juravolg@mail.ru[✉], <https://orcid.org/0000-0003-1327-0483>

² vedmedk@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3261-523X>

³ mgs.gasu@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8648-2482>

Аннотация. Рассматривается потенциал ландшафтов Республики Алтай для предоставления экосистемных услуг и их уязвимость к изменениям окружающей среды, включая климатические. Цель исследования – выявить пространственные закономерности в способности ландшафтов оказывать такие услуги и определить степень их уязвимости к внешним воздействиям. Для оценки использовалась балльная система (от 0 до 5 баллов), где учитывались потенциал ландшафтов для предоставления 20 экосистемных услуг (обеспечивающие, регулирующие, культурные, поддерживающие) и их уязвимость к изменениям окружающей среды. В основу положена классификация Millennium Ecosystem Assessment (МЕА) с адаптацией для горных территорий. Результаты показали, что 56,5 % территории Республики Алтай обладают высоким потенциалом для предоставления ключевых биосферных функций (более 4 баллов), таких как регулирование водных ресурсов, поддержание биоразнообразия и обеспечение продовольственной безопасности. Наиболее уязвимыми оказались болотные и лугово-тундровые ландшафты (интегральная оценка уязвимости до 3,8 балла), тогда как лесные экосистемы демонстрируют более высокую устойчивость. Выявлено, что 12 % территорий относятся к категории высокоуязвимых.

Ключевые слова: экосистемные услуги, Республика Алтай, ландшафты, балльная оценка, уязвимость, изменение климата, регулирующие услуги, биоразнообразие, адаптация, горные экосистемы

Для цитирования: Журавлева О.В., Каранин А.В., Сухова М.Г. Потенциал ландшафтов Республики Алтай для предоставления экосистемных услуг в условиях изменений окружающей среды // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2026. № 1. С. 94–102. <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2026-1-94-102>

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

Original article

THE POTENTIAL OF ALTAI REPUBLIC LANDSCAPES TO DELIVER ECOSYSTEM SERVICES UNDER ENVIRONMENTAL CHANGES

Olga V. Zhuravleva^{1✉}, Andrey V. Karanin², Maria G. Sukhova³

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

³ Institute for Water and Environmental Problems of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Barnaul, Russia

¹ juravolg@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1327-0483>

² vedmedk@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3261-523X>

³ mgs.gasu@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8648-2482>

Abstract. The article focuses on assessing the capacity of landscapes in the Altai Republic to provide ecosystem services and their vulnerability to environmental changes, including climate-related ones. The study aims to identify spatial patterns in the ability of landscapes to deliver ecosystem services and determine their degree of vulnerability to external changes. A scoring system (ranging from 0 to 5) was used for the assessment, taking into

© Журавлева О.В., Каранин А.В., Сухова М.Г., 2026

account the landscapes' potential to provide 20 ecosystem services (provisioning, regulating, cultural, and supporting) and their vulnerability to changes. It is based on the Millennium Ecosystem Assessment (MEA) classification with adaptation for mountainous areas. The results revealed that 56.5 % of the Altai Republic's territory has a high capacity to deliver key ecosystem services (scoring above 4), such as water regulation, biodiversity maintenance, and food security. The most vulnerable landscapes were wetlands and meadow-tundra ecosystems (integrated vulnerability assessment score up to 3.8), while forest ecosystems exhibited greater resilience. It was found that 12 % of the territory falls into the highly vulnerable category.

Keywords: ecosystem services, Altai Republic, landscapes, score-based assessment, vulnerability, climate change, regulating services, biodiversity, adaptation, mountain ecosystems

For citation: Zhuravleva O.V., Karanin A.V., Sukhova M.G. The Potential of Altai Republic Landscapes to Deliver Ecosystem Services under Environmental Changes. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2026;(1):94-102. (In Russ.). <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2026-1-94-102>

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

Введение

Экосистемные услуги – это совокупные выгоды и преимущества, извлекаемые людьми из природы, включающие поддержку здоровой среды обитания, предоставление чистой воды, пищи, лекарств, строительного сырья и иных важных ресурсов, необходимых для существования человечества [1]. В качестве синонимов этого термина используют такие понятия, как природные сервисы, биосферные функции, услуги природной среды. Экосистемы выполняют важные регуляторные функции – стабилизация климата, защита от наводнений и засух, фильтрация загрязнений и поддержка биологического разнообразия. Эти биосферные функции природных ландшафтов играют ключевую роль в поддержании устойчивого развития по добыче горных территорий, в частности Республики Алтай, так как подобные районы отличаются хрупкостью и повышенной чувствительностью к внешним факторам, таким как изменение климата, увеличение антропогенной нагрузки и ухудшение состояния природных ресурсов, особенно в условиях изменяющихся параметров окружающей среды.

Экосистемы поддерживают ключевые аспекты человеческого существования и выступают основой для значительной части экономики. В глобальном масштабе биосферные функции природных ландшафтов оцениваются в 125–145 трлн долл. в год [1–4].

В целом происходящие изменения состояния окружающей среды требуют осмысления угроз качеству услуг природной среды, и эта проблема активно обсуждается научным сообществом [5–18]. Так, повышение температуры может привести к таянию ледников, потере лесных массивов и сокращению водных ресурсов, изменению ареалов распространения животных и растений, увеличению распространения инвазивных видов в некоторых районах. Это может нанести значительный экологический и экономический ущерб. Особого внимания заслуживает доступность и качество некоторых продуктов питания, а также реакция сельскохозяйственного производства на происходящие изменения окружающей среды.

Материалы и методы

Для оценки ситуации используются самые различные подходы. В данной работе рассматриваются возможности балльной оценки потенциала ландшафтов для предоставления экосистемных услуг и степени их уязвимости для меняющихся условий. Выбор ландшафта в качестве территориальной единицы обусловлен тем, что одна из задач исследования заключается в выявлении реакции таких природных сервисов на изменения окружающей среды (прежде всего климатические). В этом случае именно ландшафтные комплексы способны показывать схожую реакцию.

В работе использована ландшафтная классификация Д.В. Черных и Г.С. Самойловой [19]. Исходные 109 видов ландшафтов были сгруппированы в 21 ландшафтный комплекс. Для наглядного представления о распространении комплексов выполнено их укрупнение: однотипные комплексы разных высотных уровней (например, высокогорные, среднегорные и низкогорные лесные) объединялись в одну категорию (рис. 1).

Для идентификации применена классификация, приведенная в прототипе национального доклада «Экосистемные услуги России. Услуги наземных экосистем» и основанная на систематизации МЭА (Millennium Ecosystem Assessment) [20].

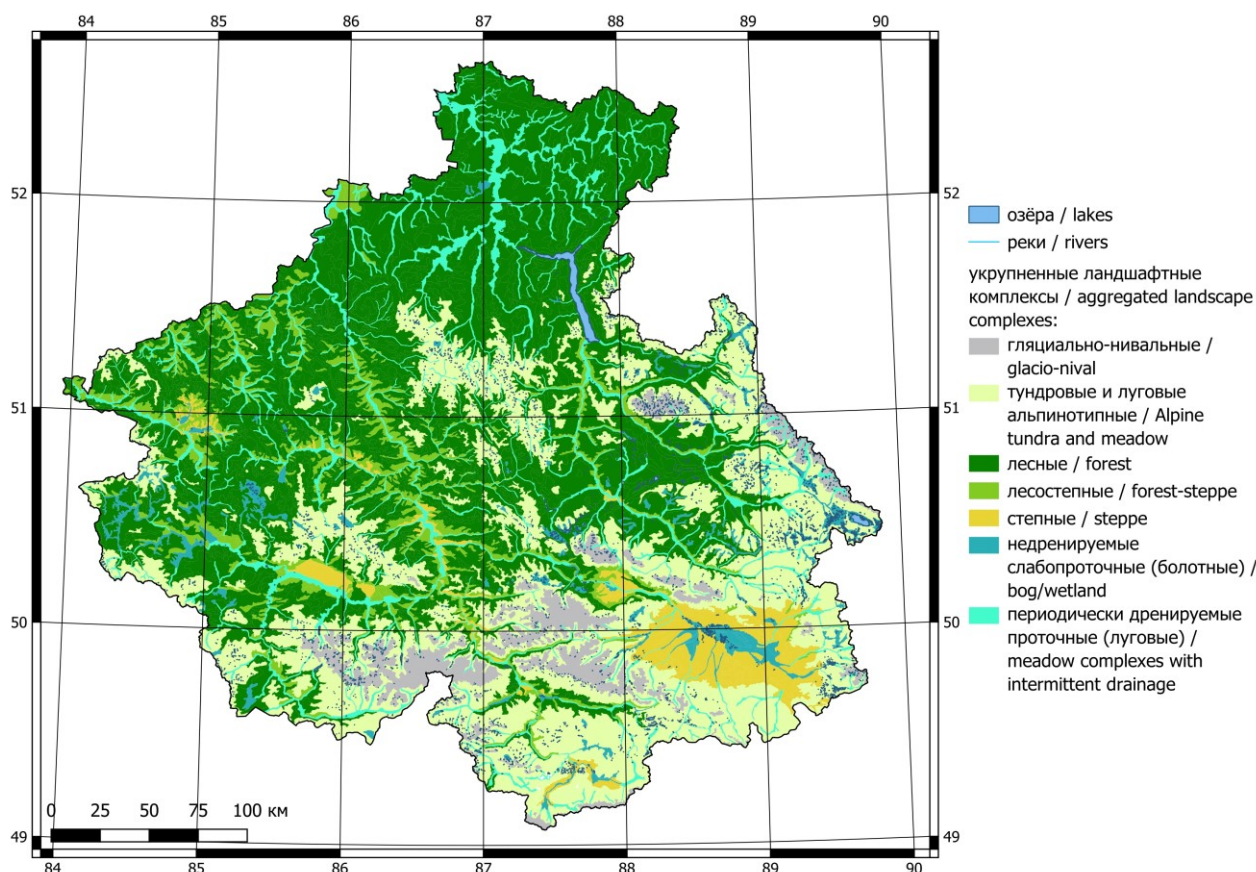


Рис. 1. Укрупнённые ландшафтные комплексы Республики Алтай (построено по [19])
/ Fig. 1. Aggregated landscape complexes of the Altai Republic (created by [19])

При использовании балльной оценки необходимо осознавать ее преимущества и недостатки. К преимуществам балльной оценки относятся:

- простота в применении, не требуется сложных расчетов;
- адаптированность к различным услугам экосистем и ландшафтам;
- визуализация различий в потенциале предоставления услуги между разными участками ландшафта.

Недостатками являются:

- выбор шкал и проводимая оценка могут быть субъективными и зависеть от экспертного мнения;
- балльная оценка не учитывает все факторы, влияющие на предоставление услуги, и может быть недостаточно точной для некоторых целей.

Шкала для оценки потенциала ландшафта ориентирует эксперта на учет природных характеристик экосистемы, которые влияют на ее способность предоставлять ту или иную экосистемную услугу. То есть если эксперт оценивает нивально-гляциальные комплексы в обеспечении продовольствием, потенциал ландшафта в этом стремится к нулю.

Таким образом сложилась следующая шкала оценки:

- 5 баллов (очень высокий потенциал) – ландшафт обладает всеми необходимыми характеристиками для оптимального предоставления услуги;
 - 4 балла (высокий потенциал) – ландшафт имеет значительную способность предоставлять услугу;
 - 3 балла (умеренный потенциал) – ландшафт обладает умеренной способностью предоставлять услугу;
 - 2 балла (низкий потенциал) – ландшафт имеет ограниченную способность предоставлять услугу;
 - 1 балл (очень низкий потенциал) – ландшафт практически неспособен предоставлять услугу.
- В случае, когда оценка невозможна, проставлялось 0 баллов.

Шкала уязвимости экосистемной услуги для изменений окружающей среды проводилась по пяти уровням:

- 1 балл – минимальная уязвимость: услуга не подвержена существенному влиянию изменений окружающей среды, обладает высокой устойчивостью и адаптивностью;
- 2 балла – низкая уязвимость: услуга может испытывать незначительные негативные последствия от изменений окружающей среды, но обладает достаточной устойчивостью и адаптивностью для преодоления этих последствий;
- 3 балла – средняя уязвимость: услуга подвержена умеренному негативному влиянию изменений окружающей среды, может испытывать трудности при адаптации, но сохраняет потенциал для восстановления;
- 4 балла – высокая уязвимость: услуга подвержена значительному негативному влиянию изменений окружающей среды, испытывает серьезные трудности при адаптации и восстановлении, что может привести к ее деградации;
- 5 баллов – максимальная уязвимость: экосистемная услуга находится под угрозой полного исчезновения из-за изменений окружающей среды, неспособна адаптироваться к изменениям и находится в состоянии серьезной деградации.

Для каждого ландшафтного комплекса (всего 21 единица) была составлена таблица, где оценивались потенциал и степень уязвимости по 20 показателям, на основе которых затем рассчитывались интегральные оценки (21-й показатель). Полная таблица по всем комплексам содержит 441 строку, поэтому в работе представлен только ее фрагмент, включающий лишь высокогорные гляциально-нивалые ландшафты (табл. 1). Для обработки данных и построения карт использовалась геоинформационная система QGIS.

Таблица 1 / Table 1

Фрагмент оценочной таблицы / Section of the scoring table

Ландшафтный комплекс	Экосистемные услуги		Балльная оценка	
			потенциала ландшафтов для предоставления экосистемной услуги	степени уязвимости качества услуг в результате изменения окружающей среды
А-1. Гляциально-нивалые	Обеспечивающие	Продовольствие	0	0
		Пресная вода	5	4
		Волокна	0	0
		Топливо	0	0
		Генетические ресурсы	1	4
	Регулирующие	Регулирование качества воздуха	1	4
		Регулирование климата	3	4
		Регулирование стока	5	4
		Регулирование эрозии	1	4
		Очистка воды и сточных вод	2	4
	Культурные	Культурное разнообразие	1	3
		Духовные и религиозные ценности	1	3
		Системы знаний	1	3
		Образовательные ценности	3	3
		Эстетические ценности	5	3
		Рекреация и экотуризм	5	3
	Поддерживающие	Почвообразование	1	5
		Круговорот питательных веществ	1	5
		Круговорот воды	5	4
		Фотосинтез	1	5
Интегральная оценка		2,1	3,25	

Результаты и обсуждение

На основе полученных балльных оценок потенциала и уязвимости ландшафтов для предоставления экосистемных услуг составлены карты (рис. 2, 3). Полученные пространственные закономерности отражают разнообразие природных условий горной территории, однако высотная поясность накладывает наиболее яркий отпечаток.

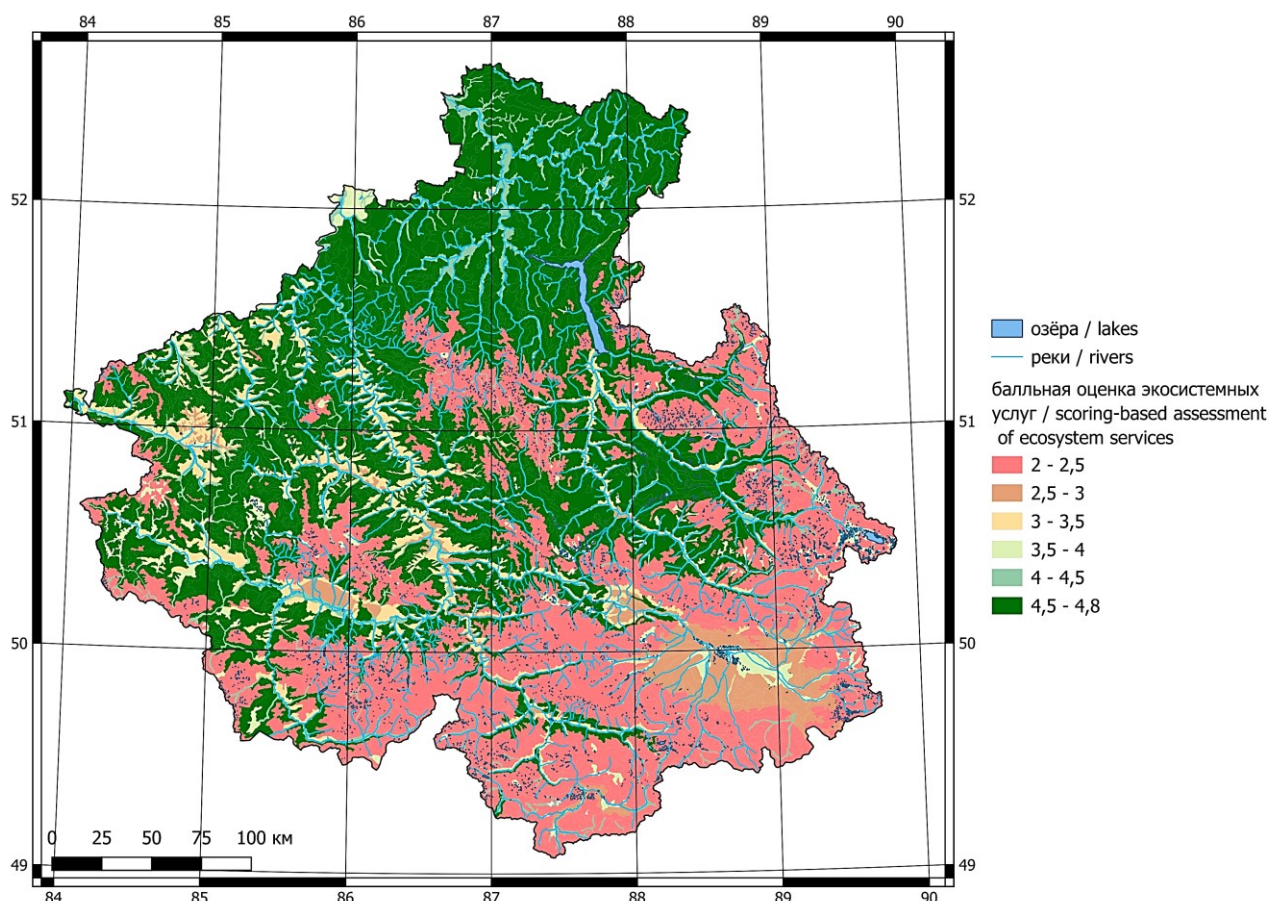


Рис. 2. Балльная оценка потенциала ландшафтов Республики Алтай для обеспечения экосистемных услуг / Fig. 2. A scoring-based assessment of the ecosystem service provision potential of landscapes in the Altai Republic

Гляциально-нивальные природные комплексы Юго-Восточного и Центрального Алтая, несмотря на общую низкую величину потенциала, предоставляют важные регулирующие услуги. Одной из главных функций таких ландшафтов является их способность регулировать водный цикл, обеспечивая естественное накопление и фильтрацию воды, что, в свою очередь, влияет на качество и доступность водных ресурсов для различных экосистем. Не менее важна их роль в углеродном цикле, так как гляциально-нивальные зоны могут выступать как углеродные стоки, способствуя смягчению последствий изменения климата. Вместе с тем территории чутко реагируют на происходящие изменения окружающей среды, что обуславливает их повышенную уязвимость (рис. 3).

Для высокогорных тундровых и луговых альпинотипных ландшафтов характерны более высокие интегральные оценки по сравнению с гляциально-нивальными (рис. 1, 2). В среднегорье значения потенциала по некоторым обеспечивающим и поддерживающим категориям еще выше. Особо следует выделить роль этих комплексов (как в высокогорье, так и среднегорье) в поддержании биоразнообразия. Множество редких и эндемичных видов растений и животных обитает в этих труднодоступных местах, тем самым поддерживая экологическое равновесие и способствуя устойчивости всей экосистемы. Кроме того, альпинотипные ландшафты служат важной основой для пастбищного скотоводства. Степень уязвимости экосистемных услуг этих территорий зависит от абсолютных высот и в высокогорье может достигать существенных значений, в среднегорье ситуация чуть менее критическая (рис. 3).

Лесные экосистемы всех высотных поясов демонстрируют наиболее высокий потенциал и характеризуются самыми высокими оценочными баллами (рис. 1, 2). Трудно переоценить их роль в поддержании биологического разнообразия и обеспечении устойчивости экологических систем. В высокогорьях леса, формируя уникальные микроклиматические условия, способствуют сохранению многих редких видов флоры и фауны, а также служат естественными барьерами от природных катастроф, таких как лавины и оползни. Среднегорные леса, являясь переходной зоной, соединяют

высокогорные и низкогорные экосистемы, влияя на обмен генетическим материалом и обеспечивая надежный экологический каркас. Помимо этого, леса всех высотных уровней играют весомую роль в регулировании водного режима, предотвращении эрозии почв, стабилизации качества воды, воздуха и многих других жизненно важных процессах. Лесные массивы не только способны обеспечить древесиной и другими ресурсами, но и имеют большое культурное значение.

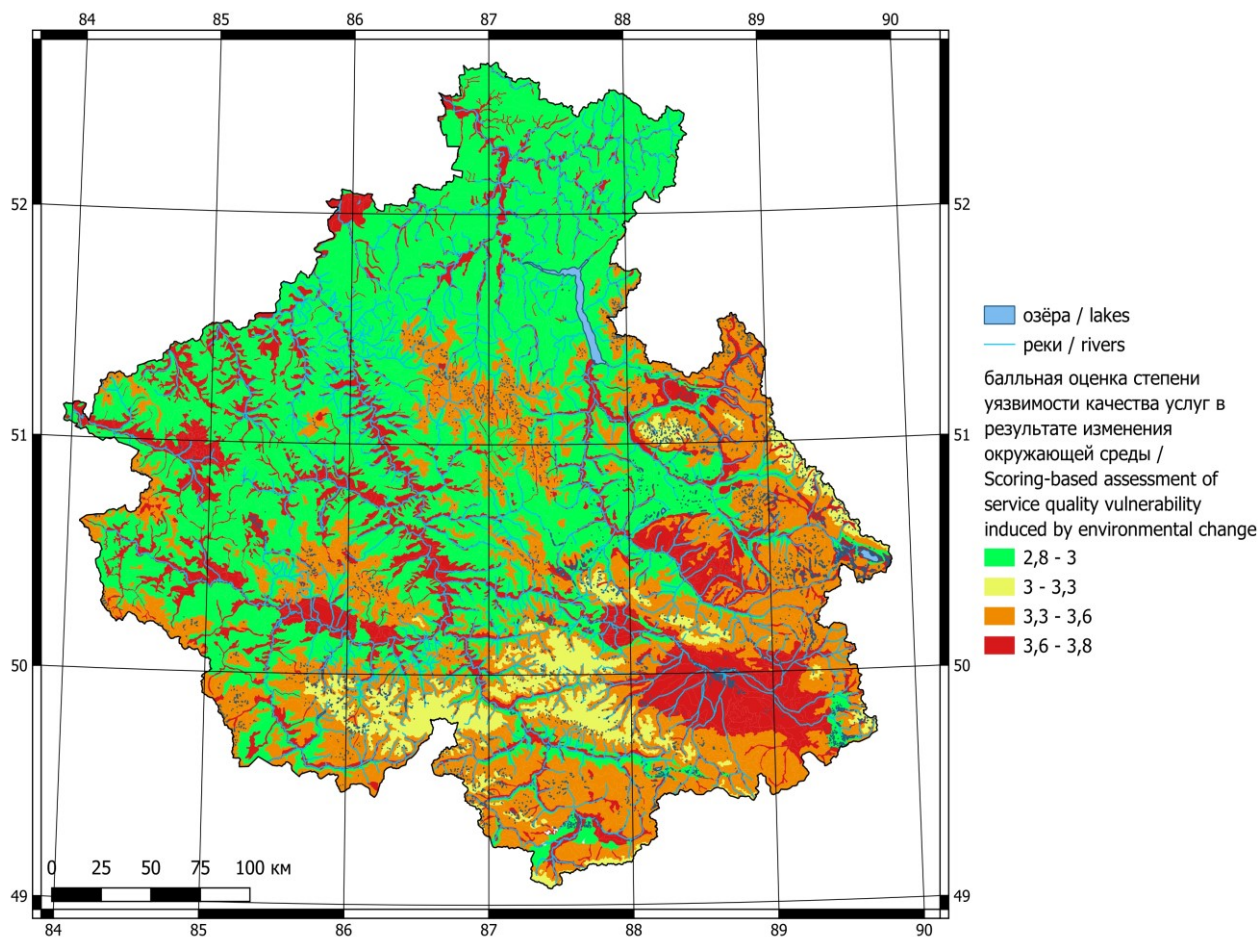


Рис. 3. Балльная оценка степени уязвимости качества экосистемных услуг в результате изменений окружающей среды / Fig. 3. A scoring-based vulnerability assessment of ecosystem service quality in response to environmental change

Адаптивные механизмы лесных ландшафтов надежнее по сравнению с другими экосистемами, что усиливает их противостояние негативным изменениям среды и ведёт к их меньшей уязвимости.

Лесостепные и степные ландшафты также предоставляют широкий спектр экосистемных услуг – от генетических ресурсов до эстетических ценностей. По интегральной оценке потенциала они немного проигрывают лесным экосистемам, но эти территории невероятно ценны как сельскохозяйственные угодья, обеспечивающие продовольственную безопасность (рис. 1, 2). Степень уязвимости качества природных сервисов здесь выше, так как территории находятся в зонах недостаточного увлажнения, что усугубляет реакцию на изменение параметров тепло- и влагообеспеченности (рис. 3).

Результаты площадной оценки представлены в табл. 2 и 3.

Можно отметить, что около 57 % территории Республики Алтай (52 604 км²) характеризуются высоким и очень высоким интегральным потенциалом ($\geq 4,0$ балла), при этом 43 % (40 150 км²) достигают максимума (4,8 балла) – это преимущественно лесные ландшафты.

Почти 28 % (25 730 км²) оцениваются как территории с умеренным потенциалом (2,3 балла), что характерно для тундровых и альпийских ландшафтов.

Таблица 2 / Table 2

Интегральная оценка экосистемных услуг / Integrated assessment of ecosystem services

Балл	Площадь, км ²
2,10	4558,2
2,20	132,0
2,30	25 729,6
2,80	990,7
2,85	2814,7
3,15	9,9
3,30	77,9
3,40	5405,6
3,55	306,0
4,00	2759,0
4,05	8116,4
4,65	1578,4
4,80	40 150,4

Таблица 3 / Table 3

Интегральная оценка уязвимости экосистемных услуг / Integrated assessment of vulnerability of ecosystem services

Балл	Площадь, км ²
2,85	40 282,3
2,90	664,3
2,95	9,8
3,25	4558,1
3,50	25 065,2
3,65	10 182,4
3,70	990,7
3,80	10 875,3

Примерно 5 % (4 558 км²) демонстрируют критически низкий потенциал ($\leq 2,1$ балла), это в основном гляциально-нивальные комплексы.

Для интегральной оценки уязвимости экосистемных услуг (табл. 3) характерны следующие показатели: около 51 % территории (47 114 км²) относится к категории высокой уязвимости ($\geq 3,5$ балла), причем 12 % (10 875 км²) достигают пика (3,8 балла) – это главным образом травяно-болотные и лугово-тундровые ландшафты.

43 % (40 282 км²) имеют умеренную уязвимость (2,85 балла), охватывая устойчивые таёжные массивы.

Заключение

В результате проведенного исследования выполнена комплексная оценка потенциала и уязвимости ландшафтов Республики Алтай. Установлено, что более половины территории (56,5 %, или 52 604 км²), представленной преимущественно лесными массивами, обладает высоким и очень высоким потенциалом для предоставления ключевых экосистемных услуг. Эти функции являются незаменимыми для регулирования климата и водного режима, защиты от эрозии и стихийных бедствий, поддержания биоразнообразия и обеспечения продовольственной безопасности.

Параллельно выявлены зоны повышенного риска: 12 % территории с высокой уязвимостью, где даже незначительные изменения климата и рост антропогенной нагрузки могут привести к деградации природных функций. К ним отнесены в первую очередь лугово-тундровые и травяно-болотные комплексы.

Проведенная оценка не избавлена от недостатков и субъективности, но может служить отправной точкой для разработки стратегий по адаптации и митигации изменений.

Список источников

1. Costanza R., d'Arge R., de Groot R., Farber S., Grasso M., Hannon B., Limburg K., Naeem S., O'Neill R.V., Paruelo J., Raskin R.G., Sutton P., van den Belt M. The value of the world's ecosystem services and natural capital // Nature. 1997. Vol. 387. P. 253–260. <https://doi.org/10.1038/387253a0>
2. Global assessment report on biodiversity and ecosystem services of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services. E.S. Brondizio, J. Settele, S. Díaz, H.T. Ngo (eds.). Bonn: IPBES secretariat, 2019. 1148 p. <https://doi.org/10.5281/zenodo.3831673>
3. Mooney H., Larigauderie F.A., Cesario M., Elmquist T., Hoegh-Guldberg O., Lavorel S., Mase G.M., Palmer M., Scholes R., Yahara T. Biodiversity, climate change, and ecosystem services // Current Opinion in Environmental Sustainability. 2009. Vol. 1, № 1. P. 46–54. EDN: OZXBSX. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2009.07.006>
4. Living Planet Report 2020 – Bending the curve of biodiversity loss. R.E.A. Almond, M. Grooten, T. Petersen (eds.). Gland, 2020. URL: <https://pure.iiasa.ac.at/id/eprint/16870/1/ENGLISH-FULL.pdf> (дата обращения: 13.05.2025).
5. Hussain S., Sharma S., Bhatti R.C., Singh A.N. Sustainability in the Indian Himalayan Region: Understanding the Ecosystem Services, Climate Change Impacts, Land Use Shifts and Their Threats // The Himalayas in the Anthropocene. A. Borthakur, P. Singh. (eds.) Cham: Springer, 2024. P. 33–57. https://doi.org/10.1007/978-3-031-50101-2_2
6. Цыдыпов Б.З., Гармаев Е.Ж., Гомбоев Б.О., Аюржанаев А.А., Содномов Б.В., Пуцукова С.Д., Андреев С.Г., Мотошкина М.А. Влияние изменения климата на экосистемные услуги лесных земель юга Восточной Сибири // Изв. РАН. Серия геогр. 2022. Т. 86, № 1. С. 82–97. EDN: PUTTED. <https://doi.org/10.31857/S2587556622010125>

7. Сухова М.Г., Журавлева О.В., Каранин А.В., Кочеева Н.А., Минаев А.И., Никольченко Ю.Н. Идентификация экосистемных услуг северного Алтая // Вестн. Тамбовского ун-та. Серия: Естеств. и техн. науки. 2014. Т. 19, № 5. С. 1351–1355. EDN: SMOANH.
8. Shilky S., Patra P., Ekka A., Kumar P., Saikia M., Khan L. Climate Change: A Major Challenge to Biodiversity Conservation, Ecological Services, and Sustainable Development // The Palgrave Handbook of Socio-ecological Resilience in the Face of Climate Change. S. Nautiyal, A.K. Gupta, M. Goswami, I. Khan, Y.D. Imran (eds.). Singapore: Palgrave Macmillan, 2023. P. 577–592. https://doi.org/10.1007/978-981-99-2206-2_33
9. Бондаренко Л.В., Маслова О.В., Белкина А.В., Сухарева К.В. Глобальное изменение климата и его последствия // Вестн. Росс. экон. ун-та им. Г.В. Плеханова. 2018. № 298. С. 84–93. EDN: YWMJMQ. <https://doi.org/10.21686/2413-2829-2018-2-84-93>
10. Порфирьев Б.Н., Терентьев Н.Е. Концепция экосистемных услуг для населения и экономики: к реализации в Российской Арктике в условиях климатических изменений // Рос. экон. журн. 2016. № 6. С. 18–24. EDN: XWUFHR.
11. Изменение климата и его воздействие на экосистемы, население и хозяйство российской части Алтае-Саянского экорегиона: оценочный доклад / Т.А. Бляхарчук, И.В. Герасимчук, Г.В. Груза [и др.]. М., 2011. 168 с. EDN: RWHUXP.
12. Carpenter S.R., Mooney H.A., Agard J., Capistrano D., Defries R.S., Diaz S., Dietz T., Duraipappah A.K., Oteng-Yeboah A., Pereira H.M., Perrings C., Reid W.V., Sarukhan J., Scholes R.J., Whyte A. Science for managing ecosystem services: beyond the Millennium Ecosystem Assessment // Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A. 2009. Vol. 106, № 5. P. 1305–1312. <https://doi.org/10.1073/pnas.0808772106>
13. Fischer G., Shah M., Tubiello F.N., van Velhuizen H. Socio-economic and climate change impacts on agriculture: an integrated assessment, 1990–2080 // Philos. Trans. R. Soc. Lond. B Biol. Sci. 2005. Vol. 360, № 1463. P. 2067–2083. <https://doi.org/10.1098/rstb.2005.1744>
14. Kottawa-Arachchi J.D., Wijeratne M.A. Climate change impacts on biodiversity and ecosystems in Sri Lanka: a review // Nature Conservation Research. 2017. Vol. 2, № 3. P. 2–22. EDN: WZUHYU. <https://dx.doi.org/10.24189/ncr.2017.042>
15. Scholes R.J. Climate change and ecosystem services // WIREs Clim. Change. 2016. Vol. 7, iss. 4. P. 537–550. EDN: YDHCNC. <https://doi.org/10.1002/wcc.404>
16. Мередов Э.Н., Хатамова М.Ч., Ачилова Г.А. Влияние изменения климата на биоразнообразие и экосистемные услуги пустынных территорий // Интернаука. 2024. № 37-1 (354). С. 50–52. EDN: TPLEGP.
17. Walther G.R., Post E., Convey P., Menzel A., Parmesan C., Beebee T.J., Fromentin J.-M., Hoegh-Guldberg O., Bairlein F. Ecological responses to recent climate change // Nature. 2002. Vol. 416. P. 389–395. <https://doi.org/10.1038/416389a>
18. Zabel F., Putzenlechner B., Mauser W. Global Agricultural Land Resources – A High Resolution Suitability Evaluation and Its Perspectives until 2100 under Climate Change Conditions // PLoS ONE. 2014. Vol. 9, № 9. Art. e107522. EDN: YBGMRP. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0107522>
19. Черных Д.В., Самойлова Г.С. Ландшафты Алтая (Республика Алтай и Алтайский край): карта м-1:500 000. Новосибирск: Новосибирская картографическая фабрика, 2011. 4 с.
20. Экосистемные услуги России: прототип национального доклада / С.Н. Бобылев, Е.Н. Букварева, В.И. Грабовский [и др.]. М.: Центр охраны дикой природы, 2016. Т. 1. 148 с. EDN: YRZSHL.

