

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЯ И ЭКОЛОГИЯ

№ 83

Научно-теоретический журнал

Издается с октября 2005 года

Выходит 4 раза в год

ISSN 3034-4190

Санкт-Петербург
РГГМУ
2026

УДК 001(051.2)«540.1»
ББК 72я5

Гидрометеорология и экология. № 83. Научно-теоретический журнал. Санкт-Петербург : РГГМУ, 2026. 166 с.

Представлены статьи по наиболее актуальным современным проблемам изучения природной среды: изменениям климата в региональном и глобальном масштабах; мониторингу, моделированию и прогнозированию физических процессов в атмосфере, водах суши и морской среде; влиянию антропогенной деятельности на разнообразные процессы в биосфере, атмосфере и гидросфере Земли. Материал сгруппирован по специальностям. В разделе «Хроника» освещены события жизни университета.

Журнал предназначен для ученых, широкой категории исследователей природной среды, а также аспирантов и студентов, обучающихся по соответствующим специальностям.

Редакционный совет:

Михеев В. Л., канд. юрид. наук, доцент, ректор РГГМУ — *председатель совета*
Агафонов Г. И., д-р техн. наук, академик РАН, председатель совета директоров холдинговой компании «Пигмент»; **Анри де Люмле**, PhD, проф., член-корр. Французской академии наук (Франция); **Камбаров М. А.**, канд. юрид. наук, вице-президент Национального исследовательского центра «Курчатовский институт»; **Квинт В. Л.**, д-р экон. наук, проф., главный научный сотр. Центрального экономико-математического института РАН; **Кулешов Ю. В.**, д-р техн. наук, проф., зам. начальника Военно-космической академии им. А. Ф. Можайского по учебной и научной работе; **Орыщенко А. С.**, д-р техн. наук, проф., член-корр. РАН, зав. кафедрой СПбПУ; **Поздняков Ш. Р.**, д-р геогр. наук; **Сальников В. Г.**, д-р геогр. наук, проф., декан ф-та географии и природопользования Казахского национального университета им. Аль-Фараби; **Сильников М. В.**, д-р техн. наук, проф., член-корр. РАН, директор Института военно-технического обучения и безопасности СПбПУ; **Федоров М. П.**, д-р техн. наук, проф., академик РАН, СПбПУ; **Холматжанов Б. М.**, д-р геогр. наук, проф. (Узбекистан).

Редакционная коллегия:

Малинин В. Н., д-р геогр. наук, проф. — *главный редактор*
Кондратьев С. А., д-р физ.-мат. наук — *зам. главного редактора*
Гайдукова Е. В., канд. техн. наук, доцент — *отв. секретарь*
Алексеев Г. В., д-р геогр. наук, проф.; **Белоненко Т. В.**, д-р геогр. наук, проф.; **Биденко С. И.**, д-р техн. наук, проф.; **Блиновская Я. Ю.**, д-р техн. наук, проф.; **Вильфанд Р. М.**, д-р техн. наук, проф.; **Вуглинский В. С.**, д-р геогр. наук, проф.; **Гриценко В. А.**, д-р физ.-мат. наук, проф.; **Дмитриев В. В.**, д-р геогр. наук, проф.; **Ермаков Д. М.**, д-р физ.-мат. наук, проф.; **Зиновьев А. Т.**, д-р техн. наук; **Иванов В. В.**, д-р физ.-мат. наук; **Костяной А. Г.**, д-р физ.-мат. наук, проф.; **Кудряцев В. Н.**, д-р физ.-мат. наук, проф.; **Курашов Е. А.**, д-р биол. наук, проф.; **Лобанов В. А.**, д-р техн. наук, проф.; **Мушкет И. И.**, д-р юрид. наук, проф.; **Прошутинский А. Ю.**, д-р физ.-мат. наук (США); **Репина И. А.**, д-р физ.-мат. наук, проф.; **Румянцев В. А.**, д-р геогр. наук, проф., академик РАН; **Рябченко В. А.**, д-р физ.-мат. наук; **Смышляев С. П.**, д-р физ.-мат. наук, проф.; **Тимофеев Ю. М.**, д-р физ.-мат. наук, проф.; **Филатов Н. Н.**, д-р геогр. наук, проф., член-корр. РАН; **Чернышков П. П.**, д-р геогр. наук, проф.; **Шапрон Б.**, PhD, ведущий ученый Института морских исследований IFREMER (Франция); **Щукин Г. Г.**, д-р физ.-мат. наук, проф.; **Якушев Д. И.**, д-р техн. наук, проф. СПбУ МВД РФ.

Журнал является продолжением журнала «Ученые записки РГГМУ», который был основан в 2005 г. В 2010 г. он вошел в Перечень ВАК, а в январе 2020 г. переименован в журнал «Гидрометеорология и экология».

Журнал зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций.

Свидетельство ПИ № ФС77-79574 от 27.11.2020 г.

Специализация: метеорология, гидрология, океанология, геоэкология, лимнология, геоинформатика, геофизика, общественные и гуманитарные науки.

Точка зрения редакции может не совпадать с мнением авторов статей.

Журнал входит в Перечень ВАК по направлению науки о Земле и окружающей среде, имеет категорию K2, индексируется в системе CrossRef и включен в базу данных «Российский индекс научного цитирования» (РИНЦ), размещенную на платформе Национальной электронной библиотеки (<http://elibrary.ru>). Полнотекстовые версии опубликованных статей в виде pdf-файлов размещаются в Интернете для свободного доступа на сайте журнала <http://www.rshu.ru/university/notes/archive/> сразу же после его выхода.

Журнал включен в Белый список, уровень 3, сентябрь 2025 г.

При перепечатке материалов ссылка на журнал обязательна.

Адрес редакции: Россия, 192007, Санкт-Петербург, Вороневская ул., д. 79. Тел.: (812) 633-01-88 (доб. 421), e-mail: rio@rshu.ru.

© Российский государственный гидрометеорологический университет (РГГМУ), 2026

© Авторы публикаций, 2026

ISSN 3034-4190

The Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation

THE FEDERAL STATE BUDGET EDUCATIONAL
INSTITUTION OF HIGHER EDUCATION
“RUSSIAN STATE HYDROMETEOROLOGICAL UNIVERSITY”

HYDROMETEOROLOGY AND ECOLOGY

№ 83

A theoretical research journal

Published since October, 2005
4 issues a year

ISSN 3034-4190

St. Petersburg
RSHU
2026

UDC 001(051.2)«540.1»
LBC 72я5

Hydrometeorology and Ecology. No. 83. St. Petersburg : RSHU Publishers, 2026. 166 p.

The Journal contains articles on the most relevant contemporary problems of studying the environment: climate change in regional and global scales; monitoring, modeling and forecasting of physical processes in the atmosphere, inland and ocean waters; influence of anthropogenic activity on various processes in the biosphere, atmosphere and hydrosphere of the Earth. The material is grouped by specialty. The "Chronicle" section covers the events of the University life.

The Journal is intended for scientists, a broad category of environmental researchers, as well as post-graduate and graduate students of these specialties.

The Editorial Board:

Mikheev V. L., PhD in Juridical Sciences, Associate Professor, Rector of RSHU — *Chairman*
Agafonov G. I., Grand PhD in Engineering, Academician of the Russian Academy of Sciences, Board Chairman of "Pigment" holding company; **Fedorov M. P.**, Grand PhD in Engineering, Academician of the Russian Academy of Sciences, President of Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University; **Henry de Lumley**, PhD, Professor, Corresponding Member of the Academy of Sciences, France; **Kambolov M. A.**, PhD in Juridical Sciences, Vice-president of the National Research Center «Kurchatov Institute»; **Kuleshov Iu. V.**, Grand PhD in Engineering, Professor, Vice-president of Mozhaisky Military Space Academy for academic affairs and research; **Kholmatzhanov B. M.**, Grand PhD in Geography, Professor, Uzbekistan; **Kvint V. L.**, Grand PhD in Economics, Professor, leading researcher of the RAS Central Economic and Mathematical Institute; **Otryshchenko A. S.**, Grand PhD in Engineering, Professor, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Head of Department at Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University; **Pozdnyakov Sh. R.**, Grand PhD in Geography, Professor; **Salnikov V. G.**, Grand PhD in Geography, Professor, Dean of Geography and Natural Management Faculty of Al-Farabi Kazakh National University; **Silnikov M. V.**, Grand PhD in Engineering, Professor, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Director of Military-Technical Education and Security Institute of Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.

Editors:

Malinin V. N., Grand PhD in Geography, Professor — *Editor in Chief*

Kondratiev S. A., Grand PhD in Physics and Mathematics — *Deputy Editor in Chief*

Gaidukova E. V., PhD in Engineering — *Executive editor*

Alekseev G. V., Grand PhD in Geography, Professor; **Belonenko T. V.**, Grand PhD in Geography, Professor; **Bidenko S. I.**, Grand PhD in Engineering sciences, Professor; **Chernyshkov P. P.**, Grand PhD in Geography, Professor; **Dmitriev V. V.**, Grand PhD in Geography, Professor; **Ermakov D. M.**, Grand PhD in Physics and Mathematics; **Filatov N. N.**, Grand PhD in Geography, Professor, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences; **Gritsenko V. A.**, Grand PhD in Physics and Mathematics, Professor; **Ivanov V. V.**, Grand PhD in Physics and Mathematics, Professor; **Kostyanov A. G.**, Grand PhD in Physics and Mathematics, Professor; **Kudriavtsev V. N.**, Grand PhD in Physics and Mathematics, Professor; **Kurashov E. A.**, Grand PhD in Biology, Professor; **Lobanov V. A.**, Grand PhD in Engineering, Professor; **Mushket I. I.**, Grand PhD in Juridical Sciences, Professor; **Proshutinskii A. Iu.**, Grand PhD in Physics and Mathematics, USA; **Repina I. A.**, Grand PhD in Physics and Mathematics, Professor; **Rumyantsev V. A.**, Grand PhD in Geography, Professor, Academician of the Russian Academy of Sciences; **Ryabchenko V. A.**, Grand PhD in Physics and Mathematics; **Smyshlyaev S. P.**, Grand PhD in Physics and Mathematics, Professor; **Timofeev Iu. M.**, Grand PhD in Physics and Mathematics; **Shapron B.**, PhD, leading scientist of French Research Institute for Exploitation of the Sea IFREMER (France); **Shechukin G. G.**, Grand PhD in Physics and Mathematics, Professor; **Vilfand R. M.**, Grand PhD in Engineering, Professor; **Vuglinsky V. S.**, Grand PhD in Geography, Professor; **Zinoviev A. T.**, Grand PhD in Engineering Sciences; **Yakushev D. I.**, Grand PhD in Engineering, Professor; SPU MI.

The Journal is continuation of the Journal "Proceedings of RSHU", founded in 2005. In 2010 it was included in the List of the Higher Attestation Commission, and in January 2020 it was renamed into the Journal "Gidrometeorologiya i ekologiya".

The Federal Service for Supervision of Communications, Information Technology, and Mass Media.

Certificate ПИ № ФЧ77-79574 of November 11, 2020.

Area of expertise: meteorology, hydrology, oceanology, geocology, limnology, geoinformatics, geophysics, social sciences and humanities.

Editorial Board's point of view may not be concurrent with opinion of the authors.

The Journal included in the List of the Higher Attestation Commission in the direction of science of the Earth, has category K2 and the environment is indexed in the CrossRef and RSCI systems and is included in the "Russian Science Citation Index" (RSCI) database, placed on the National Electronic Library platform (<http://elibrary.ru>). Full-text versions of published articles as pdf-files are posted on the Internet for free access on the Journal's website <http://www.rshu.ru/university/notes/archive/> immediately after its publication, afterwards being available on the National electronic library website (<http://elibrary.ru>).

The journal is included in Whitelist, level 3, September 2025.

Any use of this Journal in whole or in part, must include the customary bibliographic citation.

Editorial Office address: 192007, Voronezhskaya str., 79, St. Petersburg, Russia. Phone: (812) 633-01-88 (421), e-mail: rio@rshu.ru.

© Russian State Hydrometeorological University (RSHU), 2026
© Authors of publications, 2026

ISSN 3034-4190

Содержание

Геофизика. Обзор

- Е. В. Заболотских, Е. В. Львова.* Российский спутниковый радиометр МТВЗА-ГЯ: история измерений и перспективы их использования в задачах гидрометеорологии. 207

Океанология. В порядке обсуждения

- А. И. Узрюмов, П. А. Вайновский, Д. В. Густоев.* О влиянии атмосферной циркуляции на формирование межгодовых вариаций теплового режима Баренцева моря 231

Метеорология

- С. В. Антонов, С. М. Двоеглазов, Е. Н. Николаев, А. М. Петрунин, Н. А. Платонов, А. В. Частухин, Г. Г. Щукин.* Перспективы применения беспилотных летательных аппаратов в работах по воздействиям на переохлажденные облака и туманы 255
- А. М. Жмодиков, Т. В. Шлендер, А. Н. Красовский, В. В. Жучкевич, С. К. Бородко, А. Г. Светашев, А. Е. Яротов.* Отклонения общего содержания озона во время глобальных ионосферных бурь 269
- А. Д. Кузнецов, В. Ю. Жуков, В. С. Никитина, Т. Е. Симакина.* Модельное представление возникновения сверхрефракции радиоволн сантиметрового диапазона над обширными водными поверхностями на примере Ладожского озера 294
- С. В. Морозова, А. Р. Файзыев, В. А. Морозова.* Применение метода латентных переменных к анализу временных рядов температуры воздуха 305

Геоэкология

- Е. А. Гребнева, М. Б. Шилин.* Связь Восточно-Атлантического колебания с аномалиями водородного показателя pH в глубоководной части Чёрного моря 323

Геоинформатика

- А. К. Беляев, С. И. Биденко.* Территориальные мониторинги гидрометеорологической и экологической обстановки: ситуационно-предиктивная поддержка технических средств наблюдения за воздушной средой. 340

- Хроника** 358

Contents

Geophysics. Review

- E. V. Zabolotskikh, E. V. Lvova.* Russian satellite radiometer MTVZA-GYa: history of measurements and potential of data exploration in hydrometeorology 207

Oceanology. Discussion

- A. I. Ugrumov, P. A. Vainovsky, D. V. Gustoev.* On the Influence of Atmospheric Circulation on the Formation of Interannual Variations in the Thermal Regime of the Barents Sea 231

Meteorology

- S. V. Antonov, S. M. Dvoeglazov, E. N. Nikolaev, A. M. Petrunin, N. A. Platonov, A. V. Chastukhin, G. G. Shchukin.* Prospects for the use of unmanned aerial vehicles in work on influencing supercooled clouds and fogs 255
- A. M. Zhmodikov, T. V. Shlender, A. N. Krasouski, V. V. Zhuchkevich, S. K. Borodko, A. G. Svetashev, A. E. Yarotau.* Total ozone variations during global ionospheric storms 269
- A. D. Kuznetsov, V. Yu. Zhukov, V. S. Nikitina, T. E. Simakina.* A model illustrating superrefraction of centimeter-wave radio signals over large water surfaces using Lake Ladoga as an example 294
- S. V. Morozova, A. R. Faizliev, V. A. Morozova.* Application of the latent variable method to the analysis of air temperature time seriee. 305

Geoeccology

- E. A. Grebneva, M. B. Shilin.* Relationship between the East Atlantic Oscillation and pH anomalies in the deep-water part of the Black Sea 323

Geoinformatics

- A. K. Belyaev, S. I. Bidenko.* Territorial Monitoring of Hydrometeorological and Environmental Conditions in the Air Environment: A Predictive Approach to Supporting Observation Systems 340

- Chronicle** 358

Гидрометеорология и экология. 2026. № 83. С. 207—230.

Hydrometeorology and Ecology. 2026;(83):207—230.

ГЕОФИЗИКА. ОБЗОР

Обзорная статья

УДК: 551.508.826

doi: 10.33933/2713-3001-2026-83-207-230

Российский спутниковый радиометр МТВЗА-ГЯ: история измерений и перспективы их использования в задачах гидрометеорологии

***Елизавета Валериановна Заболотских,
Екатерина Владимировна Львова***

Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург,
Россия, liza@rshu.ru

Аннотация. В статье представлен обзор исследований, связанных с использованием данных измерений российского спутникового многоканального сканирующего микроволнового радиометра модуль температурного и влажностного зондирования атмосферы (МТВЗА-ГЯ). Описаны проблемы географической привязки и калибровки измерений и подходы, используемые для их решения. Проанализированы работы, направленные на разработку методов и алгоритмов восстановления геофизических параметров по данным МТВЗА-ГЯ. Подчёркнута необходимость обеспечения оперативного доступа к данным МТВЗА-ГЯ для широкого круга исследователей.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, спутниковые микроволновые радиометры, МТВЗА-ГЯ, методы восстановления геофизических параметров, географическая привязка, калибровка.

Благодарности: Обзор выполнен в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ No. FSZU—2025—0005 «Система «морской лёд—океан—атмосфера» Арктики: развитие спутниковых методов и моделей». Авторы благодарят также сотрудников НИЦ «Планета» Успенского А. Б. и Голомолзина В. В., а также сотрудника АО «Российские космические системы» Барсукова И. А. за предоставленные данные МТВЗА-ГЯ.

Для цитирования: Заболотских Е. В., Львова Е. В. Российский спутниковый радиометр МТВЗА-ГЯ: история измерений и перспективы их использования в задачах гидрометеорологии // Гидрометеорология и экология. 2026. № 83. С. 207—230. doi: 10.33933/2713-3001-2026-83-207-230.

Review article

Russian satellite radiometer MTVZA-GYa: history of measurements and potential of data exploration in hydrometeorology

Elizaveta V. Zabolotskikh, Ekaterina V. Lvova

Russian State Hydrometeorological University, Saint Petersburg, Russia, liza@rshu.ru

Summary: The manuscript presents an overview of research studies associated with the use of the measurement data from the Russian satellite multichannel scanning microwave radiometer Modul temperaturного i vlazhnostnogo zondirovaniya atmosfery (MTVZA-GYa) onboard Russian satellites “Meteor-M”. The uniqueness of the radiometer, combining capabilities of both scanner and sounder, thus providing measures to estimate simultaneously a lot of geophysical parameters, is emphasized. The challenges of the MTVZA-GYa data georeferencing and calibration — both instrumental and external are described. A few published research studies, aimed at the development of the geophysical parameter retrieval algorithms, are reviewed. These are the algorithms, exploring sounder frequency channels for the atmospheric temperature and humidity profile retrievals, and the algorithms using scanner frequency channels for the retrieval of such parameters as total atmospheric water vapor column, rain rate, sea surface wind speed and sea ice concentration. The special aspects of the MTVZA-GYa measurement scheme, associated with the unconventional observation angle, are discussed. This unconventional angle prevents using well developed geophysical model functions (GMF) to model ocean microwave emission under windy conditions and requires new GMF, based on MTVZA-GYa observations. It is postulated that only few Russian scientific groups are engaged in the development of the methods, aimed at the MTVZA-GYa data usage. All these groups have access to the data, and thus, the ability for such research. Many methods for geophysical parameter retrievals are created in the Satellite Oceanography Laboratory SOLab of the Russian State Hydrometeorological University (SOLab). All of them are based on physical modeling of the brightness temperature of the system underlying surface — atmosphere for the MTVZA-GYa channel characteristics, starting from the GMF for the MTVZA-GYa measurement angle. The need to ensure full and easy access to MTVZA-GYa data for a wide range of researchers for the following developments is underlined.

Keywords: remote sensing, satellite microwave radiometers, MTVZA-GYa, geophysical parameter retrieval methods, georeferencing, calibration.

Acknowledgments: This review was conducted within the framework of the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation No. FSZU—2025—0005 “The Arctic Sea Ice—Ocean—Atmosphere System: Development of Satellite—Based Methods and Models.” The authors also thank A. B. Uspensky and V. V. Golomolzin of the Planeta Research Center, as well as I. A. Barsukov of JSC Russian Space Systems for providing the MTVZA-GYa data.

For citation: Zabolotskikh E. V., Lvova E. V. Russian satellite radiometer MTVZA-GYa: history of measurements and potential of data exploration in hydrometeorology *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydrometeorology and Ecology*. 2026;(83):(207—230). doi: 10.33933/2713-3001-2026-83-207-230. (In Russ.).

Введение

С развитием спутниковых систем, позволяющих получать и накапливать глобальные массивы данных измерений, одной из центральных проблем дистанционного зондирования стало развитие алгоритмов восстановления геофизических

параметров по этим данным. Измерения спутниковых микроволновых радиометров используются как для наблюдения за поверхностью Земли, так и для зондирования атмосферы, позволяя получать информацию о большом количестве геофизических параметров. Спутниковые микроволновые радиометрические измерения характеризуются возможностью получения регулярной глобальной оперативной информации об атмосфере и подстилающей поверхности. Особенную значимость эти измерения приобретают над обширными районами океанов, где традиционные измерения либо недостаточны, либо вообще отсутствуют [1]. Кроме того, данные микроволновых радиометров представляют особую ценность в экстремальных условиях погоды, сопровождающихся штормовыми ветрами, высокими волнами, ливневыми осадками. В таких условиях большинство измерений других спутниковых приборов либо целиком теряют информативность, либо интерпретация измерений сопровождается существенными ошибками. При этом данные измерений спутниковых микроволновых радиометров не теряют информативности [2].

Запуск спутников с радиометрической аппаратурой на борту (Космос-243 в нашей стране и Nimbus-5 за рубежом) послужил началом спутниковых пассивных микроволновых наблюдений земной атмосферы и океанов и быстрого прогресса в области разработки методов восстановления геофизических параметров по данным наблюдений [3]. С запуском спутникового радиометра Special Sensor Microwave/Imager (SSM/I) в 1987 г. началась новая эра в развитии спутниковых пассивных микроволновых методов, обусловленная усовершенствованием калибровки радиометрических измерений [4]. На сегодняшний день измерения спутниковых микроволновых радиометров принимают, обрабатывают и распространяют несколько крупных международных центров обработки и хранения спутниковой информации:

- американский центр Remote Sensing Systems (RSS — <http://remss.com>);
- американский центр по снегу и льду National Snow and Ice Data Center (NSIDC — <http://nsidc.org>);
- центр данных японского аэрокосмического агентства Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA) (<https://gportal.jaxa.jp/>);
- китайский национальный метеорологический центр данных National Satellite Meteorological Center (<https://www.nsmc.org.cn/>).

Все эти центры при помощи современных методов обрабатывают данные спутниковых радиометров, занимаются калибровкой измерений и создают спутниковые продукты не только первого (Level 1, калиброванные радиояркие температуры микроволнового излучения), но и второго уровня (Level 2, геофизические параметры). Ежедневно выкладываются в свободном доступе данные обработки измерений таких радиометров как Special Sensor Microwave — Imager/Sounder (SSMIS) со спутников серий Defense Meteorological Satellite Program (DMSP), Advanced Microwave Scanning Radiometer — 2 (AMSR2) со спутника Global Change Observation Mission for Water (GCOM-W), Global Precipitation Mission (GPM) Microwave Instrument (GMI), Soil Moisture Active-Passive (SMAP). Сравнительно недавно появились в доступе данные китайских микроволновых

радиометров серий Micro-Wave Radiation Imager (MWRI) со спутников серий Feng-Yun 3 (FY-3) и Hai Yang 2 (HY-2).

Данные по параметрам атмосферы, океана и морского льда, накапливаемые и выкладываемые на оперативной основе, широко используются мировой научной общественностью, и их значимость трудно переоценить. Количественная информация о влагозапасе атмосферы и водозапасе облаков нужна для прогноза осадков [5] и используется в климатических моделях [6]. Карты влагозапаса с высоким временным разрешением позволяют судить о положении атмосферных фронтов и движении воздушных масс, диагностировать на этапе зарождения полярные и внетропические циклоны [7, 8] и могут быть использованы для улучшения качества прогноза их эволюции. Кроме того, водяной пар является важнейшим парниковым газом в атмосфере Земли, поэтому точная количественная оценка его пространственно-временной изменчивости представляет исключительную важность при изучении изменений климата и климатологических циклов [9].

Регулярные данные о приводном ветре необходимы для уточнения прогнозов погоды, выявления зарождающихся ураганов, циклонов различного масштаба, прослеживания путей их следования, расчёта интенсивности штормов на море [10]. Картирование приводного ветра необходимо для обеспечения безопасности транспортных и промысловых операций, строительства и эксплуатации нефтяных платформ, уменьшения рисков, связанных с экстремальными явлениями погоды. Оперативные данные по ледяному покрову требуются как для моделей прогноза, так и для проводки судов и обеспечения безопасности народнохозяйственной деятельности в морях Арктики.

Вся эта информация используется центрами атмосферных и морских прогнозов, научными и производственными организациями, нефтяными и транспортными компаниями, и другими заинтересованными предприятиями. Возможность ее эффективного использования зависит от точности и области применения методов обработки и удобства системы распространения готовых спутниковых продуктов. На сегодняшний день действующие зарубежные спутниковые микроволновые радиометры представлены американскими (SSMIS и GPM), японскими (AMSR2 и недавно запущенный AMSR3) и китайскими (MWRI) инструментами. И все спутниковые продукты создаются с использованием американских, японских и китайских данных. Несмотря на абсолютную (без ограничений) и полную (оперативную и ретроспективную) доступность сторонних данных, европейское космическое агентство European Space Agency (ESA) анонсировало создание своего собственного микроволнового радиометра Micro-Wave Imager (MWI) на серии спутников Meteorological operational satellite Second Generation B (Metop-SG-B). Первый такой спутник (Metop-SG-B1) планируется к запуску уже в текущем 2026 г. Решение о создании собственного спутникового микроволнового радиометра было принято несмотря на огромные вложения как в техническое (у ESA нет ни опыта, ни инфраструктуры создания микроволновых радиометров конического типа сканирования, работающих на частотах выше С-диапазона), так и в научное обеспечение (калибровка, алгоритмы восстановления параметров). Это связано с пониманием важности наличия

собственного источника оперативной информации о важнейших геофизических параметрах.