References

1. Costanza R., d'Arge R., de Groot R., Farber S., Grasso M., Hannon B., Limburg K., Naeem S., O'Neill R.V., Paruelo J., Raskin R.G., Sutton P., van den Belt M. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*. 1997;387:253-260. <https://doi.org/10.1038/387253a0>
2. Brondizio E.S., Settele J., Díaz S., Ngo H.T., eds. *IPBES. Global assessment report on biodiversity and ecosystem services of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services*. Bonn: IPBES secretariat; 2019. 1148 p. <https://doi.org/10.5281/zenodo.3831673>
3. Mooney H., Larigauderie A., Cesario M., Elmquist T., Hoegh-Guldberg O., Lavorel S., Mase G.M., Palmer M., Scholes R., Yahara T. Biodiversity, climate change, and ecosystem services. *Current Opinion in Environmental Sustainability*. 2009;1(1):46-54. EDN: OZXBSX. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2009.07.006>
4. Almond R.E.A., Grooten M., Petersen T., eds. *WWF. Living Planet Report 2020 - Bending the curve of biodiversity loss*. Gland; 2020. Available from: <https://pure.iiasa.ac.at/id/eprint/16870/1/ENGLISH-FULL.pdf> [Accessed 13th May 2025].
5. Hussain S., Sharma S., Bhatti R.C., Singh A.N. Sustainability in the Indian Himalayan Region: understandings the ecosystem services, climate change impacts, land use shifts and their threats. *The Himalayas in the Anthropocene*. A. Borthakur, P. Singh (eds.). Cham: Springer; 2024:33-57. https://doi.org/10.1007/978-3-031-50101-2_2
6. Tsydypov B.Z., Garmayev E.Zh., Gomboev B.O., Ayurzhanayev A.A., Sodnomov B.V., Puntskukova S.D., Andreev S.G., Motoshkina M.A. Impact of climate change on ecosystem services of forest lands in the South of Eastern Siberia. *Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Geography*. 2022;86(1):82-97. (In Russ.). EDN: PUTTED. <https://doi.org/10.31857/S2587556622010125>

7. Sukhova M.G., Zhuravleva O.V., Karanin A.V., Kocheeva N.A., Minaev A.I., Nikolchenko Yu.N. Identification of ecosystem services in Northern Altai. *Bulletin of Tambov University. Natural and Technical Sciences*. 2014;19(5):1351-1355. (In Russ.). EDN: SMOANH.
8. Shilky S., Patra P., Ekka A., Kumar P., Saikia M., Khan L. Climate change: a major challenge to biodiversity conservation, ecological services, and sustainable development. *The Palgrave handbook of socio-ecological resilience in the face of climate change*. S. Nautiyal, A.K. Gupta, M. Goswami, Y.D. Imran Khan (eds.). Singapore: Palgrave Macmillan; 2023:577-592. https://doi.org/10.1007/978-981-99-2206-2_33
9. Bondarenko L.V., Maslova O.V., Belkina A.V., Sukhareva K.V. Global climate change and its consequences. *Bulletin of the Plekhanov Russian University of Economics*. 2018;(2):84-93. (In Russ.). EDN: YWMJMQ. <https://doi.org/10.21686/2413-2829-2018-2-84-93>
10. Porfiryev B.N., Terentyev N.E. The concept of ecosystem services for the population and the economy: towards implementation in the Russian Arctic in the context of climate change. *Russian Economic Journal*. 2016;(6):18-24. (In Russ.). EDN: XWUFHR.
11. Blyakharchuk T.A., Gerasimchuk I.V., Gruza G.V. et al. *Climate change and its impact on ecosystems, population and economy of the Russian part of the Altai-Sayan ecoregion*. Assessment report. Moscow, 2011. 168 p. (In Russ.). EDN: RWHUXP.
12. Carpenter S.R., Mooney H.A., Agard J., Capistrano D., DeFries R.S., Diaz S., Dietz T., Duraipapp A.K., Oteng-Yeboah A., Pereira H.M., Perrings C., Reid W.V., Sarukhan J., Scholes R.J., Whyte A. Science for managing ecosystem services: Beyond the Millennium Ecosystem Assessment. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 2009;106(5):1305-1312. <https://doi.org/10.1073/pnas.0808772106>
13. Fischer G., Shah M., Tubiello F.N., van Velhuizen H. Socio-economic and climate change impacts on agriculture: an integrated assessment, 1990-2080. *Philos. Trans. R. Soc. Lond. B Biol. Sci.* 2005;360(1463):2067-2083. <https://doi.org/10.1098/rstb.2005.1744>
14. Kottawa-Arachchi J.D., Wijeratne M.A. Climate change impacts on biodiversity and ecosystems in Sri Lanka: a review. *Nature Conservation Research*. 2017;2(3):2-22. EDN: WZUHY Y. <https://dx.doi.org/10.24189/ncr.2017.042>
15. Scholes R.J. Climate change and ecosystem services. *WIREs Clim. Change*. 2016;7(4):537-550. EDN: YDHCNC. <https://doi.org/10.1002/wcc.404>
16. Meredov E.N., Khatamova M.Ch., Achilova G.A. the impact of climate change on biodiversity and ecosystem services in desert areas. *Inter Science*. 2024;(37-1):50-52. (In Russ.). EDN: TPLEGP.
17. Walther G.R., Post E., Convey P., Menzel A., Parmesan C., Beebee T.J., Fromentin J.-M., Hoegh-Guldberg O., Bairlein F. Ecological responses to recent climate change. *Nature*. 2002;416:389-395. <https://doi.org/10.1038/416389a>
18. Zabel F., Putzenlechner B., Mauser W. Global agricultural land resources - a high resolution suitability evaluation and its perspectives until 2100 under climate change conditions. *PLoS ONE*. 2014;9(9):e107522. EDN: YBGMRP. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0107522>
19. Chernykh D.V., Samoilo G.S. *Landscapes of Altai (Altai Republic and Altai Krai): Map M-1:500 000*. Novosibirsk: Novosibirsk Cartographic Factory; 2011. 4 p. (In Russ.).
20. Bobylev S.N., Bukvareva E.N., Grabovsky V.I. [et al.]. *Ecosystem services of Russia: prototype of the national report*. Moscow: Center for Wildlife Conservation; 2016. Vol. 1. 148 p. (In Russ.). EDN: YRZSHL.

Информация об авторах

О.В. Журавлёва – кандидат географических наук, доцент кафедры географии и природопользования ГАГУ.

А.В. Каранин – кандидат географических наук, доцент кафедры географии и природопользования ГАГУ.

М.Г. Сухова – доктор географических наук, доцент, проректор по НИИД ГАГУ; старший научный сотрудник ИВЭП СО РАН.

Information about the authors

O.V. Zhuravleva – Candidate of Science (Geography), Associate Professor of the Department of Geography and Environmental Management, GASU.

A.V. Karanin – Candidate of Science (Geography), Associate Professor of the Department of Geography and Environmental Management, GASU.

M.G. Sukhova – Doctor of Science (Geography), Associate Professor, Vice-Rector for Research and Development GASU; Senior Researcher, IWEP SB RAS.

Статья поступила в редакцию 15.08.2025; одобрена после рецензирования 24.09.2025; принята к публикации 11.11.2025.
The article was submitted 15.08.2025; approved after reviewing 24.09.2025; accepted for publication 11.11.2025.

Научная статья

УДК 911.2:556:11

<https://doi.org/10.18522/1026-2237-2026-1-103-117>

ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКОЕ РАЙОНИРОВАНИЕ МЕЛОВЫХ ПОДЗЕМНЫХ ВОД СЕВЕРО-ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ ДОНЕЦКО-ДОНСКОГО АРТЕЗИАНСКОГО БАСЕЙНА

Елена Васильевна Леонтьева¹, Василий Николаевич Квачев²

^{1, 2} Белгородский государственный национальный исследовательский университет, Белгород, Россия

¹ leonteva@bsuedu.ru

² kvachev@bsuedu.ru

Аннотация. Усовершенствован таксонометрический ряд гидрогеологического районирования путем введения таксонов: подрайон (порядок гидрогеологической структуры – IV), участок (порядок гидрогеологической структуры – V), подучасток (порядок гидрогеологической структуры – VI) для условий ненарушенного и нарушенного режима. Впервые в верхнемеловых водоносных карбонатно-терригенных горизонтах и комплексах К₂ в пределах Донецко-Донского артезианского бассейна в результате проведенных исследований выделен северо-восточный подрайон К₂ – гидрогеологическая структура IV порядка, представленная трансграничной водосборной площадью подземного стока, и три участка: 1 – Оскольский, 2 – Северско-Донецкий, 3 – Ворскло-Псельский – гидрогеологические структуры V порядка, представленные региональными водосборными площадями подземного стока. В верхне-нижнемеловом водоносном терригенном горизонте К₁₋₂ в пределах Донецко-Донского артезианского бассейна в результате проведенных исследований выделен также северо-восточный подрайон К₁₋₂ – гидрогеологическая структура IV порядка. Методика выделения таксонов основывалась на цифровизации исходных материалов распределения изопьез с шагом 20 м и представлении их в виде грида методом кригинга, реконструкции изолиний равных напоров с шагом 5 м с учетом области развития меловых подземных вод в северо-восточной части Донецко-Донского артезианского бассейна, трассирования границ таксонов по водоразделам бассейнов подземного стока.

Ключевые слова: Донецко-Донской артезианский бассейн, таксон, гидрогеологическое районирование, гидрогеологическая структура

Для цитирования: Леонтьева Е.В., Квачев В.Н. Гидрогеологическое районирование меловых подземных вод северо-восточной части Донецко-Донского артезианского бассейна // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2026. № 1. С. 103–117. <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2026-1-103-117>

Благодарности: исследование выполнено в рамках госзадания FZWG-2025-0006.

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

Original article

HYDROGEOLOGICAL ZONING OF CRETACEOUS GROUNDWATERS IN THE NORTHEASTERN PART OF THE DONETS-DON ARTESIAN BASIN

Elena V. Leontyeva¹, Vasily N. Kvachev²

^{1, 2} Belgorod State National Research University, Belgorod, Russia

¹ leonteva@bsuedu.ru

² kvachev@bsuedu.ru

© Леонтьева Е.В., Квачев В.Н., 2026

Abstract. The taxonomic series for hydrogeological zoning has been refined by introducing the following taxa: subregion (a hydrogeological structure of the IV order); area (a hydrogeological structure of the V order); subarea (a hydrogeological structure of the VI order), for conditions of both undisturbed and disturbed regimes. For the first time, as a result of the conducted research within the Donets-Don artesian basin, the north-eastern K_2 subregion - a hydrogeological structure of the IV order, represented by a transboundary groundwater catchment area - has been identified in the Upper Cretaceous carbonate-terrigenous aquifers and complexes. Furthermore, three areas have been delineated: 1 - the Oskol, 2 - the Seversky Donets, and 3 - the Vorskla-Psel, which are hydrogeological structures of the V order, represented by regional groundwater catchment areas. Within the Upper-Lower Cretaceous terrigenous aquifer K_{1-2} of the Donets-Don artesian basin, the northeastern K_{1-2} subregion - a hydrogeological structure of the IV order - has also been identified as a result of this research. The methodology for delineating the taxa was based on the digitization of initial data on the distribution of isopiezies with a 20 m interval and their representation as a grid using the kriging method, reconstruction of equipotential lines with a 5 m interval considering the area of Cretaceous groundwater development in the northeastern part of the Donets-Don artesian basin, and tracing the boundaries of the taxa along the watersheds of the groundwater catchment basins.

Keywords: Donets-Don artesian basin, taxon, hydrogeological zoning, hydrogeological structure

For citation: Leontyeva E.V., Kvachev V.N. Hydrogeological Zoning of Cretaceous Groundwaters in the Northeastern Part of the Donets-Don Artesian Basin. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2026;(1):103-117. (In Russ.). <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2026-1-103-117>

Acknowledgements: the research was carried out within the framework of the state assignment FZWG-2025-0006.

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

Введение

Подземные воды меловых водоносных комплексов в северо-восточной части Донецко-Донского артезианского бассейна приурочены к территории Белгородской, Курской, Воронежской областей Российской Федерации (РФ) и на юге выходят за их пределы, таким образом, относятся к типу трансграничных, межрегиональных и являются основными источниками хозяйственно-питьевого водоснабжения.

Меловые подземные воды рассматриваемого региона находятся под интенсивным антропогенным прессингом, обусловленным высокой степенью техногенной нагрузки, включая дренажные системы, хвостохранилища горнопромышленного (Лебединский, Стойленский, Яковлевский горно-обогатительные комбинаты, «КМА-руда»), металлургического (Оскольский металлургический комбинат) и сельскохозяйственного профиля, подземные рудники, интенсивное развитие водоемких производств агропромышленного комплекса, индивидуальной жилищной застройки.

Данный процесс сопровождается трансформацией подземной гидросферы, прежде всего через нарушение гидродинамического равновесия, истощение и загрязнение подземных вод. При этом интенсивную техногенную нагрузку испытывают все зоны активного, замедленного и затрудненного водообмена земной коры.

Так, только на территории Белгородской области общий объем добычи и извлечения подземных вод водозаборами различного назначения и ведомственной принадлежности, дренажными системами, по данным государственного мониторинга геологической среды, составляет около 0,7 млн м³/сут, а модуль добычи и извлечения – 28,43 м³/(сут·км), этот же объем стоков после использования сбрасывается в поверхностные и подземные водные объекты [1]. Интенсивность техногенной нагрузки на ресурсы подземных вод Белгородской области в пределах РФ уступает только Москве и находится практически на уровне Московской области. При этом хозяйственно-питьевое водоснабжение Белгородской области на 95 % обеспечивается за счёт подземных вод.

Управление подземными водными ресурсами организовано по административному принципу, без учета гидрогеологических особенностей, степени нагрузки и состояния подземных вод

в пределах бассейнов подземного стока различного порядка природного и антропогенного генезиса и характера взаимодействия их с бассейнами поверхностного стока.

Специфика условий залегания подземных вод на северо-востоке Белгородской и южной части Курской областей заключается в том, что первый от поверхности эксплуатируемый альб-сеноманский водоносный горизонт и турон-маастрихтский на большей части территории являются незащищенными от поступления загрязнений от хозяйственной, аграрной и промышленной деятельности с поверхности водосборов, это определяет их уязвимость и требует постоянного мониторинга и решения задач рационального и ответственного водопользования. В силу того, что профильный информационный ресурс из федеральных источников [1] имеет обобщенный вид, ограниченный объем и степень информативности неприменимы при выработке и принятии управляющих решений для устойчивого развития региона на уровне субъектов Федерации. В связи с этим НИУ БелГУ в 2024 г. выступил с инициативой разработки для рассматриваемого региона «Концепции современного формирования ресурсов природных вод и вопросов их рационального использования для решения региональных проблем водопользования», которая приобрела статус госзадания FZWG-2025-0006. Приведенные в статье исследования выполнены в рамках данного госзадания и являются актуальными для его реализации.

Основная задача – обоснование гидрогеологических границ исследования меловых водоносных горизонтов в северо-восточной части Донецко-Донского артезианского бассейна и их гидрогеологическое районирование.

Данная задача решалась применительно к ненарушенным гидродинамическим условиям для того, чтобы сравнить с современным состоянием и определить степень трансформации природных гидрогеологических условий под влиянием антропогенной нагрузки.

В основу обоснования этих гидрогеологических границ положены существующий таксономический ряд гидрогеологического районирования, область развития водоносных комплексов и гидродинамика фильтрации подземных вод применительно к ненарушенным условиям.

Материалы исследования

Следует отметить, что систематизированное изучение гидрогеологических условий Донецко-Донского артезианского бассейна имеет почти вековую историю, а его результаты отражены в различных публикациях [2–9]. Из них следует выделить гидрогеологический очерк Донецкого бассейна, состоящий из 12 статей [2], и две монографии [3, 4].

В 2002 г. во ВСЕГИНГЕО В.В. Куренным были составлены гидрогеологические карты водоносных комплексов докайнозойских и кайнозойских отложений масштаба 1: 500 000 отдельно на Белгородскую, Курскую, Воронежскую области, которые в электронном виде опубликованы в базе знаний Института геоэкологии РАН [5].

В период с 1990 г. и по настоящее время вопросам общего гидрогеологического районирования посвящены работы Л.А. Островского, В.В. Куренного, Ю.Б. Челидзе, В.А. Барона, С.Л. Пугача и др. [9–14]. Данными авторами для территории РФ были составлены карты гидрогеологического районирования различной направленности масштаба 1: 10 000 000, 1: 2 500 000 и изданы, в том числе в электронном виде, ВСЕГИНГЕО, Гидроспецгеологией, размещены в Российском федеральном геологическом фонде [15], Всероссийском научно-исследовательском геологическом институте им. А.П. Карпинского [16]. Следует отметить, что изданные карты для субъектов РФ и на межсубъектном уровне малоинформативны для решения задач устойчивого развития регионов.

Днепровский и Донецко-Донской артезианские бассейны, являющиеся бассейнами III порядка в пределах Днепровско-Донецкого артезианского бассейна (гидрогеологической структуры II порядка), на карте гидрогеологического районирования территории РФ масштаба 1:2 500 000 не нашли отражение из-за ее мелкомасштабности [15]. К тому же в ранее выполненных исследованиях имеющийся таксономический ряд объектов районирования предусмотрен только для гидрогеологических структур до III порядка включительно. В то же время современные технологии изучения гидрогеологических процессов в зоне влияния горных производств и водоотбора на объектах хозяйственной деятельности [17–20] требуют детализации границ развития гидрогеологических структур природного и антропогенного генезиса, поэтому данные исследования весьма актуальны.

В качестве исходных материалов исследований использованы:

- таксономический ряд гидрогеологического районирования (табл. 1);
- карта распространения изопьез с шагом 20 м и уровней в скважинах турон-маастрихтского и альб-сеноманского водоносных горизонтов (рис. 1) [4];
- карты водоносных комплексов докайнозойских отложений масштаба 1: 500 000 Белгородской, Курской, Воронежской областей (рис. 2, 3) [5].

Таблица 1 / Table 1

**Таксономический ряд гидрогеологического районирования [10]
 / Taxonomic series of hydrogeological zoning [10]**

Таксон	Порядок гидрогеологических структур	Плита	Складчатые тектонические структуры	Щит
Провинция	I	Сложные артезианские бассейны плит	Сложные гидрогеологические складчатые области определенных тектонических циклов складчатости	Сложные гидрогеологические массивы щитов
Подпровинция (область)	II	Артезианские бассейны крупных синеклиз, прогибов, впадин. Предгорные артезианские бассейны краевых прогибов, предгорных впадин. Гидрогеологические складчатые области с пластовой фильтрацией подземных вод	Гидрогеологические складчатые области, гидрогеологические массивы, предгорные артезианские бассейны крупных гидрогеологических структур	Гидрогеологические складчатые области щитов, сложенных метаморфизованными осадочными породами (Алдано-Становой щит)
Район	III	Артезианские бассейны, соответствующие более мелким впадинам или характеризующиеся разнонаправленным подземным стоком	Межгорные и предгорные артезианские бассейны, соответствующие межгорным и предгорным впадинам, гидрогеологические массивы в пределах гидрогеологических складчатых областей	Межгорные артезианские бассейны и гидрогеологические массивы в пределах гидрогеологических складчатых областей щитов (Алдано-Становой щит)

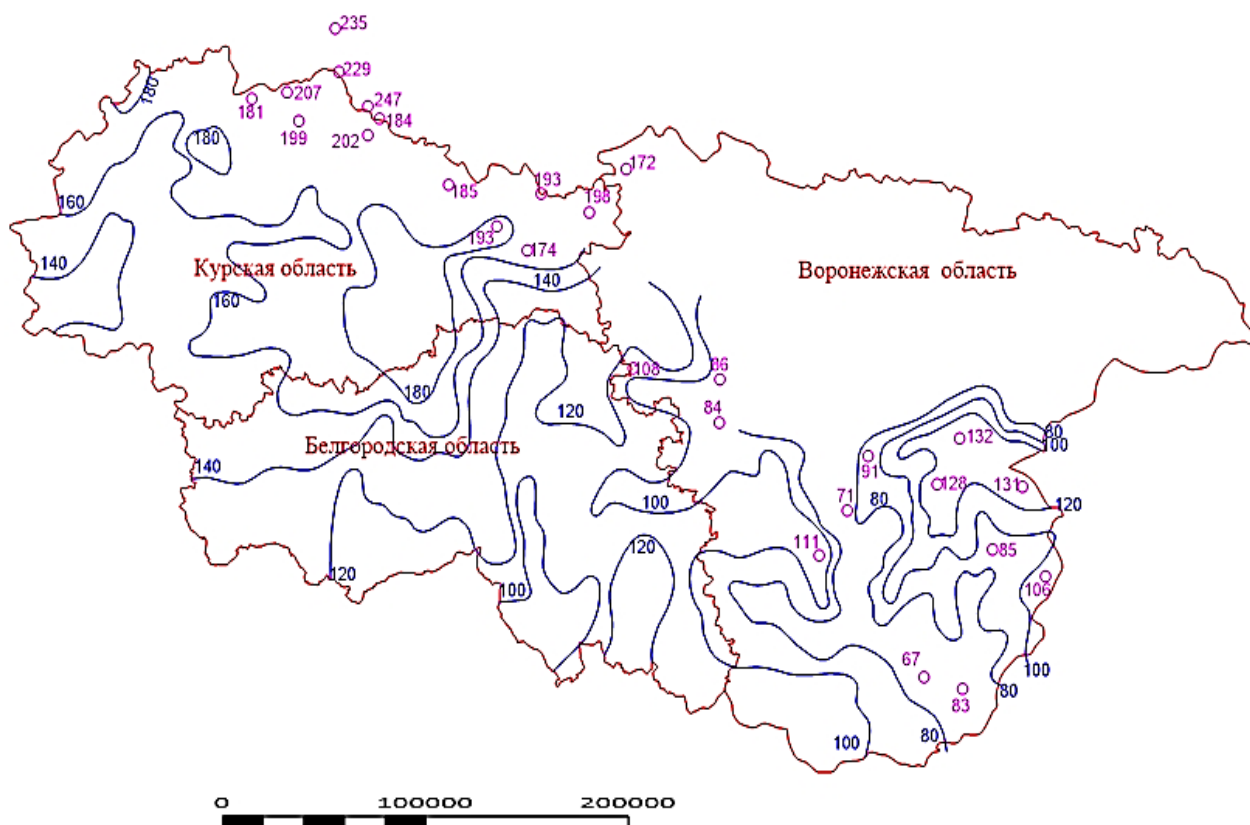
При этом В.В. Куренным в меловых отложениях выделены:

- верхнемеловые водоносные карбонатно-терригенные горизонты K_2 , представленные мелом маастрихтского, кампанского, сантонского, коньякского и туронского возраста;
- верхнемеловые водоупорные и слабоупорные карбонатно-терригенные горизонты K_2 , представленные мергелем, опоками, алевритами, глинами сантонского возраста;
- верхне-нижнемеловой водоносный терригенный горизонт K_{1-2} , представленный песками с прослоями фосфоритов, разнотернистыми песками с прослоями глин сеноманского и альбского возраста;
- нижнемеловой водоупорный терригенный горизонт K_1 , представленный песками с линзами песчаников, глин, алевритами, глинами с прослоями песков, песчаников аптского и неокомского возраста.

Как следует из рис. 2, обводненные меловые отложения отсутствуют в северной и восточной части Воронежской области.



а/а






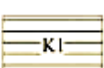



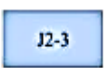

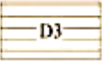







б/б

Рис. 1. Распределение изопьез и уровней в скважинах: а – турон-маастрихтского; б – альб-сеноманского водоносных горизонтов [4] / Fig. 1. Distribution of isopiez and water levels in wells: a - turonian-maastrichtian; b - albian-cenomanian aquifer [4]

УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ К ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИМ КАРТАМ

ДОКАЙНОЗОЙСКИХ ОТЛОЖЕНИЙ

	Верхнемеловые водоносные карбонатно-терригенные горизонты и комплексы		Верхнекаменноугольные-нижнепермские водоносные карбонатные комплексы
	Верхнемеловые водоупорные и слабоводоносные карбонатно-терригенные горизонты		Верхнекаменноугольные водоупорные терригенные горизонты
	Верхне-нижнемеловой водоносный терригенный горизонт		Верхнекаменноугольный водоносный карбонатный комплекс
	Нижнемеловой водоупорный терригенный горизонт		Среднекаменноугольные водоупорные терригенные горизонты
	Верхнеюрский-нижнемеловой слабоводоносный терригенный комплекс		Среднекаменноугольные водоносные карбонатные и терригенные комплексы
	Верхнеюрский-нижнемеловой водоносный терригенный комплекс		Нижнекаменноугольные водоупорные карбонатно-терригенный комплекс и терригенный горизонт
	Верхне-среднеюрский водоупорный терригенный горизонт		Нижнекаменноугольные водоносные карбонатно-терригенный комплексы и карбонатные горизонты
	Верхне-среднеюрские водоупорные терригенные горизонты		Верхнедевонские водоупорные карбонатно-терригенный комплекс и терригенные горизонты
	Среднеюрский слабоводоносный терригенно-карбонатный горизонт		Верхнедевонские водоносные карбонатно-терригенные комплексы и карбонатные горизонты
	Нижнеюрский водоупорный терригенный горизонт		Верхнедевонские слабоводоносные карбонатно и терригенные комплексы
	Верхнепермский-нижнетриасовый слабоводоносный карбонатно-терригенный комплекс		Среднедевонский слабоводоносный терригенный комплекс
	Верхнепермский водоносный карбонатный горизонт		
	Нижнепермский водоупорный карбонатно-сульфатный комплекс		

Границы погребенных водоносных горизонтов


	Водоносный сантонский терригенный горизонт		Слабоводоносный кембрийско-ордовикский карбонатно-терригенный комплекс
	Водоносный касимовский карбонатный комплекс		Слабоводоносный вендско-кембрийский терригенный комплекс
	Водоносный каширский карбонатный комплекс		Слабоводоносный рифейский терригенный комплекс
	Водоносный озерско-хованский карбонатный комплекс		
	Водоносный саргавско-семилюкский карбонатный комплекс		

Рис. 2. Условные обозначения к гидрогеологическим картам развития докайнозойских отложений в пределах Белгородской, Курской, Воронежской областей в редакции В.В. Куренного [5]

/ Fig. 2. Legend for the hydrogeological maps of the Pre-Cainozoic deposits development within the Belgorod, Kursk, and Voronezh regions, edited by V.V. Kurennoy [5]

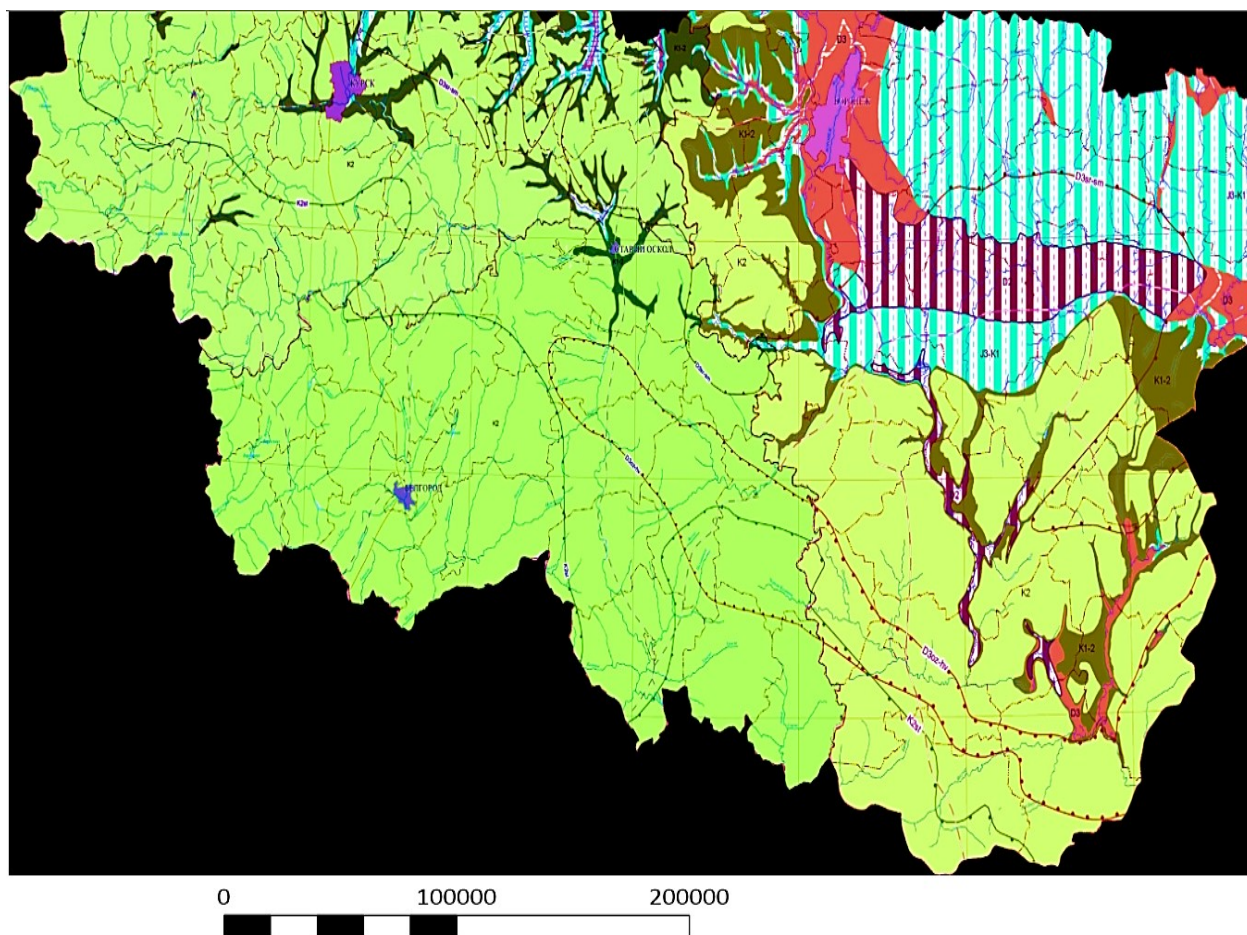


Рис. 3. Гидрогеологические карты развития докайнозойских отложений в пределах Белгородской, Курской, Воронежской областей в редакции В.В. Куренного [5] / Fig. 3. Hydrogeological maps of the Pre-Cainozoic deposits development within the Belgorod, Kursk, and Voronezh regions, edited by V.V. Kurennoy [5]

Методы исследований

Поскольку частью методики общего гидрогеологического районирования значится выделение площадей подземного стока путем трассирования границ по водоразделам бассейнов подземного стока, которое является довольно трудоемким процессом, то для его автоматизации авторами отработаны компьютерные технологии цифровизации полей распределения изолиний напоров и представление их в виде грида методом кригинга и затем создание на основе GRID-файла карты водоразделов. Компьютерные технологии базировались на использовании лицензионного программного обеспечения Digger и Surfer компании Golden Software.

Методы исследований включали:

- трансформацию сканов карт распространения изопьез турон-маастрихтского и альб-сеноманского водоносных горизонтов, карт водоносных комплексов докайнозойских и кайнозойских отложений масштаба 1: 500 000 Белгородской, Курской, Воронежской областей в систему координат Pulkovo 1942 / Gauss-Kruger CM 39E;
- векторизацию изопьез турон-маастрихтского и альб-сеноманского водоносных горизонтов, данных по скважинам, административных границ Белгородской, Курской и Воронежской областей;
- создание в картографическом комплексе Surfer гридов изопьез методом кригинга и их детальную реконструкцию с шагом 5 м в виде изолиний;
- формирование в картографическом комплексе Surfer границ водосборных площадей в турон-маастрихтском и альб-сеноманском водоносных горизонтах и линий стока с использованием команды Watershed и их пространственный анализ путем оверлея;
- усовершенствование классификации гидрогеологического районирования, в частности расширение ее таксонов для гидрогеологических структур IV–VI порядка.

Результаты исследования и их обсуждение

Таксономический ряд гидрогеологических структур IV–VI порядка. Поскольку исследуемая территория относится к Донецко-Донскому артезианскому бассейну III порядка, таксону район [10], авторами предложено в развитие существующего таксонометрического ряда с учетом преемственности дополнить его таксонами: подрайон, участок, подучасток (табл. 2).

Таблица 2 / Table 2

**Таксономический ряд гидрогеологических структур IV–VI порядка
 / Taxonomic series of hydrogeological structures of orders IV-VI**

Таксон	Порядок гидрогеологической структуры	Гидрогеологические структуры в условиях	
		ненарушенного режима	нарушенного режима
Подрайон	IV	Трансграничная водосборная площадь подземного стока водоносных горизонтов внутри структуры III порядка, сформированных дренирующим эффектом трансграничных водных артерий (пересекающих границы субъектов Федерации и (или) государственные границы)	Трансграничная депрессионная воронка водоносных горизонтов внутри структуры III порядка, сформированных дренирующим эффектом трансграничных водных артерий, крупных водозаборов, дренажных систем, пересекающих границы субъектов Федерации и (или) государственные границы
Участок	V	Региональная водосборная площадь подземного стока водоносных горизонтов внутри структуры IV порядка, сформированных дренирующим эффектом, кроме трансграничных, в том числе региональных, местных водных артерий, относящихся к типу малых рек	Региональная депрессионная воронка водоносных горизонтов внутри структуры IV порядка, сформированных, кроме трансграничных, дренирующим эффектом региональных, местных водных артерий, относящихся к типу малых рек, водозаборов, дренажных систем
Подучасток	VI	Местная водосборная площадь подземного стока водоносных горизонтов внутри структуры V порядка, сформированных дренирующим эффектом региональных, местных водных артерий, относящихся к типу малых рек, не выходящая за границы субъекта Федерации	Локальная депрессионная воронка купола растекания, площади подтопления сформированных дренирующим и инфильтрационным эффектом региональных, местных водных артерий, относящихся к типу малых рек, водозаборов, дренажных систем, гидротехнических сооружений и др. объектов, не выходящая за границы субъекта Федерации

Реконструкция изопьез турон-маастрихтского и альб-сеноманского водоносных горизонтов. Реконструкция изопьез турон-маастрихтского водоносного горизонта выполнена с сечением 5 м и наложена на гидрогеологические карты докайнозойских отложений в пределах их развития на территории РФ (рис. 4).

Полученная форма распределения изопьез в пределах верхнемеловых водоносных карбонатно-терригенных горизонтов K_2 позволила установить два явно выраженные региональных водораздела и одну впадину меридионального простираения. Один из них расположен в северной части рассматриваемой области фильтрации площадного типа с абсолютными отметками

пьезоизогипс 180–190 м, а второй – в восточной части линейного типа с отметками пьезоизогипс 190–125 м, между ними региональная впадина с абсолютными отметками пьезоизогипс 120–100 м. Площадной водораздел, околтуренный соответствующими пьезоизогипсами, охарактеризован как область питания, линейный водораздел околтурен водораздельной границей с территориями подземного стока р. Дон, а площадь впадины – областью разгрузки фильтрационного потока. Территория между водораздельными пространствами и областью разгрузки принята за область транзита.

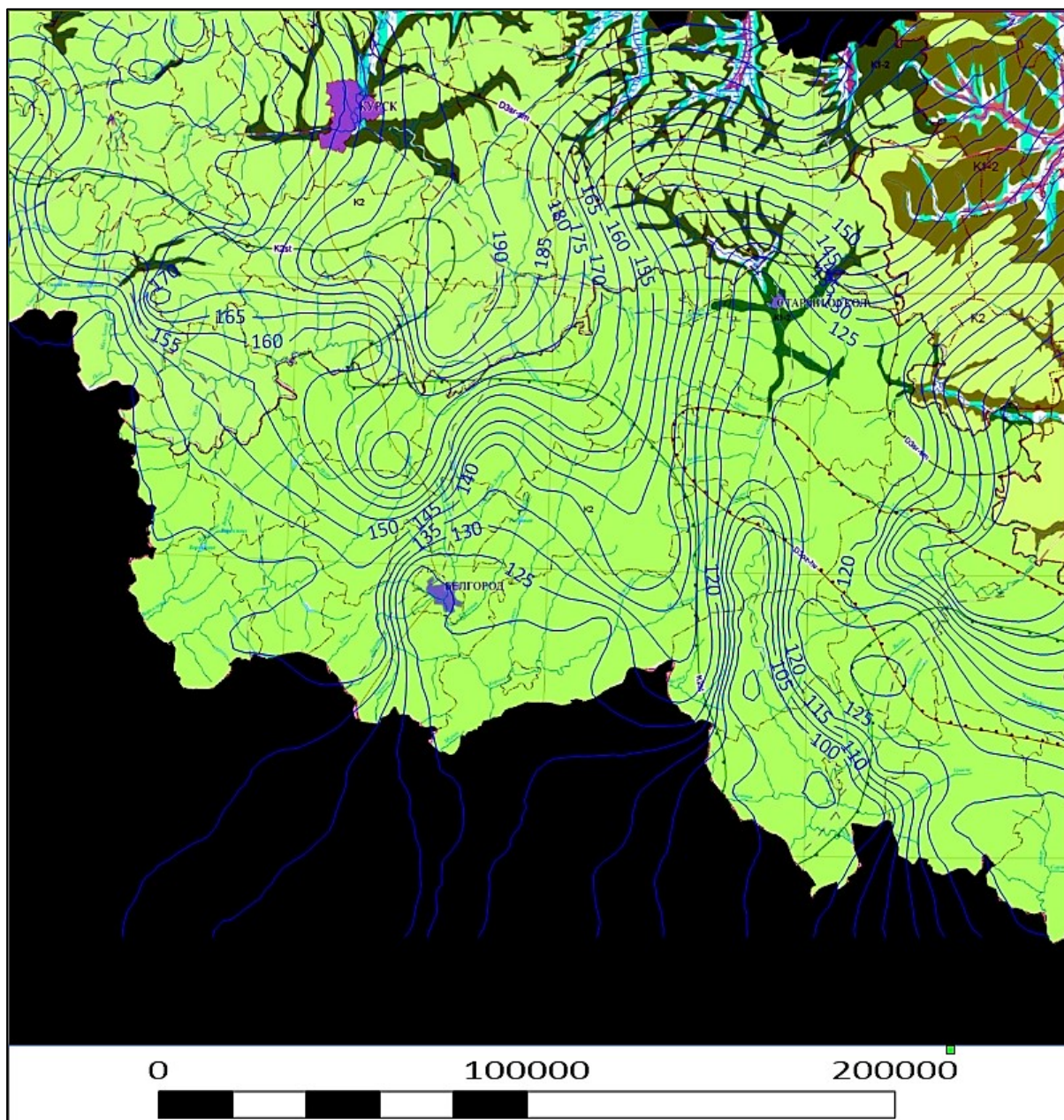


Рис. 4. Распределение пьезоизогипс в турон-маастрихтском водоносном горизонте с сечением 5 м / Fig. 4. Distribution of piezohypses in the turonian-maastrichtian aquifer with a contour interval of 5 m

Реконструкция изопьез альб-сеноманского водоносного горизонта также выполнена с сечением 5 м и наложена на гидрогеологическую карту докайнозойских отложений в пределах их развития на территории РФ (рис. 5).