Российская наука, центры прогнозов погоды, а также все предприятия и организации, пользующиеся данными спутниковых микроволновых радиометров, при изменении политики международных центров распространения данных окажутся в тяжелом положении. В настоящий момент при функционировании собственного многочастотного сканирующего микроволнового радиометра — модуля температурного и влажностного зондирования атмосферы (МТВЗА-ГЯ, ГЯ — в память о конструкторе Геннадии Яковлевиче Гуськове) — отсутствует необходимая инфраструктура, позволяющая свободно пользоваться данными его измерений, развивать и совершенствовать алгоритмы восстановления параметров. Тем не менее, даже в таких условиях научные коллективы страны за последние десятилетия накопили значительный опыт в использовании данных измерений МТВЗА-ГЯ — от калибровки и геопривязки до создания методов оценки геофизических параметров. Целью данного обзора является необходимость изучения данного опыта.

Модуль

температурного и влажностного зондирования атмосферы (МТВЗА-ГЯ).

Калибровка и геопривязка данных измерений

Россия в составе своей орбитальной группировки имеет спутник «Метеор-М» № 2, который был запущен 8 июля 2014 г. и заменил на орбите «Метеор-М» № 1 (2009—2014 гг.). В настоящее время на орбите находятся 2 спутника «Метеор-М» № 2: № 2—3 и № 2—4. К запуску в 2027—2035 гг. планируются еще 4 спутника серии «Метеор-М» № 2. В состав аппаратного комплекса спутников серии «Метеор-М» № 2 входят, помимо МТВЗА-ГЯ, комплекс многозональной спутниковой съемки (КМСС-2), многозональное сканирующее устройство (МСУ-МР), бортовой радиолокационный комплекс и гелиогеофизические инструменты [11, 12].

МТВЗА-ГЯ принимает излучение Земли на частотах сканера (10—50, 92 ГГц) и зондировщика в полосе поглощения молекулярного кислорода 52—58 ГГц и в области сильной линии поглощения водяного пара на 183,31 ГГц. Радиометр предназначен для определения параметров атмосферы и подстилающей поверхности. К несомненным достоинствам МТВЗА-ГЯ следует отнести комбинацию в одном приборе каналов сканера и зондировщика, что открывает дополнительные возможности для оценки гидрометеорологических параметров [13].

Прибор принимает уходящее излучение Земли под углом 65° к нормали к поверхности с пространственным разрешением 16—112 км в зависимости от частотного канала. Ширина полосы обзора составляет 1500 км. Детальные технические характеристики прибора представлены, например, в [14, 15], а на рис. 1 приводится его изображение [15].

Для восстановления по данным измерений МТВЗА-ГЯ гидрометеорологической информации нужны калиброванные радиояркостные температуры (Тя) микроволнового излучения. Обычно калибровка Тя предваряет любые методы

оценки геофизических параметров. В зарубежных спутниковых центрах вопросам калибровки уделяется не меньшее внимание, чем методам и алгоритмам восстановления геофизических параметров, причем не только во время подготовки запуска прибора, но и на протяжении всего периода его работы [16]. Помимо внутренней и внешней инструментальной калибровки, для обеспечения согласованности в интерпретации спутниковых измерений, часто применяется подход, основанный на так называемой модельной калибровке, когда измерения сопоставляются с расчетными значениями сигнала для известных параметров океана и атмосферы, и на основании этого сопоставления вычисляются значения калибровочных поправок к измерениям [17—19]. Наличие собственных методов калибровки, ориентированных на измерения МТВЗА-ГЯ, позволяет использовать свои алгоритмы восстановления параметров и избежать зависимости от неточностей данных, получаемых из зарубежных источников. Внутренняя калибровка инструмента используется для представления регистрируемых сигналов в виде антенных температур (T_a). Бортовая калибровка МТВЗА-ГЯ корректируется при каждом сканировании за счёт непрерывных измерений интенсивности излучения двух со-

гласованных нагрузок с известными радиояркостными температурами — «горячей» и «холодной». В качестве «горячей» нагрузки используется бортовой имитатор абсолютно черного тела с температурой 250—300 К. В качестве «холодной» нагрузки используется калибровочная антенна, ориентированная в космическое пространство и принимающая фоновое реликтовое излучение с $T_r = 2,73$ К [20].

Из-за различных погрешностей внутренней калибровки [21] для перевода значений T_a в T_r необходима внешняя калибровка данных измерений, т. е. определение функций $T_r = T_r(T_a)$ [22]. Чаще всего при выполнении внешней калибровки предполагается, что зависимости $T_r = T_r(T_a)$ могут быть аппроксимированы линейными функциями [23]. При внешней калибровке эти зависимости определяются на основе сопутствующих данных по T_a и T_r . При этом, в качестве T_r могут быть использованы как результаты модельных расчетов при заданных параметрах атмосферы и подстилающей поверхности [24], так уже откалиброванные измерения других спутниковых радиометров с аналогичными характеристиками [25—28].



Рис. 1. Российский спутниковый радиометр МТВЗА-ГЯ [15].

Fig. 1. Russian satellite radiometer MTVZA-Gya [15].

Абсолютная калибровка измерений МТВЗА-ГЯ выполнялась несколькими коллективами исследователей. Авторы [22] калибровали измерения МТВЗА-ГЯ с КА «Метеор-М» № 2 в каналах температурного (52—57 ГГц) и влажностного (183,3 ГГц) зондирования на основе использования результатов модельных расчетов Тя для данных численных прогнозов погоды. Такой подход не годится для калибровки каналов в окнах прозрачности атмосферы, поскольку неопределенность в задании значений излучательной способности подстилающей поверхности может служить существенным источником ошибок [29]. Авторы [16] проводили внешнюю калибровку Тя МТВЗА-ГЯ со спутника «Метеор-М» № 2 в каналах сканера с использованием измерений над бассейном реки Амазонки и над холодными районами океана. В работе [24] авторы провели калибровку Тя МТВЗА-ГЯ на спутнике «Метеор-М» №2—2 в каналах сканера с использованием данных сопутствующих измерений AMSR2 со спутника GCOM—W1. Калибровка основана на применении метода «double-difference technique» [25, 30], при котором проводится регрессия значений Тя МТВЗА-ГЯ на референсные значения Тя AMSR2 для «холодных» и «горячих» областей на основании модельных расчетов [31]. Измерения AMSR2 над областями арктического океана со слабым ветром использовались в качестве опорных «холодных» измерений, а измерения над морским льдом — в качестве опорных «горячих» измерений. Безусловным преимуществом данных AMSR2 в качестве калибровочных являются близкие параметры спутникового сканирования, позволяющие отобрать большое количество сопутствующих данных в полярных областях, разница во времени измерений которых не превышает 10 минут.

В работе [32] авторы обсуждают выбор полигонов на суше для внешней калибровки МТВЗА-ГЯ, акцентируя внимание на том, что использование опыта калибровки зарубежных инструментов-аналогов не всегда оптимально для российского инструмента из-за отличающегося угла встречи с Землей. Авторы предлагают в качестве «горячих» областей использовать полигоны с наименьшими значениями изменчивости эффективного коэффициента излучения, которые, в свою очередь, определяются по данным измерений МТВЗА-ГЯ и реанализа MERRA-2. Подход, при котором авторы при моделировании Тя используют приближение отсутствующей (оказывающей незначительное влияние) атмосферы, вызывает вопросы, поскольку речь идет о каналах на частотах от 10 до 91 ГГц. Однако в заключении к работе авторы указывают на необходимость использования более точных моделей переноса излучения при проведении самой калибровки.

Одной из серьезных проблем при использовании данных измерений МТВЗА-ГЯ является географическая привязка данных — точное позиционирование элементов разрешения на поверхности Земли. Ошибки географической привязки, наблюдаемые при анализе данных измерений МТВЗА-ГЯ, достигают в некоторых случаях 40—70 км [33]. Для потребителей данных отсутствует детальное техническое описание процедуры географической привязки, поэтому нет возможности контролировать этапы действующего алгоритма геопривязки.

Антенные системы приборов серии МТВЗА-ГЯ реализуются в виде однозеркальных параболических антенн с боковым облучением рефлектора [34]. Широкий

диапазон частот требует несколько физически разделённых облучателей, что приводит к ситуации, когда лучи визирования разных частотных каналов ориентированы по-разному [35]. При соблюдении требований к сборке оптической схемы антенны подобная реализация должна характеризоваться одинаковым углом конуса сканирования, с угловым смещением лишь в азимутальной плоскости, для устранения которого предусмотрена операция аппаратного смещения лучей визирования. Однако в реальных условиях обеспечить сонаправленность лучей визирования многоканальных радиометров не удаётся никогда ни для МТВЗА-ГЯ, ни для его зарубежных аналогов. Проблема получения синхронных данных Тя одного и того же элемента поверхности на разных частотах решается за счёт введения разработчиками в процедуру геопривязки корректирующих углов крена, тангажа и рыскания прибора/носителя [33]. Авторы работы [33] предложили независимую схему реализации географической привязки измерений, алгоритм поиска корректирующих углов для разных групп частотных каналов [36]. Проведённые оценки показали, что средняя точность географической привязки с использованием данного алгоритма в два раза превышает точность встроенной геопривязки. Остается неясным, почему предложенный алгоритм не реализован в инфраструктуре создания спутникового продукта по Тя МТВЗА-ГЯ. В настоящий момент данные записываются в неуточненной геопривязке, что затрудняет их использование.

В работе [37] авторы анонсируют потоковую обработку данных МТВЗА-ГЯ в ЦКП (Центр коллективного пользования системами архивации, обработки и анализа данных спутниковых наблюдений Института космических исследований РАН (ИКИ РАН) «ИКИ-Мониторинг»). Обработка включает распаковку и фильтрацию данных, их геопривязку с использованием прогностической модели движения и параметров космического аппарата, а также радиометрическую калибровку по усреднённым измерениям излучения космоса и чёрного тела и показаниям датчиков температуры.

Существуют подходы автоматического контроля точности геодезической привязки спутниковых изображений, включающие создание опорных банков данных и использование механизмов идентификации одноименных объектов в анализируемых данных и на опорных изображениях (как правило, более высокого разрешения) [38]. Для уточнения геопривязки измерений МТВЗА-ГЯ можно попробовать применить подобный подход, используя актуальную информацию о состоянии различных наблюдаемых объектов, полученную по данным измерений AMSR2. Однако при практической реализации данного подхода ожидается ряд серьёзных затруднений. Во-первых, различия геометрии наблюдений приводят к сильным отличиям спектральных зависимостей и поляризационных контрастов наблюдаемых объектов, что усложняет их отождествление перед проведением процедуры точной географической привязки. Во-вторых, корректное геометрическое преобразование, направленное на оптимальное совмещение наблюдений двумя приборами, окажется как минимум не проще, чем привязка по статической береговой линии, а упрощённые модели не обеспечат необходимой точности фактических углов встречи луча зрения с поверхностью, что критически важно для многих приложений.

Методы восстановления геофизических параметров по данным МТВЗА-ГЯ

Методы восстановления геофизических параметров, основанные на использовании измерений спутниковых сканирующих многоканальных микроволновых радиометров, начали интенсивно развиваться после запуска первого хорошо калиброванного радиометра SSM/I [39]. Дальнейшее развитие алгоритмы получили после запуска японских радиометров серии AMSR в 2002 г. [40]. Поскольку измерения многоканальных сканирующих радиометров проводятся, в том числе на частотах, на которых атмосфера либо прозрачна, либо частично прозрачна, при их использовании возможно восстанавливать как параметры атмосферы, так и параметры подстилающей поверхности. У радиометра МТВЗА-ГЯ измерения в каналах зондировщика (в полосе поглощения кислорода 52—58 ГГц и в области сильной линии поглощения водяного пара на 183,31 ГГц), как и у его аналога SSMIS, позволяют восстанавливать профили температуры и влажности атмосферы. Эти данные дополняют данные наземной наблюдательной сети и приобретают все большую роль в информационном обеспечении численного прогноза погоды. Согласно оценкам ведущих прогностических центров, наибольший вклад в повышение достоверности краткосрочного численного прогноза дает именно усвоение данных микроволновых зондировщиков [41].

В связи с установленной радиометрической стабильностью приборов МТВЗА-ГЯ и сложностью выполнения абсолютной калибровки исходной информации коллективами исследователей независимо развиваются подходы к восстановлению различных параметров природных сред непосредственно на основе регистрируемых антенных температур без перехода к температурам радиояркостным. Практическая эффективность таких подходов подтверждена соответствующими публикациями [22, 42]. Однако их применение приводит к невозможности разделить ошибки калибровки и радиофизического моделирования, что затрудняет развитие и сопоставление различных радиофизических моделей наблюдаемых природных сред.

Методические вопросы микроволнового температурно-влажностного зондирования атмосферы с помощью измерений МТВЗА-ГЯ неоднократно освещались в докладах на всероссийских и зарубежных конференциях с начала 2000-х гг. В. М. Пегасовым и А. Б. Успенским (НИЦ) «Планета». В 2021 г. была опубликована работа [42], в которой авторы представили в деталях метод искусственных нейронных сетей (НС) для восстановления вертикальных профилей температуры и влажности атмосферы по данным МТВЗА-ГЯ со спутника Метеор-М № 2—2. В качестве входных данных использовались антенные температуры, измеренные в каналах МТВЗА-ГЯ.

В качестве обучающего набора вертикальных профилей температуры и влажности атмосферы вместо данных аэрологического радиозондирования (р/з) использовались продукты глобального численного прогноза погоды (ЧПП). Такой подход к составлению обучающей выборки позволил получить глобальное покрытие и высокую дискретность по времени. Поскольку численные эксперименты

выявили существенные погрешности восстанавливаемых профилей вблизи границ между разными типами подстилающей поверхности, для обучения НС формировалась единая глобальная выборка без разбиения на подвыборки по типам подстилающей поверхности. Для верификации метода спутниковые оценки профилей температуры и влажности сравнивались с данными радиозондирования и продукцией прогностических моделей.

Разработкой алгоритмов восстановления профилей температуры и влажности атмосферы по данным МТВЗА-ГЯ Метеор-М №2—2 занимаются также Е. В. Пашинов, Д. М. Ермаков, А. В. Кузьмин и В. В. Стерлядкин из ИКИ РАН. С 2020 г. в институте ведётся работа по внедрению данных МТВЗА-ГЯ в информационный сервис «ВЕГА-Science» — уникальную научную установку, входящую в состав ЦКП «ИКИ-Мониторинг». Результаты разработки алгоритмов представлялись на девятнадцатой международной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» в 2021 г., а результаты внедрения алгоритмов в «ВЕГА-Science» авторизованные пользователи могут посмотреть на сайте <http://sci-vega.ru/maps/leaflet.shtml>.

С момента запуска первого инструмента физическим моделированием радиоярких температур микроволнового излучения для характеристик каналов измерений МТВЗА-ГЯ занимаются в нашей стране исследователи из Тихоокеанского океанологического института им. В. И. Ильичева ДВО РАН Л. М. Митник, М. Л. Митник и В. П. Кулешов [20]. В указанной работе обобщены результаты многолетних исследований авторов по анализу как модельных значений T_y в каналах сканера, так и полей измерений МТВЗА-ГЯ. Подчёркивается, что измерения российского радиометра могут использоваться для восстановления температуры поверхности океана, скорости приводного ветра, интегрального содержания водяного пара в атмосфере, водозапаса облаков, параметров осадков. Полученные поля геофизических параметров позволяют изучать характеристики циклонов, фронтов и атмосферных рек над океаном, распределение морских льдов и свойства ледяных щитов Антарктиды и Гренландии [43, 44]. Подчёркивается необходимость усовершенствования моделей T_y , разработки алгоритмов восстановления параметров, проведения калибровки радиометров и валидации продуктов.

Для восстановления параметров подстилающей поверхности (сплоченность и тип ледяного покрова, водозапас снежного покрова, скорость приводного ветра) и интегральных параметров влагосодержания атмосферы (влагозапас атмосферы (WVC, от англ. Water Vapor Column), водозапас облаков (LWP, от англ. Liquid Water Path), интенсивность осадков) используются каналы сканера на частотах 10—91 ГГц.

Интегральные параметры влагосодержания атмосферы относятся к важнейшим метеорологическим параметрам, изучение которых необходимо для понимания климата Земли [45]. Сведения о WVC и LWP и их временной изменчивости представляют исключительную важность для решения различных метеорологических и климатических задач. Большинство методов восстановления WVC, по данным спутниковых микроволновых радиометров, применимо над морскими

поверхностями, однако есть и работы, демонстрирующие возможность восстановления WVC над другими типами подстилающих поверхностей [46, 47].

Несмотря на то, что разработкой алгоритмов восстановления интегральных параметров влагосодержания атмосферы и параметров подстилающей поверхности по данным МТВЗА-ГЯ научные коллективы НИЦ «Планета», ТОИ ДВО РАН, ИКИ РАН занимаются с момента первого запуска прибора, публикации, описывающие особенности алгоритмов и их применения для изучения окружающей среды, появились сравнительно недавно.

В работе [48] описан метод восстановления влагозапаса безоблачной атмосферы над морскими поверхностями по измерениям МТВЗА-ГЯ. Метод основан на использовании регрессии, предикторами которой являются измеренные T_a в выбранных каналах радиометра. Оптимальный набор каналов для разных районов земного шара проводится в зависимости от климатической зоны, а критерием выбора каналов и вида регрессии является минимальная среднеквадратичная невязка получаемых оценок влагозапаса атмосферы с контрольными значениями по данным реанализа National Center for Environmental Prediction (NCEP) и атмосферных моделей European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF).

Автор работы [49] разработал методику восстановления WVC по данным измерениям МТВЗА-ГЯ разности радиометрических сигналов на вертикальной (V) и горизонтальной (H) поляризациях на частотах 18,7 и 23,8 ГГц, адаптировав подход, описанный в [46]. Особенностью подхода является уход от существенной зависимости используемых разностей от свойств подстилающей поверхности, позволяющий восстанавливать WVC не только над морскими поверхностями, но и над сушей. Автор [49], однако, для подбора регрессионных коэффициентов в алгоритме, использовал данные радиозондирования с малых островов Тихого и Атлантического океанов, оставив разработку алгоритма для суши на будущее. Таким образом, представленный метод позволяет рассчитывать WVC над районами океанов и, несмотря на низкую точность (среднеквадратичная погрешность оценки составляет $4,8 \text{ кг/м}^2$), неплохо коррелирует с сопутствующими измерениями WVC зарубежными аналогами.

Сотрудник ИКИ РАН Д. С. Сазонов в составе коллектива исследователей из ИКИ РАН, давно занимающийся повышением возможностей использования данных измерений МТВЗА-ГЯ, в том числе путём работы над геопривязкой измерений, исследовал возможность восстановления интенсивности осадков (R) [50]. Для оценки R использовалась регрессионная модель [51] и индекс рассеяния, для расчёта которого используются вертикально поляризованные измерения на частоте 91,65 ГГц и все измерения на частотах 10,6, 18,7 23,8 и 36,7 ГГц. Полученные результаты сравнения оценок R со спутниковым продуктом по данным GPM (микроволновый радиометр на спутнике Global Precipitation Measurement) продемонстрировали неудовлетворительную точность, но обозначили фронт исследований, главное направление которых автор связывает с усовершенствованием географической привязки и приведением пространственного разрешения разных каналов к единому масштабу.

Лаборатория спутниковой океанографии Российского государственного гидрометеорологического университета (РГТМУ) за последние годы внесла существенный вклад в развитие методов и алгоритмов восстановления параметров атмосферы и океана по данным AMSR2, признанный зарубежными специалистами [47, 52—54]. Для условий Арктики, по данным радиометра AMSR2, в ЛСО были разработаны несколько уникальных методов, позволяющих с высокой точностью восстанавливать интегральные параметры влагосодержания атмосферы [47, 52] и параметры атмосферного излучения [54] над морским льдом. Получив в своё распоряжение большой архив данных МТВЗА-ГЯ за целый год измерений, сотрудники лаборатории использовали наработанный опыт для создания алгоритмов восстановления геофизических параметров по данным измерений МТВЗА-ГЯ в каналах сканера.

Методологические основы создания алгоритмов для МТВЗА-ГЯ такие же, как и для AMSR2. Физическое моделирование Т_я уходящего излучения системы подстилающая поверхность — атмосфера позволяет рассчитывать модельные значения Т_я для большого количества геофизических параметров, в качестве которых в последние годы используются данные реанализов. Обратная задача традиционно решается с использованием нейронных сетей (НС), входными параметрами для которых служат Т_я в тех каналах, в которых они наиболее чувствительны к тем или иным параметрам. Верификация алгоритмов проводится путем их применения к данным спутниковых измерений и сравнения результатов с данными независимых измерений параметров — либо контактных, либо спутниковых.

Алгоритм восстановления влагозапаса атмосферы WVC над районами океанов был представлен на международном симпозиуме IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS) и опубликован в статье [55]. Алгоритм включает глобальную НС (НС1) и тропическую НС (НС2) — настроенную специально для условий тропических циклонов (ТЦ). Глобальная НС использует измерения МТВЗА-ГЯ на всех частотах, кроме 91,65 ГГц, тропическая — только измерения на частотах 18,7 и 36,7 ГГц. Несмотря на то, что модельная точность НС2, рассчитанная для всего массива данных, была существенно ниже, чем точность НС1, в условиях ТЦ именно тропическая НС продемонстрировала возможность восстановления физических значений WVC во всей области ТЦ, включая области интенсивных осадков. Это связано с тем, что микроволновое излучение на используемых в НС2 частотах не рассеивается на дождевых каплях и далеко от насыщения, что позволяет использовать НС2 при изучении ТЦ. Верификация алгоритма проводилась с помощью спутниковых оценок WVC по данным AMSR2, выполненных с помощью разработанного ранее метода [2].

Для параметров подстилающей поверхности для радиометра МТВЗА-ГЯ ЛСО разработала два алгоритма — алгоритм восстановления скорости приводного ветра (SWS, от англ. Surface Wind Speed) [56], основанный на использовании при моделировании геофизической модельной функции (ГМФ), настроенной на экспериментальных данных по ветровым поправкам к коэффициентам излучения, полученным на основании измерений AMSR2; и алгоритм восстановления сплоченности ледяного покрова, основанный на поляризационных измерениях X-диапазона [57].

Самая большая проблема при восстановлении SWS по данным МТВЗА-ГЯ — нестандартный (65°) угол измерений. Влияние ветра на эффективный коэффициент излучения океана очень сильно зависит от угла наблюдений [58]. Существующие ГМФ, разработанные для зарубежных инструментов SSM/I, AMSR2, WindSat с углом зондирования $53\text{—}55^\circ$, основаны на огромном количестве экспериментальных данных, собранных в том числе в рамках специальных подспутниковых экспериментов. Соответственно, все модели зависимости излучения от скорости ветра, созданные на сегодняшний день, как экспериментальные, так и теоретические, неприменимы для моделирования измерений МТВЗА-ГЯ. Создание согласованной физической модели излучения и рассеяния океана, способной описать микроволновые наблюдения взволнованной морской поверхности при разных углах и частотах в широком диапазоне скоростей ветра, является до сих пор нерешенной задачей. В частности, в работе [59] показано, что предложенная теоретическая ГМФ, хорошо согласующаяся с данными измерений AMSR2 под углом 55° , не согласуется с измерениями МТВЗА-ГЯ под углом 65° без существенных эмпирических настроек. Основными факторами формирования избыточного микроволнового излучения океана являются шероховатость морской поверхности и обрушения ветровых волн. Вызываемые ими контрасты T_a увеличиваются с ростом скорости ветра вплоть до 70 м/с и более, что позволяет восстанавливать поля скорости ветра, в том числе в ураганах [60].

В работе [56] представлен НС-алгоритм восстановления SWS по данным МТВЗА-ГЯ. Алгоритм основан на теоретической ГМФ, описанной в [59] и использованной для моделирования измерений МТВЗА-ГЯ на каналах $10,6$ и $18,7$ ГГц на горизонтальной и вертикальной поляризации. Следует отметить, что модель [59] была протестирована только для частоты $10,6$ ГГц, а для частоты $18,7$ ГГц была использована «как есть», без проверки на соответствие данным наблюдений. Тем не менее, созданный НС-алгоритм, протестированный на основании сравнения с сопутствующими измерениями ветра радиометром AMSR2, продемонстрировал высокую точность восстановления во всём диапазоне скоростей ветра. Более того, НС-алгоритм был применен к измерениям МТВЗА-ГЯ над несколькими тропическими циклонами. Восстановленные максимальные значения SWS в ТЦ оказались близки к SWS по данным AMSR2, что подтверждает возможность применения алгоритма для изучения ТЦ.

Возможности использования алгоритма для изучения полей ветра во вне-тропических циклонах (ВТЦ) северной Атлантики детально проанализированы в работе [61]. В ней было проведено сравнение полей SWS, по данным квазисинхронных измерений МТВЗА-ГЯ и AMSR2 для 67 ВТЦ за период с 1 апреля 2021 г. по 31 марта 2022 г., и оценены систематические смещения и среднеквадратичные ошибки восстановления для разных диапазонов значений SWS, включая сильные ($> 15\text{ м/с}$) и штормовые ($> 25\text{ м/с}$) ветра. Показано, что максимальные скорости ветра в ВТЦ, по данным AMSR2, превышают максимальные скорости ветра, по данным МТВЗА-ГЯ, в среднем на 10% . Частично результирующее занижение высоких SWS, по данным МТВЗА, обусловлено разницей в пространственном разрешении каналов измерений МТВЗА-ГЯ и AMSR2. Но основная причина, скорее

всего, лежит в неточной модели ГМФ в области высоких ветров, лежащей в основе алгоритма.

Спутниковые микроволновые радиометры являются единственными инструментами, позволяющими проводить регулярный глобальный мониторинг параметров ледяного покрова в Арктике и количественно оценивать его параметры. Зарубежные радиометрические измерения, начиная с 1978 г., обеспечили получение непрерывных данных, позволивших строить длинные временные ряды таких параметров, как: площадь, границы и тип ледяного покрова (однолетний/многолетний); оценивать климатические тенденции и тренды за последние десятилетия [62]. Параметры измерений МТВЗА-ГЯ позволяют включить российский инструмент в систему наблюдений за арктическим морским льдом при условии корректной геопривязки и калибровки измерений, а также при наличии точных алгоритмов восстановления параметров морского льда. Измерения спутниковых микроволновых радиометров на частотах вблизи 90 ГГц позволяют получать поля сплочённости морского льда (SIC, от англ. Sea Ice Concentration) с максимально высоким пространственным разрешением (3—5 км) [63].