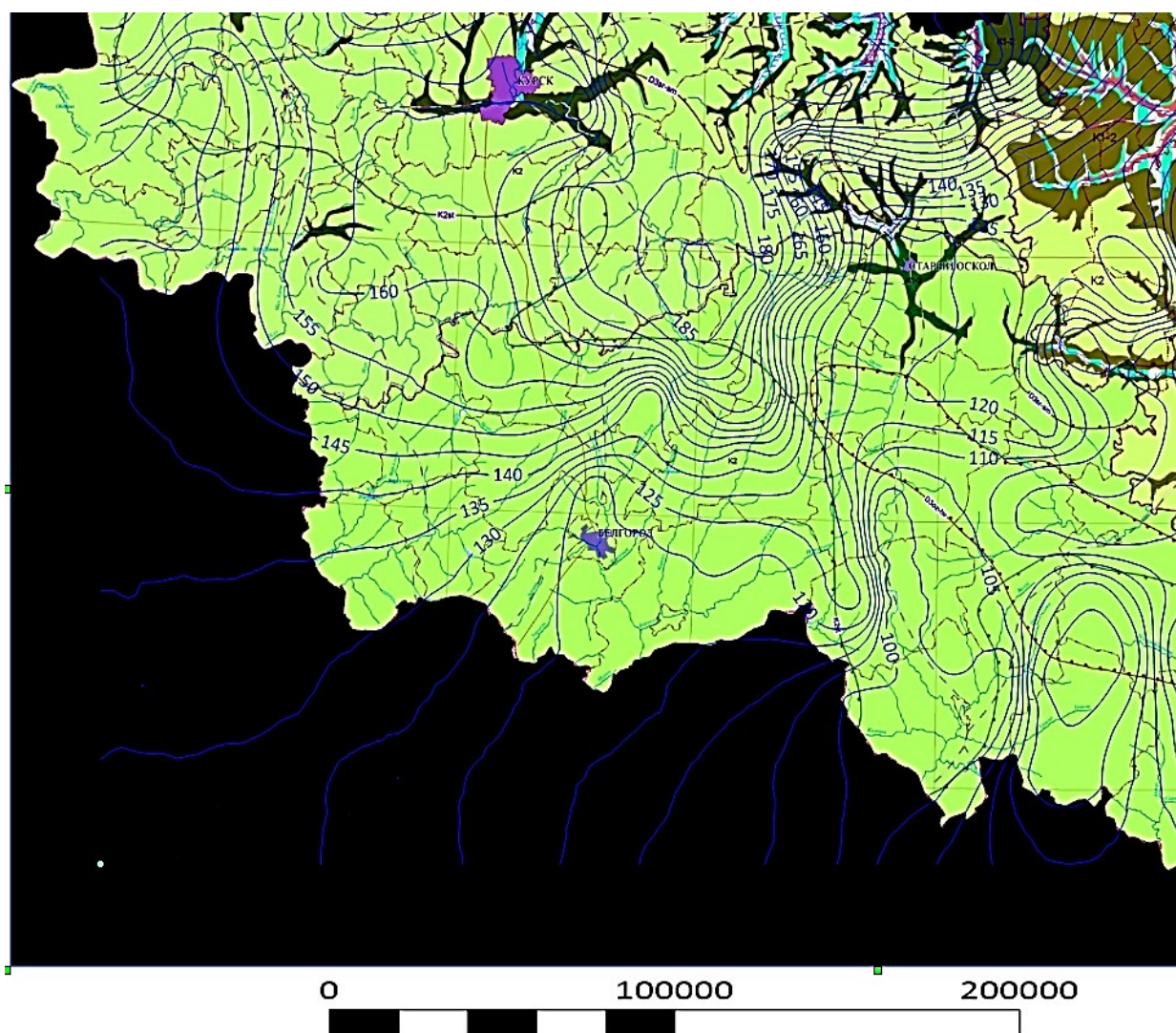


Рис. 5. Распределение пьезоизогипс в альб-сеноманском водоносном горизонте с сечением 5 м
 / Fig. 5. Distribution of piezoisohypses in the albian-cenomanian aquifer with a contour interval of 5 m

Полученная форма распределения изопьез в пределах верхне-нижнемелового водоносного терригенного горизонта K_{1-2} позволила установить также два явно выраженных региональных водораздела и одну впадину меридионального простирания. Один водораздел в северной части рассматриваемой области фильтрации площадного типа с абсолютными отметками пьезоизогипс 180–190 м, а второй – в восточной части линейного типа с отметками пьезоизогипс 190–110 м, между ними расположена региональная впадина с абсолютными отметками пьезоизогипс 120–100 м. Площадной водораздел, оконтуренный соответствующими пьезоизогипсами, охарактеризован как область питания, линейный оконтурен водораздельной границей с территорией подземного стока р. Дон, а площадь впадины – областью разгрузки фильтрационного потока. Территория между водораздельными пространствами и областью разгрузки принята за область транзита.

Районирование северо-восточной части Донецко-Донского артезианского бассейна. В процессе компьютерной обработки гридов изопьез турон-маастрихтского водоносного горизонта, относящегося к типу грунтовых вод, в верхнемеловых водоносных карбонатно-терригенных горизонтах K_2 выделен один подрайон – гидрогеологическая структура IV порядка, представленная трансграничной водосборной площадью подземного стока – и три участка – гидрогеологические структуры V порядка, представленные региональными водосборными площадями подземного стока (табл. 2, рис. 6).

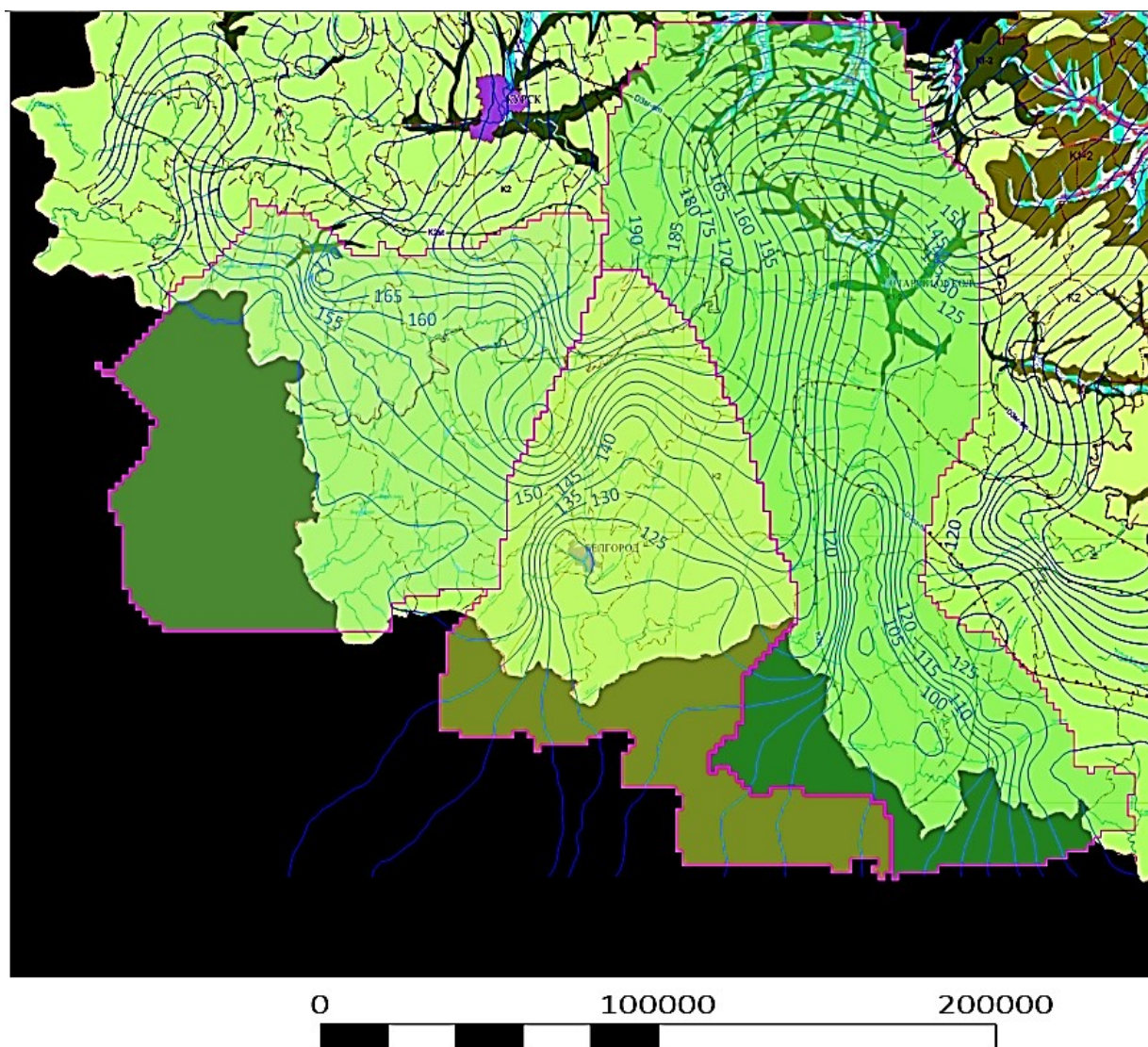


Рис. 6. Границы водосборных площадей турон-маастрихтского водоносного горизонта.
/ Fig. 6. Watershed boundaries of the turonian-maastrichtian aquifer

Подрайон назван северо-восточным – K_2 по местоположению в пределах Донецко-Донского артезианского бассейна и гидрогеологической стратификации, а участки наименованы по основным дренирующим водным артериям: 1 – Оскольский; 2 – Северско-Донецкий; 3 – Ворсколо-Псельский. Границами подрайона и участков являются водораздельные линии, ортогональные к изопьезам.

В административном отношении водосборные площади подземного стока подрайона и участков приурочены к восточной и южной частям Курской области, охватывают Белгородскую область, за исключением ее восточной части, и южнее выходят за пределы РФ.

В процессе компьютерной обработки гридов изопьез альб-сеноманского водоносного горизонта, относящегося к типу межпластовых вод, в верхне-нижнемеловом водоносном терригенном горизонте K_{1-2} выделен один подрайон – гидрогеологическая структура IV порядка без участков, поскольку данный тип вод меньше подвержен дренированию поверхностными водными артериями, представлен трансграничной водосборной площадью подземного стока (табл. 2, рис. 7).

Границами подрайона являются водораздельные линии, ортогональные к изопьезам.

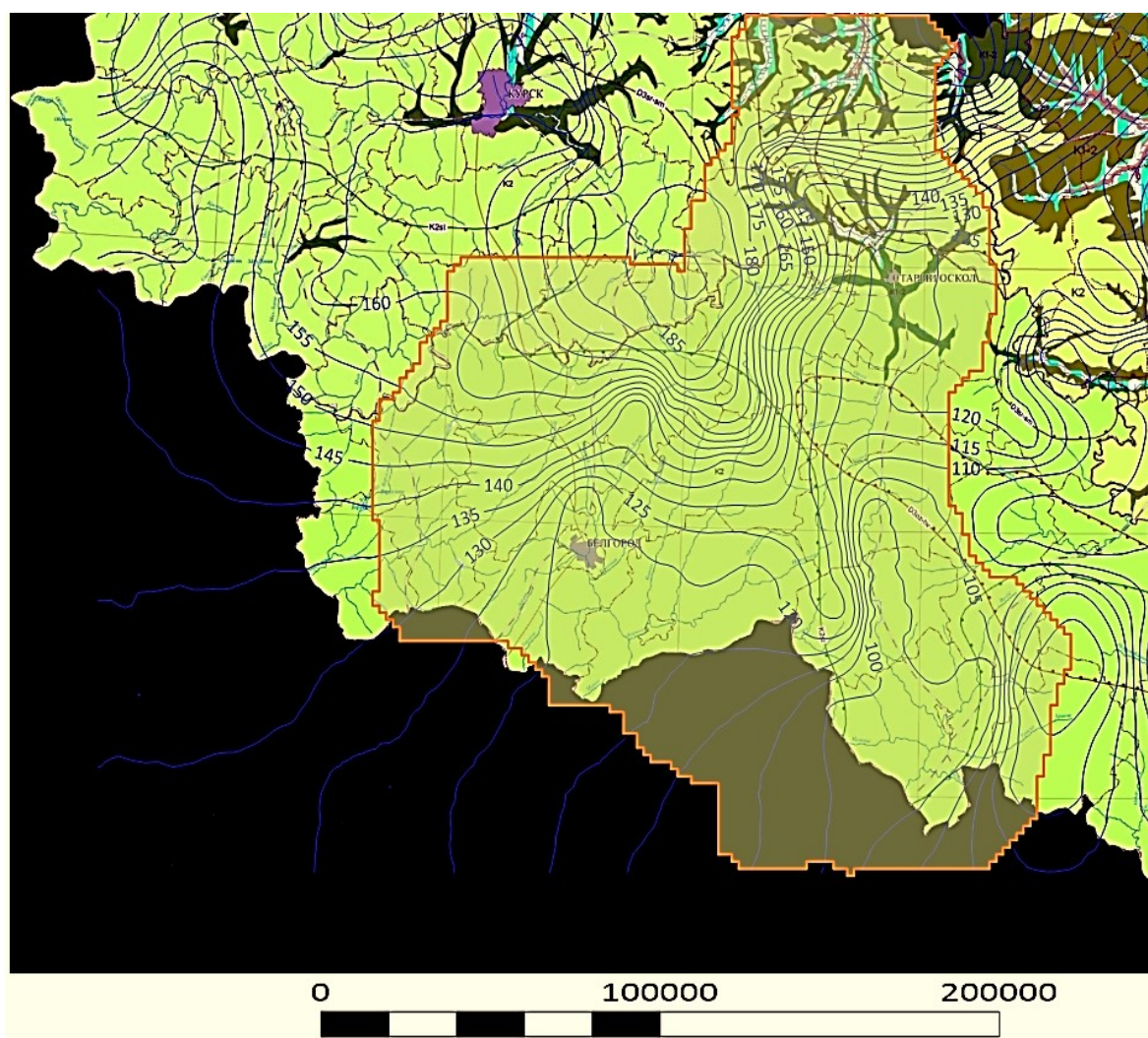


Рис. 7. Границы водосборных площадей альб-сеноманского водоносного горизонта /
Fig. 7. Watershed boundaries of the albian-cenomanian aquifer

Подрайон назван северо-восточным K_{1-2} по местоположению в пределах Донецко-Донского артезианского бассейна и гидрогеологической стратификации.

В административном отношении водосборная площадь подземного стока подрайона также приурочена к восточной и южной частям Курской области, охватывает Белгородскую область, за исключением ее восточной части, и южнее выходит за пределы РФ.

Пространственное соотношение подрайонов северо-восточного K_2 и северо-восточного K_{1-2} , а также Оскольского, Северско-Донецкого и Ворскло-Псельского участков отображено на рис. 8. Северные, восточные и южные границы подрайонов практически совпадают, а западные имеют значительные расхождения, что необходимо учитывать при дальнейших исследованиях.

Заключение

1. Авторами дополнен существующий таксонометрический ряд гидрогеологического районирования с учетом преимущества таксонами: подрайон – порядок гидрогеологической структуры – IV; участок – порядок гидрогеологической структуры – V; подучасток – порядок гидрогеологической структуры – VI для условий ненарушенного и нарушенного режима.

2. Разработана методика автоматизации выделения таксонов, которая основывалась на цифровизации исходных материалов распределения изопьез с шагом 20 м и представлении их в виде грида методом кригинга, реконструкции изолиний равных напоров с шагом 5 м с учетом области развития меловых подземных вод в северо-восточной части Донецко-Донского артезианского бассейна, трассирования границ таксонов по водоразделам бассейнов подземного стока.

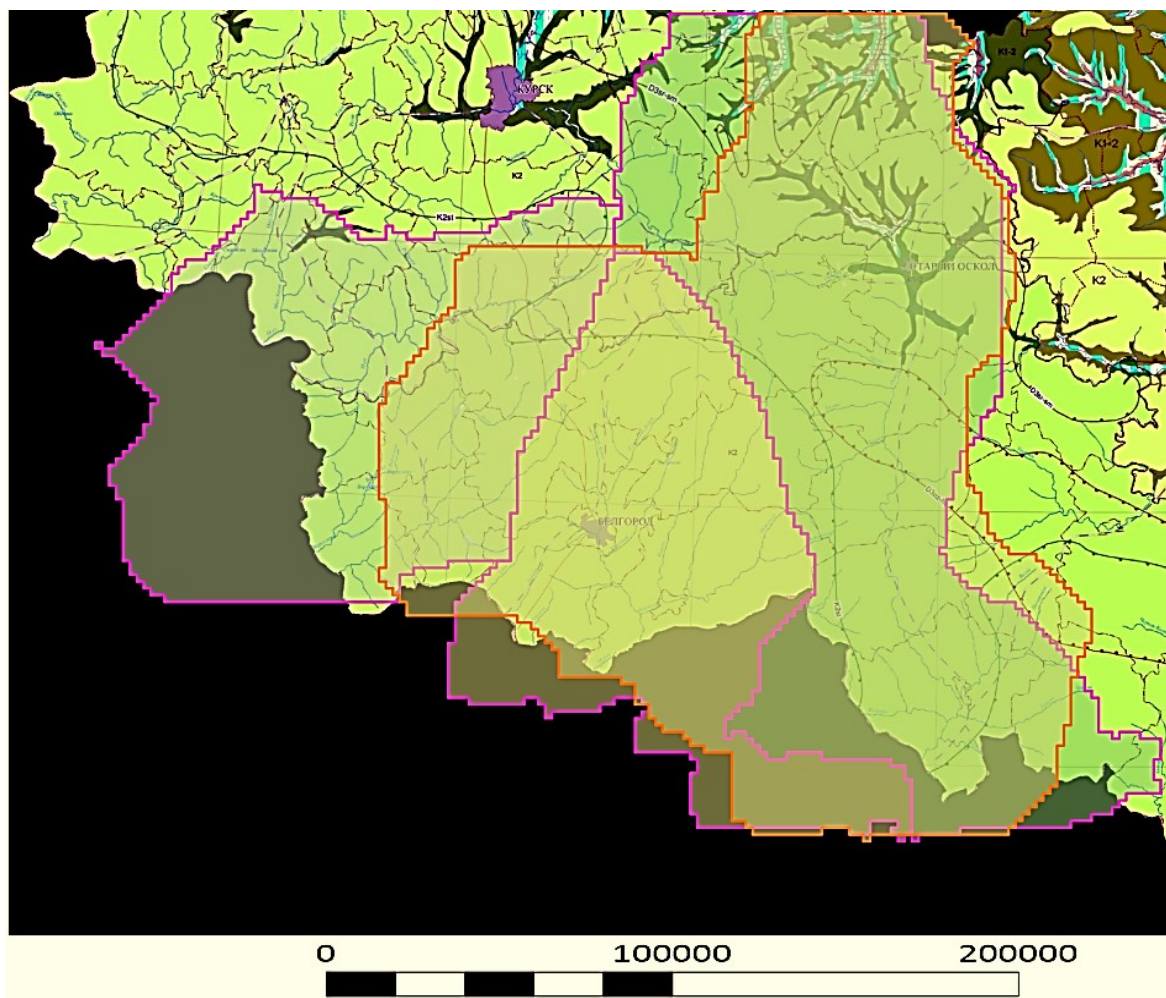


Рис. 8. Пространственное соотношение подрайонов и участков
/ Fig. 8. Spatial relationship of subdistricts and site.

3. В верхнемеловых водоносных карбонатно-терригенных горизонтах и комплексах K_2 в пределах Донецко-Донского артезианского бассейна в результате проведенных исследований выделен северо-восточный подрайон K_2 (гидрогеологическая структура IV порядка, представленная трансграничной водосборной площадью подземного стока) и три участка: 1 – Оскольский, 2 – Северско-Донецкий, 3 – Ворскло-Псельский (гидрогеологические структуры V порядка, представленные региональными водосборными площадями подземного стока).

4. В верхне-нижнемеловом водоносном терригенном горизонте K_{1-2} в пределах Донецко-Донского артезианского бассейна в результате проведенных исследований выделен также северо-восточный подрайон K_{1-2} – гидрогеологическая структура IV порядка.

Список источников

1. Информационный бюллетень о состоянии недр на территории Центрального федерального округа за 2024 г. М.: Гидроспецгеология. 2025. Вып. 30. С. 158. URL: https://geomonitoring.ru/download/IV/2025_cfo.pdf (дата обращения: 20.08.2025).
2. Гидрогеологический очерк Донецкого бассейна / под ред. В.С. Попова, Н.А. Родыгина, Д.И. Щеголева. М.; Л.: Геол. изд-во Гл. геол.-развед. упр., 1930. 292 с.
3. Геология, гидрогеология и железные руды бассейна Курской магнитной аномалии (КМА). Т. II: Гидрогеология и инженерная геология / под ред. А.Т. Бобрышева. М.: Недра, 1972. 480 с.
4. Гидрогеология СССР. Т. 4: Воронежская область, Курская область, Белгородская область, Брянская область, Орловская область, Липецкая область, Тамбовская область / под ред. А.Т. Бобрышева, М.Р. Никитина, Д.С. Соколова, Е.Г. Чаповского. М.: Недра, 1972. 499 с.

5. База знаний. Карты. Институт геоэкологии РАН. URL: <http://hgepro.ru/mapgis/start.html> (дата обращения: 21.08.2025).
6. Смолянинов В.М. Подземные воды Центрально-Черноземного региона: условия их формирования и использование. Воронеж: Истоки, 2003. 240 с.
7. Квачев В.Н. Гидрогеологическая стратификация и районирование Белгородской области для целей водоснабжения // Вестн. Воронежского ун-та. Геология. 2004. № 2. С. 194–204. EDN: NVPXIS.
8. Петруша В.Я. Формирование эксплуатационных запасов подземных вод мезо-кайнозоя Донецко-Донского артезианского бассейна и использование их для водоснабжения (в пределах Рост. обл.): автореф. дис. ... канд. геол.-минер. наук. Новочеркасск, 1973. 28 с.
9. Скиданов А.Т., Бубнова Г.К., Тетюхин В.В. Особенности формирования подземных вод в породах мело-мергельной толщи Северо-Восточного крыла Днепровско-Донецкого артезианского бассейна // Экологическая геология: теория, практика и региональные проблемы: материалы III междунар. науч.-практ. конф. / под ред. И.И. Косиновой. Воронеж, 2013. С. 267–270.
10. Челидзе Ю.Б., Барон В.А., Пугач С.Л., Кокорева С.В. Общее гидрогеологическое районирование как основа системного картографирования, изучения, использования и оценки состояния подземных вод России // Разведка и охрана недр. 2015. № 5. С. 41–50. EDN: ТТКВИН.
11. Островский Л.А., Антыпко Б.Е., Колюхова Т.А. Методические основы гидрогеологического районирования территории СССР. М.: Недра, 1990. 238 с.
12. Островский Л.А., Колюхова Т.А., Пугач С.Л., Шнак А.А. Карта гидрогеологического районирования Российской Федерации масштаба 1:2 500 000. М.: ВСЕГИНГЕО, Геомониторинг, 2001.
13. Пугач С.Л., Кокорева С.В. Основные положения и принципы унифицированной гидрогеологической стратификации гидрогеологических структур территории Российской Федерации // Разведка и охрана недр. 2013. № 10. С. 25–29. EDN: RDYUXR.
14. Лукьянчиков В.М., Плотникова Р.И., Челидзе Ю.Б., Егоров Т.С., Еришов В.В., Кашина Н.П. Результаты и проблемы государственного гидрогеологического картографирования // Разведка и охрана недр. 2019. № 3. С. 48–55. EDN: ZCDJCP.
15. Карта гидрогеологического районирования территории Российской Федерации масштаба 1:2 500 000 (для ведения мониторинга подземных водных объектов) URL: <https://rfgf.ru/catalog/docview.php?did=c883ec9081347a29677c4f50f2644d5f> (дата обращения: 21.08.2025).
16. Карта водообменных бассейнов зоны свободного водообмена. URL: https://karpinskyinstitute.ru/info/archiv_sv_maps/492743/492743_2-10.jpg (дата обращения: 21.08.2025).
17. Леонтьева Е.В., Квачев В.Н. Цифровизация гидрогеологических процессов в горнодобывающей промышленности // Горн. журн. 2020. № 10. С. 95–100. EDN: YKGXNY. <https://doi.org/10.17580/gzh.2020.10.11>
18. Леонтьева Е.В., Квачев В.Н. Способы и методические аспекты автоматизации гидрогеологического мониторинга на горнодобывающих производствах // Горн. журн. 2022. № 11. С. 44–51. EDN: XMALNS. <https://doi.org/10.17580/gzh.2022.11.07>
19. Леонтьева Е.В., Погорельцева Е.И., Квачев В.Н. Технологические аспекты создания концептуальных 3D-моделей гидрогеологических объектов и процессов на примере Стойленского ГОКа // Горн. журн. 2024. № 10. С. 83–89. EDN: KMRTRX. <https://doi.org/10.17580/gzh.2024.10.12/>
20. Квачев В.Н., Леонтьева Е.В. Водоснабжение и инженерные мелиорации: учеб. пособие. М.: Вологда: Инфра-Инженерия, 2024. 277 с.

References

1. *Information Bulletin on the State of the Subsoil within the Central Federal District for 2024*. Moscow: Hydrospeitsgeology; 2025. Iss. 30. 158 p. Available from: https://geomonitoring.ru/download/IB/2025_cfo.pdf [Accessed 20th August 2025]. (In Russ.).
2. Popov V.S., Rodygin N.A., Shchegolev D.I., eds. *Hydrogeological outline of the Donets Basin*. Moscow; Leningrad: Geological Publishing House of the Main Geological and Exploration Department; 1930. 292 p. (In Russ.).
3. Bobryshev A.T., ed. *Geology, hydrogeology and iron ores of the Kursk Magnetic Anomaly (KMA) basin. Vol. II: Hydrogeology and engineering geology*. Moscow: Bowels; 1972. 480 p. (In Russ.).
4. Bobryshev A.T., Nikitin M.R., Sokolov D.S., Chapovsky E.G., eds. *Hydrogeology of the USSR. Vol. 4: Voronezh Region, Kursk Region, Belgorod Region, Bryansk Region, Oryol Region, Lipetsk Region, Tambov Region*. Moscow: Bowels; 1972. 499 p. (In Russ.).
5. *Knowledge Base. Maps. Institute of Geoecology of the Russian Academy of Sciences*. Available from: <http://hgepro.ru/mapgis/start.html> [Accessed 21st August 2025]. (In Russ.).
6. Smolyaninov V.M. *Groundwater of the Central Chernozem Region: conditions of their formation and use*. Voronezh: Origins; 2003. 240 p. (In Russ.).

7. Kvachev V.N. Hydrogeological stratification and zoning of the Belgorod Region for water supply purposes. *Bulletin of Voronezh University. Geology*. 2004;(2):194-204. (In Russ.). EDN: NVPXIS.
8. Petrusha V.Ya. *Formation of operational groundwater reserves in the meso-cenozoic of the Donets-Don artesian basin and their use for water supply (within the Rostov Region)*. Abstract of PhD thesis. Novocherkassk, 1973. 28 p. (In Russ.).
9. Skidanov A.T., Bubnova G.K., Tetyukhin V.V. Features of groundwater formation in the Chalk-Marl sequence of the North-Eastern flank of the Dnieper-Donets Artesian Basin. *Ecological geology: theory, practice and regional problems*. Materials of the 3rd International Scientific-Practical Conference. I.I. Kosinov (ed.). Voronezh, 2013:267-270. (In Russ.).
10. Chelidze Yu.B., Baron V.A., Pugach S.L., Kokoreva S.V. General hydrogeological zoning as a basis for systemic mapping, study, use and assessment of the state of groundwater in Russia. *Exploration and Protection of Mineral Resources*. 2015;(5):41-50. (In Russ.). EDN: TTKBIIH.
11. Ostrovsky L.A., Antypko B.E., Konyukhova T.A. *Methodological foundations of hydrogeological zoning of the USSR territory*. Moscow: Bowels; 1990. 238 p. (In Russ.).
12. Ostrovsky L.A., Konyukhova T.A., Pugach S.L., Shpak A.A. *Map of hydrogeological zoning of the Russian Federation, Scale 1:2,500,000*. Moscow: All-Union Research Institute of Hydrogeology and Engineering Geology, Geomonitoring; 2001. (In Russ.).
13. Pugach S.L., Kokoreva S.V. Main provisions and principles of a unified hydrogeological stratification of hydrogeological structures of the Russian Federation territory. *Exploration and Protection of Mineral Resources*. 2013;(10):25-29. (In Russ.). EDN: RDYUXR.
14. Lukyanchikov V.M., Plotnikova R.I., Chelidze Yu.B., Egorov T.S., Ershov V.V., Kashina N.P. Results and problems of state hydrogeological mapping. *Exploration and Protection of Mineral Resources*. 2019;(3):48-55. (In Russ.). EDN: ZCDJCP.
15. *Map of hydrogeological zoning of the Russian Federation Territory, scale 1:2,500,000 (for monitoring groundwater objects)*. Available from: <https://rfgf.ru/catalog/docview.php?did=c883ec9081347a29677c4f50f2644d5f> [Accessed 21st August 2025]. (In Russ.).
16. *Map of water exchange basins of the zone of active water exchange*. Available from: https://karpinskyinstitute.ru/info/archiv_sv_maps/492743/492743_2-10.jpg [Accessed 21st August 2025]. (In Russ.).
17. Leontieva E.V., Kvachev V.N. Digitalization of hydrogeological processes in the mining industry. *Mining Journal*. 2020;(10):95-100. (In Russ.). EDN: YKGXNY. <https://doi.org/10.17580/gzh.2020.10.11>
18. Leontieva E.V., Kvachev V.N. Methods and methodological aspects of automating hydrogeological monitoring at mining enterprises. *Mining Journal*. 2022;(11):44-51. (In Russ.). EDN: XMALNS. <https://doi.org/10.17580/gzh.2022.11.07>
19. Leontieva E.V., Pogoreltseva E.I., Kvachev V.N. Technological aspects of creating conceptual 3D models of hydrogeological objects and processes using the example of the Stoilensky GOK. *Mining Journal*. 2024;(10):83-89. (In Russ.). EDN: KMRTRX. <https://doi.org/10.17580/gzh.2024.10.12>
20. Kvachev V.N., Leontieva E.V. *Water supply and engineering reclamation*. Textbook. Moscow, Vologda: Infra-Engineering; 2024. 277 p. (In Russ.).

Информация об авторах

Е.В. Леонтьева – кандидат географических наук, доцент кафедры прикладной геологии и горного дела Института наук о Земле НИУ БелГУ.

В.Н. Квачев – кандидат технических наук, доцент кафедры прикладной геологии и горного дела Института наук о Земле НИУ БелГУ.

Information about the authors

E.V. Leontyeva – Candidate of Science (Geography), Associate Professor of the Department of Applied Geology and Mining, Institute of Earth Sciences, BelSU.

V.N. Kvachev – Candidate of Science (Technical), Associate Professor of the Department of Applied Geology and Mining, Institute of Earth Sciences, BelSU.

*Статья поступила в редакцию 15.09.2025; одобрена после рецензирования 22.09.2025; принята к публикации 11.11.2025.
The article was submitted 15.09.2025; approved after reviewing 22.09.2025; accepted for publication 11.11.2025.*

Научная статья

УДК 556.535.3

<https://doi.org/10.18522/1026-2237-2026-1-118-132>

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МАССОВОГО РАСХОДА КОНСЕРВАТИВНЫХ ЗАГРЯЗНИТЕЛЕЙ ДЛЯ УЧАСТКОВ МАЛЫХ РЕК С ВЫСОКОЙ АНТРОПОГЕННОЙ НАГРУЗКОЙ

Валерий Юрьевич Филимонов¹, Ольга Вольфовна Ловцкая²,
Анастасия Юрьевна Танакова³, Ирина Евгеньевна Васильева⁴

^{1, 2, 3, 4} Институт водных и экологических проблем Сибирского отделения Российской академии наук,
Барнаул, Россия

¹ vyfilimonov@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0229-7058>

² lov@iwer.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3942-1350>

³ a.u.goronenko@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0003-8717-6008>

⁴ vasileva_i@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0004-7477-6554>

Аннотация. Рассматривается метод оценки суммарного массового расхода консервативных загрязняющих веществ на участках рек с повышенной антропогенной нагрузкой. В качестве объекта исследования выбрана р. Барнаулка (Алтайский край, Российская Федерация). Проанализированы результаты натурных измерений пространственного распределения концентраций растворенных загрязняющих веществ: свинца, алюминия, нитратов на участках с ускоренным ростом их содержания в меженьный период. Целью исследования было определение пространственного распределения суммарного массового расхода загрязняющих веществ и оценка числа Пекле на основе имеющихся данных измерений. Предложена нелинейная регрессионная модель, устанавливающая связь между суммарным массовым расходом загрязняющего вещества и его концентрацией. Неизвестные параметры модели определялись из условий минимизации функционала качества методом глобальной оптимизации с использованием математического пакета MATLAB MathWorks Inc. На основе данных натурных измерений вычислен глобальный минимум функционала качества модели, что позволило оценить искомые параметры. Для проверки стабильности полученных результатов при малых объёмах выборок использован метод Монте-Карло для рандомизации измеренных концентраций в пределах погрешности химического анализа образцов. Расчёт показал незначительное различие значений искомых параметров для рандомизированных и нерандомизированных значений концентраций. Для растворенного свинца использован метод заполнения пропущенных данных, также показавший устойчивость значений искомых параметров. На основании результатов расчётов высказано предположение о гидрхимической однородности рассматриваемых территорий.

Ключевые слова: антропогенная нагрузка, диффузное загрязнение, уравнение адвекции-диффузии, малые реки, натурные измерения, математическое моделирование

Для цитирования: Филимонов В.Ю., Ловцкая О.В., Танакова А.Ю., Васильева И.Е. Определение массового расхода консервативных загрязнителей для участков малых рек с высокой антропогенной нагрузкой // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2026. № 1. С. 118–132. <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2026-1-118-132>

Благодарности: работа выполнена в рамках реализации и при поддержке гранта Российского научного фонда № 24-27-20023 «Разработка методов оценки расхода консервативных загрязнителей на участках малых равнинных рек (на примере рек Барнаулка, Лосиха, Алтайский край)» (<https://rscf.ru/project/24-27-20023/>).

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

Original article

DETERMINATION OF MASS FLOW RATE OF CONSERVATIVE POLLUTANTS FOR SMALL RIVER'S SECTIONS WITH HIGH ANTHROPOGENIC LOAD

Valery Yu. Filimonov¹, Olga V. Lovtskaya²✉, Anastasia Yu. Tanakova³, Irina E. Vasilyeva⁴

^{1, 2, 3, 4} Institute for Water and Environmental Problems of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Barnaul, Russia

¹ vyfilimonov@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0229-7058>

² lov@iwep.ru ✉, <https://0000-0002-3942-1350>

³ a.u.goponenko@mail.ru, <https://orcid.org/orcid.org/0009-0003-8717-6008>

⁴ vasilyeva_i@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0004-7477-6554>

Abstract. The paper considers a method for estimating the total mass flow rate of conservative pollutants in river sections with high anthropogenic load. The Barnaulka River (Altai Region, Russian Federation) was chosen as the object of study. The results of field measurements of the spatial concentration distribution for dissolved pollutants - lead, aluminum, and nitrate - in sections of accelerated growth of their content during the low-water period were analyzed. The aim of this study is to determine the spatial distribution of the total mass flow rate of pollutants and to estimate the Peclet number based on available measurement data. The unknown parameters of the model were determined from the minimization conditions of the quality functional of the model by the global optimization method using the mathematical package MATLAB, MathWorks Inc. Based on the data from field measurements, the global minimum of the model quality functional was determined, which made it possible to estimate the sought parameters. To test the stability of the obtained results for small sample sizes, the Monte-Carlo method was used to randomize the measured concentrations within the error range of the chemical analysis of the samples. The calculation showed an insignificant difference in the values of the sought parameters for randomized and non-randomized concentration values. For dissolved lead, the missing data imputation method was used, also demonstrating the stability of the values of the sought parameters. Based on the calculation results, it was suggested that the areas under consideration are hydrochemically homogeneous.

Keywords: anthropogenic load, diffuse pollution, advection-diffusion equation, small rivers, field measurements, mathematical modelling

For citation: Filimonov V.Yu., Lovtskaya O.V., Tanakova A.Yu., Vasilyeva I.E. Determination of Mass Flow Rate of Conservative Pollutants for Small River's Sections with High Anthropogenic Load. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2026;(1):118-132. (In Russ.). <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2026-1-118-132>

Acknowledgments: the work was carried out within the framework of the implementation and with the support of the Russian Science Foundation grant No. 24-27-20023 "Development of methods for assessing the flow rate of conservative pollutants in sections of small lowland rivers (using the Barnaulka and Losikha rivers, Altai Region as an example)" (<https://rscf.ru/project/24-27-20023/>).

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

Введение

С ужесточением природоохранного законодательства и совершенствованием технологий производства во многих развитых странах снижается влияние точечных источников загрязнения на качество водных объектов и увеличивается вклад неточечных (диффузное загрязнение). В ряде стран 60 % и более загрязняющих веществ, попадающих в водные объекты, связаны с диффузным загрязнением [1–4]. Среди веществ, попадающих в природные воды, можно выделить некоторые виды консервативных примесей: тяжёлые металлы, пестициды и синтетические поверхностно-активные вещества [5]. Очевидно, что количество растворённых загрязня-

ющих веществ, поступающих в водоток с водосборной площади, невозможно измерить напрямую, и альтернативы математическим методам определения их расхода нет. Традиционные математические методы восстановления расходных характеристик источников загрязнения основаны на решении обратных задач [6–8]. Математическое моделирование обратных задач для точечных источников базируется на представлении о предельно локализованном пространственном распределении стока загрязняющего вещества (точечный выброс) [9–13].

К настоящему времени эта проблема изучена достаточно полно. Расчёт диффузного стока представляет собой качественно иную, более сложную задачу, требующую анализа распределённых источников загрязнения. В этом случае [14–22] проводится так называемый квази-эксперимент с использованием заданных тестовых функций пространственного распределения удельного массового расхода загрязняющего вещества (количество загрязняющего вещества, поступающего в водоток за единицу времени на единицу длины русла). В процессе решения обратной задачи, для которой дано строгое математическое обоснование, восстанавливаются исходные тестовые функции. Однако здесь «теория проверяется теорией», а физическим и гидрологическим аспектам, связанным с изучением качества поверхностных вод в природных водотоках [1, 2], не всегда уделяется внимание. Основная проблема заключается в том, что неизбежное наличие погрешностей измерений увеличивает неявную неопределённость задачи, поскольку малые ошибки наблюдений могут привести к большим погрешностям решения. Имеющиеся сегодня расчёты обратных задач не выходят за рамки теоретического анализа. Как следствие, необходима разработка методов, адаптированных к результатам реальных измерений.

Следует отметить, что наряду с удельным массовым расходом загрязняющих веществ важной характеристикой диффузного загрязнения является полный массовый расход, определяющий общее количество вещества, поступающего в водоток за единицу времени на исследуемом участке водосбора. Его расчёт имеет важное практическое значение. В отличие от удельного массового расхода, полный – величина, монотонно возрастающая с ростом координаты, что делает задачу его определения более предсказуемой и сужает класс исследуемых функций. Важно подчеркнуть, что неизвестным параметром, входящим в уравнение адвекции-диффузии, является число Пекле [23]. В [14–22] значение этого числа предполагается заданным и не подлежит определению. При анализе результатов реального эксперимента возникает необходимость корректного определения этой величины для изучаемого участка реки.

Исходя из вышеизложенного, цель настоящего исследования – восстановление пространственного распределения суммарного массового расхода консервативных загрязняющих веществ и нахождение эффективного значения числа Пекле. В исследовании используется метод нелинейной глобальной оптимизации функционала качества на основе набора натуральных измерений, полученных на реальном водотоке. Для решения задачи о влиянии случайных отклонений концентраций загрязняющих веществ на определяемые значения применяется метод Монте-Карло, основанный на учете большого числа этих отклонений. В качестве объекта исследования рассматривалась р. Барнаулка (Алтайский край, Российская Федерация).

Материалы и методы

Для расчета пространственно-временного распределения концентраций загрязняющих веществ для малых рек используется одномерное уравнение адвекции-диффузии в виде [24]

$$\frac{\partial(\omega c)}{\partial t} + \frac{\partial(Qc)}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial x} \left(E\omega \frac{\partial c}{\partial x} \right) = \varphi(x, t), \quad (1)$$

где t – время, с; x – координата, м; ω – площадь поперечного сечения русла, м²; c – массовая концентрация загрязнителя, кг/м³; Q – объемный расход воды, м³/с; E – коэффициент продольной дисперсии, м²/с; $\varphi(x, t)$ – удельный массовый расход загрязнителя, кг/м·с, который учитывает все возможные механизмы поступления растворенных загрязняющих веществ в реку. Далее важно ввести в рассмотрение полный массовый расход загрязнителя, кг/с, в точке x

$$\Phi(x, t) = \int_0^x \varphi(x, t) dx. \quad (2)$$

Заметим, что зависимость (2) монотонно возрастающая, поскольку $\varphi(x, t) > 0$ по определению.

Для адекватного описания процессов стока важно знать некоторую постоянную составляющую, не связанную с осадками, паводками, снеготаянием и т.д. Как правило, эта величина определяется по переносу загрязняющих веществ через фильтрацию в почве и грунтовые воды [25]. В данном случае наиболее корректно рассматривать установившиеся режимы стока, т.е. стационарную задачу (1).

В меженный период значения расходов воды и скоростей течения для малых равнинных рек изменяются по руслу незначительно, и стационарное уравнение (1) для исследуемого участка длиной L можно записать в безразмерном виде [26]

$$\frac{d\theta}{dz} - \frac{1}{\alpha} \frac{d^2\theta}{dz^2} = \tilde{\varphi}(z). \quad (3)$$

Здесь введены в рассмотрение следующие безразмерные величины: $z = x/L$, $\theta = (c - c_A)/c_A$, $\alpha = VL/E$, $\tilde{\varphi}(z) = L\varphi(z)/Qc_A$, где $c_A = c(0)$ – концентрация загрязнителя в начальной точке исследуемого участка; α – число Пекле; V – средняя скорость течения; Q – средний объемный расход на исследуемом участке. Тут под числом Пекле следует понимать эффективную величину, характеризующую исследуемый участок реки в целом. Будем считать, что граничные условия к (3) определяются измерениями и имеют вид условий Коши:

$$\theta(0) = 0, \quad \theta(1) = \theta_1, \quad (4)$$

где θ_1 – измеренная концентрация в конечной точке исследуемого участка $z = 1$.

Полный массовый расход загрязняющего вещества в безразмерном виде определится с использованием (2):

$$\tilde{\Phi}(z) = \Phi/Qc_A = \int_0^z \tilde{\varphi}(z) dz. \quad (5)$$

Очевидно, что величина $\tilde{\Phi}(1)$ определяет полный массовый расход загрязняющего вещества на всем исследуемом участке водотока.

Согласно [27–31], анализ проб воды, отобранных в меженный период, показывает наличие участков ускоренного роста концентрации растворенного вещества. Эти участки связаны с непрерывным стоком с водосборной территории, являются потенциально опасными и требуют детального изучения. Цель решения обратной задачи определяется нахождением функции (5) и эффективного значения числа Пекле по известной зависимости $\theta(z)$ для таких участков. Для этого использовался метод нелинейной глобальной оптимизации функционала качества в сочетании с методом Монте-Карло.

Результаты и обсуждение

Для анализа поставленной задачи необходимо рассмотреть решение уравнения (3) с граничными условиями (4), которое выражается через неизвестную зависимость $\tilde{\Phi}(z)$.

Это решение может выглядеть следующим образом:

$$\theta(z, \alpha) = \frac{e^{\alpha z} - 1}{e^{\alpha} - 1} \left(\theta_1 + \alpha e^{\alpha} \int_0^1 \tilde{\Phi}(\xi) e^{-\alpha \xi} d\xi \right) - \alpha e^{\alpha z} \int_0^z \tilde{\Phi}(\xi) e^{-\alpha \xi} d\xi. \quad (6)$$

Представим неизвестную функцию $\tilde{\Phi}(\xi)$ в виде полинома

$$\tilde{\Phi}(\xi) = \sum_{n=1}^m a_n \xi^n. \quad (7)$$

Тогда зависимость (6) может быть представлена в виде разложения по набору функций $H_n(z, \alpha)$

$$\theta(z) = H_0(z, \alpha) + \sum_{n=1}^m a_n H_n(z, \alpha), \quad (8)$$

где

$$\begin{aligned} H_0(z, \alpha) &= \theta_1 \frac{e^{\alpha z} - 1}{e^{\alpha} - 1}, \\ H_1(z, \alpha) &= z - \frac{e^{\alpha z} - 1}{e^{\alpha} - 1}, \quad H_2(z, \alpha) = \left[z^2 + \frac{2}{\alpha} z - \left(1 + \frac{2}{\alpha} \right) \frac{e^{\alpha z} - 1}{e^{\alpha} - 1} \right], \\ H_3(z, \alpha) &= \left[z^3 + \frac{3z^2}{\alpha} + \frac{6z}{\alpha^2} - \left(1 + \frac{3}{\alpha} + \frac{6}{\alpha^2} \right) \frac{e^{\alpha z} - 1}{e^{\alpha} - 1} \right], \dots \end{aligned} \quad (9)$$

Функция $H_0(z)$ определяет решение однородного уравнения (3). Последовательность функций $H_n(z, \alpha)$ имеет общие свойства: $H_n(0, \alpha) = H_n(1, \alpha) = 0$; $H_n(z, \alpha) \geq 0$; $H_n(z, \alpha) \leq M_n(\alpha)$, где $M_n > 0$ – верхняя граница диапазона значений функций H_n .

Как следует из уравнения (6), рассматриваемая функция характеризуется сильной зависимостью от числа Пекле, которое является априори неизвестным параметром. Следовательно, использование любого неточного значения числа Пекле может привести к некорректным результатам при анализе данных реального натурного эксперимента.

Следует отметить, что представление (7) использовалось в исследовании [26] для оценки общего массового расхода для заданных сценариев диффузного загрязнения (тестовые функции для распределения удельного массового расхода $\tilde{\varphi}(z)$) при заданном значении числа Пекле.

Все неизвестные параметры a_n входят в выражение (8) линейно, поэтому применение метода наименьших квадратов с регуляризацией методом Лассо для их определения оправдано. Применение этого метода привело к удовлетворительным результатам, однако его реализация потребовала большого количества расчётных точек.

В данном исследовании число Пекле считается неизвестным параметром, что делает невозможным использование стандартного подхода к определению коэффициентов регрессии. В связи с этим авторами предложена нелинейная оптимизация функционала качества модели. Для получения единственного решения, не зависящего от начальных условий, применен метод определения глобального минимума. Параметры модели a_n ($n=1, 2, \dots, m$) и α , входящий в (9), были найдены из условия минимизации функционала качества

$$S = \sum_{i=1}^k (\theta(z_i, \omega) - \theta_i)^2 \rightarrow \min, \quad (10)$$

где $\theta(z_i, \omega)$ – расчётные значения концентрации на основе (8); θ_i – известные (измеренные) значения концентрации; ω – вектор параметров ($\alpha, a_1 \dots a_m$), минимизирующий функционал S . Суммирование в (10) проводится по всем k расчётным точкам. Неизвестные параметры определялись из представления (8), (9) методом глобальной оптимизации [32–34]. Для этих целей использовался математический пакет MATLAB MathWorks Inc. с расширением Global Optimization Toolbox [34]. Глобальный минимум выбирался из локальных минимумов, достигнутых на наборе из 100 случайных начальных точек, сгенерированных функцией MultiStart. Локальные минимумы находили с помощью алгоритма нелинейной оптимизации Левенберга – Марквардта без ограничений [32, 33].

Предложенный алгоритм апробирован для р. Барнаулки (Алтайский край). Барнаулка является левым притоком р. Оби и впадает в неё на 3409-м км от устья. В нижнем течении река протекает через г. Барнаул. Длина реки – 167 км, средний уклон – 0,4 ‰, площадь бассейна – 5720 км² (рис. 1). Средний многолетний расход воды – 3,71 м³/с. Река получает значительное питание за счёт грунтовых вод, залегающих на небольшой глубине. В верхнем и среднем течении она практически не испытывает антропогенной нагрузки. В нижнем течении Барнаулка подвергается сильному антропогенному воздействию, в реку поступают неочищенные хозяйственно-бытовые, ливневые и промышленные сточные воды; вода в устье характеризуется как «грязная» [35].

Для апробации предлагаемого метода использованы данные полевых экспериментов, проведенных авторами в июле 2024 г. Пробы отбирались в 30 точках, относительно равномерно распределенных по длине участка. Верхняя (по течению) точка с номером (идентификатором) 30 находилась на юго-западной окраине города в районе малоэтажной (коттеджной) застройки, нижняя точка с номером 1 – в центральной части города, в 200 м от устья реки.

Общая длина рассматриваемого участка – 10 км. Объемный расход менялся незначительно и составлял $Q = 5,70 \pm 0,3$ м³/с (в соответствии с измерениями в пяти точках).

Барнаулку можно рассматривать как малую реку с шириной русла 10–30 м и глубиной около 1 м (на исследуемых участках), при этом, как показывают измерения, скорость течения и расход воды меняются плавно и незначительно. Это позволяет утверждать, что поперечные градиенты концентрации загрязнителей невелики и продольный перенос доминирует. Таким образом, выполняются условия применимости одномерного уравнения адвекции-диффузии (3) [36].

При анализе распределения концентраций загрязнителей в точках отбора проб выявлены характерные участки их ускоренного роста, особенно для растворённых Pb, Al и нитратов. В табл. 1 приведены длины характерных участков и соответствующие им расстояния до устья.

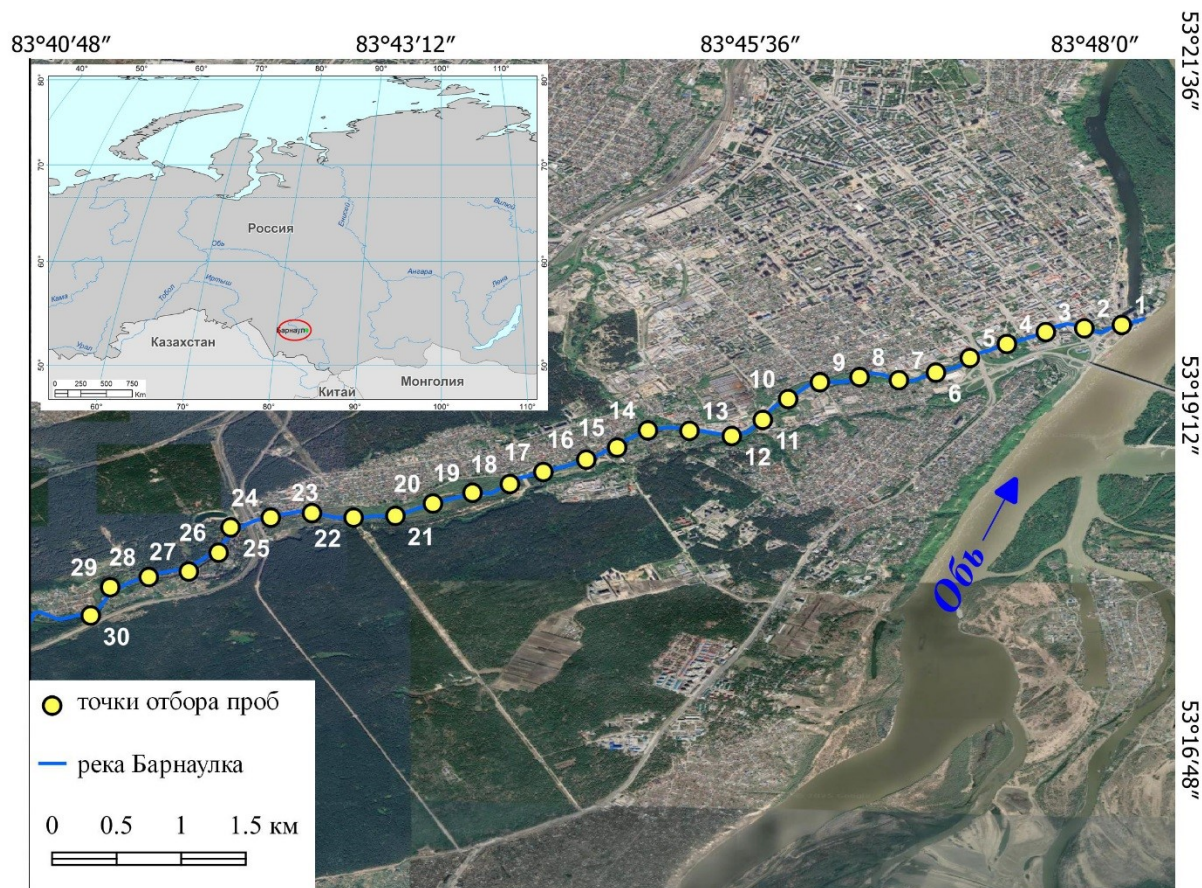


Рис. 1. Карта-схема точек отбора проб на р. Барнаулке, 16 июля 2024 г. Подложка – мозаика снимков Google Satellite [URL: <https://www.google.at/permissions/geoguidelines/attr-guide.html>] / Fig. 1. Map of sampling points on the Barnaulka River, July 16, 2024. The base map is the mosaic of images from Google Satellite [URL: <https://www.google.at/permissions/geoguidelines/attr-guide.html>]

Таблица 1 / Table 1

**Области ускоренного роста концентрации растворенных загрязнителей
 / Areas of accelerated growth in the concentration of dissolved pollutants**

Параметр	Загрязнители		
	Pb	Al	Нитраты
Точки*	10–1	8–1	17–12
Длина участка, км	3,05	2,37	1,72
Расстояние до устья, км	0	0	3,73

* Нумерация точек отбора соответствует рис. 1.

Исходя из известных соображений [37], число измерений должно быть примерно в 10 раз больше числа определяемых параметров. Для имеющегося числа измерений расчёт проводился по формуле (7) для полинома первой степени ($m=1$). Таким образом, минимизация функционала (10) выполнялась по двум параметрам: a_1 , α . В этом случае значение $\tilde{\Phi}(1)$ совпадает с a_1 и возможна визуализация поверхности S в трёхмерном пространстве параметров.

На рис. 2 представлены восстановленные распределения концентраций рассматриваемых загрязняющих веществ с использованием метода глобальной нелинейной оптимизации (левый столбец). В правом столбце показаны изолинии функционала (10).

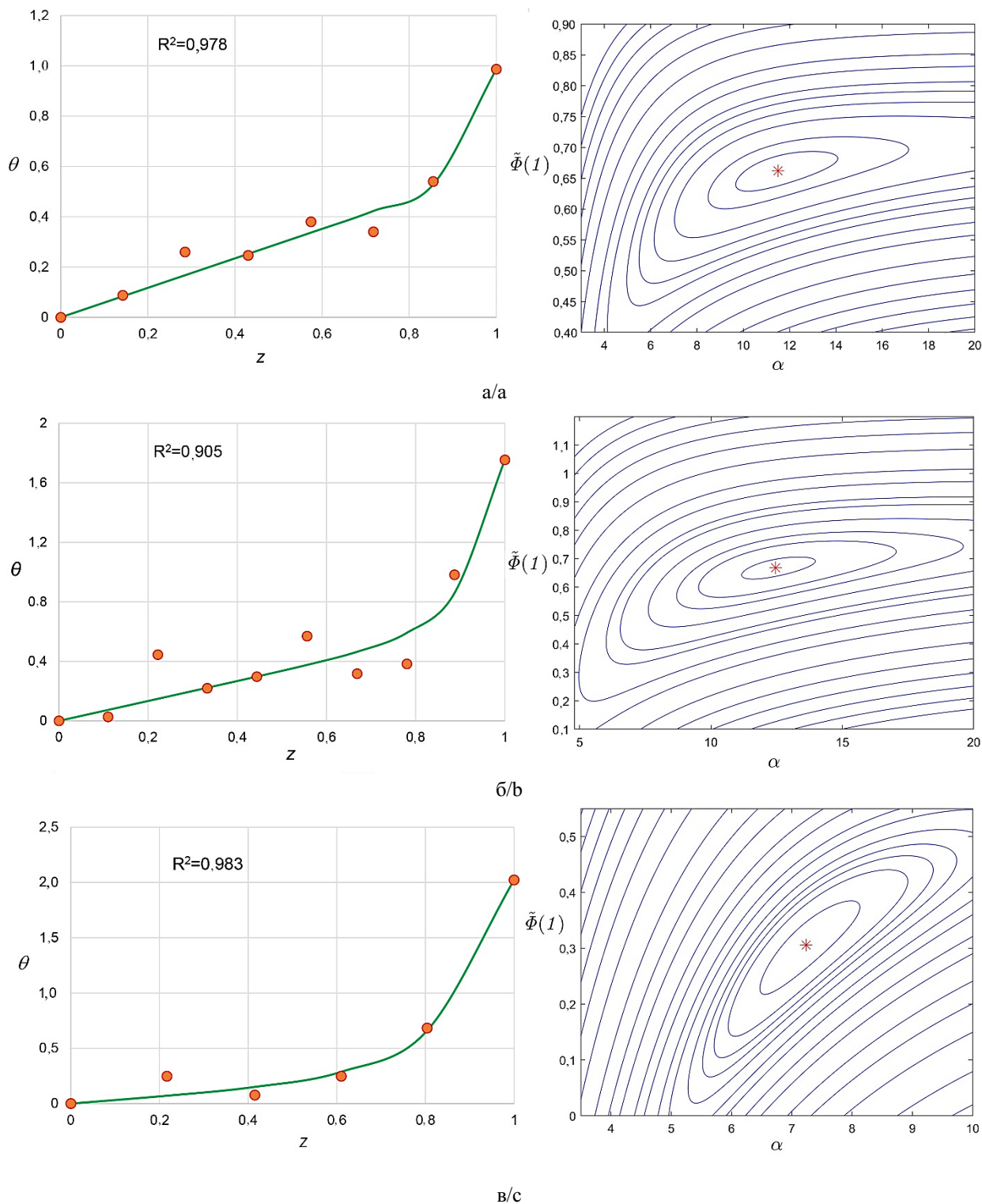


Рис. 2. Восстановленные распределения концентраций растворённых загрязняющих веществ (левый столбец). Соответствующие изолинии функционала (10) в пространстве $\alpha, \tilde{\Phi}(1)$ для $m=1$ (формула (7)) (правый столбец): а – Al; б – Pb; в – нитраты. Точки – концентрация загрязнителей по данным измерений, кривые – значения концентрации, рассчитанные по модели. Точка минимума функционала (10) отмечена звёздочкой / Fig. 2. Reconstructed distributions of dissolved pollutant concentrations (left column). The corresponding isolines of the functional (10) in the space $\alpha, \tilde{\Phi}(1)$ for $m=1$ (formula (7)) (right column): a - Al; b - Pb; c - nitrate. The points indicate pollution concentration according to measured data; the plots correspond to concentration values calculated by the model. The minimum point of the functional (10) is marked with an asterisk

Как следует из рис. 2, для всех трёх случаев минимум функционала наблюдается достаточно чётко. При этом важно отметить, что абсолютный минимум для рассматриваемых случаев – единственный, что согласуется со строгим доказательством существования и единственности решения обратной задачи для стационарного уравнения (3), представленным в [38].

Коэффициент детерминации, характеризующий качество модели, рассчитан по формуле [39]

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_i^k (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_i^k (y_i - \bar{y})^2},$$

где y_i, \hat{y}_i – измеренные и рассчитанные значения переменной соответственно; $\bar{y} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k y_i$ – выборочное среднее; k – количество элементов в выборке.

Очевидно, что, несмотря на высокую степень соответствия расчётных и измеренных значений концентраций, значения искомым параметров могут быть неустойчивыми, что связано с различного рода погрешностями измерений. Это характерно для рассмотрения некорректных задач. В [26] для проверки устойчивости использовалась однократная рандомизация. Однако одного случая моделирования недостаточно для подтверждения устойчивости полученного результата.

В связи с этим проведен анализ устойчивости полученных результатов методом Монте-Карло. Для этого каждой точке $\theta_i(z_i)$, определяемой путем измерения (рис. 2), был присвоен интервал $\Delta\theta_i = \pm\delta$. В пределах заданного интервала значение концентрации устанавливалось случайным образом с помощью генератора случайных чисел. Реализация метода Монте-Карло основывалась на рассмотрении N различных реализаций случайного разброса точек относительно измеренных концентраций в заданном интервале δ и расчете средних значений соответствующих параметров α, a_n [40]. Расчет выполнялся для условий рандомизации $\delta=0,1, N=1000$. По результатам расчетов определены средние значения искомым параметров $\alpha, \tilde{\Phi}(1)$ (табл. 2).

Таблица 2 / Table 2

Результаты расчета эффективного значения числа Пекле и полного массового расхода загрязняющего вещества для нерандомизированных ($\delta = 0$) и рандомизированных ($\delta = 0,1$) значений концентраций / Results of calculating the effective value of the Peclet number and the total mass flow rate of the pollutant for non-randomized ($\delta = 0$) and randomized ($\delta = 0,1$) concentration values

Концентрация	Загрязнитель					
	Pb ($k^*=10$)		Al ($k=8$)		Нитраты ($k=6$)	
	α	$\tilde{\Phi}(1)$	α	$\tilde{\Phi}(1)$	α	$\tilde{\Phi}(1)$
$\delta = 0$	12,44	0,668	11,53	0,662	7,24	0,306
$\delta = 0,1$	12,65	0,667	12,67	0,659	7,31	0,289

* k – количество точек измерений.

Значения искомым параметров для рандомизированных и нерандомизированных значений концентрации близки, что свидетельствует об устойчивости результатов расчёта и корректности предлагаемого метода.

Для применения расчётных моделей, восстанавливающих характеристики массового расхода растворённых загрязняющих веществ, требуется большой массив данных. Однако, согласно результатам натурных экспериментов, этих данных недостаточно для анализа отдельных областей ускоренного роста концентраций [25–28]. В нашем случае число расчётных точек не превышает десяти. Это не позволяет в полной мере использовать представленный метод расчёта (8) для минимизации функционала (10), поскольку при имеющемся числе точек корректно вводить в рассмотрение только два неизвестных параметра: α, a_1 . Между тем в [37, 41] предлагается так называемый метод заполнения пропущенных данных.

Реализация метода выглядит следующим образом. Пропущенные значения оцениваются с помощью регрессионного уравнения, построенного на основе имеющихся данных (рис. 2). Для получения пропущенных данных каждый интервал между точками измерения разбивается на интервалы с заданным шагом Δz , который определяет общее количество точек расчёта k . В сформированных точках расчёта значения концентрации рассчитываются по уравнению регрессии, полученному на предыдущем шаге (измеренные значения).

На рис. 3 представлены зависимости параметра α и общего массового расхода $\tilde{\Phi}(1)$ от количества расчетных точек для растворенного Pb (рис. 2b), полученные с использованием метода заполнения пропущенных данных.

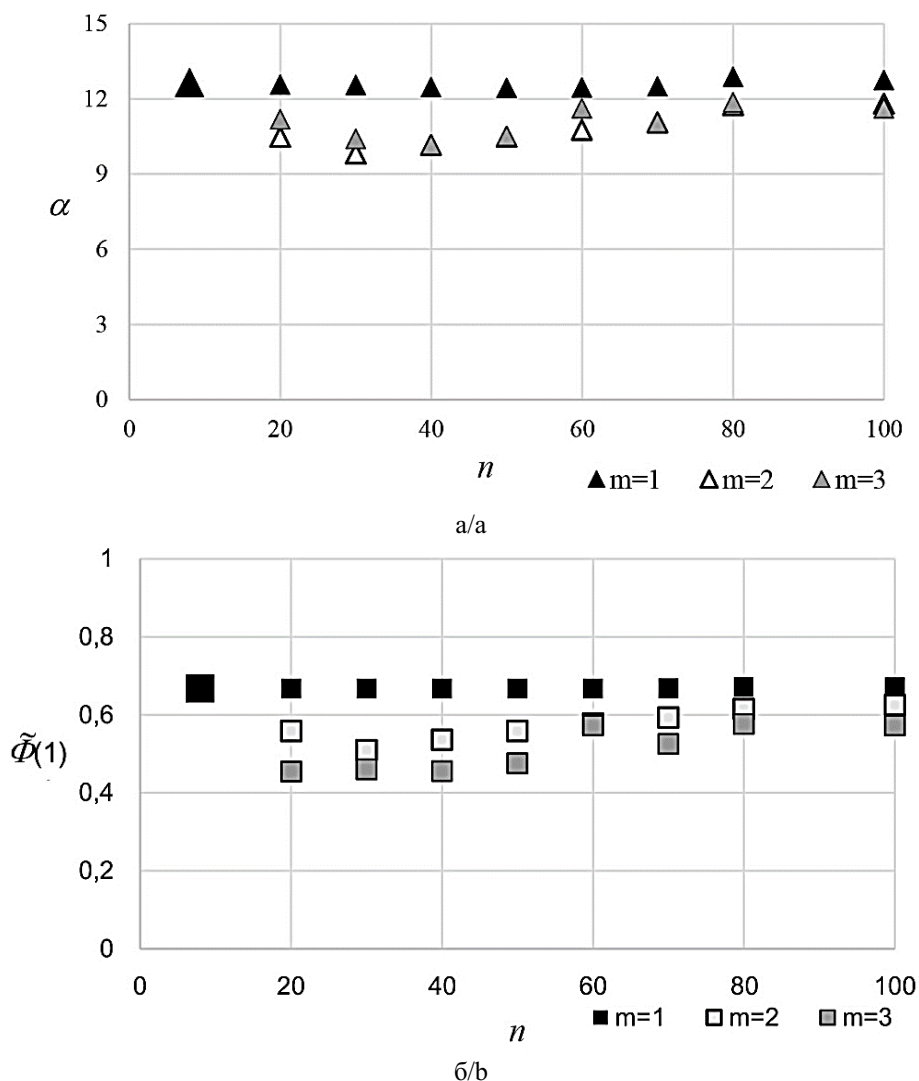


Рис. 3. Зависимость параметра α (а) и величины полного массового расхода $\tilde{\Phi}(1)$ (б) растворенного Pb от количества расчетных точек для разных степеней полинома m (7). Крупными маркерами отмечены результаты предыдущих расчетов (табл. 2) / Fig. 3. Dependence of the parameter α (a) and the value of the total mass flow rate $\tilde{\Phi}(1)$ (b) for dissolved Pb on the number of calculation points for different degrees of the polynomial m (7). Large markers indicate the results of previous calculations (Table 2)

Как следует из рис. 3, увеличение числа расчётных точек практически не изменяет значения искомых параметров для первой степени полинома (7). В то же время для второй и третьей степени увеличение числа расчётных точек приводит к незначительному уменьшению значений искомых параметров вплоть до $k=30$. Последнее объясняется тем, что, как уже указывалось, число расчётных точек должно быть в 10 и более раз больше числа искомых параметров [37, 39]. В противном случае возникает несоответствие между числом расчётных точек и числом определяемых параметров. По этой причине тридцати точек недостаточно для корректного вычисления неизвестных параметров (два-три коэффициента полинома и число Пекле). При увеличении числа расчетных точек значения искомых параметров возрастают до некоторых предельных значений. Дальнейшее увеличение числа точек практически не изменяет результаты расчётов. Значения параметров при $n=100$ близки к значениям, рассчитанным с использованием натуральных измерений ($n=10$). Полученный результат можно рассматривать как иллюстрацию устойчивости значе-

ний определяемых величин относительно процедуры добавления пропущенных данных. Полученные значения для полиномов второй и третьей степени можно рассматривать как поправку для случая полинома первой степени.

На рис. 4 показаны распределения концентрации и полного массового расхода для различных степеней полинома.

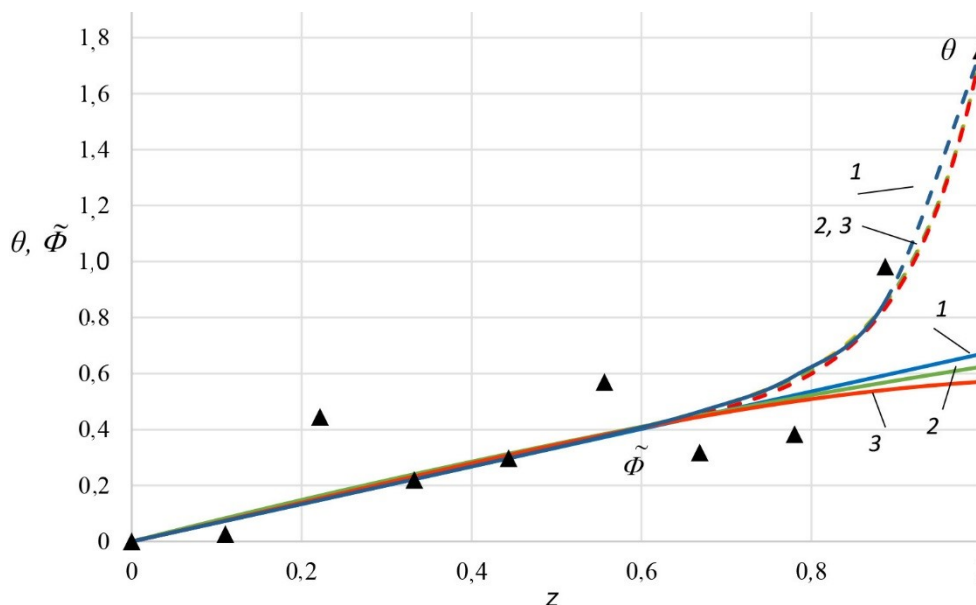


Рис. 4. Распределение концентрации и общего массового расхода растворенного Pb для различных степеней полинома (7): 1 – $m=1$, 2 – $m=2$, 3 – $m=3$. Количество расчетных точек $k=100$. Треугольные маркеры соответствуют результатам натурных измерений / Fig. 4. Distribution of concentration and total mass flow rate for dissolved Pb for different degrees of polynomial (7): 1 – $m=1$, 2 – $m=2$, 3 – $m=3$. Number of calculation points $k=100$. Triangular markers correspond to the results of field measurements

Увеличение степени полинома не приводит к существенному изменению распределения концентрации, а результаты расчётов при $m=2$ и $m=3$ практически совпадают. При этом для величины $\tilde{\Phi}(1)$ с ростом степени полинома наблюдается небольшое её уменьшение. Полученные результаты свидетельствуют об устойчивости значений определяемых параметров. Основываясь на результатах расчётов, можно предположить, что определяющей является первая степень полинома (7). Это может означать, что пространственное распределение $\tilde{\varphi}(z)$ удельного массового расхода в стационарном уравнении (3) близко к однородному. В пользу этого свидетельствует тот факт, что протяженность рассматриваемых участков сравнительно невелика (несколько километров), на них отсутствуют места локализованных выбросов загрязняющих веществ, которые могли бы усложнить поведение функции $\tilde{\varphi}(z)$, а натурный эксперимент проводился в меженьный период.

Окончательные результаты расчетов представлены в табл. 3. Переход к размерной величине Φ осуществлялся по формуле (5): $\Phi = Qc_A\tilde{\Phi}$.

Таблица 3 / Table 3

Значения параметров исследуемых загрязнителей / Parameter values for the pollutants studied

Параметр	Загрязнитель		
	Pb	Al	Нитраты
c_A , мкг/л	0,34	360	590
$\Phi(1)$, г/с	$1,3 \cdot 10^{-3}$	1,35	0,97
α	12,64	12,67	7,31

Таким образом, предложенный метод предлагается использовать для оценки суммарного массового расхода консервативных загрязняющих веществ и числа Пекле в малых реках. Для этого необходимо применить следующий алгоритм:

1. Для заданного числа расчётных точек, используя принцип минимизации функционала (10), необходимо построить регрессионную зависимость $\theta(z)$ и определить значения неизвестных параметров α , $\tilde{F}(1)$. Число расчётных точек должно быть в 5–10 раз больше числа неизвестных параметров.

2. На основе метода Монте-Карло необходимо убедиться в устойчивости и независимости результата от случайного разброса точек относительно измеренных концентраций в заданном интервале.

3. Для дополнительной проверки стабильности определяемых значений следует использовать метод заполнения пропущенных данных.

Заключение

В представленной работе предложен метод оценки суммарного массового расхода консервативных загрязняющих веществ и числа Пекле в процессах диффузного стока на участках малых равнинных рек. Для апробации метода проанализированы результаты натурных измерений распределения концентраций трёх растворённых загрязняющих веществ (Pb, Al и нитраты) на участках реки Барнаулки, характеризующихся ускоренным ростом концентраций и определяющих области повышенной антропогенной нагрузки. Расчеты выполнены с использованием метода нелинейной глобальной оптимизации, позволяющего определять значения неизвестных параметров на основе данных натурных измерений. Для проверки устойчивости полученных результатов использовался метод Монте-Карло, генерирующий случайные отклонения концентраций загрязняющих веществ от измеренных значений в пределах погрешности химического анализа. Установлено, что рандомизация на заданном интервале не приводит к существенным изменениям искомых параметров (различия не превышают 10 %). В дополнение к полученным расчетам реализован метод заполнения пропущенных данных, что позволило учесть большее количество параметров. Установлено, что искомые параметры стремятся к постоянным значениям с увеличением числа дополнительных точек, а заданные значения близки к полученным ранее (без добавления точек). Полученные результаты позволяют сделать предположение о гидрохимической однородности рассматриваемых территорий. Предложен алгоритм расчета для оценки суммарного массового потока загрязняющих веществ и числа Пекле для малых равнинных рек.

Список источников

1. Лобченко Е.Е., Ничипорова И.П., Оленникова Н.Н., Романюк О.Л., Лямперт Н.А. Пространственно-временные изменения содержания загрязняющих веществ в поверхностных водах бассейна Северной Двины // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2022. № 1. С. 57–65. EDN: RJOJPW. <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2022-1-57-65>
2. 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. EDN: WDGJZD. <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2025-2-83-94>
3. Chen Y., Lin L.-S., Viadero R.C., Gang D.D. Nonpoint Source Pollution // Water Env. Res. 2007. Vol. 79, № 10. P. 2032–2048. <https://doi.org/10.2175/106143007X218656>
4. Lintern A., Webb J.A., Ryu D., Liu S., Bende-Michl U., Waters D., Leahy P., Wilson P., Western A.W. Key factors influencing differences in stream water quality across space // Wires Water. 2018. Vol. 5, № 1. Art. e1260. <https://doi.org/10.1002/wat2.1260>
5. Narendran N. Review on environmental problem due to water pollution // Int. J. Eng. Res. 2015. Vol. 3, № 4. P. 43–45. <https://doi.org/10.70729/IJSER1570>
6. Argoul P. Overview of inverse problems. DEA. Ecole Nationale des Ponts et chaussées, 2012. 283 p.
7. Kern M. Numerical methods for inverse problems. N.Y.: Wiley-ISTE, 2016. 240 p. <https://doi.org/10.1002/9781119136941>
8. Samarskii A.A., Vabishchevich P.N. Numerical methods for solving inverse problems of mathematical physics. Berlin; N.Y.: Walter de Gruyter, 2007. 452 p.