Алгоритмы восстановления SIC, позволяющие строить карты морского льда с максимальным пространственным разрешением, основаны на использовании поляризационных измерений (PD, от англ. Polarization Difference) на частотах вблизи 90 ГГц. Но поскольку для МТВЗА-ГЯ на спутнике «Метеор-М» № 2 не удалось добиться функционирования одного из каналов измерений на частоте 91,65 ГГц, для восстановления SIC в работе [57] была проанализирована возможность использования PD измерений на каналах, работающих на частотах 10,6 и 36,7 ГГц, и предложены формулы для расчета SIC. При оценке работоспособности предложенных формул было проведено их сравнение со значениями SIC, восстановленными по данным AMSR2, а также проведен анализ ледовых карт Арктического и Антарктического научно-исследовательского института (АНИИ), подтвердивший адекватность восстановленных полей SIC, а для некоторых областей о повышении точности оценок SIC по данным МТВЗА-ГЯ. Таким образом, несмотря на низкое, по сравнению с зарубежными аналогами, пространственное разрешение, поля SIC с успехом могут заменить эти аналоги, например, в климатических исследованиях. Радиометр МТВЗА-ГЯ на последнем из запущенных спутников серии «Метеор-М» № 2 (№ 2—4) имеет оба работающих канала на частоте 91,65 ГГц, что открывает возможности для разработки новых алгоритмов восстановления SIC, позволяющих строить карты ледяного покрова с разрешением 14×30 км.

Доступность данных МТВЗА-ГЯ

На текущий момент данные измерений МТВЗА-ГЯ поступают в центры приема ФБГУ НИЦ «Планета» (<http://planet.iitp.ru/>) дважды в сутки и оттуда, по запросу, в ЦКП «ИКИ-Мониторинг». Здесь результаты измерений проходят первичную обработку до уровня L1B (с использованием программного комплекса предварительной обработки измерений МТВЗА-ГЯ, созданного разработчиками

аппаратуры), включающую распаковку, фильтрацию, геопривязку и калибровку, после чего сохраняются в архивах и могут быть предоставлены потребителям [37]. ЦКП «ИКИ-Мониторинг» анонсирует возможность работы с архивными данными МТВЗА-ГЯ, но фактически коллективу ЛСО РГГМУ, в том числе авторам данного обзора, на протяжении последнего десятилетия удавалось получать данные для проведения исследований только благодаря личным контактам с разработчиками (АО «Российские космические системы») и сотрудниками НИЦ «Планета».

Заключение

В статье представлен обзор исследований, связанных с использованием данных измерений российского спутникового сканирующего многоканального радиометра МТВЗА-ГЯ со спутников серии «Метеор-М». Основные направления исследований включают разработку методов восстановления геофизических параметров атмосферы и подстилающей поверхности, а также решение проблем с географической привязкой данных и их калибровкой.

МТВЗА-ГЯ представляет собой один из уникальных микроволновых инструментов в мире (единственный аналог — американский радиометр SSMIS на спутниках серии DMSP), сочетающий в себе функционал зондировщика и сканера с широкими возможностями оперативного получения обширной гидрометеорологической информации, которую можно использовать как для ретроспективных исследований, так и для улучшения точности прогнозов различной заблаговременности. На сегодняшний день, по данным МТВЗА-ГЯ, опубликованы работы по восстановлению профилей температуры и влажности атмосферы, влагозапаса атмосферы, интенсивности осадков, скорости приводного ветра и сплочённости ледяного покрова.

Несмотря на то, что первый инструмент был запущен 17 лет назад (на спутнике «Метеор-М» №1), количество работ, связанных с использованием данных МТВЗА-ГЯ, невелико, особенно по сравнению с работами, ориентированными на зарубежные данные. Ключевой проблемой, сдерживающей развитие и совершенствование методов, позволяющих грамотно и эффективно распорядиться этой бесценной информацией, является отсутствие данных в широком доступе. Научные публикации на основе данных МТВЗА-ГЯ выпускаются почти исключительно коллективами российских ученых, причем число таких коллективов невелико: исключая разработчиков (АО «Российские космические системы»), это коллективы НИЦ «Планета», ИКИ РАН, ТОИ ДВО РАН и ЛСО РГГМУ. Попытка проанализировать доступную информацию МТВЗА-ГЯ иностранными коллегами представлена в [64], но сама работа содержит грубые ошибки интерпретации данных, что подчеркивает слабое знакомство мирового научного сообщества с особенностями функционирования российского прибора.

С марта 2016 г. некоторое время данные уровня Level 1В передавались Федеральной службой по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет) в зарубежный центр распространения спутниковых данных EUMETSAT, главной миссией которого является хранение и распространение

готовых спутниковых продуктов, предоставляемых гидрометеорологическими организациями со всего мира. Однако данные МТВЗА-ГЯ в EUMETSAT не архивировались, поэтому получить их можно было только в режиме реального времени через сервис EUMETCast, требующий для использования лицензии и специального оборудования. В настоящий момент данные МТВЗА-ГЯ в EUMETSAT не передаются.

Мы уверены, что обеспечение полного оперативного доступа к данным измерений единственного российского микроволнового многоканального сканирующего радиометра позволит дать новый старт как работам по геопривязке и внешней калибровке данных, так и разработкам в области развития методов восстановления геофизических параметров по данным МТВЗА-ГЯ.

Список литературы

1. Заболотских Е. В. Спутниковые пассивные микроволновые методы зондирования системы «Океан-Атмосфера» для изучения экстремальных погодных явлений // Ученые Записки Российского государственного гидрометеорологического университета. 2016. № 45. С. 64—80.
2. Zabolotskikh E. V., Mitnik L. M., Chapron B. New approach for severe marine weather study using satellite passive microwave sensing // Geophysics Research Letters. 2013. V. 40. No 13. P. 3347—3350.
3. Кондратьев К. Я. Термическое зондирование атмосферы со спутников. Гидрометеиздат, 1970. 409 с.
4. Wentz F. J. SSM/I Version-7 Calibration Report, report number 011012 // Remote Sensing Systems. St. Rosa CA. 2013. 46 p.
5. Rocken C., Van Hove V., Ware R. Near real-time GPS sensing of atmospheric water vapor // Geophysical Research Letter. 1997. V. 24. No 24. P. 3221—3224. doi: 10.1029/97GL03312.
6. Andersson E., Hölm E., Bauer P. et al. Analysis and forecast impact of the main humidity observing systems // Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. 2007. V. 133. No. 627. P. 1473—1485. doi: <https://doi.org/10.1002/qj.112>.
7. Bobylev L. P., Zabolotskikh E. V., Mitnik L. M., Mitnik M. L. Arctic Polar Low Detection and Monitoring Using Atmospheric Water Vapor Retrievals from Satellite Passive Microwave Data // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2011. V. 49. No 9. P. 3302—3310. doi: 10.1109/TGRS.2011.2143720.
8. Vasilyeva P. V., Zabolotskikh E. V., Chapron B. Comparative analysis of the North Atlantic and North Pacific extratropical cyclone characteristics retrieved from ERA-Interim reanalysis and AMSR-E data // Sovremennye Problemy Distancionnogo Zondirovaniya Zemli Iz Kosmosa. 2018. V. 15. No 4. P. 236—248. doi: 10.21046/2070-7401-2018-15-4-236-248.
9. Trenberth K. E., Zhang Y., Fasullo J. V., Taguchi, S. Climate variability and relationships between top-of-atmosphere radiation and temperatures on Earth // Journal of Geophysical Research: Atmospheres. 2015. V. 120. No 9. P. 3642—3659. doi: 10.1002/2014JD022887.
10. Reul N., Tenerelli J., Chapron B. et al. SMOS satellite L-band radiometer: A new capability for ocean surface remote sensing in hurricanes // Journal of Geophysical Research: Oceans 1978—2012. 2012. V. 117. No. C2. doi: 10.1029/2011JC007474.
11. Асмус В. В. Загребав В. А., Макриденко Л. А. и др. Система полярно-орбитальных метеорологических спутников серии «Метеор-М» // Метеорология и Гидрология. 2014. № 12. С. 5—16. doi: 10.21046/2070-7401-2024-21-6-48-63.
12. Болдырев В. В., Горобец Н. Н., Ильгасов П. А. и др. Спутниковый микроволновый сканер/зондировщик МТВЗА-ГЯ // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2008. Т. 5. № 1. С. 243—248.
13. Барсуков И. А., Болдырев В. В., Гаврилов М. И. и др. Спутниковая СВЧ-радиометрия для решения задач дистанционного зондирования Земли // Радиотехника. 2021. Т. 8. № 1. С. 11—23.

14. Барсуков И. А., Никитин О. В., Стрельцов А. М., Черный И. В. Калибровка Свч-Радиометра МТВЗА-ГЯ // *Космонавтика и ракетостроение*. 2010. № 1 (58).
15. Чернявский Г. М., Митник Л. М., Кулешов В. П. и др. Микроволновое зондирование океана, атмосферы и земных покровов по данным спутника «Метеор-М» № 2 // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2018. Т. 15. № 4. С. 78—100.
16. Митник Л. М., Митник М. Л. Калибровка и валидация-необходимые составляющие микроволновых радиометрических измерений со спутников серии Метеор-М № 2 // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2016. Т. 13. № 1. С. 95—104. doi: 10.21046/2070-7401-2016-13-1-95-104.
17. Gentemann C. L., Wentz F. J., Brewer M. et al. Passive microwave remote sensing of the ocean: An overview // *Oceanography from Space*. Springer, 2010. P. 13—33. doi: 10.1007/978-90-481-8681-5_2.
18. Wentz F. J., Meissner V. Algorithm Theoretical Basis Document (ATBD), Version 2, AMSR Ocean Algorithm, RSS Tech. Proposal 121599A-1, Remote Sensing Systems // Algorithm Theoretical Basis Document (ATBD), Version 2, AMSR Ocean Algorithm. 121599A-1 Remote Sens. Syst. 2000.
19. Zabolotskikh E. V., Mitnik L. M., Chapron B. An Updated Geophysical Model for AMSR-E and SSMIS Brightness Temperature Simulations over Oceans // *Remote Sensing*. 2014. V. 6. No 3. P. 2317—2342.
20. Чернявский Г. М., Митник Л. М., Кулешов В. П. и др. Моделирование яркостной температуры и первые результаты, полученные микроволновым радиометром МТВЗА-ГЯ со спутника «Метеор-М» № 2-2 // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2020. Т. 17. № 3. С. 51—65.
21. Weng F., Zou X., Sun N. et al. Calibration of Suomi national polar-orbiting partnership advanced technology microwave sounder // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2013. V. 118. No. 19. P. 11—187. doi: 10.1002/jgrd.50840.
22. Успенский А. Б., Асмус В. В., Крамчанинова Е. К. и др. Абсолютная калибровка каналов атмосферного зондирования спутникового микроволнового радиометра МТВЗА-ГЯ // *Исследование Земли из космоса*. 2016. № 5. С. 57—70. doi: 10.7868/S0205961416050079.
23. Успенский А. Б., Крамчанинова Е. К., Косцов В. С. и др. Развитие системы внешней калибровки и валидации данных измерений микроволнового радиометра МТВЗА-ГЯ КА «Метеор-М» № 2 // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2017. Т. 14. № 4. С. 27—35. doi: 10.21046/2070-7401-2017-14-4-27-35.
24. Заболотских Е. В., Балашова Е. А. Внешняя калибровка измерений российского спутникового микроволнового радиометра МТВЗА-ГЯ в каналах сканера. Часть 2. Эксперимент // *Метеорология и гидрология*. 2021. № 11. С. 47—55. doi: 10.52002/0130-2906-2021-11-47-55.
25. Biswas S. K., Farrar S., Gopalan K. et al. Intercalibration of microwave radiometer brightness temperatures for the global precipitation measurement mission // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2012. V. 51. No 3. P. 1465—1477. doi: 10.1109/TGRS.2012.2217148.
26. Colton M. C., Poe G. A. Intersensor calibration of DMSP SSM/I's: F-8 to F-14, 1987-1997 // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 1999. V. 37. No 1. P. 418—439. doi: 10.1109/36.739079.
27. Das N. N., Colliander A., Chan S. K. et al. Intercomparisons of brightness temperature observations over land from AMSR-E and WindSat // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2013. V. 52. No. 1. P. 452—464. doi: 10.1109/TGRS.2013.2241445.
28. Yan B., Weng F. Intercalibration Between Special Sensor Microwave Imager/Sounder and Special Sensor Microwave Imager // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2008. V. 46. No. 4. P. 984—995.
29. Wentz F. J., Gentemann C. L., Ashcroft P. D. On-orbit calibration of AMSR-E and the retrieval of ocean products, paper presented at the 12th Conference on Satellite Meteorology and Oceanography // 36th Conference on Hurricanes and Tropical Meteorology. 2003. P. 10—13.
30. Berg W., Bilanow S., Chen R. et al. Intercalibration of the GPM Microwave Radiometer Constellation // *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*. 2016. V. 33. No. 12. P. 2639—2654. doi: 10.1175/JTECH-D-16-0100.1