9. *Badia A., Hamdi A.* Inverse source problem in an advection-dispersion-reaction system: application to water pollution // *Inverse Probl.* 2007. Vol. 23, № 5. P. 2103–2120. <https://doi.org/10.1088/0266-5611/23/5/017>
10. *Mamonov A., Tsai R.* Point source identification in non-linear advection-diffusion-reaction systems // *Inverse Probl.* 2013. Vol. 29, № 3. Art. 035009. <https://doi.org/10.1088/0266-5611/29/3/035009>
11. *Hassin A.B., Hariga N.T., Khayat F.* Data completion problem for the advection-diffusion equation with aquifer point sources // *Math. Meth. Appl. Sci.* 2021. Vol. 44, № 2. P. 1651–1663. EDN: NKGGEJ. <https://doi.org/10.1002/mma.6868>.
12. *Lugão B.C., Knupp D.C., Rodrigues P.P.G.W.* Direct and inverse simulation applied to the identification and quantification of point pollution sources in rivers // *Env. Model. Softw.* 2022. Vol. 156. Art. 105488. EDN: KYLSYS. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2022.105488>
13. *Hamdi A.* Identification of point sources in two-dimensional advection-diffusion-reaction equation: application to pollution sources in a river. Stationary case // *Inverse Probl. Sci. Eng.* 2007. Vol. 15, № 8. P. 855–870. <https://doi.org/10.1080/17415970601162198>
14. *Shen J., Jia J.J., Sisson G.* Inverse estimation of nonpoint sources of fecal coliform for establishing allowable load for Wye River, Maryland // *Water Res.* 2006. Vol. 40, № 18. P. 3333–3342. EDN: KHXIIN. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2006.07.035>
15. *Boano F., Revelli R., Ridolfi L.* Source identification in river pollution problems: A geostatistical approach // *Water Resour. Res.* 2005. Vol. 41, № 7. Art. W07023. <https://doi.org/10.1029/2004wr003754>
16. *Permanoon E., Mazaheri M., Amiri S.* An analytical solution for the advection-dispersion equation inversely in time for pollution source identification // *Phys. Chem. Earth.* 2022. Vol. 128, № 2. Art. 103255. EDN: CUAHQ. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2022.103255>
17. *Rashedi K.* A numerical solution of an inverse diffusion problem based on operational matrices of orthonormal polynomials // *Math. Meth. Appl. Sci.* 2021. Vol. 44, № 2. P. 12980–12997. EDN: FVQRLT. <https://doi.org/10.1002/mma.7601>
18. *Sousa D.M., Roberty N.C.* An inverse source problem for the stationary diffusion-advection-decay equation // *Inverse Probl. Sci. Eng.* 2012. Vol. 20, № 7. P. 891–915. <https://doi.org/10.1080/17415977.2011.609466>
19. *Kulbay M., Mukanova B., Sebu C.* Identification of separable sources for advection-diffusion equations with variable diffusion coefficient from boundary measured data // *Inverse Probl. Sci. Eng.* 2017. Vol. 25, № 2. P. 279–308. EDN: XMOWFH. <https://doi.org/10.1080/17415977.2016.1160396>
20. *Jun K.S., Kang J.W., Lee K.S.* Simultaneous estimation of model parameters and diffuse pollution sources for river water quality modelling // *Water Sci. Technol.* 2007. Vol. 56, № 1. P. 155–162. <https://doi.org/10.2166/wst.2007.447>
21. *Chaikovskii D., Zhang Y.* Convergence analysis for forward and inverse problems in singularly perturbed time-dependent reaction-advection-diffusion equations // *J. Comput. Phys.* 2022. Vol. 470. Art. 111609. EDN: KGHBDL. <https://doi.org/10.1016/j.jcp.2022.111609>
22. *Lukyanenko D.V., Shishlenin M.A., Volkov V.T.* Solving of the coefficient inverse problems for a nonlinear singularly perturbed reaction-diffusion-advection equation with the final time data // *Commun. Nonlinear Sci. Numer. Simul.* 2018. Vol. 54. P. 233–247. EDN: XMUOGN. <https://doi.org/10.1016/j.cnsns.2017.06.002>
23. *Acheson D.J.* Elementary fluid dynamics. Oxford: University Press, 1990. 408 p.
24. *James A.* Mathematical models in water pollution control. N.Y.: Wiley, 1978. 420 p.
25. *Ясинский С.В., Веницианов Е.В., Вишневецкая И.А.* Диффузное загрязнение водных объектов и оценка выноса биогенных элементов при различных сценариях землепользования на водосборе // *Водные ресурсы.* 2019. Т. 46, № 2. С. 232–244. EDN: KXGBRC. <https://doi.org/10.31857/S0321-0596462232-244>
26. *Filimonov V.Yu., Lovtskaya O.V., Zinoviev A.T.* Calculation of dissolved pollutants mass flow according to the data of their concentration spatial distribution in the sites of small plain rivers // *Eurasian J. Math. Comput. Appl.* 2023. Vol. 11, № 4. P. 14–28. EDN: GSJHIR. <https://doi.org/10.32523/2306-6172-2023-11-4-14-28>
27. *Byrne P., Onnis P., Runkel R.L., Frau I., Lynch S.F.L., Edwards P.* Critical shifts in trace metal transport and remediation performance under future low river flows // *Environ. Sci. Technol.* 2020. Vol. 54, № 24. P. 15742–15750. EDN: MALHIY. <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c04016>
28. *Ren J., Hao J., Tao L.* Concentrations, spatial distribution, and pollution assessment of heavy metals in surficial sediments from upstream of Yellow River, China // *Environ. Sci. Pollut. Res.* 2021. Vol. 28, № 3. P. 2904–2913. EDN: FSCPAQ. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-10349-3>.
29. *Hoang H.G., Lin C., Tran H., Chiang C.F., Bui X.T., Cheruiyot N.K., Shern C.C., Lee C.W.* Heavy metal contamination trends in surface water and sediments of a river in a highly-industrialized region // *Env. Technol. Innov.* 2020. Vol. 20. Art. 101043. EDN: HLWSUU. <https://doi.org/10.1016/J.ETI.2020.101043>
30. *Lu Q., Bian Z., Tsuchiya N.* Assessment of heavy metal pollution and ecological risk in river water and sediments in a historically metal mined watershed, Northeast Japan // *Env. Monit. Assess.* 2021. Vol. 193, № 12. Art. 814. EDN: YOWUZW. <https://doi.org/10.1007/s10661-021-09601-1>

31. Markich S.J., Brown P.L. Relative importance of natural and anthropogenic influences on the fresh surface water chemistry of the Hawkesbury Nepean River, south-eastern Australia // *Sci. Total Env.* 1998. Vol. 217, № 3. P. 201–230. EDN: ABVQPB. [https://doi.org/10.1016/s0048-9697\(98\)00188-0](https://doi.org/10.1016/s0048-9697(98)00188-0)
32. Nocedal J., Wright S.J. Numerical optimization. N.Y.: Springer, 2006. 686 p.
33. Dennis J.E., Schnabel R.B. Numerical methods for unconstrained optimization and nonlinear equations. N.Y.: SIAM, 1996. 394 p.
34. Global Optimization Toolbox. User's Guide. The MathWorks Inc., 2020. 878 p.
35. Река Барнаулка: экология, флора и фауна бассейна / под ред. М.М. Силантьевой. Барнаул: Изд-во АГУ, 2000. 224 с.
36. Fischer H.B., List E.J., Koh R., Imberger J., Brooks N.H. Mixing in inland and coastal waters. N.Y.: Academic Press, 1979. 483 p.
37. Frank E., Harrell Jr. Regression modeling strategies: with applications, to linear models, logistic and ordinal regression, and survival analysis. Heidelberg: Springer, 2015. 598 p.
38. Alekseev G.V., Vakhitov I.S., Soboleva O.V. Stability estimates in identification problems for the convection-diffusion-reaction equation // *Comput. Math. Math. Phys.* 2012. Vol. 52, № 12. P. 1635–1649. EDN: RGIVCZ. <https://doi.org/10.1134/S0965542512120032>
39. Драйнер Н., Смут Н. Прикладной регрессионный анализ. М.: Диалектика, 2017. 918 с.
40. Strijov V., Weber G.W. Nonlinear regression model generation using hyperparameter optimization // *Comput. Math. Appl.* 2010. Vol. 60, № 4. P. 981–988. EDN: MXNTYD. <https://doi.org/10.1016/j.camwa.2010.03.021>
41. Луттл Дж., Рубин Д.Б. Статистический анализ данных с пропусками. М.: Финансы и статистика, 1991. 336 с.

References

1. Lobchenko E.E., Nichiporova I.P., Olennikova N.N., Romanyuk O.L., Lyampert N.A. Spatio-time changes in the content of pollutants in the surface waters of the Northern Dvina Basin. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2022;(1):57-65. (In Russ.). EDN: RJOJPW. <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2022-1-57-65>
2. 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.). EDN: WDGJZD. <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2025-2-83-94>
3. Chen Y., Lin L.-S., Viadero R.C., Gang D.D. Nonpoint source pollution. *Water Environ. Res.* 2007;79(10):2032-2048. <https://doi.org/10.2175/106143007X218656>
4. Lintern A., Webb J.A., Ryu D., Liu S., Bende-Michl U., Waters D., Leahy P., Wilson P., Western A.W. Key factors influencing differences in stream water quality across space. *Wires Water.* 2018;5(1):e1260. <https://doi.org/10.1002/wat2.1260>
5. Narendran N. Review on environmental problem due to water pollution. *Int. J. Eng. Res.* 2015;3(4):43-45. <https://doi.org/10.70729/IJSER1570>
6. Argoul P. *Overview of inverse problems.* DEA: Ecole Nationale des Ponts et chaussées; 2012. 283 p.
7. Kern M. *Numerical methods for inverse problems.* New York: Wiley-ISTE; 2016. 240 p. <https://doi.org/10.1002/9781119136941>
8. Samarskii A.A., Vabishchevich P.N. *Numerical methods for solving inverse problems of mathematical physics.* Berlin, New York: Walter de Gruyter; 2007. 452 p.
9. Badia A., Hamdi A. Inverse source problem in an advection-dispersion-reaction system: application to water pollution. *Inverse Probl.* 2007;23(5):2103-2120. <https://doi.org/10.1088/0266-5611/23/5/017>
10. Mamonov A., Tsai R. Point source identification in non-linear advection-diffusion-reaction systems. *Inverse Probl.* 2013;29(3):035009. <https://doi.org/10.1088/0266-5611/29/3/035009>
11. Hassin A.B., Tlatli N.H., Khayat F. Data completion problem for the advection-diffusion equation with aquifer point sources. *Math. Meth. Appl. Sci.* 2021;44(2):1651-1663. EDN: NKGGEJ. <https://doi.org/10.1002/mma.6868>
12. Lugão B.C., Knupp D.C., Rodrigues P.P.G.W. Direct and inverse simulation applied to the identification and quantification of point pollution sources in rivers. *Environ. Model. Softw.* 2022;156:105488. EDN: KYLSYS. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2022.105488>
13. Hamdi A. Identification of point sources in two-dimensional advection-diffusion-reaction equation: application to pollution sources in a river. Stationary case. *Inverse Probl. Sci. Eng.* 2007;15(8):855-870. <https://doi.org/10.1080/17415970601162198>

14. Shen J., Jia J.J., Sisson G. Inverse estimation of nonpoint sources of fecal coliform for establishing allowable load for Wye River, Maryland. *Water Res.* 2006;40(18):3333-3342. EDN: KHXIIN. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2006.07.035>
15. Boano F., Revelli R., Ridolfi L. Source identification in river pollution problems: a geostatistical approach. *Water Resour. Res.* 2005;41(7):W07023. <https://doi.org/10.1029/2004wr003754>
16. Permanoon E., Mazaheri M., Amiri S. An analytical solution for the advection-dispersion equation inversely in time for pollution source identification. *Phys. Chem. Earth.* 2022;128(2):103255. EDN: CUAAHQ. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2022.103255>
17. Rashedi K. A numerical solution of an inverse diffusion problem based on operational matrices of orthonormal polynomials. *Math. Meth. Appl. Sci.* 2021;44(2):12980-12997. EDN: FVQRLT. <https://doi.org/10.1002/mma.7601>
18. Sousa D.M., Roberty N.C. An inverse source problem for the stationary diffusion-advection-decay equation. *Inverse Probl. Sci. Eng.* 2012;20(7):891-915. <https://doi.org/10.1080/17415977.2011.609466>
19. Kulbay M., Mukanova B., Sebu C. Identification of separable sources for advection-diffusion equations with variable diffusion coefficient from boundary measured data. *Inverse Probl. Sci. Eng.* 2017;25(2):279-308. EDN: XMOWFH. <https://doi.org/10.1080/17415977.2016.1160396>
20. Jun K.S., Kang J.W., Lee K.S. Simultaneous estimation of model parameters and diffuse pollution sources for river water quality modelling. *Water Sci. Technol.* 2007;56(1):55-162. <https://doi.org/10.2166/wst.2007.447>
21. Chaikovskii D., Zhang Y. Convergence analysis for forward and inverse problems in singularly perturbed time-dependent reaction-advection-diffusion equations. *J. Comput. Phys.* 2022;470:111609. EDN: KGHBDL. <https://doi.org/10.1016/j.jcp.2022.111609>
22. Lukyanenko D.V., Shishlenin M.A., Volkov V.T. Solving of the coefficient inverse problems for a nonlinear singularly perturbed reaction-diffusion-advection equation with the final time data. *Commun. Nonlinear Sci. Numer. Simul.* 2018;54:233-247. EDN: XMUOGN. <https://doi.org/10.1016/j.cnsns.2017.06.002>
23. Acheson D.J. *Elementary fluid dynamics*. Oxford: Oxford University Press; 1990. 408 p.
24. James A. *Mathematical models in water pollution control*. New York: Wiley, 1978. 420 p.
25. Yasinskii S.V., Vishnevskaya I.A., Venitsianov E.V. Diffuse pollution of water bodies and estimation of export of biogenic elements under different scenarios of water use in the watershed. *Water Resources.* 2019;46(2):266-277. EDN: KSDMWI. <https://doi.org/10.1134/S0097807819020179>
26. Filimonov V.Yu., Lovtskaya O.V., Zinoviev A.T. Calculation of dissolved pollutants mass flow according to the data of their concentration spatial distribution in the sites of small plain rivers. *Eurasian J. Math. Comput. Appl.* 2023;11(4):14-28. EDN: GSJHIR. <https://doi.org/10.32523/2306-6172-2023-11-4-14-28>
27. Byrne P., Onnis P., Runkel R.L., Frau I., Lynch S.F.L., Edwards P. Critical shifts in trace metal transport and remediation performance P future low river flows. *Environ. Sci. Technol.* 2020;54(24):15742-15750. EDN: MALHIY. <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c04016>
28. Ren J., Hao J., Tao L. Concentrations, spatial distribution, and pollution assessment of heavy metals in surficial sediments from upstream of Yellow River. China. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 2021;28(3):2904-2913. EDN: FSCPAQ. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-10349-3>
29. Hoang H.G., Lin C., Tran H., Chiang C.F., Bui X.T., Cheruiyot N.K., Shern C.C., Lee C.W. Heavy metal contamination trends in surface water and sediments of a river in a highly-industrialized region. *Environ. Technol. Innov.* 2020;20:101043. EDN: HLWSUU. <https://doi.org/10.1016/J.ETI.2020.101043>
30. Lu Q., Bian Z., Tsuchiya N. Assessment of heavy metal pollution and ecological risk in river water and sediments in a historically metal mined watershed, Northeast Japan. *Environ. Monit. Assess.* 2021;193(12):814. EDN: YOWUZW. <https://doi.org/10.1007/s10661-021-09601-1>
31. Markich S.J., Brown P.L. Relative importance of natural and anthropogenic influences on the fresh surface water chemistry of the Hawkesbury Nepean River, south-eastern Australia. *Sci. Total Environ.* 1998;217(3):201-230. EDN: ABVQPB. [https://doi.org/10.1016/s0048-9697\(98\)00188-0](https://doi.org/10.1016/s0048-9697(98)00188-0)
32. Nocedal J., Wright S. J. *Numerical optimization*. New York: Springer; 2006. 686 p.
33. Dennis J.E., Schnabel R.B. *Numerical methods for unconstrained optimization and nonlinear equations*. New York: SIAM; 1996. 394 p.
34. *Global Optimization Toolbox*. User's Guide. The MathWorks, Inc.; 2020. 878 p.
35. Silantyeva M.M., ed. *The Barnaulka River: ecology, flora, and fauna of the basin*. Barnaul: Altai State University; 2000. 224 p. (In Russ).
36. Fischer H.B., List E.J., Koh R., Imberger J., Brooks N.H. *Mixing in inland and coastal waters*. New York: Academic Press; 1979. 483 p.
37. Frank E., Harrell Jr. *Regression modeling strategies: with applications, to linear models, logistic and ordinal regression, and survival analysis*. Heidelberg: Springer; 2015. 598 p.

38. Alekseev G.V., Vakhitov I.S., Soboleva O.V. Stability estimates in identification problems for the convection-diffusion-reaction equation. *Comput. Math. Math. Phys.* 2012;52(12):1635-1649. EDN: RGIVCZ. <https://doi.org/10.1134/S0965542512120032>

39. Draper N.R., Smith H. *Applied regression analysis*. Moscow: Dialectics; 2017. 918 p. (In Russ.).

40. Strijov V., Weber G.W. Nonlinear regression model generation using hyperparameter optimization. *Comput. Math. Appl.* 2010;60(4):981-988. EDN: MXNTYD. <https://doi.org/10.1016/j.camwa.2010.03.021>

41. Little J., Rubin D.B. *Statistical analysis of missing data*. Moscow: Finance and Statistics; 1991. 336 p. (In Russ.).

Информация об авторах

В.Ю. Филимонов – доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник лаборатории гидрологии и геоинформатики ИВЭП СО РАН.

О.В. Ловцкая – старший научный сотрудник лаборатории гидрологии и геоинформатики ИВЭП СО РАН.

А.Ю. Танакова – ведущий инженер химико-аналитического центра ИВЭП СО РАН.

И.Е. Васильева – ведущий инженер химико-аналитического центра ИВЭП СО РАН.

Information about the authors

V.Yu. Filimonov – Doctor of Science (Physics and Mathematics), Chief Researcher of the Laboratory of Hydrology and Geoinformatics, IWEP SB RAS.

O.V. Lovtskaya – Senior Researcher of the Laboratory of Hydrology and Geoinformatics, IWEP SB RAS.

A.Yu. Tanakova – Leading Engineer of the Chemical-Analytical Center, IWEP SB RAS.

I.E. Vasilyeva – Leading Engineer of the Chemical-Analytical Center, IWEP SB RAS.

*Статья поступила в редакцию 18.09.2025; одобрена после рецензирования 18.10.2025; принята к публикации 11.11.2025.
The article was submitted 18.09.2025; approved after reviewing 18.10.2025; accepted for publication 11.11.2025.*

Original article

UDC 379.8+745(502.3)

<https://doi.org/10.18522/1026-2237-2026-1-133-143>

TRADITIONAL FOLK CRAFTS AND HANDICRAFTS OF THE NORTH-EAST CAUCASUS IN THE CONTEXT OF ECOTOURISM DEVELOPMENT

Khava Sh. Zaburaeva

Ibragimov Complex Institute of the Russian Academy of Sciences, Grozny, Russia
eveggne@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9326-5758>

Abstract. *The North-East Caucasus is a unique cultural region which represents significant interest for tourism. This study identifies and cartographically visualizes spatial variations in traditional folk crafts, taking into account the ethnogenetic characteristics of the territory. The research results demonstrate that folk crafts and handicrafts have been predominantly preserved in mountainous and highland areas. Jewelry-making has flourished for centuries in the mountainous districts of Dagestan (Laksky, Khunzakhsky, Dakhadayevsky, etc.), as well as in the Nazranovsky district of Ingushetia. Hand-woven carpet production persists mainly in the south-east part of the study area (Dokuzparinsky, Akhtynsky, Kurakhsky and other districts of Dagestan). Artisans specializing in felt products can only be found in a few districts of Chechnya (Vedensky, Nozhay-Yurtovsky, Shalinsky), Ingushetia (Malgobeksky), and Dagestan (Nogaysky, Botlikhsky). Analysis of the distribution of folk crafts in relation to ethnogenetic regional types of the North-East Caucasus revealed that homogeneous or adjacent districts are characterized by similar crafts and handicrafts. Mountainous areas preserving folk art and traditional crafts hold potential as centers for developing various forms of ecotourism, which would positively impact local employment. The article also demonstrates the crucial role of ecotourism in preserving the historical and cultural heritage of indigenous peoples in the North-East Caucasus amid contemporary geopolitical, geoeological and socioeconomic challenges.*

Keywords: *ecotourism, mountain regions, art, souvenirs, cultural heritage, potential, folk crafts*

For citation: *Zaburaeva Kh.Sh. Traditional Folk Crafts and Handicrafts of the North-East Caucasus in the Context of Ecotourism Development. Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science. 2026;(1):133-143. <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2026-1-133-143>*

Acknowledgments: *this work was supported by the Russian Science Foundation under grant No. 23-17-00218 "Ecological tourism and recreational nature management in the North-East Caucasus".*

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

Научная статья

ТРАДИЦИОННЫЕ НАРОДНЫЕ ПРОМЫСЛЫ И РЕМЕСЛА СЕВЕРО-ВОСТОЧНОГО КАВКАЗА В КОНТЕКСТЕ РАЗВИТИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО ТУРИЗМА

Хава Ш. Забураева

*Комплексный научно-исследовательский институт им. Х.И. Ибрагимова Российской академии наук,
Грозный, Россия*
eveggne@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9326-5758>

© Zaburaeva Kh.Sh, 2026

Аннотация. Северо-Восточный Кавказ – уникальный культурный регион, представляющий большой интерес для туристов. В рамках данного исследования выявлены и картографически визуализированы пространственные различия традиционных народных промыслов с учетом этногенетических особенностей исследуемой территории. Результаты исследования показывают, что народные промыслы и ремесла преимущественно сохранились в горных и высокогорных районах. Ювелирное искусство на протяжении многих столетий успешно развивается в горных районах Дагестана (Лакский, Хунзахский, Дахадаевский и др.), а также в Назрановском районе Ингушетии. Ручное ковроткачество сохранилось в основном на юго-востоке исследуемой территории (Докузпаринский, Ахтынский, Курахский и другие районы Дагестана). Мастеров по изготовлению войлочных изделий можно встретить лишь в нескольких районах Чечни (Веденский, Ножай-Юртовский, Шалинский), Ингушетии (Малгобекский) и Дагестана (Ногайский, Ботлихский). Анализ распространения народных промыслов с учетом этногенетических типов районов Северо-Восточного Кавказа показал, что однородные либо граничащие друг с другом районы характеризуются одинаковым ремеслом и промыслами. Горные районы, где сохранилось народное искусство и традиционные народные промыслы, в перспективе могут стать центрами развития различных видов экологического туризма, что положительно отразится и на занятости населения. Доказана важная роль экологического туризма в сохранении историко-культурного наследия коренных народов Северо-Восточного Кавказа с учетом современных геополитических, геоэкологических и социально-экономических вызовов.

Ключевые слова: экологический туризм, горные районы, искусство, сувениры, культурное наследие, потенциал, народные промыслы

Для цитирования: Zaburaeva Kh.Sh. Traditional Folk Crafts and Handicrafts of the North-East Caucasus in the Context of Ecotourism Development // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2026. № 1. С. 133–143. <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2026-1-133-143>

Благодарности: исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-17-00218 «Экологический туризм и рекреационное природопользование на Северо-Восточном Кавказе».

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

Problem Statement

Global experience demonstrates that crafts and arts have become important factors in the tourism industry. There exists a significant correlation between the production of handicrafts and tourist inflows, job creation, increased income, and enhanced social status of artisans. The development of folk crafts enables tourists to genuinely understand the unique traditions of indigenous populations.

Tourism plays a key role in preserving both tangible and intangible cultural heritage of indigenous peoples (language, history, folklore, art, dance, customs, rituals, crafts, etc.) [1]. In several countries, cultural heritage resources are evaluated as tools for achieving sustainable territory development goals [2].

The sale of folk crafts and handicrafts as souvenirs has become an important factor in promoting tourist attractions and national identity in many countries, stimulating tourism growth [3, 4]. In Russia, traditional folk crafts and handicrafts have been preserved in almost every region. Among the earliest projects targeting the restoration and promotion of traditional crafts was one undertaken in the Altai Republic at the start of the 1990s [5]. Currently, traditional crafts are emerging as a key factor in attracting an increasingly large flow of tourists. Well-known examples include Rostov finift (Yaroslavl Region), the Dymkovo toy (Kirov Region), and the Orenburg downy shawl (Orenburg Region). Another successful model is the Christmas tree ornament factory in the Bryansk Region, a major tourist attraction. The factory offers tours where visitors can observe the entire production process. Its master glassblowers can craft bespoke ornaments and even add a personal inscription upon request.

The first international conference examining the connection between tourism and crafts was held in Tehran in 2006 [6]. Its main objectives included assessing poverty reduction opportunities through local tourism's role in preserving traditional crafts. Simultaneously, the international community recognizes the need to transition to environmentally sustainable forms of tourism, considering that geoeological risks associated with landscape degradation are particularly relevant in mountainous tourist areas [7].

Therefore, alongside tourism development planning, it is necessary to research opportunities for preserving ethnocultural heritage, identity and multicultural traditions, which are becoming increasingly relevant

globally, while ensuring the conservation of vulnerable mountain ecosystems, including the study area [8]. These goals align with the concept of ecotourism - one of the most discussed concepts worldwide [2, 9].

Analysis of Recent Research and Publications

In recent decades, there has been a sharp increase in publications dedicated to ecotourism [10, 11]. The study [12] conducted a literature review on ecotourism from 2012 to 2022 in order to examine new trends and developments in this field. The peak of publications occurred in 2021. The evolution of ecotourism shows growing research examining ecotourism in the context of sustainable regional development. The United States, China and Australia lead in number of publications.

Currently, ecotourism accounts for about 20 % of the global tourism market [10]. Ecotourism potential encompasses both natural and cultural heritage sites. The particular relevance of this tourism form in mountain regions is explained by its ability to stimulate socioeconomic development in these territories [13]. The study results [8] confirm that effective ecotourism policies can reduce negative environmental impacts and improve the quality of tourism services. The latter can also be achieved through advancements in information technologies for ecotourism [14].

The study focuses on mountain regions of the North-East Caucasus, which have long attracted tourists with their diverse natural-climatic and geomorphological conditions that create a favorable tourism image for most mountain regions worldwide. Various crafts have developed here - carpet weaving, patterned knitting, wood and bone carving, artistic metalworking and many others. Remote mountain villages still maintain traditions and crafts of global renown [15].

The study aimed to examine geographical patterns in the distribution of traditional folk crafts across the North-East Caucasus and assess their potential for ecotourism development.

The scientific novelty lies in being the first study to examine geographical patterns of traditional craft distribution (considering ethnogenetic characteristics) in the North-East Caucasus for developing environmentally sustainable tourism forms.

Materials and Methods

The research utilized methodological developments by Russian and international scholars in tourism, recreational land use, and environmental conservation, along with official statistics from Rosstat. Data on traditional crafts were obtained from regional ministries of culture and tourism, as well as folk art and craft centers. Some were personally visited by the author during a Russian Science Foundation-funded project.

The study employed geosystem and geosituational approaches, along with systematic, comparative-geographical, historical, demographic, ethnocultural analysis and statistical processing. To examine relationships between ethnic groups and traditional craft distribution, data on surviving crafts and trades were mapped onto ethnogenetic regional types. The map was created using Corel DRAW software.

Results

Origins and Development of Traditional Folk Crafts

The Caucasus is a majestic mountainous macroregion between Europe and Asia, where ethnic communities of various genetic types, language families and religions have freely settled throughout history. Since the early 20th century, the largest indigenous ethnic groups in the North Caucasus remain Chechens (17-20 %) and Avars (13-15 %). The Caucasus differs from other mountain regions (Crimea, Altai, Urals, etc.) in its high population density and polyethnic, multilingual composition.

Traditional crafts of the North-East Caucasus originated in ancient times, underwent several developmental stages, and became integral to traditional national culture. These crafts serve as keys unlocking the cultural distinctiveness of the Caucasus. Since ancient times, the indigenous ethnic groups of the North-East Caucasus have developed and refined their skills in processing leather, wool, stone, wood, clay, metal, and other materials. Initially, these forms of domestic crafts within subsistence economies were driven by the need to meet the demands of family members for clothing and household items. However, with the growth of trade and exchange, they evolved into specialized crafts that provided additional income to households.

The uniqueness and diversity of folk crafts in the North-East Caucasus stem from the fact that the region is home to numerous ethnic groups and peoples who, over centuries, have cultivated and perfected their traditional craftsmanship. Each group has contributed to the cultural heritage, shaping a distinctive cultural region that holds great appeal for tourists. The development of these crafts has also been influenced by the geographical and historical peculiarities of the region. The grandeur of the mountains, the striking beauty of local architecture, and the unique mentality of the people are all embodied in the handmade creations of talented artisans.

Economically, the mountainous regions of the North-East Caucasus are agro-oriented, indicating significant potential for the development of agritourism. The historically established way of life of the mountain peoples has fostered the development of crop farming and livestock breeding in these areas. This, in turn, led to the widespread practice of wool processing and the production of felted goods - primarily carpets with diverse ornamental patterns. Felt was also used to craft sleeveless outer garments for shepherds. Notably, while the felting techniques among the North Caucasian peoples were largely uniform, the color schemes, ornamentation, and decorative elements of felt products exhibit distinct local characteristics [16]. The mass production of felt goods persisted until the early 20th century [17]. Thus, traditional family crafts encompass not only agriculture (crop farming, livestock, forest product gathering) but also souvenir production, household items, traditional clothing and footwear, and other goods and services.

Woodworking among North-East Caucasus peoples represents one of the oldest forms of labor activity and one of the earliest branches of craft production, meeting the everyday needs for wooden household items. As the most accessible and affordable materials, wood and clay were extensively utilized by local artisans. The widespread use of wood in daily life since ancient times has preserved archaic traditional ornaments in woodcarving.

A striking continuity of motifs is observed in Untsukul'sky crafts from the 19th to 21st centuries, where patterns of triangles, chevrons, lines, and circles - identical to those found on Bronze Age axes discovered in Dagestan (Late Bronze and Early Iron Ages) - remain prevalent. These symbols originally represented fertility cults. By the early 19th century, the craft had diversified to include the production of walking sticks and horse whips.

The evolution of woodworking art followed complex developmental paths while retaining its distinctive character. Traditional decorative woodwork encompasses household items (measuring vessels, mugs, goblets, trays), furniture (tables, chairs, benches, chests, sofas), architectural elements (door/window frames, ceiling beams) and musical instruments. Pottery played a secondary economic role, with archaeological evidence dating it to the 1st century AD [17]. Metalworking also has ancient roots among the peoples of the North-East Caucasus according to archeological materials [18].

Dagestan has always stood out among other regions for its jewelry-making. Many traditional adornments, integral to women's costumes, have ancient origins and served protective rather than decorative functions. Weaponry and jewelry production reached high levels in Kubachi, Kumukh, Gotsatl, Gamsutl, Untsukul, Amuzgi, Kharbuk, Verkhneye Kazanishche and Chokh, producing cold steel, firearms and diverse jewelry. The earliest surviving jewelry (wedding bracelets, rings, pendants) date to the 17th-18th centuries, with most pieces from the late 19th to early 20th centuries [6].

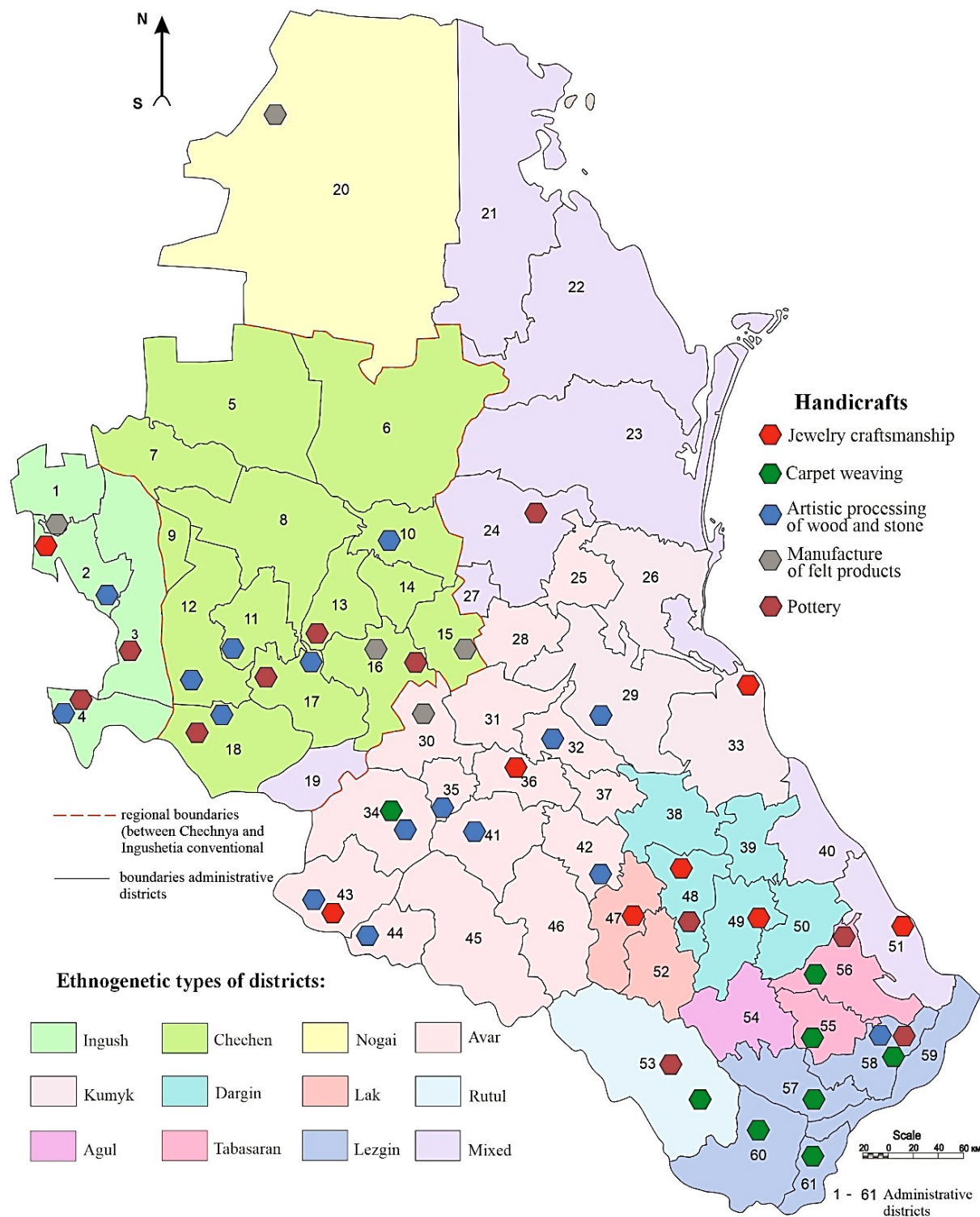
Indigenous Chechen and Ingush populations never engaged in mass jewelry production. However, their artisans historically created decorative and functional jewelry as well as weapons with jewelry elements, primarily in villages like Evloy, Verkhny Alkun, Tsecha-Akhk, Tsori, Egikal, Erzi and Metskhal [19].

Ethnogenetic Characteristics and Spatial Distribution of Traditional Crafts

The North-East Caucasus has long been inhabited by dozens of ethnic groups preserving unique traditions and cultural identities. Polyethnic Dagestan and monoethnic Chechnya and Ingushetia are not just geographical neighbors. Having common features of historical development in the past, their ethnic groups share economic, trade and cultural connections.

Previous research on ethnic composition in municipal districts enabled identification of 12 ethnogenetic regional types based on dominant ethnic groups (>50 % population) [20]. Each type is named after its predominant ethnicity, except mixed-type districts with balanced ethnic representation.

Spatial differentiation analysis of the spread of traditional folk crafts in the North-East Caucasus reveals that most creative potential is concentrated in mountainous and highland areas, where family traditions of jewelry-making, pottery and other crafts continue across generations (Figure).



Administrative districts: 1 - Malgobeksky; 2 - Nazranovsky; 3 - Sunzhensky; 4 - Dzheyrakhsy; 5 - Naursky; 6 - Shelkovskoy; 7 - Nadterechny; 8 - Groznensky; 9 - Sunzhensky; 10 - Gudermessky; 11 - Urus-Martanovsky; 12 - Achkhoy-Martanovsky; 13 - Shalinsky; 14 - Kurchaloyevsky; 15 - Nozhay-Yurtovsky; 16 - Vedensky; 17 - Shatoysky; 18 - Itum-Kalinsky; 19 - Sharovsky; 20 - Nogaysky; 21 - Tarumovsky; 22 - Kizlyarsky; 23 - Babayurtovsky; 24 - Khasavyurtovsky; 25 - Kizilyurtovsky; 26 - Kumtorkalinsky; 27 - Novolaksky; 28 - Kazbekovsky; 29 - Buynaksky; 30 - Botlikhsky; 31 - Gumbetovsky; 32 - Untsukulsky; 33 - Karabudakhkentky; 34 - Tsumadinsky; 35 - Akhvakhsky; 36 - Khunzakhsky; 37 - Gergebilsky; 38 - Levashinsky; 39 - Sergokalinsky; 40 - Kayakentsky; 41 - Shamilsky; 42 - Gumbsky; 43 - Tsuntinsky; 44 - Bezhtinsky Section; 45 - Tlyaratinsky; 46 - Charodinsky; 47 - Laksky; 48 - Akushinsky; 49 - Dakhadayeysky; 50 - Kaytagasky; 51 - Derbentsky; 52 - Kulinsky; 53 - Rutulsky; 54 - Agulsky; 55 - Khivsky; 56 - Tabasaransky; 57 - Kurakhsky; 58 - Sulcymán-Stalsky; 59 - Magaramkentky; 60 - Akhtynsky; 61 - Dokuzparinsky

Types of ethnogenetic districts and the distribution of handicrafts in the North-East Caucasus
 / Типы этногенетических районов и распространение народных промыслов
 на Северо-Восточном Кавказе

Woodcarving art persists in mountainous Dzheyrakhsky and Nazranovsky districts (Ingushetia), Itum-Kalinsky, Achkhoy-Martanovsky and Shatoysky districts (Chechnya), and Tsumadinsky, Tsuntinsky, Shamilsky, Laksky, Untsukulsky and other Dagestani districts. Dagestan also maintains wood-working schools (Gidatlinskaya, Kumykskaya, Lezginskaya, Kaytagaskaya, Lakskaya, Tabasaranskaya, Derbentskaya, etc.), where students can master the skills of artistic wood processing.

Traditional jewelry-making centers remain in mountainous Khunzakhsky, Dakhadayevsky, Laksky and other Dagestani districts. The highest mastery of artistic metalworking is embodied in the creation of women's jewelry, tableware items, and various types of edged weapons (swords, bows, knives, daggers, helmets). In modern Chechnya and Ingushetia, there is an extremely limited number of jewelers and metal artisans preserving their ancestors' traditional techniques.

In Ingushetia, this craft has survived primarily in the mountainous part of the Nazranovsky district, while in Chechnya, it is concentrated in the republic's capital. Here, various jewelry pieces are crafted from silver and gold using precious and semi-precious stones, including both men's and women's adornments. While retaining distinctive national features, this form of decorative and applied art simultaneously undergoes transformation, evolving within the context of pan-European artistic trends. Of particular note is the production of modern decorative daggers, created based on historical edged weapon designs, where traditional forms are combined with innovative decorative elements.

Nowadays felt-making survives in only a few districts, including Botlikhsky and Nogaysky (Dagestan), Vedensky, Nozhay-Yurtovsky, Shalinsky (Chechnya) and Malgobeksky (Ingushetia). Carpet weavers, a craft that has evolved in this region over many years, can be found in Dokuzparinsky, Akhtynsky, Tabasaransky and other districts. Pottery persists in both mountainous (e.g., Shatoysky - Chechnya; Dzheyrakhsky - Ingushetia) and lowland areas (Khasavyurtovsky, Suleyman-Stalsky - Dagestan).

As shown in the figure, craft distribution correlates with ethnogenetic regional types of the North-East Caucasus. Chechen and Ingush district types share similar crafts which include woodworking, stone and metal processing, felt-making, pottery. This is due to the fact that Chechens and Ingush are related peoples, who reflect their ethnic kinship and share history.

In polyethnic Dagestan, homogeneous or adjacent districts are also characterized by sharing similar crafts. For example, the folk crafts basis of the Avar-type districts predominantly feature woodworking and jewelry, while Tabasaransky, Rutulsky, Lezginsky and Agulsky types specialize in such ancient art as carpet weaving. These areas differ in their ethnogenetic composition but they are adjacent to each other. Lowland northern districts, located in semi-desert and steppe zones, show minimal craft development, except Nogaysky district.

Among the current forms of organizing tourist leisure activities, master classes hold a significant place, with a particular focus on traditional crafts - both those preserved as museum exhibits and those still used in daily life. For example, among mountain communities, these include: weaving and textile crafts, wood and stone carving, production of felt and leather goods, jewelry-making (filigree, gold and silver embroidery).

Sustainable regional development requires more balanced integration of tradition and innovation in the tourism and recreational spheres, with innovations building on traditional foundations. The traditions of the North Caucasus peoples have demonstrated remarkable resilience throughout centuries of social development, enduring diverse external cultural influences while exhibiting flexibility and adaptation to each new historical epoch. Today, there is no doubt about the ability of traditions to adapt and develop "immunity" in response to significant challenges posed by the global information space, nor about modern society's capacity to embrace and revitalize tradition [21].

As demonstrated in a study [11] focusing on a region of Vietnam, cultural revival does not entail preserving culture in a "frozen" state but rather involves adapting traditions to contemporary realities. Globally, many traditional crafts have become less viable due to mass production, with some disappearing entirely [22]. The affordability and accessibility of factory-made goods have reduced demand for handmade products. In the North-East Caucasus, crafts such as felt production, pottery, Kaytagasky embroidery, and Ispiksky ceramics are now endangered and require support [23].

Undoubtedly, many traditional crafts in the region have undergone transformation over time. The range of goods produced by artisans has evolved significantly since their inception. For example, while ancient jewelry was made of bronze, later periods introduced silver and gold ornaments. During the Middle Ages, jewelers primarily crafted swords and sabers, whereas today, decorative items (rings,

bracelets, necklaces, earrings, pendants, etc.), ornamental weapons, and gold/silver embroidery dominate. A relatively recent development this unique decorative woodworking art featuring inlaid silver or nickel silver wire patterns, rooted in ancient highland traditions of wood and metalworking. For instance, artisans from the mountain village of Untsukul'sky, basing on the ancient traditions, gained international acclaim within a short period by showcasing their work at global exhibitions.

In Dagestan, a region of the North-East Caucasus, numerous artistic centers continue to operate, producing souvenir items and diplomatic gifts. The city of Derbent is home to the North Caucasus Federal District Folk Crafts Center, which conducts lectures and seminars on artistic design, economics, and marketing. Dagestan has long been distinguished among Caucasian regions for its diversity of traditional crafts. The most renowned centers of folk arts in Dagestan include: Kazi-Kumukh (jewelry, weapons, gold embroidery, copperwork), Kubachi (jewelry, weapons, gold embroidery, copperwork), Sulevzent (pottery), Urma (mat weaving), Gotsatl (jewelry, weapons, bone carving, copperwork), Verkhneye Kazanishche (weapons), Tabasaran (carpet weaving), Kaytag (silk embroidery), Kunbatar (felt), Balkhar (unglazed pottery), Ispik (polychrome ceramics), Untsukul (wood inlay), Botlikh (burka cloaks) [6].

In the city of Kizlyar, a specialized enterprise continues to manufacture traditional weapons, particularly sabers and daggers. The production is done manually using time-honored Caucasian and Cossack techniques. The facility regularly organizes free guided tours for visitors.

In Chechnya and Ingushetia Associations of Artisans and Craftsmen have been established to preserve and promote traditional crafts. These organizations produce jewelry, ceramics, national costumes, embroidery, and wood carvings, presenting their works at international exhibitions. In 2019, the North Caucasus Federal District Folk Crafts Center commenced operations in Grozny.

The domestic rituals of Caucasian highlanders (associated with weddings, births, funerals, etc.) function as mechanisms for sustaining traditional culture and could serve as a significant factor in developing ecotourism in the region [24]. These traditions-encompassing moral norms, values, customs, rites, and social mores are acknowledged to be subject to transformation, much like the evolving domestic practices of local communities.

The North-East Caucasus hosts museums of diverse profiles that could form the basis for ecotourism development. For example, the Kh. Isaev Local History Museum in the highland Itum-Kalinsky District of Chechnya displays household items, antique weapons, jewelry, and other artifacts.

Dagestan boasts over twenty local history museums and cultural-historical complexes that enhance the region's tourism and recreational potential. Among the most notable are Alibek Takho-Godi National Museum of Dagestan in Makhachkala, The Carpet and Decorative Arts Museum in Derbent, The Historical-Architectural Museum in the mountain village of Gunib, The Akhtynsky Local History Museum in the mountain village of Akhty.

With more than half of the population in these regions which resides in rural areas, agritourism could play a pivotal role in reducing unemployment, stimulating small businesses, creating new infrastructure, and elevating the status of rural life, particularly among younger generations. The high social efficacy of this approach is evidenced by the extensive experience of agritourism development in European countries (Austria, France, Switzerland, Ireland, Hungary, etc.) [25]. A key aspect of agritourism development involves promoting rural tourism products through souvenirs, with particular emphasis on design [26].

Establishing a network of guesthouses, including in remote mountain villages - where infrastructure costs are low and hospitality levels are high - could further boost employment. For instance, cheese tourism holds significant potential in highland areas. In the mountainous regions of Chechnya and Dagestan, various types of cheese have been produced for centuries, often using unique recipes passed down through generations.

International researchers identify culinary appeal and service quality as critical factors shaping a region's (or country's) tourism image [27]. Modern smart technologies in food preparation are also considered capable of enhancing service quality and fostering a positive image for tourist destinations. In the North-East Caucasus, exposure to national cuisine could serve as a key element of tourism attractiveness.

The conducted analysis demonstrates that for the development of ecotourism in the North-East Caucasus, it is essential to cultivate and fully leverage the potential of traditional folk crafts and handicrafts. However, the use of crafts' potential for tourism development and increasing local employment is hampered by a multitude of problems. These challenges are most acute in the mountainous districts, which

hold a significant share of this potential. These include economic and infrastructural constraints (inadequate transport accessibility, insufficient marketing support, unstable electricity supply, lack of start-up capital and accessible financing for local artisans, low digital literacy among craftspeople, absence of high-speed internet - which is critical for online product promotion, participation in virtual fairs, and organizing e-commerce, etc.); and socio-demographic obstacles (outmigration of youth and population ageing, disruption of craft succession, reluctance to modernize products to meet market demands, etc.). Furthermore, tourism agencies typically do not offer tours to locations where local folk crafts have been preserved.

Conclusions

The mountainous regions of the North-East Caucasus are characterized by a rich history and ancient cultural traditions. Diverse ethnic groups have inhabited the area since the Paleolithic era, united not only by shared cultural practices but also by ethnogenetic and environmental factors [28].

The cultural distinctiveness of the multiethnic North-East Caucasus is reflected in music and art festivals, folk performances, artistic works, and museum exhibitions. Alongside modern economic activities, the local population has practiced various crafts since antiquity. Over centuries, artisans have perfected techniques such as gold embroidery, copper embossing, weaponry, carpet weaving, jewelry-making, metalworking, burka production, pottery, chasing, wood and stone carving, and knitting-all of which merit attention as promising ecotourism attractions. For example, the world-famous Kaytagsky embroidery is unique to Dagestan. Most traditional crafts are preserved in mountainous and highland areas.

Traditional crafts and folk arts serve as one of the principal instruments for promoting tourism products and may potentially transform into a substantial resource base for developing environmentally sustainable forms of tourism in this region. The author's emphasis on ecotourism takes into account contemporary challenges faced by mountain ecosystems under conditions of intensive anthropogenic development of these territories and their inherent vulnerability.

The research results demonstrate that traditional crafts constitute an integral cultural asset and one of the forms of creative expression among the peoples of the North-East Caucasus. Intangible cultural heritage is continuously recreated as it is transmitted from generation to generation and modified to reflect contemporary realities. This intangible cultural heritage holds significant importance as it fosters a sense of identity and continuity among communities while promoting social integration.

The focus on ethnocultural traditions represents a crucial characteristic of modern tourism. Tourism substantially cultivates respect for intangible cultural heritage and creates new platforms for its transmission to future generations [29, 30]. Current global tourism trends confirm that tourism can play a pivotal role in preserving and promoting cultural heritage through festivals, traditional crafts, and gastronomy [31]. Consequently, priority should be given to developing new tourism products that facilitate immersion in national distinctiveness and ethnic traditions by engaging tourists in various activities (folk dances, simple craft workshops, hiking, horseback riding, etc.). The primary regional directions for tourism development should aim to preserve and maintain established traditional crafts in the North-East Caucasus while enhancing interest in the region among residents of other cities, regions, and countries.

References

1. Ruhanen L., Whitford M. Cultural heritage and Indigenous tourism. *J. of Heritage Tourism*. 2019;14(3):179-191. <https://doi.org/10.1080/1743873X.2019.1581788>
2. Worku Tadesse G. Heritage resources as a driver of cultural tourism development in Ethiopia: a review. *Cogent Arts & Humanities*. 2023;10(1):2158623. EDN: FUXTGG. <https://doi.org/10.1080/23311983.2022.2158623>
3. Nzei J. A. Role of handicraft in tourism promotion and economic empowerment in Nigeria. *Int. J. of Social Science and Education Research Studies*. 2024;4(8):829-835. EDN: XYVGFR. <https://doi.org/10.55677/ijssers/V04I8Y2024-01>
4. Khushnazarova M.G. The importance and attractiveness of handicraft products for tourists. *Int. Multidisciplinary Research in Academic Science*. 2025;8(6):42-49. <https://doi.org/10.5281/zenodo.15619501>
5. Oktyabrskaya I.V., Pavlova E.Y., Skovpen A.V. Modern Altai crafts. *Archaeology, Ethnology and Anthropology of Eurasia*. 2009;37(1):129-135. EDN: RHRCFV. <https://doi.org/10.1016/j.aee.2009.05.015>
6. Atekov B.I., Ivlieva O.V., Shmytkova A.V. Tourism in the locations of traditional arts and crafts in the Northern Caucasus. *Scientific Notes of Vernadsky Crimean Federal University. Geography. Geology*. 2021;7(2):3-13. (In Russ.). EDN: ISSAKY.

7. Zhang Y.Q., Wang Y.L., Li H., Li X.-M. Risk assessment of mountain tourism on the Western Sichuan Plateau, China. *J. of Mountain Science*. 2023;20(11):3360-3375. EDN: YHYWIF. <https://doi.org/10.1007/s11629-022-7884-6>
8. Firman A., Moslehpour M., Qiu R., Lin P.-K., Ismail T., Rahman F.F. The impact of eco-innovation, ecotourism policy and social media on sustainable tourism development: evidence from the tourism sector of Indonesia. *Economic Research-Ekonomska Istraživanja*. 2023;36(2):2143847. EDN: ZPQHTI. <https://doi.org/10.1080/1331677X.2022.2143847>
9. Xu L., Ao C., Liu B., Cai Z. Ecotourism and sustainable development: a scientometric review of global research trends. *Environ. Dev. and Sustain.* 2023;25(4):2977-3003. EDN: QRXSAK. <https://doi.org/10.1007/s10668-022-02190-0>
10. Samal R., Dash M. Ecotourism, biodiversity conservation and livelihoods: understanding the convergence and divergence. *Int. J. of Geoheritage and Parks*. 2023;11(1):1-20. EDN: ARXYFQ. <https://doi.org/10.1016/j.ijgeop.2022.11.001>
11. Nguyen T.-S.T., Phan D.-H.T., Doan D.-H.L., Chau M.-N.T., Doan T.-T.T. Cultural revitalization for tourism development from an Indigenous perspective: the case of Ta Oi people, A Luoi District, Thua Thien Hue province, Vietnam. *Front. Sustain. Tourism*. 2025;4:1510934. EDN: VSFNMI. <https://doi.org/10.3389/frsut.2025.1510934>
12. Jin Z., Gao M. Global trends in research related to ecotourism: A bibliometric analysis from 2012 to 2022. *SAGE Open*. 2025;15(1):21582440251. EDN: JPCMRU. <https://doi.org/10.1177/21582440251316718>
13. Peev-Otiman P.D., Mateoc-Sîrb N. Analyzing the development possibilities of the mountain area of Banat, Caras-Severin County. *Sustainability*. 2023;15(11):8730. EDN: LLICIA. <https://doi.org/10.3390/su15118730>
14. Zainol N.R., Abdullah F.A., Rahman M.K. Exploring digitalization-driven in innovative eco-tourism sector. *Social Entrepreneurship and Social Innovation in Eco-Tourism*. Singapore: Springer; 2023:61-84. https://doi.org/10.1007/978-981-99-1827-0_5
15. Frolova O.A., Chernykh K.E. Decorative and applied art of Dagestan as a source of development of ethno-tourism. *The Multifaceted World of Traditional Culture and Folk Arts*. Proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference with Int. Participation. Kazan: Kazan State Institute of Culture; 2024:84-87. (In Russ.).
16. Akieva Kh.M. Ingush felt art as a type of traditional handicraft. *Bulletin of the Adyghe State University*. 2021;(1):103-110. (In Russ.). EDN: ZMEHSU.
17. Kurbanov M.Yu. Traditional crafts and trade Hutsul-Dargo of 18th - early 20th centuries. *Regional Problems of Economic Transformation*. 2022;(1):26-33. (In Russ.). EDN: MOQVMW. <https://doi.org/10.26726/1812-7096-2022-1-26-33>
18. Kurbanova A.M., Gadzhibekova N.S. Folk crafts of the Republic of Dagestan as objects for domestic tourism development. *Society: Philosophy, History, Culture*. 2025;(4):67-73. (In Russ.). EDN: RYFGKB. <https://doi.org/10.24158/fik.2025.4.8>
19. Zaburaeva Kh.Sh. Ethnocultural heritage of the North-Eastern Caucasus as a factor of eco-tourism development. *J. of Mountain Science*. 2024;21:2810-2824. EDN: RQUDJC. <https://doi.org/10.1007/s11629-024-8638-4>
20. Zaburaeva Kh.Sh., Krasnov E.V. Ethnogenetic typology of the regions of North-East Caucasus. *Regional Research*. 2014;2(44):106-112. (In Russ.). EDN: SILFCP.
21. Kanukova Z.V. Traditional culture of the North Caucasus peoples in contemporary society. *History, Archeology and Ethnography of the Caucasus*. 2024;20(3):599-606. (In Russ.). EDN: XKLOPM. <https://doi.org/10.32653/CH203599-606>
22. Liaoanshun, Banerjee S. Exploring cultural sustainability through the integration and innovation of traditional crafts with contemporary design. *Prestieesci Research Review*. 2025;2(2):286-296.
23. Kuzeeva Z.Z., Zelnitskaya R.Sh. The art of ornamented felt of the Nogais. *History, Archeology and Ethnography of the Caucasus*. 2018;14(4):173-194. (In Russ.). EDN: YUXZYT. <http://doi.org/10.32653/CH144173-194>
24. Seferbekov R.I. Family and household rituals of the peoples in Dagestan: a historiographical review. *Caucasology*. 2022;(3):360-375. (In Russ.). EDN: KIBLIS. <https://doi.org/10.31143/2542-212X-2022-3-360-375>
25. Popescu C.A., Iancu T., Popescu G., Croitoru I.M., Adamov T., Ciolac R. Rural tourism in mountain rural communities-possible direction/strategies: case study mountain area from Bihor County. *Sustainability*. 2024;16(3):1127. EDN: ZIEXTW. <https://doi.org/10.3390/su16031127>
26. Qiu L., Rahman A.R.A., Dolah M.S.B. Innovative design of agricultural tourism souvenirs to promote the inheritance and promotion of intangible cultural heritage. *Pakistan J. of Agricultural Science*. 2024;61(1):359-368. <https://doi.org/10.21162/PAKJAS/24.121>
27. Seyfi S., Hall C.M., Rasoolimanesh S.M. Exploring memorable cultural tourism experiences. *J. of Heritage Tourism*. 2020;15(3):341-357. <https://doi.org/10.1080/1743873X.2019.1639717>
28. Zaburaeva Kh.Sh. Tourist and recreational zoning of the Chechen Republic. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science*. 2024;(4-2):43-48. (In Russ.). EDN: FZJIOM. <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2024-4-2-43-48>

29. Safarova T.R. Natural and cultural heritage as an important resource of ethno-cultural tourism. *Miasto Przynalosci*. 2023;35:526-528. <http://dspace.umsida.ac.id/handle/123456789/20852>
30. Deac L.A., Herman G.V., Gozner M., Bulz G.C., Boc E. Relationship between population and ethno-cultural heritage-case study: Crişana, Romania. *Sustainability*. 2023;15(11):9055. EDN: XRAYRG. <https://doi.org/10.3390/su15119055>
31. Gajić T., Veljović S., Petrović M.D., Radovanovic M.M., Kholina V.N., David L.D. Does empowerment of national minorities through sustainable ethnic tourism overcome prejudices? Lessons from Serbia. *J. of Community & Applied Social Psychology*. 2025;35(1):e70031. EDN: BCWDFJ. <https://doi.org/10.1002/casp.70031>

Список источников

1. Ruhanen L., Whitford M. Cultural heritage and Indigenous tourism // *J. of Heritage Tourism*. 2019. Vol. 14, № 3. P. 179–191. <https://doi.org/10.1080/1743873X.2019.1581788>
2. Worku Tadesse G. Heritage resources as a driver of cultural tourism development in Ethiopia: a review // *Cogent Arts & Humanities*. 2023. Vol. 10, № 1. Art. 2158623. EDN: FUXTGG. <https://doi.org/10.1080/23311983.2022.2158623>
3. Nzei J.A. Role of Handicraft in Tourism Promotion and Economic Empowerment in Nigeria // *Int. J. of Social Science and Education Research Studies*. 2024. Vol. 4, № 8. P. 829–835. EDN: XYVGRF. <https://doi.org/10.55677/ijssers/V04I8Y2024-01>
4. Khushnazarova M.G. The importance and attractiveness of handicraft products for tourists // *Int. Multidisciplinary Research in Academic Science*. 2025. Vol. 8, № 6. P. 42–49. <https://doi.org/10.5281/zenodo.15619501>
5. Oktyabrskaya I.V., Pavlova E.Y., Skovpen A.V. Modern Altai crafts // *Archaeology, Ethnology and Anthropology of Eurasia*. 2009. Vol. 37, № 1. P. 129–135. EDN: RHRCFV. <https://doi.org/10.1016/j.aeae.2009.05.015>
6. Атеков Б.И., Ивлиева О.В., Шмыткова А.В. Туризм по местам бытования народных художественных промыслов и ремесел на Северном Кавказе // *Учёные записки Крымского фед. ун-та им. В.И. Вернадского. География. Геология*. 2021. Т. 7, № 2. С. 3–13. EDN: ISSAKY.
7. Zhang Y.Q., Wang Y.L., Li H., Li X.-M. Risk assessment of mountain tourism on the Western Sichuan Plateau, China // *J. of Mountain Science*. 2023. Vol. 20, № 11. P. 3360–3375. EDN: YHYWIF. <https://doi.org/10.1007/s11629-022-7884-6>
8. Firman A., Moslehpour M., Qiu R., Lin P.-K., Ismail T., Rahman F.F. The impact of eco-innovation, ecotourism policy and social media on sustainable tourism development: evidence from the tourism sector of Indonesia // *Economic Research-Ekonomska Istraživanja*. 2023. Vol. 36, № 2. Art. 2143847. EDN: ZPQHTI. <https://doi.org/10.1080/1331677X.2022.2143847>
9. Xu L., Ao C., Liu B., Cai Z. Ecotourism and sustainable development: a scientometric review of global research trends // *Environment, Development and Sustainability*. 2023. Vol. 25, № 4. P. 2977–3003. EDN: QRXSAK. <https://doi.org/10.1007/s10668-022-02190-0>
10. Samal R., Dash M. Ecotourism, biodiversity conservation and livelihoods: Understanding the convergence and divergence // *Int. J. of Geoheritage and Parks*. 2023. Vol. 11, № 1. P. 1–20. EDN: ARXYFQ. <https://doi.org/10.1016/j.ijgeop.2022.11.001>
11. Nguyen T.-S.T., Phan D.-H.T., Doan D.-H.L., Chau M.-N.T., Doan T.-T.T. Cultural revitalization for tourism development from an Indigenous perspective: the case of Ta Oi people, A Luoi District, Thua Thien Hue province, Vietnam // *Frontiers Sustainable Tourism*. 2025. Vol. 4. Art. 1510934. EDN: VSFNMI. <https://doi.org/10.3389/frsut.2025.1510934>
12. Jin Z., Gao M. Global trends in research related to ecotourism: A bibliometric analysis from 2012 to 2022 // *SAGE Open*. 2025. Vol. 15, № 1. Art. 21582440251. EDN: JPCMRU. <https://doi.org/10.1177/21582440251316718>
13. Peev-Otiman P.D., Mateoc-Sîrb N. Analyzing the Development Possibilities of the Mountain Area of Banat, Caras-Severin County // *Sustainability*. 2023. Vol. 15, № 11. Art. 8730. EDN: LLICIA. <https://doi.org/10.3390/su15118730>
14. Zainol N.R., Abdullah F.A., Rahman M.K. Exploring Digitalization-Driven in Innovative Eco-Tourism Sector // *Social Entrepreneurship and Social Innovation in Eco-Tourism*. Singapore: Springer, 2023. P. 61–84. https://doi.org/10.1007/978-981-99-1827-0_5
15. Фролова О.А., Черных К.Е. Декоративно-прикладное искусство Дагестана как источник развития этнотуризма // *Многогранный мир традиционной культуры и народного художественного творчества: материалы Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием*. Казань: Казанский гос. ин-т культуры, 2024. С. 84–87.
16. Акуева Х.М. Искусство войлока ингушей как разновидность традиционного кустарного промысла // *Вестн. АГУ*. 2021. Вып. 1 (274). С. 103–110. EDN: ZMEHSU.
17. Курбанов М.Ю. Традиционные ремесла и торговля Гуцул-Дарго XVIII – начала XX вв. // *Региональные проблемы преобразования экономики*. 2022. № 1. С. 26–33. EDN: MOQVMW. <https://doi.org/10.26726/1812-7096-2022-1-26-33>

18. Курбанова А.М., Гаджибекова Н.С. Народные промыслы Республики Дагестан как объекты развития внутреннего туризма // Общество: философия, история, культура. 2025. № 4. С. 67–73. EDN: RYFGKB. <https://doi.org/10.24158/fik.2025.4.8>

19. Zaburaeva Kh.Sh. Ethnocultural heritage of the North-Eastern Caucasus as a factor of eco-tourism development // J. of Mountain Science. 2024. Vol. 21. P. 2810–2824. EDN: RQUDJC. <https://doi.org/10.1007/s11629-024-8638-4>

20. Забураева Х.Ш., Краснов Е.В. Об этногенетических особенностях населения регионов Северо-Восточного Кавказа и их классификации // Региональные исследования. 2014. № 2 (44). С. 106–112. EDN: SILFCP.

21. Канукова З.В. Традиционная культура народов Северного Кавказа в современном обществе // История, археология и этнография Кавказа. 2024. Т. 20, № 3. С. 599–606. EDN: XKLOPM. <https://doi.org/10.32653/CH203599-606>

22. Liaoanshun, Banerjee S. Exploring cultural sustainability through the integration and innovation of traditional crafts with contemporary design // Prestieesci Research Review. 2025. Vol. 2, № 2. P. 286–296.

23. Кузеева З.З., Зельницкая Р.Ш. Искусство орнаментированного войлока ногайцев // История, археология и этнография Кавказа. 2018. Т. 14, № 4. С. 173–194. EDN: YUXZYT. <http://doi.org/10.32653/CH144173-194>

24. Сефербеков Р.И. Семейно-бытовая обрядность народов Дагестана: историографический обзор // Кавказология. 2022. № 3. С. 360–375. EDN: KIBLIS. <https://doi.org/10.31143/2542-212X-2022-3-360-375>

25. Popescu C.A., Iancu T., Popescu G., Croitoru I.M., Adamov T., Ciolac R. Rural Tourism in Mountain Rural Communities-Possible Direction/Strategies: Case Study Mountain Area from Bihor County // Sustainability. 2024. Vol. 16, № 3. Art. 1127. EDN: ZIEXTW. <https://doi.org/10.3390/su16031127>

26. Qiu L., Rahman A.R.A., Dolah M.S.B. Innovative design of agricultural tourism souvenirs to promote the inheritance and promotion of intangible cultural heritage // Pakistan J. of Agricultural Science. 2024. Vol. 61, № 1. P. 359–368. <https://doi.org/10.21162/PAKJAS/24.121>

27. Seyfi S., Hall C.M., Rasoolimanesh S.M. Exploring memorable cultural tourism experiences // J. of Heritage Tourism. 2020. Vol. 15, № 3. P. 341–357. <https://doi.org/10.1080/1743873X.2019.1639717>

28. Забураева Х.Ш. Туристско-рекреационное районирование Чеченской Республики // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2024. № 4-2. С. 43–48. EDN: FZJIOM. <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2024-4-2-43-48>

29. Safarova T.R. Natural and Cultural Heritage as an Important Resource of Ethno-Cultural Tourism // Miasto Przyszłości. 2023. Vol. 35. P. 526–528. <http://dspace.umsida.ac.id/handle/123456789/20852>

30. Deac L.A., Herman G.V., Gozner M., Bulz G.C., Boc E. Relationship between Population and Ethno-Cultural Heritage-Case Study: Crişana, Romania // Sustainability. 2023. Vol. 15, № 11. Art. 9055. EDN: XRAYRG. <https://doi.org/10.3390/su15119055>

31. Gajić T., Veljović S., Petrović M.D., Radovanovic M.M., Kholina V.N., David L.D. Does Empowerment of National Minorities Through Sustainable Ethnic Tourism Overcome Prejudices? Lessons from Serbia // J. of Community & Applied Social Psychology. 2025. Vol. 35, № 1. Art. e70031. EDN: BCWDFJ. <https://doi.org/10.1002/casp.70031>

Информация об авторе

Х.Ш. Забураева – доктор географических наук, главный научный сотрудник КНИИ им. Х.И. Ибрагимова РАН.

Information about the author

Kh.Sh. Zaburaeva – Doctor of Science (Geography), Chief Researcher, ICI of the RAS.

Статья поступила в редакцию 26.08.2025; одобрена после рецензирования 20.10.2025; принята к публикации 11.11.2025.
The article was submitted 26.08.2025; approved after reviewing 20.10.2025; accepted for publication 11.11.2025.

БИОЛОГИЧЕСКИЕ НАУКИ

BIOLOGICAL SCIENCES

Научная статья

УДК 630*.611 (571.63)

<https://doi.org/10.18522/1026-2237-2026-1-144-154>

ОПТИМАЛЬНЫЕ УСЛОВИЯ ПРОИЗРАСТАНИЯ КЕДРОВО-ШИРОКОЛИСТВЕННЫХ ЛЕСОВ В ПРИМОРСКОМ КРАЕ

**Любовь Алексеевна Майорова^{1✉}, Лариса Ивановна Варченко²,
Лариса Алексеевна Латышева³**

^{1, 2, 3} Тихоокеанский институт географии Дальневосточного отделения Российской академии наук, Владивосток, Россия

¹ mayorova.49@inbox.ru[✉], <https://orcid.org/0000-0001-8607-4075>

² varchenkoi@tigdvo.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0916-0396>

³ l.a.lat@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4485-6324>

Аннотация. Рассматриваются ареалы кедрово-широколиственных лесов (кедровников) в Приморском крае, их типология и оптимальные условия произрастания. Большое число типов местообитаний, присущее данной лесной формации, характеризует её высокое типологическое разнообразие, потенциальную продуктивность древостоев (бонитет) и ход возобновительного процесса. На основе информации из карт природы (геоморфологическая, почвенная, климатическая), материалов лесоустройства всех лесхозов и заповедников края по кедрово-широколиственным лесам создана обширная база данных. Применение математических методов по выявлению оптимальных условий природной среды позволило выделить основные географические факторы, определяющие структуру и динамику древостоев кедровников. Составлены экологические паспорта различных типов леса, образованных кедром корейским. Указаны районы оптимума их произрастания в Приморском крае, наиболее пригодные для реконструкции вторичных лесов, закладки лесных культур и питомников. В условиях возрастающей антропогенной нагрузки и изменений климата полученные методические разработки могут послужить дополнительными критериями для мониторинга лесной растительности и устойчивого лесопользования в данном регионе.

Ключевые слова: Приморский край, лесная формация, кедрово-широколиственные леса (кедровники), факторы географической среды, тип леса, оптимум произрастания

Для цитирования: Майорова Л.А., Варченко Л.И., Латышева Л.А. Оптимальные условия произрастания кедрово-широколиственных лесов в Приморском крае // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2026. № 1. С. 144–154. <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2026-1-144-154>

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

Original article

OPTIMAL GROWING CONDITIONS CEDAR-BROAD-LEAVED FORESTS IN PRIMORSKY TERRITORY

Lubov A. Mayorova^{1✉}, Larica I. Varchenko², Larica A. Latysheva³

^{1, 2, 3} Pacific Geographical Institute of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russia

© Майорова Л.А., Варченко Л.И., Латышева Л.А., 2026

¹ mayorova.49@inbox.ru[✉], <https://orcid.org/0000-0001-8607-4075>

² varchenkol@tigdvo.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0916-0396>

³ l.a.lat@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4485-6324>

Abstract. This article examines the areas of cedar-deciduous forests (cedar forests) in the Primorsky Territory, their typology and optimal growing conditions. The wide variety of habitat types inherent in this forest formation determines its high typological diversity, the potential productivity of stands (bonity) and the course of the renewal process. Based on information from nature maps (geomorphological, soil, climatic), forest management materials of all forestry enterprises and nature reserves of the region, an extensive database (DB) has been created for cedar-deciduous forests. The use of mathematical methods to identify optimal environmental conditions made it possible to identify the main geographical factors of the environment that determine the structure and dynamics of cedar stands. Ecological passports of various types of forest formed by Korean cedar have been compiled. The areas of their optimal growth in the Primorsky Territory have been determined the most suitable for the reconstruction of secondary forests, laying forest crops and nurseries. In the face of increasing anthropogenic loads and climate changes, the obtained methodological developments can serve as additional criteria for monitoring forest vegetation and sustainable forest management in this region.

Keywords: Primorsky Territory, forest formation, cedar-deciduous forests (cedar forests), geographical environment factors, forest type, optimal growth

For citation: Mayorova L.A., Varchenko L.I., Latysheva L.A. Optimal Growing Conditions Cedar-Broad-Leaved Forests in Primorsky Territory. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2026;(1):144-154. (In Russ.). <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2026-1-144-154>

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

Введение

Формация кедрово-широколиственных лесов (кедровников) произрастает в Приморье в зоне хвойно-широколиственных лесов, в средних и нижних поясах хребтов Сихотэ-Алиня, Синий, Черные горы, Пограничный и по долинам крупных рек западного макросклона Сихотэ-Алиня: Уссури, Большая Уссурка, Бикин и их многочисленных притоков. На восточном макросклоне, более коротком и резко обрывающемся к побережью Японского моря, кедровники менее распространены. Этому факту способствовали как влияние Японского моря, так и начавшееся еще в прошлые века интенсивное освоение побережья и прилегающей территории.

Общая площадь кедрово-широколиственных лесов Приморского края – 2 млн 147 тыс. га. Запасы древесины – 437 млн м³. Преобладающий бонитет насаждений – III [1].

Главная лесообразующая порода лесной формации – кедр корейский (сосна корейская) (*Pinus koraiensis* Siebold et Zucc.). В зависимости от типа леса, в древостоях кедровников большое участие принимают другие хвойные породы: аянская и корейская ели (*Picea jezoensis* (Siebold & Zucc.) Carrière и *P. koraiensis* Nakai), цельнолистная и белокорая пихты (*Abies holophylla* Maxim., *A. nephrolepis* (Trautv. ex Maxim.) Maxim). Под пологом кедровников, особенно в центральной и южной частях Приморского края, многочисленны лиственные породы: дуб монгольский (*Quercus mongolica* Fisch. ex Ledeb.), липа амурская (*Tilia amurensis* Rupr.), береза желтая (*Betula costata* Trautv.), ильм долинный (*Ulmus propinqua* Koidsz.), ясень маньчжурский (*Fraxinus mandshurica* Rupr.), диморфант (*Kalopanax Miq.*) и др. В подлеске часто встречаются лианы: лимонник китайский (*Schisandra chinensis* (Turcz.) Baill.), виноград амурский (*Vitis amurensis* Rupr.), актинидии коломикта и полигамная (*Actinidia kolomikta* (Maxim.) Maxim., *A. polygama* (Siebold) Miq.).

Кедр корейский – крупное, высокое дерево – до 40–45 м высотой и диаметром ствола около одного метра. Среди лесных формаций Приморского края кедрово-широколиственные леса имеют самое высокое видовое разнообразие и играют большую природоохранную роль в экологии и экономике региона. Интенсивная эксплуатация этих ценных лесов, которая началась ещё в начале XX в. и продолжалась до 1990 г., привела к потере их местообитаний, снижению видового разнообразия и продуктивности [2]. Старые вырубки и гари кедровников восстанавливаются естественным путем через смену пород. Под пологом вторичных лесов из березы плосколистной (*Betula platyphylla* Sukacz.), осины Давида (*Populus davidiana* Dode) и других малоценных пород

немногочисленный подрост кедрового леса начинает длительное восстановление. Научная и практическая значимость исследований по кедрово-широколиственным Дальнего Востока (ДВ), где произрастает множество краснокнижных растений, обитают амурские тигры и леопарды, несомненна. Поэтому изучение современного состояния и распространения кедровников в настоящее время очень актуально.