31. Заболотских Е. В. Внешняя калибровка измерений российского спутникового микроволнового радиометра МТВЗА-ГЯ в каналах сканера. Часть 1. Моделирование // Метеорология и гидрология. 2021. № 10. С. 57—65. doi: 10.52002/0130-2906-2021-10-57-65.
32. Садовский И. Н., Сазонов Д. С. Выбор потенциальных полигонов для внешней калибровки российского сканера/зондировщика МТВЗА-ГЯ // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2025. Т. 22. № 1. С. 26—39. doi: 10.21046/2070-7401-2025-22-1-26-39.
33. Садовский И. Н., Сазонов Д. С. Географическая привязка данных дистанционных радиометрических измерений МТВЗА-ГЯ // Исследования Земли Из Космоса. 2022. № 6. С. 101—112. doi: 10.31857/S0205961422060100.
34. Барсуков И. А., Митник Л. М., Болдырев В. В. Метеорологический спутник «Метеор-М» № 2-3: предварительные результаты микроволнового зондирования Земли // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2025. Т. 22. № 1. С. 315—326. doi: 10.21046/2070-7401-2025-22-1-315-326.
35. Садовский И. Н., Сазонов Д. С., Клитная А. В. Новый подход к реализации процедуры географической привязки измерений МТВЗА-ГЯ // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2025. Т. 22. № 5. С. 87—95. doi: 10.21046/2070-7401-2025-22-5-87-95.
36. Садовский И. Н., Сазонов Д. С. Корректировка географической привязки данных МТВЗА-ГЯ // Исследование Земли из космоса. 2023. Т. 6. С. 73—85. doi: 10.31857/S0205961423060076.
37. Ермаков Д. М., Кузьмин А. В., Мазуров А. А. и др. Концепция потоковой обработки данных российских спутниковых СВЧ-радиометров серии МТВЗА на базе ЦКП «ИКИ-Мониторинг» // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 4. С. 298—303. doi: 10.21046/2070-7401-2021-18-4-298-303.
38. Кузнецов А. Е., Пошихонов В. И., Рыжиков А. С. Технология автоматического контроля точности геопривязки спутниковых изображений по опорным снимкам от КА «LANDSAT-8» // Цифровая Обработка Сигналов. 2015. № 3. С. 37—42.
39. Wentz F. J. A well-calibrated ocean algorithm for special sensor microwave/imager // Journal of Geophysical Research. 1997. V. 102. P. 8703—8718.
40. Kawanishi V., Sezaï V., Ito Y. et al. The Advanced Microwave Scanning Radiometer for the Earth Observing System (AMSR-E), NASDA's contribution to the EOS for global energy and water cycle studies // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2003. V. 41. No 2. P. 184—194. doi: 10.1109/TGRS.2002.808331.
41. Гайфулин Д. Р., Цырульников М. Д., Успенский А. Б. и др. Использование информации спутникового микроволнового радиометра МТВЗА-ГЯ в системе усвоения данных Гидрометцентра России // Метеорология и гидрология. 2017. № 9. С. 36—47. doi: 10.37162/2618-9631-2019-4-112-126.
42. Филей А. А., Андреев А. И., Успенский А. Б. Использование искусственных нейронных сетей для восстановления температурно-влажностного состояния атмосферы по данным спутникового микроволнового радиометра МТВЗА-ГЯ КА Метеор-М № 2-2 // Исследование Земли из космоса. 2021. № 6. С. 83—95. doi: 10.21046/2070-7401-2017-14-4-27-35.
43. Митник Л. М., Митник М. Л., Гурвич И. А. и др. Исследование эволюции тропических циклонов в северо-западной части Тихого океана по данным СВЧ-радиометров МТВЗА-ГЯ со спутника Метеор-М №1 и AMSR-E со спутника Aqua // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 4. С. 121—128.
44. Митник Л. М., Митник М. Л., Чернявский Г. М. и др. Приводный ветер и морской лед в Баренцевом море по данным микроволновых измерений со спутников «Метеор-м» № 1 и GCOM-W1 в январе-марте 2013 г. // Исследование Земли из космоса. 2015. № 6. С. 36. doi: 10.7868/S0205961415040077.
45. Малинин В. Н., Гордеева С. М., Наумов Л. М. Влагосодержание атмосферы как климатообразующий фактор // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 3. С. 243—251. DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-3-243-251.
46. Deeter M. N. A new satellite retrieval method for precipitable water vapor over land and ocean // Geophysical Research Letter. 2007. V. 34. No 2. P. L02815. doi: 10.1029/2006GL028019.
47. Zabolotskikh E. V., Khvorostovsky K. S., Chapron B. An Advanced Algorithm to Retrieve Total Atmospheric Water Vapor Content From the Advanced Microwave Scanning Radiometer Data Over Sea

- Ice and Sea Water Surfaces in the Arctic // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2020. V. 58. No 5. P. 3123—3135. doi: 10.1109/TGRS.2019.2948289.
48. Косторная А. А., Рублев А. Н., Голомолзин В. В. Определение влагосодержания в безоблачной атмосфере над океаном по измерениям микроволнового радиометра МТВ3А-ГЯ // *Вычислительные технологии*. 2020. Т. 25. № 4. С. 83—98. doi: 10.25743/ICT.2020.25.4.008.
49. Пашинов Е. В. Восстановление интегрального паросодержания атмосферы по данным прибора МТВ3А-ГЯ («Метеор-М» № 2) над поверхностью океана // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2018. Т. 15. № 4. С. 225—235. doi: 10.21046/2070-7401-2018-15-4-225-235.
50. Сазонов Д. С. Исследование возможности восстановления интенсивности осадков по измерениям МТВ3А-ГЯ // *Исследование Земли из космоса*. 2023. № 5. С. 23—35. doi: 10.31857/S020596142305007X.
51. Ferraro R. R. Special sensor microwave imager derived global rainfall estimates for climatological applications // *Journal of Geophysical Research*. 1997. V. 102. No. D14. P. 16715—16735.
52. Заболотских Е. В. Восстановление значений водозапаса облаков над морским льдом Арктики по данным радиометра AMSR2 // *Метеорология и гидрология*. 2025. № 11. С. 5—11. doi: 10.52002/0130-2906-2025-11-5-11.
53. Заболотских Е. В., Балашова Е. А., Шапрон Б. Усовершенствованный метод восстановления сплочённости морского льда по данным спутниковых микроволновых измерений вблизи 90 ГГц // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2019. Т. 16. № 4. С. 233—246. doi: 10.21046/2070-7401-2019-16-4-233-243.
54. Zabolotskikh E. V., Chapron B. Estimation of Atmospheric Microwave Radiation Parameters Over the Arctic Sea Ice From the AMSR2 Data // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2024. V. 62. P. 4104211. doi: 10.1109/TGRS.2024.3392369.
55. Zabolotskikh E. V., Zhivotovskaia M. A. Atmospheric Water Vapor Column Retrievals from MT-VZA—GYa Measurements // *IGARSS 2022-2022 IEEE International Geoscience Remote Sensing Symposium*. 2022. P. 7387—7390. doi: 10.1109/IGARSS46834.2022.9883207.
56. Заболотских Е. В., Азаров С. М., Животовская М. А. Восстановление скорости приводного ветра по данным МТВ3А-ГЯ // *Метеорология и гидрология*. 2023. № 8. С. 24—34. doi: 10.52002/0130-2906-2023-8-24-34.
57. Заболотских Е. В., Балашова Е. А., Азаров С. М. Восстановление сплочённости морского льда по данным измерений МТВ3А-ГЯ // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2022. Т. 19. № 1. С. 27—38. doi: 10.21046/2070-7401-2022-19-1-27-38.
58. Plant W. J., Irsov V. A. joint active/passive physical model of sea surface microwave signatures // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2017. V. 122. No. 4. P. 3219—3239. doi: 10.1109/IGARSS.2017.8127248.
59. Заболотских Е. В., Шапрон Б. Моделирование микроволнового излучения морей Арктики в X диапазоне по данным спутниковых наблюдений: учет угла измерений // *Метеорология и гидрология*. 2021. № 4. С. 69—77. doi: 10.52002/0130-2906-2021-4-69-77.
60. Zabolotskikh E. V. New Possibilities for Geophysical Parameter Retrievals Opened by GCOM-W1 AMSR2 // *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*. 2015. V. 8. No 9. P. 4248—4261. doi: 10.1109/MicroRad.2014.6878931.
61. Заболотских Е. В., Животовская М. А., Ярусов К. И., Азаров С. М. Поля ветра во внетропических циклонах Северной Атлантики по данным спутникового микроволнового радиометра МТВ3А-ГЯ // *Метеорология и гидрология*. 2024. № 10. С. 5—14. doi: 10.52002/0130-2906-2024-10-5-14.
62. Comiso J. C., Hall D. K. Climate trends in the Arctic as observed from space // *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*. 2014. V. 5. No 3. P. 389—409. doi: 10.1002/wcc.277.
63. Svendsen E., Matzler C., Grenfell V. C. A model for retrieving total sea ice concentration from a spaceborne dual-polarized passive microwave instrument operating near 90 GHz // *International Journal of Remote Sensing*. 1987. V. 8. No. 10. P. 1479—1487. doi: 10.1080/01431168708954790.
64. Xiao H., Han W., Han Y. et. al. First trial for the assimilation of radiance data from MTVZA-GY on board the new Russian satellite meteor-M N2-2 in the CMA-GFS 4D-Var system // *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. 2024. V. 150 No. 765. P. 5000—5019. doi: 10.1002/qj.4853.

References

1. Zabolotskikh E. V. Satellite-Based Passive Microwave Ocean-Atmosphere Sensing Methods for Studying Extreme Weather Events. *Gidrometeorologiya i ekologiya = Hydrometeorology and ecology*. 2016; (45): (64—80). (In Russ.).
2. Zabolotskikh E. V., Mitnik L. M., Chapron B. New approach for severe marine weather study using satellite passive microwave sensing. *Geophysics Research Letters*. 2013; 40 (13): 3347—3350.
3. Kondratiev K. YA. *Termicheskoe zondirovanie atmosfery so sputnikov = Thermal sounding of the atmosphere from satellites*. Leningrad: Hydrometeoisdat, 1970; 409 p. (In Russ.).
4. Wentz F.J. SSM/I Version-7 Calibration Report, report number 011012. *Remote Sensing Systems*. 2013; 46.
5. Rocken C., Van Hove T., Ware R. Near real-time GPS sensing of atmospheric water vapor. *Geophysical Research Letter*. 1997; 24 (24): 3221—3224. doi: 10.1029/97GL03312.
6. Andersson E., Hölm E., Bauer P. et al. Analysis and forecast impact of the main humidity observing systems. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. 2007; 133 (627): 1473—1485. doi: 10.1002/qj.112.
7. Bobylev L. P., Zabolotskikh E. V., Mitnik L. M., Mitnik M. L. Arctic Polar Low Detection and Monitoring Using Atmospheric Water Vapor Retrievals from Satellite Passive Microwave Data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2011; 49 (9): 3302—3310. doi: 10.1109/TGRS.2011.2143720.
8. Vasilyeva P. V., Zabolotskikh E. V., Chapron B. Comparative analysis of the North Atlantic and North Pacific extratropical cyclone characteristics retrieved from ERA-Interim reanalysis and AMSR-E data. *Sovremennye Problemy Distancionnogo Zondirovaniya Zemli Iz Kosmosa*. 2018; 15 (4): 236—248. doi: 10.21046/2070-7401-2018-15-4-236-248.
9. Trenberth K. E., Zhang Y., Fasullo J. T., Taguchi S. Climate variability and relationships between top-of-atmosphere radiation and temperatures on Earth. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2015; 120 (9): 3642—3659. doi: 10.1002/2014JD022887.
10. Reul N., Tenerelli J., Chapron B. et al. SMOS satellite L-band radiometer: A new capability for ocean surface remote sensing in hurricanes. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1978—2012. 2012; 117 (C2). doi: 10.1029/2011JC007474.
11. Asmus V. V., Zagrebaev V. A., Makridenko L. A. The Meteor-M series of polar-orbiting meteorological satellites. *Meteorologiya i Gidrologiya = Meteorology And Hydrology*. 2014; (12): (5—16). doi: 10.21046/2070-7401-2024-21-6-48-63. (In Russ.).
12. Boldyrev V. V., Gorobec N. N., Il'gasov P. A. et al. Satellite microwave scanner/sounder MTVZA—GYa. *Sovremennye Problemy Distancionnogo Zondirovaniya Zemli Iz Kosmosa = Current problems in remote sensing of the Earth from space*. 2008; 5 (1): (243—248). (In Russ.).
13. Barsukov I. A., Boldyrev V. V., Gavrilov M. I. et al. Satellite microwave radiometry for solving problems of Earth remote sensing. *Radiotekhnika = Radio engineering*. 2021; 8 (1): (11—23). (In Russ.).
14. Barsukov I. A., Nikitin O. V., Strel'cov A. M., Chernyj I. V. Calibration of the MTVZA—GYa Microwave Radiometer. *Kosmonavtika i Raketostroenie = Cosmonautics and Rocketry*. 2010; 1 (58). (In Russ.).
15. Chernyavskij G. M., Mitnik L. M., Kuleshov I. V. et al. Microwave sounding of the ocean, atmosphere and land cover using data from the Meteor-M No. 2 satellite. *Sovremennye Problemy Distancionnogo Zondirovaniya Zemli Iz Kosmosa = Current problems in remote sensing of the Earth from space*. 2018; 15 (4). (In Russ.).
16. Mitnik L. M., Mitnik M. L. Calibration and validation are essential components of microwave radiometric measurements from the Meteor-M No. 2 series satellites. *Sovremennye Problemy Distancionnogo Zondirovaniya Zemli Iz Kosmosa = Current problems in remote sensing of the Earth from space*. 2016; 13 (1): 95—104. doi: 10.21046/2070-7401-2016-13-1-95-104. (In Russ.).
17. Gentemann C. L., Wentz F. J., Brewer M., Hilburn K., & Smith D. Passive microwave remote sensing of the ocean: An overview. *Oceanography from Space*. 2010; 13—33. doi: 10.1007/978-90-481-8681-5_2.
18. Wentz F. J., Meissner T. Algorithm Theoretical Basis Document (ATBD), Version 2, AMSR Ocean Algorithm, RSS Tech. Proposal 121599A-1, Remote Sensing Systems. Algorithm Theoretical Basis Document (ATBD), Version 2, AMSR Ocean Algorithm. 121599A-1 Remote Sensing System 2000.