Цель исследования – методами эколого-географического анализа рассмотреть типологию кедрово-широколиственной формации и встречаемость различных типов леса на территории Приморья, составить их экологические паспорта и определить оптимальные районы произрастания.

Материалы и методы

Кедровники ДВ являются лесами горно-долинного ландшафта нижних и средних поясов, указанных выше горных хребтов и межгорных равнин, а также частично побережья Японского моря. В прошлом они образовывали огромный массив в южной половине ДВ (Приморский край), в бассейнах р. Уссури и правых притоках р. Амур. Меньший по размерам, ранее компактный, но в настоящее время разбитый на части массив кедровников произрастет на побережье Японского моря.

Распространение ареала кедрово-широколиственных лесов Приморского края в основном зависит от термического режима климата и степени обеспеченности влагой в течение вегетационного периода. В северных районах края кедровники на более прохладных местообитаниях зонально замещаются темнохвойными породами (ель аянская и пихта белокорая), а на переувлажненных и болотистых местообитаниях – лиственницами Любарского и ольгинской [*Larix Lubarskii* Sukaczew, *L. gmelinii* var. *olgensis* (A. Henry) Ostenf. & Syrach]. На побережье Японского моря повышение влажности воздуха за счет частых морских туманов, обусловленных муссонным климатом, ограничивает распространение древостоев кедрового леса, снижая его лесообразующее значение в этой зоне. Возрастание тепла при движении на юг и высокие показатели влажности воздуха создают преимущества для его произрастания. В этих районах состав древостоев, подлеска и травостоя обогащается новыми теплолюбивыми видами, повышается видовое разнообразие. Однако степень участия кедрового леса в древостоях заметно снижается за счет конкуренции с другими древесными породами: пихтой цельнолистной (*Abies holophylla* Maxim.), елью корейской (*Picea koraiensis* Nakai), ясенем маньчжурским, грабом сердцелистным (*Carpinus cordata* Blume), диморфантом. На юге Приморского края, где расположены крупные города, сосредоточены основные промышленные предприятия и сельское хозяйство, антропогенный фактор резко возрастает. Земледелие на плодородных почвах склонов и речных долин, рубки и лесные пожары в этом регионе начались еще в прошлых столетиях и продолжают в настоящее время. На западных и северо-западных границах ареала кедрового леса в Приморье ограниченное распространение кедровых лесов диктуется рельефом местности. В этом районе широко представлены пологие увалы и межгорные равнины, южнее переходящие в лесостепную Суйфуно-Ханкайскую равнину. На юге края доминируют дубово-широколиственные леса из дуба монгольского, а на севере зоны – мелколиственные леса и лиственничники.

С учетом географических особенностей (тип рельефа, количественные и качественные показатели климата, почвы) область распространения кедрово-широколиственных лесов на ДВ делится на 3 части: южную в границах распространения пихты цельнолистной, граба и других термомезофильных представителей флоры, среднюю с оптимальными условиями для роста кедровых лесов и северную с постепенным ослаблением значения этих лесов в связи с ухудшением условий климатического режима [3, с. 70]. Для каждой из них характерно распространение определенных климатически замещающих типов кедровых лесов трех климатических фаций: северных кедровников с темнохвойными породами, типичных кедровников с широколиственными породами и южных «грабовых» кедровников [3].

Границы между ними во многом условные, так как одни и те же типы леса могут встречаться во всех климатических фациях. Дополнительно их выделение определяется геологической историей развития территории, с которой тесно связаны различная протяженность, ориентация и преобладающие абсолютные высоты горных хребтов, распространенных в данных районах.

Климатическая фация северных кедровников представлена небольшими выделами на севере Приморского края в виде переходных (промежуточных) групп типов леса на границе с господствующими в этом районе лиственничниками и пихтово-еловыми лесами. Основные группы типов леса данной климатической фации по [4]: кедровники рододендровые (К-I), мелкотравно-папоротниковые с елью аянской и пихтой белокорой (КЕП), с лиственницей Любарского (КЛ).

Преимущественное распространение в Приморье получила климатическая фация средних или типичных кедрово-широколиственных лесов, которая занимает большую часть ареала. Из-за присутствия многочисленных лиственных пород в древостоях типичных кедровников резко возрастает видовое разнообразие и повышается потенциальная продуктивность. В данной климатической фации произрастают кедровники рододендровые с дубом (К-I), лещиново-леспедециевые (К-II), лещинные с липой и дубом (К-III), разнокустарниковые с березой желтой и липой (К-IV), кленово-лещинные с липой и дубом (К-VI), а по долинам крупных рек – долинные кедровники с широколиственными породами (К-VII) и сырые с ясенем (К-VIII).

Климатическая фация южных «грабовых кедровников» распространена в южной части Приморского края, охватывающей бассейны рек, впадающих в залив Петра Великого (Японское море). На юге края бонитет кедрово-широколиственных лесов повышается. Несмотря на широкую освоенность и заселенность территории, их видовое разнообразие растёт. Здесь выделяются кленово-лещинные кедровники с липой и дубом (К-VI), где в первом ярусе встречаются дуб монгольский, липы амурская и таке (*Tilia amurensis* Rupr., *T. taquetii* C.K. Schneid.), ясень маньчжурский и редкие краснокнижные породы: пихта цельнолистная, ель корейская, во втором – граб сердцелистный, мелкоплодник ольхолистный (*Micromeles alnifolia* (Siebold & Zucc.) K. Koch), тис остроконечный (*Taxus cuspidata* Siebold et Zucc), диморфант, клены. По долинам рек – небольшие участки влажных кедровников (К-VII, К-VIII, КЕ-VI) с грабом сердцелистным (*Carpinus cordata* Blume) – редким видом, занесенным в Красную книгу [5].

«Тип леса является качественно обособленным звеном в генетическом ряду развития лесной растительности определенной лесорастительной (ландшафтно-географическая) области, этапом присущего ей лесообразовательного процесса. К одному типу леса относятся участки (насаждения, лесные биогеоценозы), принадлежащие к различным стадиям возрастных и коротковосстановительных смен, свойственных данному типу условий местопроизрастания, и характеризующиеся общностью главной породы, а также других пород, закономерно сопутствующих главной на всех стадиях указанных смен. Тип леса характеризуется определенным классом производительности (бонитетом)» [3, с. 147].

Каждой группе типов кедрового леса присущи свои типы условий местопроизрастания, которые характеризуются «как участки территории, принадлежащие к сходным по топографическому положению и происхождению формам рельефа, климату и типам почв, обуславливающих однородный лесорастительный эффект» [3, с. 149]. Для изучения закономерностей лесообразовательного процесса на такой обширной и неоднородной территории, как Приморский край, понятие о типе лесорастительных условий весьма существенно. Особую важность оно имеет при выборе способов и методов восстановления бывших кедровых лесов.

Разнообразие лесорастительных условий, типов растительных комплексов, стадий возрастных и коротковосстановительных смен в кедрово-широколиственных лесах Приморья способствует и высокому разнообразию почвенно-растительных комплексов на данной территории. Если северные кедровники приурочены к буроземам грубогумусированным, глееватым и оподзоленным, то типичные кедровники чаще всего встречаются на буроземах типичных, а на пологих склонах – оподзоленных. На платообразных водоразделах, где ослаблен почвенный дренаж, под кедровниками формируются буроземы глеевато-оподзоленные. Наибольшее типовое и подтиповое разнообразие почв встречается под южными кедровниками. Это – буроземы типичные глееватые и темные оподзоленные глееватые. Долинные кедровники произрастают на аллювиально-темногумусовых почвах и буроземах глееватых [6].

Для проведения эколого-географического анализа распространения кедрово-широколиственных лесов в Приморском крае авторами использовались материалы базы данных (БД) «Лесная растительность Приморского края», которая включает таксационные описания лесов почти всех лесных формаций края, типы их местообитаний (рельеф, климат, почвы). БД состоит из 7065 точек-площадок. 5222 площадки характеризуют лесную площадь Приморского края – 71% территории, 1808 – нелесную. Основой для формирования БД по лесам Приморского края

послужили лесотаксационные планы и описания лесов всех лесхозов и заповедников края, собранные авторами по учетам лесного фонда на конец XX в.

Данная информация представляет большой научный и практический интерес, поскольку в XXI в. государственное сплошное лесоустройство огромных территорий ДВ не проводилось и ценный материал во многом был утерян.

Материал для БД собирался с помощью пространственных сеток-решёток, привязанных к системе географических координат. Они представляют собой совокупность площадок различной размерности и часто применяются в географических исследованиях (сбор необходимой информации, картографирование территории).

На рис. 1 показана разграфка карты Приморского края (153 большие площадки (40 × 40 км), каждая из которых делится на 64 элементарные площадки (5 × 5 км)).

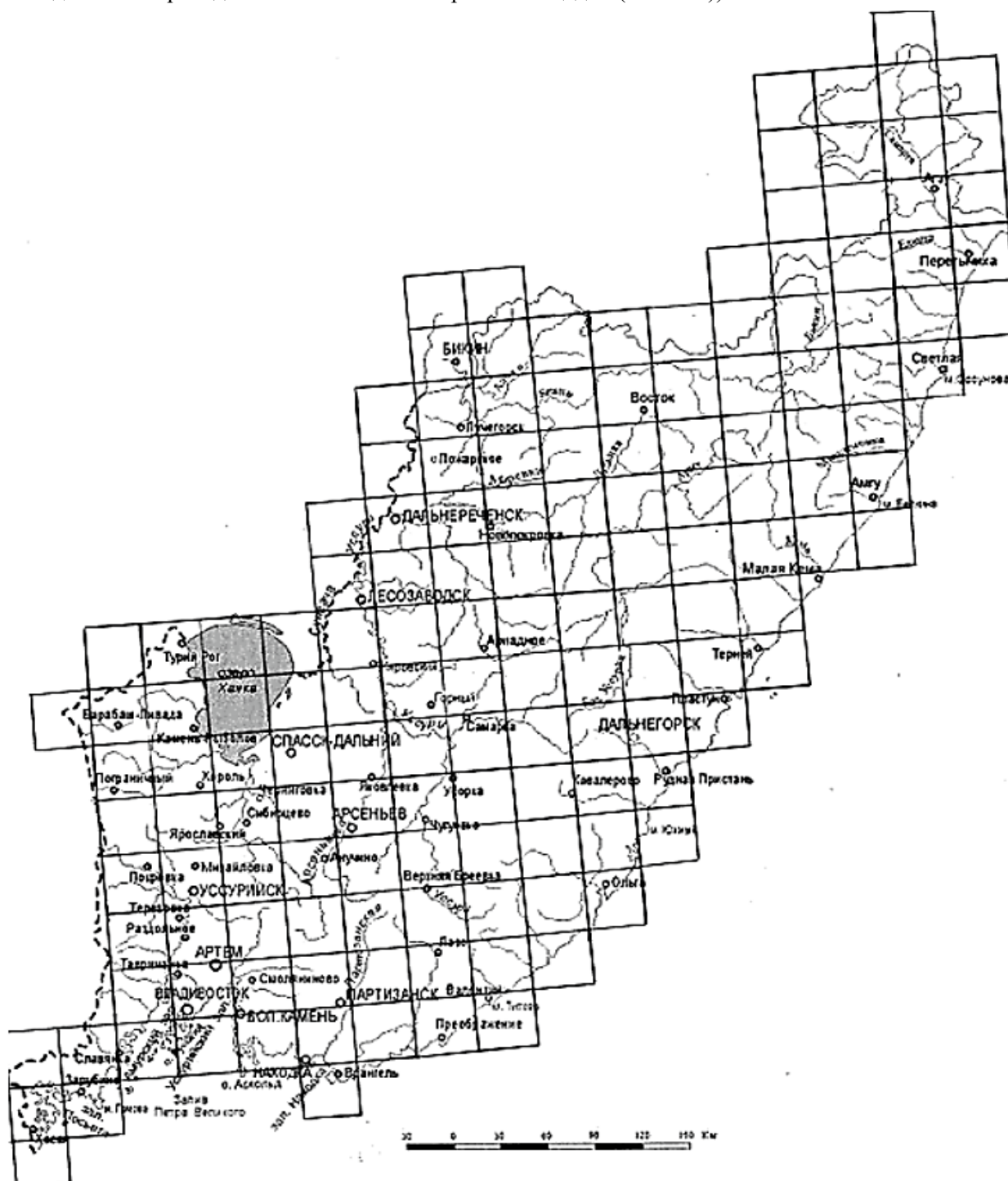


Рис. 1. Разграфка Приморского края на площадки / Fig. 1. The division of Primorsky Territory into sites

На каждую элементарную площадку по лесотаксационным описаниям лесхоза заполнялась форма, включающая координаты точки, лесхоз, лесничество, номера выдела и квартала, тип леса, доминант древостоя, доля его участия, средние диаметр, высота, возраст полога, содоминант, его доля, общее количество видов в древостое, бонитет, запасы древесины, м³/га. Для характеристики лесорастительных условий дополнительно снималась географическая информация (10 позиций) с карт природы (геоморфологическая, почвенная, климатическая, масштаб 1:500 000) [7].

Далее из БД «Лесная растительность Приморского края» авторами проведена конкретная выборка точек-площадок, находящихся в ареале произрастания кедровников, и составлена БД «Кедрово-широколиственные леса Приморского края», включающая 1520 площадок. Типичные кедровники представлены на 1130 площадках (5 × 5 км), а переходные группы типов леса на границе с другими хвойными формациями Приморского края – на 390.

Для эколого-географического анализа лесорастительных условий в ареале кедрово-широколиственных лесов Приморского края и выявления оптимальных районов произрастания кедровников нами выбраны следующие климатические характеристики: сумма активных температур выше 10 °С, гидротермический коэффициент по Селянинову (ГТК), осадки годовые, мм/г., средняя температура воздуха в январе, средняя температура воздуха в июле, °С. Морфогенетические типы рельефа, свойственные местообитаниям кедровников, фиксировались по геоморфологической карте [8], абсолютная высота, м н. у. м. – по картам-бланковкам, масштаб 1:500 000, экспозиция и крутизна склона – по лесотаксационным описаниям лесов всех лесхозов Приморского края. Факторы среды были разбиты на градации и кодировались.

В дальнейшем, учитывая уже хорошо изученный дальневосточными учеными ход восстановительных и возрастных смен в кедрово-широколиственных лесах ДВ и тенденцию изменения климата, возможна корректировка количественных характеристик, приведенных выше факторов географической среды и современного ареала кедровников в Приморском крае методами спутникового зондирования.

Для определения степени влияния факторов среды на лесную растительность кедрово-широколиственных лесов применены методы информационной статистики, основанной на оценке количества передаваемой информации, выраженной в категориях неопределенности, энтропии фактора и явления (мера разнообразия) [9-12].

Для расчета мер взаимозависимости (связи) фактор среды – явление (таксон растительности) применялась оценка разнообразия состояния, которая определяется через категории теории вероятностей, в наших исследованиях – через меру разнообразия *H*-функцию:

$$H = - \sum_i p_i \log p_i, \text{ где } p_i - \text{вероятность } i\text{-го события.}$$

Меры связи основаны на том, что по информации, которая определяется как мера неопределенности и характеризует фактор среды (В), можно определить состояние явления (А) (в нашем случае – таксон лесной растительности).

Для выявления уровня экологического соответствия (УСЕ) таксона растительности (вид, тип леса) в связи с нахождением его вдоль градиента фактора среды и определения экологической устойчивости кедра корейского авторами использовалась методика, разработанная и апробированная Б.С. Петропавловским [1, 7, 10]. Для оценки УСЕ таксонов растительности факторам среды он применил нормированную меру Дайса – Брея [11].

По Б.С. Петропавловскому, «выборочная мера совместимости событий (коэффициент Дайса; обобщенная мера Дайса – Брея) широко используется для сравнения относительной встречаемости явления при разных градациях фактора: $K = \frac{2p_{ij}}{p_i + p_j}$, где p_{ij} – совместная встречаемость по фактору и явлению; p_i – условная вероятность по градации фактора; p_j – условная вероятность по сочетанию явления. Мера совместимости событий изменяется от 0 до 1. Это позволяет сравнивать между собой относительную частоту встречаемости по всем градациям фактора. Следовательно, чем ближе значение к 1, тем более характерно сочетание фактора и явления» [1, с. 19].

Мера совместимости событий используется для составления экологических паспортов любого таксона растительности. Они характеризуют экологические условия конкретного таксона (вид или сообщество) и представляют собой упорядоченную информацию в виде компактной таблицы-матрицы, в которой для всех градаций выбранных факторов среды приводятся соот-

ветствующие коэффициенты специфичных отношений в форме символов: 1, +, 0. В тех случаях, когда коэффициент больше единицы (условная вероятность больше априорной), проставляется 1, меньше единицы (условная вероятность меньше априорной) – +. Факт отсутствия конкретного таксона (пустые ячейки – нет встреч) – 0. Этапы составления экологических паспортов:

1. По каждому фактору среды формируется матрица совместных частот встречаемости градаций фактора и состояния таксона.

2. Вычисляются коэффициенты наиболее специфичных отношений (C) для каждой заполненной ячейки матрицы: $C = \frac{p(a_i/b_j)}{p(a_i)}$, где числитель – условная вероятность состояния явления при данном состоянии фактора (отношение частоты состояния явления к сумме частот состояний для данной градации фактора), а знаменатель – априорная вероятность состояния явления. Коэффициент C изменяется от нуля и теоретически до бесконечности. Характерным принимается то состояние, когда условная вероятность больше априорной, т.е. при значениях $C \geq 1$ [13, с. 56].

Приводим экологический паспорт кедр корейского (сосна корейская), составленный Б.С.Петропавловским и др. [13, с. 57, табл. 1].

Таблица 1/ Table 1

**Экологический паспорт кедр корейского (сосны корейской кедровой)
 / Ecological passport of Korean cedar (Korean cedar pine)**

Фактор природной среды	Градация (код) факторов природной среды														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Сумма активных температур более 10 °С	+	1	1	1	1	1	1	–	–	–	–	–	–	–	–
ГТК (по Селянинову)	+	1	1	1	0	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Осадки (годовые)	0	1	1	1	+	+	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Средняя температура в январе	0	+	+	+	1	1	1	1	1	1	–	–	–	–	–
Средняя температура в июле	+	+	1	1	1	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Тип рельефа [8]	+	1	+	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Абсолютная высота местности, м	1	1	1	1	1	+	+	+	+	+	+	0	0	0	–
Экспозиция склона, °	+	+	+	+	+	1	1	1	1	+	+	+	+	–	–
Крутизна склона, °	+	1	1	1	+	+	–	–	–	–	–	–	–	–	–

Более детально эта методика описана авторами при составлении паспортов ели аянской, пихты белокорой и типов леса, образуемых данными лесными породами [7, 13].

Результаты исследований и их обсуждение

По БД «Кедрово-широколиственные леса Приморского края» выделено 16 групп типов леса и определена их встречаемость, %, в данной лесной формации. Кроме типичных кедровников, таксаторы ДВ выделяют ещё переходные группы типов леса: кедрово-лиственничные и кедрово-еловые, где кедр корейский является главной лесообразующей породой. Встречаемость различных групп типов леса кедровников представлена в табл. 2.

Самые распространенные группы типов леса в кедрово-широколиственных лесах: разнокустарниковый кедровник с желтой березой (К-IV) – 30 % площади формации, лещинный кедровник с липой и дубом (К-III) – 15, кленово-лещинный кедровник с липой и дубом (К-VI) – 15.

Среди переходных (промежуточных) типов леса широкое распространение в Приморье получили мшисто-лещинный кедр-ельник с березой желтой (влажный) (КЕБЖ) – 12,5 % и мшисто-папоротниковые кедрово-еловые леса с липой и березой желтой (влажные) (КЕ-V) – 6.

Таблица 2 / Table 2

Встречаемость различных групп типов леса в кедрово-широколиственной формации Приморского края / Occurrence of various groups of forest types in the cedar-deciduous formation of Primorsky Territory

Код	Индекс	Тип леса [4]	Встречаемость типа леса, %
<i>Типичные кедровники (1130 площадок)</i>			75
1	К-I	Рододендроновый кедровник с дубом (периодически сухой)	1
2	К-II	Лещинно-леспедцеиновый кедровник (периодически сухой)	3
3	К-III	Лещинный кедровник с липой и дубом (свежий)	15
4	К-IV	Разнокустарниковый кедровник с желтой березой (свежий и влажный)	30
5	К-V	Мшисто-папоротниковый кедровник (свежий)	5
6	К-VI	Кленово-лещинный кедровник с липой и дубом (свежий и влажный)	15
7	К-VII	Долинный кедровник (влажный)	5
8	К-VIII	Рябинолистниковый кедровник с ясенем маньчжурским (сырой)	1
<i>Переходные группы и типы леса к другим лесным формациям (390 площадок)</i>			25
9	КЛ	Кедровник с лиственницей (периодически сырой)	0,5
10	КЕП	Мшисто-кустарниковый кедро-ельник с пихтой белокорой (влажный)	3
11	КЕЛп	Мшисто-папоротниковый кедро-ельник с липой (влажный)	0,5
12	КЕБж	Мшисто-лещинный кедро-ельник с березой желтой (влажный)	12,5
13	ЕШК	Елово-широколиственные леса с кедром корейским (влажные)	1
14	ЕкпК	Крупно-папоротниковый ельник с кедром (влажный)	0,5
15	КЕ-V	Мшисто-папоротниковые кедрово-еловые леса с липой и березой желтой	6
16	КЕ-VI	Кленово-грабовые кедрово-еловые леса с широколиственными породами	1
Итого по Приморскому краю – 1520 площадок (5×5 км)			100

Эти группы типов леса произрастают как на влажных местообитаниях пологих склонов, так и по долинам рек. Большую редкость представляют рододендроновый кедровник с дубом (периодически сухой) (**К-I**) – 1 %, который встречается мелкими выделами на крутых каменистых склонах южных экспозиций в северной климатической фации, и рябинолистниковый кедровник с ясенем маньчжурским (сырой) (**К-VIII**) – 1 %, произрастающий на пологих заболоченных шлейфах и по долинам рек и ручьев.

На основе экологических паспортов кедра корейского (вид) и самой распространенной группы типов леса (таксон) – разнокустарникового кедровника с желтой березой (**К-IV**) – составлены карты-схемы их распространения по территории Приморского края (рис. 2).

Естественное восстановление кедровых лесов на территории Приморья происходит неудовлетворительно, через смену пород. Поэтому в настоящее время встает вопрос об искусственном восстановлении – создании лесных культур и питомников.

В советское время ежегодная площадь посадок доходила до 14 тыс. га и была достигнута высокая приживаемость лесных культур. В настоящее время их общая суммарная площадь – 237,2 тыс. га, но плодоносящие кедровые культуры встречаются очень редко, а реконструкция насаждений на огромной территории Приморского края происходит крайне неудовлетворительно [14].

Состояние культур кедра корейского (сосны корейской), которые были созданы в 1948 г. на полуострове Муравьева-Амурского (район г. Владивостока), более удовлетворительное. На всех участках сомкнутость крон – 0,6, развиваются насаждения по III классу бонитета. Лесные культуры плодоносят, уже отмечены их всходы [15].

Большой проект по сохранению и восстановлению популяций кедра корейского в Приморском крае разрабатывается в Приморском государственном аграрно-техническом университете (г. Уссурийск). Объектом исследований являются искусственные насаждения из кедра корейского – главной и преобладающей породы в лесокультурном производстве на территории лесного участка Приморского государственного аграрно-технического университета. Лесной участок имеет площадь 28 830 га. Культуры (использовались семена-трехлетки) создавались с 1981 по 1987 г., возраст – 36 и 42 г. Сохранность культур кедра на различных местообитаниях хорошая – от 63 до 80 % [16].

4. В XX в. кедрово-широколиственные леса являлись основным объектом лесопользования на ДВ, что привело к значительному сокращению их ареала, снижению видового разнообразия и продуктивности. В 1990 г. был принят закон о запрете рубок главного пользования в данных лесах.

В настоящее время на больших площадях вырубок и гарей естественное восстановление лесов из кедра корейского проходит неудовлетворительно, растягиваясь на длительный срок. Для сохранения этой ценной лесной формации необходимо существенно повысить объемы искусственных посадок лесных культур и ускорить создание питомников кедра, а разработанные нами карты-схемы перспективных районов Приморского края, отражающие оптимальные условия для успешного произрастания кедра корейского, вполне подходят для этих задач.

Список источников

1. *Петропавловский Б.С.* Леса Приморского края: эколого-географический анализ. Владивосток: Дальнаука, 2004. 317 с.
2. *Сибирина Л.А., Гладкова Г.А.* Нерациональное лесопользование и потери местообитаний кедрово-широколиственных лесов // Интенсификация лесопользования и воспроизводства лесов Сибири и Дальнего Востока: материалы Всесоюз. конф. с междунар. участием. Хабаровск: ДальНИИЛХ, 2019. С. 167–169. EDN: SPPXEI.
3. *Колесников Б.П.* Кедровые леса Дальнего Востока. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1956. 261 с.
4. Справочник таксатора / сост. Н.В. Ефимов. Хабаровск: Лесопроект, Дальневосточный трест, 1955. 133 с.
5. Красная книга Приморского края: Растения. Владивосток: Апельсин, 2008. 688 с.
6. *Шишов Л.Л., Тонконогов В.Д., Лебедева И.И., Герасимова М.И.* Классификация и диагностика почв России. Смоленск: Ойкумена, 2004. 342 с. EDN: PTEEQE.
7. *Майорова Л.А., Петропавловский Б.С.* Пихтово-еловые леса Приморского края (эколого-географический анализ). Владивосток: Тихоокеанский ин-т географии ДВО РАН, 2017. 164 с. EDN: ZHYUCL.
8. *Ганешин Г.С.* Геоморфология Приморья. Объяснительная записка к геоморфологической карте Приморского края и сопредельных территорий. Масштаб 1: 500 000 / ред. Е.И. Корнутова. М.: Госгеолтехиздат, 1957. 135 с.
9. *Пузаченко Ю.Г., Мошкин А.В.* Информационно-логический анализ в медико-географических исследованиях // Итоги науки. Медицинская география. 1969. Вып. 3. С. 5–74.
10. *Семкин Б.И., Петропавловский Б.С., Кошкарев А.В., Варченко Л.П., Усольцева Л.А.* О методе многомерного анализа соотношения растительности с экологическими факторами // Ботан. журн. 1986. Т. 71, № 9. С. 1167–1181. EDN: SXQANJ.
11. *Петропавловский Б.С., Онищенко В.В.* Методика разработки многофакторной экологической классификации типов леса (на примере лесной растительности Тебердинского заповедника). Препринт. Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1980. 60 с.
12. *Петропавловский Б.С., Варченко Л.И.* Использование информационной статистики для изучения экологии растительности и динамических процессов растительного покрова Земли // Сиб. экол. журн. 2021. № 3. С. 263–273. EDN: EALZFB. <https://doi.org/10.15372/SEJ20210301>
13. *Петропавловский Б.С., Майорова Л.А.* Методы восстановления ареалов коренной растительности и составление экологических паспортов лесобразующих видов (на примере горной системы Сихотэ-Алинь в границах Приморского края) // Грозненский естественнонауч. бюл. 2018. Т. 3, № 3 (11). С. 55–63. EDN: VFPJMG. <https://doi.org/10.25744/genb.2018.11.3.007>
14. *Сибирина Л.А.* Экспериментальные рубки ухода за лесными культурами кедра корейского (*Pinus koraiensis* Siebold et Zucc.) в Приморском крае // Состояние лесов и актуальные проблемы лесовосстановления: материалы Всесоюз. конф. с междунар. участ. Хабаровск: ДальНИИЛХ, 2009. С. 67–68. EDN: LQHOPD.
15. *Сибирина Л.А., Верхолат В.П.* Состояние культур сосны корейской (*Pinus koraiensis* Siebold et Zucc.) на полуострове Муравьева-Амурского // Леса и лесное хозяйство в современных условиях: материалы Всесоюз. конф. с междунар. участием. Хабаровск: ДальНИИЛХ, 2011. С. 140–142. EDN: CUSWNK.
16. *Бурханов С.Х.* Мероприятия по уходу за сосной корейской в Приморском крае // Аграр. вестн. Приморья. 2024. № 1 (33). С. 56–59. EDN: BZCYHD.
17. *Харитонов А.М.* О некоторых региональных особенностях последствий воздействия экстремальных явлений на лесные ресурсы Приморского края // Геосистемы Северо-Восточной Азии: природа, население, хозяйство территорий: сб. науч. тр. Владивосток, 2021. С. 280–284.

References

1. *Petropavlovsky B.S.* *Forests of Primorsky territory: ecological and geographical analysis*. Vladivostok: Far Eastern Science; 2004. 317 p. (In Russ.).

2. Sibirina L.A., Gladkova G.A. Irrational forest management and habitat loss in cedar-broad-leaved forests. *Intensification of Forest Management and Reproduction of forests in Siberia and the Far East*. Materials of the All-Union Conference with international participation. Khabarovsk: Far Eastern Research Institute of Forestry; 2019:167-169. (In Russ.). EDN: SPPXEI.
3. Kolesnikov B.P. *Cedar forests of the Far East*. Moscow, Leningrad: Publishing House of the USSR Academy of Sciences; 1956. 261 p. (In Russ.).
4. Efimov N.V., comp. *Taxi driver's handbook*. Khabarovsk: Forest Project, Far Eastern Trust; 1955. 133 p. (In Russ.).
5. *The Red Book of Primorsky territory: Plants*. Vladivostok: Orange; 2008. 688 p. (In Russ.).
6. Shishov L.L., Tonkonogov V.D., Lebedeva I.I., Gerasimova M.I. *Classification and diagnostics of soils in Russia*. Smolensk: Ecumene; 2004. 342 p. (In Russ.). EDN: PTEEQE.
7. Mayorova L.A., Petropavlovsky B.S. *Fir-spruce forests of Primorsky territory (ecological and geographical analysis)*. Vladivostok: Pacific Institute of Geography, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences; 2017. 164 p. (In Russ.). EDN: ZHYUCL.
8. Ganeshin G.S. *Geomorphology of Primorye. Explanatory note to the geomorphological map of Primorsky territory and adjacent territories. M 1:500 000*. E.I. Kornutova (ed.). Moscow: State Geological and Technical Publishing House; 1957. 135 p. (In Russ.).
9. Puzachenko Yu.G., Moshkin A.V. Information and logical analysis in medical and geographical research. *Results of Science. Medical Geography*. 1969;(3):5-74. (In Russ.).
10. Semkin B.I., Petropavlovsky B.S., Koshkarev A.V., Varchenko L.I., Usoltseva L.A. On the method of multidimensional analysis of the ratio of vegetation to environmental factors. *Botanical Journal*. 1986;71(9):1167-1181. (In Russ.). EDN: SXQANJ.
11. Petropavlovsky B.S., Onishchenko V.V. *Methodology for the development of multifactorial ecological classification of forest types (on the example of forest vegetation of the Teberda reserve)*. Preprint. Vladivostok: Far Eastern Scientific Center of the USSR Academy of Sciences; 1980. 60 p. (In Russ.).
12. Petropavlovsky B.S., Varchenko L.I. The use of information statistics for studying vegetation ecology and dynamic processes of the Earth's vegetation cover. *Siberian Ecological Journal*. 2021;(3):263-273. (In Russ.). EDN: EALZFB. <https://doi.org/10.15372/SEJ20210301>
13. Petropavlovsky B.S., Mayorova L.A. Methods of restoring native vegetation areas and compiling ecological passports of forest-forming species (on the example of the Sikhote-Alin mountain system within the borders of Primorsky territory). *Grozny Natural Science Bulletin*. 2018;3(3):55-63. (In Russ.). EDN: VFPJMG. <https://doi.org/10.25744/genb.2018.11.3.007>
14. Sibirina L.A. Experimental logging of care for forest crops of Korean cedar (*Pinus koraiensis* Siebold et Zucc.) in Primorsky territory. *The state of forests and actual problems of reforestation*. Proceedings of the All-Union Conference with international participant. Khabarovsk: Far Eastern Research Institute of Forestry; 2009:67-68. (In Russ.). EDN: LQHOPD.
15. Sibirina L.A., Verkholat V.P. The state of Korean pine (*Pinus koraiensis* Siebold et Zucc.) crops on the Muravyov-Amursky peninsula. *Forests and forestry in modern conditions*. Proceedings of the All-Union Conference with international participant. Khabarovsk: Far Eastern Research Institute of Forestry; 2011:140-142. (In Russ.). EDN: CUSWNK.
16. Burkhanov S.H. Measures for the care of Korean pine in the Primorsky territory. *Agrarian Bulletin of Primorye*. 2024;(1):56-59. (In Russ.). EDN: BZCYHD.
17. Kharitonov A.M. On some regional features of the effects of extreme events on the forest resources of Primorsky territory. *Geosystems of Northeast Asia: nature, population, economy of territories*. Collection of scientific articles. Vladivostok, 2021:280-284. (In Russ.).

Информация об авторах

Л.А. Майорова – кандидат биологических наук, научный сотрудник лаборатории биогеографии и экологии ТИГ ДВО РАН.

Л.И. Варченко – научный сотрудник лаборатории биогеографии и экологии ТИГ ДВО РАН.

Л.А. Латышева – научный сотрудник лаборатории биогеографии и экологии ТИГ ДВО РАН.

Information about the authors

L.A. Mayorova – Candidate of Science (Biology), Researcher of the Laboratory of Biogeography and Ecology, PGI EAB RAS.

L.I. Varchenko – Researcher of the Laboratory of Biogeography and Ecology, PGI EAB RAS.

L.A. Latysheva – Researcher of the Laboratory of Biogeography and Ecology, PGI EAB RAS.

Статья поступила в редакцию 23.06.2025; одобрена после рецензирования 24.07.2025; принята к публикации 11.11.2025.
The article was submitted 23.06.2025; approved after reviewing 24.07.2025; accepted for publication 11.11.2025.

Научная статья

УДК 631.41:631.465

<https://doi.org/10.18522/1026-2237-2026-1-155-164>

ВЛИЯНИЕ ЗАСОЛЕНИЯ НА АГРОХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И ФЕРМЕНТАТИВНУЮ АКТИВНОСТЬ ЧЕРНОЗЕМНЫХ ПОЧВ

**Ольга Ивановна Наими¹, Владислав Александрович Матюгин²,
Марина Николаевна Дубинина³, Владимир Анатольевич Лыхман⁴**

^{1, 2, 3, 4} Федеральный Ростовский аграрный научный центр, Рассвет, Россия

¹ o.naimi@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8742-9528>

² vlad.matyugin@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0001-2055-5391>

³ dubinina-marina@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4305-635X>

⁴ lykvladimir@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3855-0070>

Аннотация. Изучен солевой состав засоленных почв понижений по сравнению с зональными почвами – черноземами обыкновенными и влияние засоления на основные агрохимические и биохимические свойства почвы. Исследования проводились в Октябрьском районе Ростовской области. Зональные почвы – незасоленные, величина плотного остатка водной вытяжки из пахотного горизонта чернозема обыкновенного – 0,068–0,088 %. В верхнем горизонте засоленной почвы плотный остаток водной вытяжки составил 0,98 %, снижаясь вниз по профилю до 0,32. Анионы распределялись в порядке убывания: $SO_4^{2-} > Cl^- > HCO_3^-$. Для катионов ряд по убыванию следующий: $Na^+ > Ca^{2+} > Mg^{2+} > K^+$. Пахотный горизонт чернозема солончаковатого характеризуется щелочной реакцией среды, небольшим содержанием гумуса и питательных элементов. Активность ферментов снижается вниз по профилю почвы и характеризуется так: каталаза – высокая, инвертаза и фосфатаза – низкая, уреазы – средняя. Исследованная почва классифицируется как лугово-черноземная солончаковая. Засоление – хлоридно-сульфатное натриевое. Выявлено отрицательное влияние засоления на активность инвертазы и фосфатазы, что может привести к замедлению процессов гумусообразования и уменьшению доступности фосфора. Показатели ферментативной активности каталазы и уреазы в исследованных почвах показали достаточную устойчивость к фактору засоления.