19. Zabolotskikh E. V., Mitnik L. M., Chapron B. An Updated Geophysical Model for AMSR-E and SSMIS Brightness Temperature Simulations over Oceans. *Remote Sensing*. 2014; 6 (3): 2317—2342.
20. CHernyavskij G. M., Mitnik, L.M., Kuleshov, V. P. et al. Modeling of brightness temperature and first results obtained by the microwave radiometer MTVZA—GYa from the Meteor-M No. 2-2 satellite. *Sovremennye Problemy Distancionnogo Zondirovaniya Zemli Iz Kosmosa = Current problems in remote sensing of the Earth from space*. 2020; 17 (3): (51—65). (In Russ.).
21. Weng F., Zou, X., Sun, N. et al. Calibration of Suomi national polar-orbiting partnership advanced technology microwave sounder. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2013; 118 (19): (11—187). doi: 10.1002/jgrd.50840.
22. Uspenskij A. B., Asmus V. V., Kramchaninova E. K. et al. Absolute calibration of atmospheric sounding channels of the satellite microwave radiometer MTVZA—GYa. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2016; (5): (57—70). doi: 10.7868/S0205961416050079. (In Russ.).
23. Uspenskij A. B., Kramchaninova E.K., Koscov V. S. et al. Development of a system for external calibration and validation of measurement data for the microwave radiometer MTVZA—GYa of the Meteor-M spacecraft No. 2. *Sovremennye Problemy Distancionnogo Zondirovaniya Zemli Iz Kosmosa = Current problems in remote sensing of the Earth from space*. 2017; 14 (4): (27—35). doi: 10.21046/2070-7401-2017-14-4-27-35. (In Russ.).
24. Zabolotskikh E. V., Balashova E. A. External calibration of measurements of the Russian satellite microwave radiometer MTVZA—GYa in scanner channels. Part 2. Experiment. *Meteorologiya I Gidrologiya = Meteorology And Hydrology*. 2021; (11): (47—55). doi: 10.52002/0130-2906-2021-11-47-55. (In Russ.).
25. Biswas S. K., Farrar S., Gopalan K. et al. Intercalibration of microwave radiometer brightness temperatures for the global precipitation measurement mission. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2012; 51 (3): 1465—1477. doi: 10.1109/TGRS.2012.2217148.
26. Colton M. C., Poe G. A. Intersensor calibration of DMSP SSM/I's: F-8 to F-14, 1987-1997. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 1999; 37 (1): 418—439. doi: 10.1109/36.739079.
27. Das N. N., Colliander A., Chan S. K. et al. Intercomparisons of brightness temperature observations over land from AMSR-E and WindSat. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2013; 52 (1): 452—464. doi: 10.1109/TGRS.2013.2241445.
28. Yan B., Weng F. Intercalibration Between Special Sensor Microwave Imager/Sounder and Special Sensor Microwave Imager. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2008; 46 (4): 984—995.
29. Wentz F. J., Gentemann C. L., Ashcroft P. D. On-orbit calibration of AMSR-E and the retrieval of ocean products, paper presented at the 12th Conference on Satellite Meteorology and Oceanography. *36th Conference on Hurricanes and Tropical Meteorology*. 2003; 10—13.
30. Berg W., Bilanow S., Chen R. et al. Intercalibration of the GPM Microwave Radiometer Constellation. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*. 2016; 33 (12): 2639—2654. doi: 10.1175/JTECH-D-16-0100.1.
31. Zabolotskikh E. V. External Calibration of Measurements of the Russian Satellite Microwave Radiometer MTVZA—GYa in Scanner Channels. Part 1. Modeling. *Meteorologiya I Gidrologiya = Meteorology And Hydrology*. 2021; (10): (57—65). doi: 10.52002/0130-2906-2021-10-57-65. (In Russ.).
32. Sadvskij I. N., Sazonov D. S. Selection of potential sites for external calibration of the Russian scanner/probe MTVZA—GYa. *Sovremennye Problemy Distancionnogo Zondirovaniya Zemli Iz Kosmosa = Current problems in remote sensing of the Earth from space*. 2025; 22 (1): 26—39. doi: 10.21046/2070-7401-2025-22-1-26-39. (In Russ.).
33. Sadvskij I. N., Sazonov D. S. Georeferencing of remote radiometric measurement data from MTVZA—GYa. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2022; (6): (101—112). doi: 10.31857/S0205961422060100. (In Russ.).
34. Barsukov I. A., Mitnik L. M., Boldyrev V. V. Meteorological satellite “Meteor-M” No. 2-3: preliminary results of microwave sounding of the Earth. *Sovremennye Problemy Distancionnogo Zondirovaniya Zemli Iz Kosmosa = Current problems in remote sensing of the Earth from space*. 2025; 22 (1): 315—326. doi: 10.21046/2070-7401-2025-22-1-315-326. (In Russ.).
35. Sadvskij I. N., Sazonov D. S., Klitnaya A. V. A new approach to the implementation of the procedure for georeferencing measurements of MTVZA—GYa. *Sovremennye Problemy Distancionnogo*

- Zondirovaniya Zemli Iz Kosmosa = Current problems in remote sensing of the Earth from space*. 2025; 22 (5): 87—95. doi: 10.21046/2070-7401-2025-22-5-87-95. (In Russ.).
36. Sadvskij I. N., Sazonov D. S. Correction of georeferencing of MTVZA—GYa data. *Issledovanie Zemli Iz Kosmosa = Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2023; (6): (73—85). doi: 10.31857/S0205961423060076. (In Russ.).
 37. Ermakov D. M., Kuz'min A. V., Mazurov A. A. et al. The concept of stream processing of data from Russian satellite microwave radiometers of the MTVZA series based on the IKI-Monitoring Center of Collective Use. *Sovremennye Problemy Distancionnogo Zondirovaniya Zemli Iz Kosmosa = Current problems in remote sensing of the Earth from space*. 2021; 18 (4): 298—303. doi: 10.21046/2070-7401-2021-18-4-298-303. (In Russ.).
 38. Kuznecov A. E., Poshekhonov V. I., Ryzhikov A. S. Technology for automatic control of the accuracy of georeferencing of satellite images using reference images from the LANDSAT-8 spacecraft. *Cifrovaya Obrabotka Signalov = Digital Signal Processing*. 2015; (3): (37—42). (In Russ.).
 39. Wentz F. J. A well-calibrated ocean algorithm for special sensor microwave/imager. *Journal of Geophysical Research*. 1997; (102): 8703—8718.
 40. Kawanishi T., Sezai T., Ito Y. et al. The Advanced Microwave Scanning Radiometer for the Earth Observing System (AMSR-E), NASDA's contribution to the EOS for global energy and water cycle studies. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2003; 41 (2): 184—194. doi: 10.1109/TGRS.2002.808331.
 41. Gajfulin D. R., Cyrul'nikov M. D., Uspenskij A. B. et al. Using information from the satellite microwave radiometer MTVZA—GYa in the data assimilation system of the Hydrometeorological Center of Russia. *Meteorologiya I Gidrologiya = Meteorology And Hydrology*. 2017; (9): (36—47). doi: 10.37162/2618-9631-2019-4-112-126. (In Russ.).
 42. Filej A. A., Andreev A. I., Uspenskij A. B. Using artificial neural networks to reconstruct the temperature and humidity state of the atmosphere based on data from the satellite microwave radiometer MTVZA—GYa KA Meteor-M No. 2-2. *Issledovanie Zemli Iz Kosmosa = Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2021; (6): (83—95). doi: 10.21046/2070-7401-2017-14-4-27-35. (In Russ.).
 43. Mitnik L. M., Mitnik M. L., Gurvich I. A. et al. A study of the evolution of tropical cyclones in the northwestern Pacific Ocean using data from the MTVZA-GY microwave radiometers on the Meteor-M No. 1 satellite and the AMSR-E on the Aqua satellite. *Sovremennye Problemy Distancionnogo Zondirovaniya Zemli Iz Kosmosa = Current problems in remote sensing of the Earth from space*. 2012; 9 (4): 121—128. (In Russ.).
 44. Mitnik L. M., Mitnik M. L., CHernyavskij G. M. et al. Surface wind and sea ice in the Barents Sea based on microwave measurements from the Meteor—M No. 1 and GCOM-W1 satellites in January-March 2013. *Issledovanie Zemli Iz Kosmosa = Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2015; (6): 36. doi: 10.7868/S0205961415040077. (In Russ.).
 45. Malinin V. N., Gordeeva S. M., Naumov L. M. Total precipitable water of the atmosphere as a climate forcing factor. *Sovremennye Problemy Distancionnogo Zondirovaniya Zemli Iz Kosmosa = Current problems in remote sensing of the Earth from space*. 2018; 15(3): 243—251. DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-3-243-251. (In Russ.).
 46. Deeter M. N. A new satellite retrieval method for precipitable water vapor over land and ocean. *Geophysical Research Letter*. 2007. V. 34 (2): L02815. doi: 10.1029/2006GL028019.
 47. Zabolotskikh E. V., Khvorostovsky K. S., Chapron B. An Advanced Algorithm to Retrieve Total Atmospheric Water Vapor Content From the Advanced Microwave Scanning Radiometer Data Over Sea Ice and Sea Water Surfaces in the Arctic. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2020; 58 (5): 3123—3135. doi: 10.1109/TGRS.2019.2948289
 48. Kostornaya A. A., Rublev A. N., Golomolzin V. V. Determination of moisture content in a cloudless atmosphere over the ocean using measurements of the MTVZA-GY microwave radiometer. *Vychislitel'nye Tekhnologii = Computing Technologies*. 2020; 25 (4): 83—98. doi: 10.25743/ICT.2020.25.4.008. (In Russ.).
 49. Pashinov E. V. Reconstruction of the integral vapor content of the atmosphere based on the data of the MTVZA—GYa instrument (Meteor-M No. 2) over the ocean surface. *Sovremennye Problemy Distancionnogo Zondirovaniya Zemli Iz Kosmosa = Current problems in remote sensing of the Earth from space*. 2018; 15 (4): 225—235. doi: 10.21046/2070-7401-2018-15-4-225-235. (In Russ.).

50. Sazonov D. S. Study of the possibility of reconstructing precipitation intensity based on MTVZA—GYa measurements. *Issledovanie Zemli Iz Kosmosa = Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2023; (5): 23—35. doi: 10.31857/S020596142305007X (In Russ.).
51. Ferraro R. R. Special sensor microwave imager derived global rainfall estimates for climatological applications. *Journal of Geophysical Research*. 1997; 102 (D14): 16715-16735.
52. Zabolotskikh E. V. Reconstruction of cloud water content values over Arctic sea ice using AMSR2 radiometer data. *Meteorologiya I Gidrologiya = Meteorology And Hydrology*. 2025; (11): (5—11). doi: 10.52002/0130-2906-2025-11-5-11. (In Russ.).
53. Zabolotskikh E. V., Balashova E. A., SHapron B. An improved method for reconstructing sea ice concentration from satellite microwave measurements near 90 GHz. *Sovremennye Problemy Distancionnogo Zondirovaniya Zemli Iz Kosmosa = Current problems in remote sensing of the Earth from space*. 2019; 16 (4): 233—246. doi: 10.21046/2070-7401-2019-16-4-233-243. (In Russ.).
54. Zabolotskikh E. V., Chapron B. Estimation of Atmospheric Microwave Radiation Parameters Over the Arctic Sea Ice From the AMSR2 Data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2024; 62: 4104211. doi: 10.1109/TGRS.2024.3392369.
55. Zabolotskikh E. V., Zhivotovskaia M. A. Atmospheric Water Vapor Column Retrievals from MTVZA—GYa Measurements. *IGARSS 2022-2022 IEEE International Geoscience Remote Sensing Symposium*. 2022. 7387—7390. doi: 10.1109/IGARSS46834.2022.9883207.
56. Zabolotskikh E. V., Azarov S. M., Zhivotovskaya M. A. Reconstruction of the surface wind speed using MTVZA—GYa data. *Meteorologiya I Gidrologiya = Meteorology And Hydrology*. 2023; (8): 24—34. doi: 10.52002/0130-2906-2023-8-24-34. (In Russ.).
57. Zabolotskikh E. V., Balashova E. A., Azarov S. M. Restoration of sea ice concentration based on MTVZA—GYa measurements. *Sovremennye Problemy Distancionnogo Zondirovaniya Zemli Iz Kosmosa = Current problems in remote sensing of the Earth from space*. 2022; 19 (1): 27—38. doi: 10.21046/2070-7401-2022-19-1-27-38. (In Russ.).
58. Plant W. J., Irisov V. A joint active/passive physical model of sea surface microwave signatures. *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2017; 122 (4): 3219—3239. doi: 10.1109/IGARSS.2017.8127248.
59. Zabolotskikh E. V., SHapron B. Modeling of Arctic sea microwave radiation in the X-band using satellite observations: taking into account the measurement angle. *Meteorologiya I Gidrologiya = Meteorology And Hydrology*. 2021; 4: 69—77. doi: 10.52002/0130-2906-2021-4-69-77. (In Russ.).
60. Zabolotskikh E. V. New Possibilities for Geophysical Parameter Retrievals Opened by GCOM-W1 AMSR2. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*. 2015; 8 (9): 4248—4261. doi: 10.1109/MicroRad.2014.6878931.
61. Zabolotskikh E. V., Zhivotovskaya M. A., Yarusov K. I., Azarov S. M. Wind fields in extratropical cyclones of the North Atlantic according to the satellite microwave radiometer MTVZA—GYa. *Meteorologiya I Gidrologiya = Meteorology And Hydrology*. 2024; (10): (5—14). doi: 10.52002/0130-2906-2024-10-5-14. (In Russ.).
62. Comiso J. C., Hall D. K. Climate trends in the Arctic as observed from space. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*. 2014; 5 (3): 389—409. doi: 10.1002/wcc.277.
63. Svendsen E., Matzler C., Grenfell T. C. A model for retrieving total sea ice concentration from a space-borne dual-polarized passive microwave instrument operating near 90 GHz. *International Journal of Remote Sensing*. 1987; 8 (10): 1479—1487. doi: 10.1080/01431168708954790.
64. Xiao H., Han W., Han Y., Hu H., Shi Y., Bai Y., Liu Y. First trial for the assimilation of radiance data from MTVZA—GY on board the new Russian satellite meteor-M N2-2 in the CMA-GFS 4D-Var system. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2024; 150 (765), 5000—5019. doi: 10.1002/qj.4853.