Ключевые слова: чернозем обыкновенный, засоление, водная вытяжка, ионный состав, агрохимические свойства, ферментативная активность, каталаза, инвертаза, фосфатаза, уреазы

Для цитирования: Наими О.И., Матюгин В.А., Дубинина М.Н., Лыхман В.А. Влияние засоления на агрохимические свойства и ферментативную активность черноземных почв // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2026. № 1. С. 155–164. <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2026-1-155-164>

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

Original article

THE INFLUENCE OF SALINIZATION ON AGROCHEMICAL PROPERTIES AND ENZYMATIC ACTIVITY OF CHERNOZEM SOILS

Olga I. Naimi¹, Vladislav A. Matyugin², Marina N. Dubinina³, Vladimir A. Lykhman⁴

^{1, 2, 3, 4} Federal Rostov Agricultural Research Centre, Rassvet, Russia

¹ o.naimi@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8742-9528>

² vlad.matyugin@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0001-2055-5391>

³ dubinina-marina@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4305-635X>

⁴ lykvladimir@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3855-0070>

© Наими О.И., Матюгин В.А., Дубинина М.Н., Лыхман В.А., 2026

Abstract. The salt composition of saline soils in depressions was studied in comparison to zonal soils (ordinary chernozems) and the influence of salinization on the main agrochemical and biochemical properties of the soil. The research was conducted in the Oktyabrsky District of the Rostov Region. The zonal soils are non-saline, with the solid residue of the water extract from the plow horizon of the ordinary chernozem being 0.068-0.088 %. In the upper horizon of the saline soil, the solid residue of the water extract was 0.98 %, decreasing down the soil profile to 0.32 %. The anions were distributed in the following descending order: $SO_4^{2-} > Cl^- > HCO_3^-$. For cations, the descending order was: $Na^+ > Ca^{2+} > Mg^{2+} > K^+$. The arable horizon of saline chernozem is characterized by an alkaline reaction (pH 8.19), a small content of humus (3.31 %) and nutrients. Enzyme activity decreases down the soil profile and is characterized as follows: catalase - high, invertase and phosphatase - low, urease - medium. The studied soil is classified as a meadow-chernozem saline soil. The salinization type is sodium chloride-sulfate. A negative impact of salinization on the activity of invertase and phosphatase was revealed, which may lead to a slowdown in humification processes and reduced phosphorus availability. The indicators of enzymatic activity for catalase and urease in the studied soils showed sufficient resistance to the salinization factor.

Keywords: ordinary chernozem, salinization, water extract, ionic composition, agrochemical properties, enzymatic activity, catalase, invertase, phosphatase, urease

For citation: Naimi O.I., Matyugin V.A. Dubinina M.N., Lykhman V.A. The Influence of Salinization on Agrochemical Properties and Enzymatic Activity of Chernozem Soils. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2026;(1):155-164. (In Russ.). <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2026-1-155-164>

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

Введение

Общая площадь земельного фонда Ростовской области составляет 10 096,7 тыс. га, из которых земли сельскохозяйственного назначения занимают 8 863,1 тыс. га. В почвенном покрове области преобладают черноземы (62 %) и каштановые почвы (23 %) [1]. По данным Единого государственного реестра почвенных ресурсов России, площадь засоленных и засоленно-солонцовых почв в земельном фонде Ростовской области – 2091 тыс. га, или 20,7 % от площади территории [2]. Среди зональных почв в разном количестве встречаются пятна почв с разной степенью засоления, приуроченные к понижениям рельефа и замкнутым микро- и мезодепрессиям. Наряду с рельефом, важную роль в процессе накопления солей в почвах одной зоны играет дренированность территории. Основными факторами засоления черноземных почв выступают неглубокий уровень залегания минерализованных грунтовых вод и изначальная засоленность почвообразующих пород [3].

В настоящее время засоление рассматривается как один из основных деградиционных процессов, которые в значительной степени ограничивают плодородие почв засушливых территорий. Повышенная концентрация водорастворимых солей в почве угнетает рост большинства сельскохозяйственных культур, приводя к их гибели или значительному снижению урожайности, а также ухудшает качество получаемой продукции. В современных гидроморфных и полугидроморфных условиях аридизации климата активизируется ряд деградиционных почвенных процессов, в том числе вторичного засоления на территориях с близким залеганием грунтовых вод [4, 5]. Засоленность почвы характеризуется высокой динамичностью, что обуславливает необходимость ее систематического контроля. Учет и оценка засоленных почв имеют высокую практическую значимость, поскольку большая их часть расположена в зонах активного земледелия.

В естественных условиях засоление почвы протекает достаточно медленно, однако антропогенное воздействие, например избыточное орошение при отсутствии дренажа, может ускорить этот процесс. Увеличение площади засоленных почв во всем мире является глобальной угрозой. На слабозасоленных почвах возможный теоретический урожай в среднем снижается

на 25 %, а сильнозасоленные почвы полностью выпадают из сельскохозяйственного использования [6]. Расширение площадей засоленных почв, влекущее за собой сокращение пахотных земель, обуславливает актуальность проведения их экологической оценки.

Основным показателем агроэкологического состояния почвы служит степень соответствия совокупности её свойств тем функциям, которые она выполняет в рамках конкретного ландшафта. Для засоленных почв ключевое значение имеет оценка степени влияния засоления на их экологические функции. В данном контексте ферментативная активность служит чувствительным индикатором, поскольку отражает функциональное состояние почвенной биоты и общую биологическую активность почвы. Она определяет направление и интенсивность биохимических процессов, что позволяет использовать ее в качестве диагностического параметра для оценки агроэкологического состояния почвы и уровня ее плодородия [3, 7].

Почвенные ферменты – это биологические катализаторы белковой природы, ускоряющие протекание биохимических реакций в почве. Их источниками могут быть почвенные микроорганизмы, водоросли, грибы, прижизненные корневые выделения растений, почвенная мезофауна, остатки растений и другая органика, поступающая в почву. Ферменты играют центральную роль в круговороте питательных веществ (углерод, азот, фосфор, сера и др.), синтезе, распаде (деструкция) и любой трансформации ее органических и неорганических компонентов, а также в формировании почвенной структуры. Различные группы ферментов отражают разные аспекты почвенной биологии. Так, каталаза, относящаяся к классу оксидоредуктаз, участвует в почвенном цикле углерода, обезвреживая токсичную для растений перекись водорода, образующуюся при окислении органики и метаболизме аэробных организмов. Благодаря этому она стимулирует микрофлору, ускоряя разложение органических остатков и образование гумуса. Инвертаза отвечает за гидролиз гликозидных связей в сахарозе и родственных соединениях, в результате чего образуются моносахариды. Фосфатаза, в свою очередь, катализирует реакцию гидролиза сложноэфирных связей в органических соединениях фосфора, составляющих около 80 % его запасов в почве, с образованием доступных для растений соединений этого элемента. Уреаза играет существенную роль в азотном цикле, катализируя гидролиз мочевины – промежуточного продукта разложения белков и нуклеиновых кислот. На сельскохозяйственных угодьях мочевина может поступать в почву в больших количествах с органическими и минеральными удобрениями. В результате гидролиза образуется аммонийная форма азота, которая легко усваивается растениями и автотрофными микроорганизмами, выступая для них непосредственным источником питания [8, 9].

Вопросы биологической и биохимической активности засоленных почв, несмотря на долгую историю их изучения, остаются недостаточно исследованными. Согласно имеющимся научным данным, засоление оказывает угнетающее воздействие на почвенную микробиоту и активность ферментов, что является основным фактором снижения уровня плодородия и общей продуктивности таких почв [10, 11]. Однако не все так однозначно. Почвенные ферменты достаточно устойчивы при невысокой степени засоления и только при высоких концентрациях солей снижают свою активность. Следует также учитывать тип засоления [12]. Так, из-за более высокой токсичности хлориды обычно сильнее подавляют ферментативную активность, чем сульфаты. Соли натрия обычно более вредны, чем соли кальция или магния, так как натрий ухудшает структуру почвы, вызывает пептизацию коллоидов, ухудшая аэрацию и доступность кислорода, что косвенно снижает активность окислительно-восстановительных ферментов [6, 7]. В долгосрочной перспективе микробное сообщество может адаптироваться к засолению, и ферментативная активность частично восстанавливается. Помимо засоления на ферментативную активность почвы оказывает влияние множество других факторов: содержание гумуса, структура почвы и ее гранулометрический состав, гидрологические условия, температурный режим и др. [13]. Так, гумус смягчает негативное влияние солей, связывая ионы и поддерживая микробиологическую активность. Все это обуславливает актуальность изучения влияния засоления на агроэкологическое состояние почвы в конкретных климатических и географических условиях, в частности на ее ферментативную активность.

Цель работы – оценка степени и вида засоления почв пониженных участков рельефа, изучение влияния засоления на основные агрохимические и биохимические свойства почвы по сравнению с зональными почвами – черноземами обыкновенными.

Объекты и методы исследования

Исследования проводились на территории Октябрьского района Ростовской области. Район входит в Приазовскую сельскохозяйственную зону, для которой характерен засушливый, умеренно жаркий континентальный климат. Количество выпадающих осадков – 420–500 мм в год. Среднегодовая температура воздуха – около 9 °С. Зональная почва района исследования – чернозем обыкновенный (по старой классификации – североприазовский) южноевропейской фации, кратковременно промерзающий, карбонатный, малогумусный, тяжелосуглинистый, сформированный на лёссовидных суглинках. В Классификации почв России (2004) эти почвы получили название черноземы миграционно-сегрегационные.

Черноземы обыкновенные, особенно их мощные виды, относятся к числу лучших пахотных почв области. Почвенные образцы отбирали с глубины 0–20 см (пахотный горизонт) с последующим определением в лаборатории основных агрохимических показателей: рН, содержания гумуса и подвижных форм азота, фосфора и калия, а также плотного остатка водной вытяжки. Дополнительно на поле с зональными почвами и на пониженном участке, выведенном из сельскохозяйственного использования из-за предполагаемого засоления (мезорельеф, конец склона), были заложены почвенные разрезы. Из них отобрали образцы по генетическим горизонтам для последующего детального анализа агрохимических характеристик и химического состава водной вытяжки.

Для определения уровня ферментативной активности образцы почвы перед анализом подвергали следующей подготовке: высушивали, удаляли корни и растительные остатки, затем измельчали и просеивали через сито с размером ячеек 1 мм. Активность каталазы устанавливали газометрическим методом, основанном на измерении объема кислорода, выделившегося в результате разложения перекиси водорода при ее взаимодействии с почвой. Активность инвертазы оценивали методом Бертрана, принцип которого заключается в количественном определении сахаров, образовавшихся при ферментативном расщеплении сахарозы, с последующим их фотоколориметрированием [14]. При определении активности фосфатазы использовали модифицированную методику А.Ш. Галстяна и Э.А. Арутюняна [14]. Внесенные изменения заключались в увеличении объема раствора фенолфталеинфосфата натрия, добавляемого к навеске почвы, и продлении времени инкубации до 3 ч [15]. Активность уреазы определяли модифицированным методом А.Ш. Галстяна, в котором концентрация аммиака измерялась фотоколориметрированием окрашенного раствора индофенольного соединения, образующегося в щелочной среде при взаимодействии аммония с салицилатом и гипохлоритом натрия [16].

Результаты исследования

Степень засоления почвы устанавливается по величине плотного остатка водной вытяжки, отражающего общее содержание минеральных солей. Для хлоридного и сульфатного типов почвы считаются засоленными, когда величина плотного остатка превышает 0,15 % (табл. 1).

Таблица 1 / Table 1

Классификация почв по степени засоления [6] / Classification of soils by degree of salinity [6]

Тип почв	Плотный остаток, %			
	Тип засоления			
	Сульфатно-хлоридный	Хлоридно-сульфатный	Хлоридный	Сульфатный
Незасоленные	< 0,15	< 0,15	< 0,15	< 0,3
Слабозасоленные	0,15–0,3	0,15–0,4	0,15–0,3	0,15–0,6
Среднезасоленные	0,3–0,6	0,4–0,7	0,3–0,5	0,6–1,0
Сильнозасоленные	0,6–1,0	0,7–1,2	0,5–0,8	1,0–2,0
Солончаки	> 1,0	> 1,2	> 0,8	> 2,0

Величина плотного остатка, определенного в водной вытяжке из пахотного горизонта чернозема обыкновенного, колебалась в пределах 0,068–0,088 %, что указывает на отсутствие засоления в основной массе зональных почв.

Исследованные почвы, занимая положение в нижней части склона, аккумулируют поверхностный и грунтовый сток с вышележащих территорий. Плотный остаток водной вытяжки из верхнего горизонта этих почв составил 0,98 %. Вниз по профилю почвы количество водорастворимых солей снижалось и в горизонте ВС (60–80 см) достигало 0,318 %. Исходя из того, что максимальное количество солей сосредоточено в верхней части профиля, а уровень грунтовых вод залегает на глубине 3,5–4,0 м, исследованную почву можно классифицировать как лугово-черноземную солончаковую.

По данным лабораторного анализа водной вытяжки определен характер и степень засоления черноземных почв, расположенных на пониженных элементах рельефа (табл. 2). Анионы в водной вытяжке чернозема солончаковатого по всем горизонтам почвы распределяются в порядке убывания: $\text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^- > \text{HCO}_3^-$. Сульфат-ион составляет 50–70 % от суммы анионов в водной вытяжке, причем вниз по профилю относительное содержание сульфатов снижается. Содержание гидрокарбонат-иона по профилю изменяется незначительно, немного увеличиваясь на глубине 20–60 см, но в связи с тем, что общая минерализация вниз по профилю снижается, то в процентном соотношении содержание гидрокарбонат-иона в водной вытяжке возрастает.

Таблица 2 / Table 2

Показатели водной вытяжки лугово-черноземной солончаковой почвы
/ Water extractability indicators of meadow-chnozem solonchak soil

Горизонт (глубина), см	HCO_3^- , ммоль/100 г	Cl^- , ммоль/100 г	SO_4^{2-} , ммоль/100 г	Ca^{2+} , ммоль/100 г	Mg^{2+} , ммоль/100 г	K^+ , ммоль/100 г	Na^+ , ммоль/100 г	Плотный остаток, %
Ап (0–10)	0,51	2,46	8,165	2,13	1,50	0,051	7,506	0,980
А (10–20)	0,50	0,96	3,620	0,75	0,50	0,025	3,897	0,474
АВ (20–40)	0,70	0,71	3,186	0,63	0,38	0,017	3,656	0,436
В (40–60)	0,65	1,06	2,685	0,88	0,55	0,0	3,027	0,434
ВС (60–80)	0,54	1,58	2,022	1,06	0,13	0,008	2,959	0,318

Для катионов ряд по убыванию следующий: $\text{Na}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+$. Натрий по всему профилю почвы преобладает и достигает 67–78 % от суммы катионов, причем наибольшее относительное количество натрия приходится на горизонт АВ. Таким образом, можно определить засоление почвы как хлоридно-сульфатное натриевое. Учитывая степень и тип засоления верхней части профиля, почву следует отнести к сильнозасоленным. Вниз по профилю количество солей в почве снижается до уровня средне- и слабозасоленного.

Мощность гумусового горизонта чернозема обыкновенного – 70–80 см. Распределение гумуса и питательных элементов по профилю почв носит регрессивно-аккумулятивный характер, реакция среды изменяется вниз по профилю от нейтральной до слабо- и среднещелочной. Содержание гумуса в пахотном горизонте чернозема обыкновенного – 3,6–4,2 %, реакция среды – 7,3–7,8, содержание нитратного азота – 3,1–5,8 мг/кг, аммонийного – 8,1–9,7, подвижного фосфора (по Мачигину) – 34,3–40,9, подвижного калия – 390–630 мг/кг.

Результаты анализа отобранных из заложенных разрезов образцов зональных и засоленных почв приведены в табл. 3. В отличие от зональных почв, мощность гумусового горизонта засоленной почвы не превышает 45–50 см. Как видим, пахотный горизонт лугово-черноземной солончаковой почвы характеризуется щелочной реакцией среды (рН 8,19), небольшим содержанием гумуса (3,31 %) и, соответственно, более низкими по сравнению с зональной почвой значениями подвижных форм азота, фосфора и калия. В нижней части почвенного профиля значения реакции среды возрастают до 8,5–8,7, а содержание гумуса снижается до 1,18 %. Засоление черноземов сухостепной зоны в настоящее время может отражать как естественный процесс их эволюции в условиях усиления аридизации климата, так и воздействие антропогенных

факторов [4, 5]. Высокое содержание солей, накапливающихся в верхних слоях почвы, препятствует развитию растений и делает земли непригодными для сельского хозяйства.

Согласно «Методическим указаниям по проведению комплексного мониторинга плодородия почв земель сельскохозяйственного назначения» (Москва, 2003), черноземы обыкновенные по содержанию в пахотном горизонте минерального азота относятся к классу средней обеспеченности, подвижного фосфора и обменного калия – повышенной обеспеченности. В то же время засоленные почвы характеризовались низкой обеспеченностью минеральными формами азота и подвижным фосфором при повышенной обеспеченности обменным калием.

Таблица 3 / Table 3

Агрохимические свойства почв / Agrochemical properties of soils

Горизонт (глубина), см	N-NO ₃ , мг/кг (ГОСТ 26951-86)	N-NH ₄ , мг/кг (ГОСТ 26489-85)	P ₂ O ₅ , мг/кг (ГОСТ 26205-91)	K ₂ O, мг/кг (ГОСТ 26205-91)	pH, ед. (ГОСТ 26483-85)	Гумус, % (метод Никитина)
<i>Чернозем обыкновенный</i>						
Ап (0–20)	5,8	9,1	34,3	399,2	7,31	4,18
А (20–40)	4,5	8,0	26,9	284,2	7,63	3,95
А (40–60)	2,4	7,7	11,2	293,8	7,88	3,35
АВ (60–80)	2,8	7,8	7,1	256,4	8,14	2,48
<i>Лугово-черноземная солончаковая почва</i>						
Ап (0–10)	5,4	4,9	15,7	351,7	8,19	3,31
А (10–20)	2,3	4,2	10,6	313,7	8,35	3,17
АВ (20–40)	2,4	4,2	4,7	247,1	8,55	3,00
В (40–60)	3,2	4,1	4,1	147,4	8,72	1,61
ВС (60–80)	3,1	3,6	3,5	142,6	8,53	1,18

В период исследований нами изучены активность ферментов группы оксидоредуктаз (каталаза) и гидролаз (инвертаза, фосфатаза, уреазы), которые являются наиболее значимыми в почвенной биодинамике. Распределение ферментативной активности по профилю почвы свидетельствует о ее тесной связи с содержанием гумуса (табл. 4). Как правило, ферментативная активность снижается с глубиной пропорционально понижению содержания гумуса, а также с уменьшением количества микробиоты и разреженностью растительных остатков.

Таблица 4 / Table 4

Ферментативная активность почв / Enzymatic activity of soils

Горизонт (глубина), см	Каталаза, мл O ₂ /1 г/1 мин	Инвертаза, мг глюкозы / 1 г/ 24 ч	Фосфатаза, мг P ₂ O ₅ /10 г/ 1 ч	Уреазы, мг NH ₃ /10 г/ 24 ч
<i>Чернозем обыкновенный</i>				
Ап (0–20)	11,8	19,8	2,81	15,98
А (20–40)	10,4	18,9	2,75	17,16
А (40–60)	8,9	15,5	2,12	18,68
АВ (60–80)	8,5	9,7	1,56	9,06
<i>Лугово-черноземная солончаковая почва</i>				
А (0–10)	18,3	9,0	0,78	15,12
А (10–20)	20,3	8,2	1,23	20,17
АВ (20–40)	18,5	6,1	1,50	24,98
В (40–60)	13,5	4,3	1,11	10,65
ВС (60–80)	12,5	5,4	0,39	8,21

Исключение составляет распределение активности уреазы по профилю почвы, где максимальные значения активности зафиксированы в средней части профиля, что связано с высокой антропогенной нагрузкой в пахотном горизонте. Такое распределение уреазы отмечалось и в других исследованиях [17].

По данным ряда авторов, засоление ингибирует активность каталазы [11], однако в наших исследованиях мы наблюдали увеличение активности этого фермента в солончаковой почве в 1,5–2 раза по сравнению с зональной почвой. Возможно, это связано с подщелачиванием почвенного раствора. В.И. Личко отмечала, что физиологически щелочные соли ингибируют инвертазу и активизируют каталазу, а физиологически нейтральные соли ингибируют активность ферментов только при высоких концентрациях [7]. По шкале оценки биологической активности Гапонюк – Малахова [18] активность каталазы чернозема обыкновенного характеризуется как средняя и высокая, а солончаковой почвы – как высокая.

Что касается активности гидролитических ферментов, выявлена следующая картина. Наблюдалось существенное снижение активности инвертазы в засоленной почве: в поверхностном слое она составила 8,2–9,0 мг глюкозы / 1 г / 24 ч, что более чем в два раза ниже, чем в зональной почве. По шкале Гапонюк – Малахова активность инвертазы в солончаковой почве характеризовалась как низкая, а в черноземе обыкновенном она попала в разряд средней. Снижение активности инвертазы наблюдалось по всему почвенному профилю солончаковой почвы. Её пониженная активность может быть связана с высоким содержанием легкорастворимых солей и малым содержанием гумуса.

Основными источниками фосфатазы в почве являются ризосферные выделения растений и почвенные микроорганизмы (бактерии, грибы и актиномицеты). Поскольку в результате засоления создаются неблагоприятные условия для жизнедеятельности микроорганизмов и растений, то в конечном итоге это негативно сказывается и на активности фермента. Активность фосфатазы в наиболее засоленном поверхностном горизонте солончаковой почвы (0–10 см) была очень низкой – 0,69–0,80 мг $P_2O_5/10$ г / 1 ч. Наибольшая активность фосфатазы зафиксирована на глубине 20–40 см – 1,50 мг $P_2O_5/10$ г / 1 ч, а на глубине 80 см она снизилась до 0,39 мг $P_2O_5/10$ г / 1 ч. В то же время в зональном черноземе обыкновенном активность фосфатазы была значительно выше (2,75–2,81 мг $P_2O_5/10$ г / 1 ч в верхней части профиля) и характеризовалась как средняя по шкале Гапонюк – Малахова. И даже в нижней части профиля ее значение составило 1,56 мг $P_2O_5/10$ г / 1 ч.

Засоление не оказало ингибирующего влияния на активность уреазы, в средней части профиля солончаковой почвы она даже выше, чем в зональной почве, и достигает 25 мг $NH_3/10$ г / 24 ч. По шкале Гапонюк – Малахова активность уреазы в зональной и солончаковой почвах характеризуется как средняя. Таким образом, уреазы показала достаточную устойчивость к внешним факторам, в частности к неблагоприятным условиям в засоленных почвах.

Как отмечалось выше, активность почвенных ферментов находится в прямой зависимости от содержания органического вещества в почве. Гумус – основной энергетический и питательный субстрат для почвенных микроорганизмов. Чем больше свежего и стабильного органического вещества, тем выше численность и активность микробного сообщества, а значит, и синтез ферментов. В черноземе обыкновенном в пределах почвенного разреза наиболее тесная связь наблюдалась между содержанием гумуса и активностями инвертазы и фосфатазы – коэффициент корреляции составил 0,99. Однако в солончаковой почве эта связь ослабевает, на что указывает снижение коэффициентов корреляции (0,83 и 0,55 соответственно). Это говорит о возрастающем влиянии на ферментативную активность других факторов, в частности засоления. В черноземе сильная прямая связь отмечается также между гумусом и ферментативной активностью каталазы и уреазы (коэффициенты корреляции 0,90 и 0,74), причем в солончаковой почве коэффициенты несколько выросли (0,96 и 0,80 соответственно), что косвенно указывает на достаточную устойчивость этих ферментов в неблагоприятных условиях засоления почв.

Выявленные процессы деградации почв в результате засоления требуют разработки систем мероприятий по стабилизации экологической устойчивости агроландшафта и сохранению почвенного плодородия. Предварительной рекомендацией для решения данной проблемы может быть увеличение в структуре посевных площадей доли многолетних бобовых и злаковых культур как более солеустойчивых.

Выводы

Засоление черноземов происходит в понижениях рельефа из-за близкого залегания минерализованных грунтовых вод с накоплением солей в поверхностном горизонте до 1,0 %. В нижней части профиля количество солей снижается до 0,3 %. Исследованные почвы можно классифицировать как лугово-черноземные солончаковые. В ионном составе водной вытяжки среди анионов преобладают сульфаты и хлориды, среди катионов – ионы натрия, что позволяет классифицировать тип засоления как хлоридно-сульфатный натриевый.

Засоленные почвы отличаются от незасоленных зональных аналогов рядом негативных признаков: невысоким содержанием гумуса (на 20–30 % меньше, чем в обыкновенных черноземах), пониженным содержанием доступных растениям питательных элементов (азот, фосфор и калий), щелочной реакцией почвенного раствора с увеличением значений pH вниз по профилю почвы.

По шкале Гапонюк – Малахова активность почвенных ферментов в солончаковой почве оценивалась так: каталаза – высокая, инвертаза и фосфатаза – низкая, уреазы – средняя. Активность каталазы, инвертазы и фосфатазы снижается вниз по профилю почвы и тесно связана с содержанием гумуса. Максимальные значения активности уреазы характерны для слоя 20–40 см. Выявлено отрицательное влияние засоления на активность инвертазы и фосфатазы, что может привести к замедлению процессов гумусообразования и уменьшению доступности фосфора. Показатели ферментативной активности каталазы и уреазы в исследованных почвах показали достаточную устойчивость к фактору засоления.

Список источников

1. Клименко А.И., Безуглова О.С., Гринько А.В. и др. Почвы Ростовской области: плодородие, деградация и восстановление в условиях аридизации климата. Рассвет: Полиграф-Сервис, 2024. 232 с. EDN: BWLBLE. <https://doi.org/10.69535/FRARC.2024.87.93.001>
2. Панкова Е.И., Горохова И.Н. Анализ сведений о площади засоленных почв России на конец XX и начало XXI веков // Бюл. Почв. ин-та им. В.В. Докучаева. 2020. Вып. 103. С. 5–33. EDN: UYLVON. <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2020-103-5-33>
3. Савич В.И., Седых В.А., Сорокин А.Е., Котенко М.Е., Тазин И.И. Агроэкологическая оценка засоления почв // АгроЭкоИнфо. 2022. № 2 (50). EDN: ODTRSY. <https://doi.org/10.51419/202122206>
4. Залибеков З.Г., Мамаев С.А., Котенко М.Е., Мусалаева П.Д. Системный анализ функционирования засоленных почв и особенности их использования в аридных условиях // Аридные экосистемы. 2024. Т. 30, № 3(100). С. 37–48. EDN: KZOLKO. <https://doi.org/10.24412/1993-3916-2024-3-37-48>
5. Кузнецова Ю.С., Казеев К.Ш. Влияние засоления на биологические свойства гидроморфных почв ильменей Астраханской области // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2010. № 1(155). С. 90–93. EDN: LANUTH.
6. Ковда В.А., Егоров В.В., Муратова В.С., Строганов Б.П. Классификация почв по степени и качеству засоления в связи с солеустойчивостью растений // Ботан. журн. 1960. № 8. С. 189–201.
7. Личко В.И. Ферментативная активность как индикатор экологического состояния почв: автореф. дис. ... канд. биол. наук. Воронеж, 1998. 18 с. EDN: ZKAFZT.
8. Rao M.A., Scelza R., Acevedo F., Diez M.C., Gianfreda L. Enzymes as useful tools for environmental purposes // Chemosphere. 2014. Vol. 107. P. 145–162. EDN: SRFNEH. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.12.059>
9. Minnikova T.V., Bataeva Yu.V., Grigoryan L.N., Kolesnikov S.I., Yakovleva L.V. Influence of salt composition on the enzymatic activity of degraded soils in Astrakhan oblast // Eurasian Soil Science. 2025. Vol. 58, № 7. Art. 90. EDN: VTRXVF. <https://doi.org/10.1134/S1064229324603998>
10. Ходжимуродова Н.Р., Хакимова Н.Х., Тагаева М.В., Камилов Б.С. Биологическая активность орошаемых лугово-аллювиальных почв в зависимости от степени засоленности // Науч. обозрение. Биол. науки. 2021. № 1. С. 27–31. EDN: HBWDLO.
11. Umarov O., Bafayeva Z., Atayeva Z. Soil salinity effects on hydrolase and oxidoreductase class enzymes // E3S Web of Conferences. 2024. Vol. 549. Art. 03017. EDN: KRWSJP. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202454903017>
12. Манжина С.А. К вопросу выявления химизма и степени засоления почв: российские и зарубежные практики // Мелиорация и гидротехника. 2021. Т. 11, № 3. С. 163–181. EDN: NUDOIO. <https://doi.org/10.31774/2712-9357-2021-11-3-163-181>
13. Хазиев Ф.Х. Экологические связи ферментативной активности почв // Экобиотех. 2018. Т. 1, № 2. С. 80–92. EDN: YHIVUL. <https://doi.org/10.31163/2618-964X-2018-1-2-80-92>

14. Хазиев Ф.Х. Методы почвенной энзимологии. М.: Наука, 2005. 252 с. EDN: QKXHYJ.
15. Наими О.И., Дубинина М.Н., Матюгин В.А., Лыхман В.А., Гринько А.В. Влияние гуминовых препаратов на содержание подвижного фосфора и активность фосфатазы в черноземе обыкновенном под посевами озимой пшеницы // Земледелие. 2023. № 5. С. 32–36. EDN: AIGQZA. <https://doi.org/10.24412/0044-3913-2023-5-32-36>
16. Наими О.И. О методе определения активности уреазы в почве // Высокие технологии и инновации в науке : сб. избр. ст. Междунар. науч. конф. СПб: ГНИИ «Нацразвитие», 2019. С. 17–20. EDN: ISSDTQ.
17. Наими О.И. Закономерности профильного распределения уреазы в черноземе обыкновенном в агроценозе // Междунар. журн. гуманитар. и естеств. наук. 2019. № 8-1. С. 12–14. EDN: ICJPPB. <https://doi.org/10.24411/2500-1000-2019-11446>
18. Гаполюк Э.И., Малахов С.В. Комплексная система показателей экологического мониторинга почв // Миграция загрязненных веществ в почвах и сопредельных средах: тр. 4-го Всесоюз. совещания. Л.: Гидрометеиздат, 1985. С. 3–10.

References

1. Klimenko A.I., Bezuglova O.S., Grinko A.V. et al. *Soils of the Rostov region: fertility, its degradation and restoration in conditions of climate aridization*. Rassvet: Poligraf-Service; 2024. 232 p. (In Russ.). EDN: BWLBLE. <https://doi.org/10.69535/FRARC.2024.87.93.001>
2. Pankova E.I., Gorokhova I.N. Analysis of information on the area of saline soils in Russia at the end of the 20th and beginning of the 21st century. *Bulletin of the Dokuchaev Soil Institute*. 2020;(103):5-33. (In Russ.). EDN: UYLVON. <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2020-103-5-33>
3. Savich V.I., Sedykh V.A., Sorokin A.E., Kotenko M.E., Tazin I.I. Agroecological assessment of soil salinization. *AgroEcoInfo*. 2022;(2). (In Russ.). EDN: ODTRSY. <https://doi.org/10.51419/202122206>
4. Zalibekov Z.G., Mamaev S.A., Kotenko M.E., Musalaeva P.D. Systems analysis of the functioning of saline soils and features of their use in arid conditions. *Arid Ecosystems*. 2024;30(3):37-48. (In Russ.). EDN: KZOLKO. <https://doi.org/10.24412/1993-3916-2024-3-37-48>
5. Kuznetsova Yu. S., Kazeev K. Sh. Effect of salinization on biological properties of hydromorphic ilmenite soils of the Astrakhan region. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science*. 2010;(1):90-93. (In Russ.). EDN: LAHUTH.
6. Kovda V.A., Egorov V.V., Muratova V.S., Stroganov B.P. Classification of soils by the degree and quality of salinization in connection with the salt tolerance of plants. *Botanical Journal*. 1960;(8):189-201. (In Russ.).
7. Lichko V.I. *Enzymatic activity as an indicator of the ecological state of soils*. Abstract of PhD thesis. Voronezh, 1998. 18 p. (In Russ.). EDN: ZKAFZT.
8. Rao M.A., Scelza R., Acevedo F., Diez M.C., Gianfreda L. Enzymes as useful tools for environmental purposes. *Chemosphere*. 2014;107:145-162. EDN: SRFNEH. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.12.059>
9. Minnikova T.V., Bataeva Yu.V., Grigoryan L.N., Kolesnikov S.I., Yakovleva L.V. Influence of salt composition on the enzymatic activity of degraded soils in Astrakhan oblast. *Eurasian Soil Science*. 2025;58(7):90. EDN: VTRXVF. <https://doi.org/10.1134/S1064229324603998>
10. Khodjimurodova N.R., Khakimova N.Kh., Tagaeva M.V., Kamilov B.S. Biological activity of irrigated meadow-alluvial soils depending on the degree of salinity. *Scientific Review. Biological Sciences*. 2021;(1):27-31. (In Russ.). EDN: HBWDLO.
11. Umarov O., Bafayeva Z., Atayeva Z. Soil salinity effects on hydrolase and oxidoreductase class enzymes. *E3S Web of Conferences*. 2024;549:03017. EDN: KRWSJP. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202454903017>
12. Manzhina S.A. On the issue of identifying the chemistry and degree of soil salinization: Russian and foreign practices. *Land Reclamation and Hydraulic Engineering*. 2021;11(3):163-181. (In Russ.). EDN: NUDOIO. <https://doi.org/10.31774/2712-9357-2021-11-3-163-181>
13. Khaziev F.Kh. Ecological relationships of soil enzymatic activity. *Ecobiotech*. 2018;1(2):80-92. (In Russ.). EDN: YHIVUL. <https://doi.org/10.31163/2618-964X-2018-1-2-80-92>
14. Khaziev F.Kh. *Methods of soil enzymology*. Moscow: Science; 2005. 252 p. (In Russ.). EDN: QKXHYJ.
15. Naimi O.I., Dubinina M.N., Matyugin V.A., Lykhman V.A., Grinko A.V. The influence of humic preparations on the content of mobile phosphorus and phosphatase activity in ordinary chernozem under winter wheat crops. *Agriculture*. 2023;(5):32-36. (In Russ.). EDN: AIGQZA. <https://doi.org/10.24412/0044-3913-2023-5-32-36>
16. Naimi O.I. On the method for determining urease activity in soil. *High technologies and innovations in science*. Collection of selected articles from the International Scientific Conference. St. Petersburg: State Research Institute “National Development”; 2019:17-20. (In Russ.). EDN: ISSDTQ.
17. Naimi O.I. Patterns of profile distribution of urease in ordinary chernozem in agroecosis. *International Journal Humanitarian and Natural Sciences*. 2019;(8-1):12-14. (In Russ.). EDN: ICJPPB. <https://doi.org/10.24411/2500-1000-2019-11446>

18. Gaponyuk E.I., Malakhov S.V. Integrated system of indicators of environmental monitoring of soils. *Migration of polluted substances in soils and adjacent environments*. Proceedings of the 4th All-Union Conference. Leningrad: Hydrometeorological Publishing House; 1985:3-10. (In Russ.).

Информация об авторах

О.И. Наими – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, заведующая лабораторией агрохимических исследований ФРАНЦ.

В.А. Матюгин – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник ФРАНЦ.

М.Н. Дубинина – старший научный сотрудник ФРАНЦ.

В.А. Лыхман – кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник ФРАНЦ.

Information about the authors

O.I. Naimi – Candidate of Science (Biology), Senior Researcher, Head of the Laboratory of Agrochemical Research, FRARC.

V.A. Matyugin – Candidate of Science (Biology), Senior Researcher, FRARC.

M.N. Dubinina – Senior Researcher, FRARC.

V.A. Lykhtman – Candidate of Science (Biology), Leading Researcher, FRARC.

*Статья поступила в редакцию 26.08.2025; одобрена после рецензирования 24.09.2025; принята к публикации 11.11.2025.
The article was submitted 26.08.2025; approved after reviewing 24.09.2025; accepted for publication 11.11.2025.*

Над номером работали: Т.А. Ватульян, Л.С. Ворович, Е.М. Колосова, О.В. Назаренко, Н.Г. Шатравкина, М.С. Шипитко

Подписано в печать 23.03.2026. Выход в свет 26.03.2026. Формат 60×84 1/8. Бумага офсетная.
Шрифт Times. Усл. печ. л. 19,07. Уч.-изд. л. 19,46. Тираж 250 экз. Заказ № 10366.

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 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, N.G. Shatravkina, M.S. Shipitko

Signed print March 23, 2026. The publication March 26, 2026. Format 60×84 1/8. Offset paper. Font Times.
Conv. print. sheets 19.07. Publ. sign. 19.46. Edition 250 copies. Order number 10366.

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, 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», MathNet, ЭБС «Университетская библиотека онлайн», ИВИС, Ulrich, Chemical Abstracts. Входит в Белый список научных журналов.

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.

Конфиденциальность персональной информации защищена в соответствии с законодательством Российской Федерации.

Издательские услуги оплачиваются организацией или автором после утверждения статьи на редколлегии.

Статья представляется по адресу izvestiya@sfedu.ru в электронном виде в формате docx. или doc. (MS Word) через 1,5 интервала, шрифтом Times New Roman размером 14 пт, страницы должны быть пронумерованы, перед заголовком указан индекс УДК. Требуется приложить экспертное заключение о возможности опубликования материала в открытой печати.

К статье на русском и английском языках прилагаются:

1. Сведения об авторах (ФИО полностью, ученая степень, звание, кафедра или лаборатория, должность) с указанием автора, ответственного за переписку.
2. Полное название организации.
3. Название статьи.
4. Аннотация (1000–1500 знаков / 150–200 слов).
5. Ключевые слова (8–10 слов).

Более подробно с правилами оформления статьи можно ознакомиться на сайте www.izvestiya.sfedu.ru

Журнал распространяется по подписке через объединённый каталог «Пресса России», интернет-каталог «Пресса по подписке». Подписной индекс – 70415 (подписка на полугодие).

Адрес для переписки: 344006, г. Ростов-на-Дону, ул. Б. Садовая, 105/42, ЮФУ, редакция журнала «Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки».

Тел./факс главной редакции (863) 218-40-00, добавочный 11-093, 11-094.

E-mail: izvestiya@sfedu.ru

Адрес в Интернете: www.izvestiya.sfedu.ru