Информация об авторах

Заболотских Елизавета Валериановна, доктор физико-математических наук, Российский государственный гидрометеорологический университет, лаборатория спутниковой океанографии, старший научный сотрудник, liza@rshu.ru.

Львова Екатерина Владимировна, аспирант, Российский государственный гидрометеорологический университет, лаборатория спутниковой океанографии, инженер-исследователь, Lvova317@gmail.com.

Information about authors

Zabolotskikh Elizaveta Valerianovna, doctor of Physical and Mathematical Sciences, Russian State Hydrometeorological University, Satellite Oceanography Laboratory, Senior Researcher.

Lyova Ekaterina Vladimirovna, postgraduate Student, Russian State Hydrometeorological University, Satellite Oceanography Laboratory, Research Engineer.

Конфликт интересов: конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила 30.03.2026

Принята в печать 14.05.2026

The article was received on 30.03.2026

The article was accepted on 14.05.2026

Гидрометеорология и экология. 2026. № 83. С. 231—254.

Hydrometeorology and Ecology. 2026;(83):231—254.

ОКЕАНОЛОГИЯ. В ПОРЯДКЕ ОБСУЖДЕНИЯ

Научная статья

УДК [551.526.6:551.513](268.45)

doi: 10.33933/2713-3001-2026-83-231-254

О влиянии атмосферной циркуляции на формирование межгодовых вариаций теплового режима Баренцева моря

Александр Иванович Угрюмов,

Павел Антонович Вайновский, Дмитрий Владимирович Густоев

Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург, gustoev@mail.ru.

Аннотация. В работе представлены результаты исследования влияния атмосферного блокинга и региональных меридиональных процессов в атмосфере на сезонные и межгодовые вариации теплоотдачи в атмосферу, океанической адвекции тепла и теплового режима деятельного слоя Баренцева моря за период с 1935 г. по 2015 г. на основе статистического анализа современных массивов натурных, спутниковых и модельных данных. Показана ключевая роль меридиональных типов циркуляции Вангенгейма-Гирса атмосферы в зимний период, которая предопределяет вариации процесса зимнего конвективного перемешивания и охлаждения деятельного слоя, что изменяет интенсивность трансформации атлантических вод, проходящих через Баренцево море в Арктический регион.

Ключевые слова: Баренцево море, атмосферная циркуляция, тепловой режим, адвекция тепла течениями.

Для цитирования: Угрюмов А. И., Вайновский П. А., Густоев Д. В. О влиянии атмосферной циркуляции на формирование межгодовых вариаций теплового режима Баренцева моря // Гидрометеорология и экология. 2026. № 83. С. 231—254. doi: 10.33933/2713-3001-2026-83-231-254.

OCEANOLOGY. DISCUSSION

Original article

On the Influence of Atmospheric Circulation on the Formation of Interannual Variations in the Thermal Regime of the Barents Sea

Alexander I. Ugrumov, Pavel A. Vainovsky, Dmitry V. Gustoev

Russian State Hydrometeorological University, Saint Petersburg, Russian Federation, gustoev@mail.ru

Summary. The paper presents the results of a study on the interannual variability of oceanic and atmospheric advective heat fluxes in the Barents Sea region for the period 1935—2015, based on a statistical

analysis of contemporary datasets of in-situ, satellite, and model data: WOCE, ICES, NOAA, and PINRO. The problem is addressed from the perspective of accounting for and describing the influence of atmospheric blocking processes and the development of anomalous meridional atmospheric processes in the Barents Sea (BS) on major thermal anomalies in the active layer of the BS within a variability range of 2—5 years. Based on the classification of atmospheric processes according to the Vangengeim-Girs typology, the key role of short-period synoptic variations in meridional types of atmospheric circulation over the BS in the winter period is demonstrated as the main factor shaping the seasonal and interannual variability of the temperature of the active layer of the BS. In the interannual-scale variability of the thermal regime of the Barents Sea, a special role is shown for synchronous oscillations of heat fluxes into the atmosphere and the advection of oceanic heat through the western boundary of the BS by Atlantic waters, under the influence of regional atmospheric circulation. In shaping the interannual variability of the oceanic heat flux, the leading role is demonstrated by changes in current velocity at the western boundary of the Barents Sea. Under the influence of meridional types of large-scale atmospheric circulation, an actual restructuring of the winter cooling process of the active layer occurs, and the intensity of transformation of Atlantic waters passing through the BS into the Arctic region changes.

Keywords: Barents Sea, atmospheric circulation, thermal regime.

For citation: Ugrumov A. I., Vainovsky P. A., Gustoev D. V. On the Influence of Atmospheric Circulation on the Formation of Interannual Variations in the Thermal Regime of the Barents Sea *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydrometeorology and Ecology*. 2026;(83):(231—254). doi: 10.33933/2713-3001-2026-83-231-254. (In Russ.).

Введение

Всем известно, что Баренцево море — ворота в Арктику. Переносимое океаном и атмосферой тепло в регион Баренцева моря (БМ) формирует в нем ледовые условия и оказывает непосредственное влияние на климат всего Евразийского сектора Арктики [1—7], являясь одним из значимых факторов «арктического усиления» [8]. В атмосфере над БМ расположена планетарная фронтальная зона, разделяющая воздушные массы умеренной и арктической климатических зон, которая формирует зональные и меридиональные воздушные потоки [9]. Непосредственно над акваторией БМ идет интенсивный меридиональный перенос тепла и влаги в Арктику, который регулируется региональными особенностями атмосферной циркуляции [6, 10, 11].

Наблюдаемые тенденции потепления климата в Арктике связаны с изменениями атмосферной циркуляции в последние десятилетия, что наиболее ярко прослеживается над акваториями Норвежского и Баренцева морей. Если раньше фиксировалось преобладание антициклона в целом над Арктическим бассейном, то в середине 1990 гг. на фоне глобального потепления произошла перестройка системы циркуляции, при которой процессами блокирования западного зонального переноса в атмосфере над Баренцевым и Карским морями формировались циклонические образования [2, 12, 13]. В последние годы наблюдается ослабление западно-восточного переноса воздушных масс и рост числа блокирующих ситуаций в атмосфере [14, 15, 16].

С блокирующими атмосферными процессами связаны значительные климатические аномалии — экстремальные морозы зимой и засухи летом [17]. Формирование блокирующих ситуаций происходит в основном над Атлантико-Европейским сектором, где наблюдается 73 % их общего числа. Определяющую роль играют зимние блокинги, количество которых составляет до 42 % от всех случаев

[18, 19]. Продолжительность блокирующих ситуаций нередко достигает 50—60 суток, что имеет принципиальное значение для формирования экстремальных метеорологических аномалий в сезонных и годовых масштабах [17, 20, 21]. Эпизоды блокирования неразрывно связаны с меридиональными формами атмосферной циркуляции [9, 14, 22, 23]. Повторяемость аномального развития процессов меридиональной циркуляции в последние годы также неуклонно увеличивается, что было доказано на основе использования макросиноптического подхода к типизации атмосферных процессов в Северном полушарии [3, 20, 23].

Процессы, происходящие в атмосфере, существенно влияют на состояние гидросферы. Атмосфера воздействует на тепловой баланс БМ за счёт переносимого ею тепла и во многом определяет интенсивность океанического притока тепла. В БМ в районе взаимодействия тёплых атлантических и холодных арктических вод обнаруживается экстремальная межгодовая изменчивость температуры воды и ледовитости, циркуляции вод и конфигурации фронтальных зон, превосходящая по величине сезонные вариации океанических процессов [24]. Изучение причин изменения различных характеристик деятельного слоя моря возможно лишь при условии их анализа во взаимосвязи с изменениями региональных атмосферных процессов [22, 25—27].

Цель данной работы состоит в исследовании влияния особенностей региональной циркуляции атмосферы на формирование межгодовых вариаций теплового режима БМ. Для достижения цели решались следующие задачи:

- выявление особенностей региональной атмосферной циркуляции над БМ;
- оценка влияния атмосферной циркуляции на сезонные и межгодовые вариации теплоотдачи в атмосферу, океанической адвекции тепла и теплового режима деятельного слоя БМ.

Исходные данные

Объектом исследования в данной работе является зона интенсивной трансформации атлантических вод на западе Баренцева моря от 20° в.д. до 40° в.д. (рис. 1). Анализ вариаций термохалинного режима проводился по материалам многолетних наблюдений за период с 1935 г. по 2015 г. на трёх стандартных океанографических разрезах: разрез о. Фуглей — о. Медвежий (Barents Sea Opening, BSO), разрез м. Нордкап — о. Медвежий (№3) и разрез Кольский меридиан (№6). Гидрофизический массив был сформирован на основе данных многолетних судовых наблюдений в западной части Баренцева моря из архива WOD [28]. Ряды месячных, сезонных и годовых значений температуры и солёности воды на стандартных разрезах №3 и №6 были заимствованы из архива ПИНРО [29, 30, 31, 32]. Ряды синхронных наблюдений течений и температуры воды на разрезе BSO были сформированы на основе архива Норвежского института морских исследований (IMR) [29, 33, 34].

Для анализа и описания синоптической ситуации использовался архив синоптических карт ЛГМИ-РГГМУ (поля приземного давления, геопотенциала 500 гПа) и каталог типов атмосферной циркуляции по классификации Вангенгейма-Гирса,

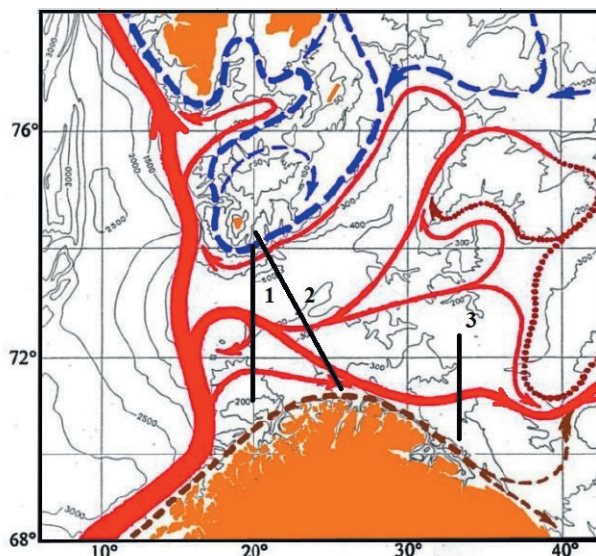


Рис. 1. Схема течений и стандартных разрезов на западе Баренцева моря [36].

Красные стрелки — атлантические воды в Норвежском, Нордкапском и Мурманском течениях, зеленые стрелки — прибрежные воды в Норвежском прибрежном течении. Разрезы: 1 — BSO, 2 — м. Нордкап — о. Медвежий (разрез №3), 4 — Кольский меридиан (№6).

Fig. 1. Scheme of currents and standard sections in the west of the Barents Sea [36].

Red arrows — Atlantic waters in the Norwegian-Nord Cape-Murmansk currents, green arrows — coastal waters in the Norwegian coastal current.

Sections: 1 — BSO, 2 — North Cape — Bear Island (section №3), 4 — Kola section (№6).

сформированный в ААНИИ [22]. Оценка теплового взаимодействия атмосферы и океана проводилась на основе архива ре-анализа NCEP/NOAA [35] с ежедневными данными о температуре воздуха и воды, приземном давлении, ветре, геопотенциале 500 гПа, потоках явного и скрытого тепла из океана в атмосферу.

Фильтрация, интерполяция и визуализация данных выполнялась в программах ODV (Ocean Data View), SURFER. Статистический анализ взаимосвязей временных рядов методами корреляционно-регрессионного анализа был выполнен в программах ASAP, MATLAB, STATISTICA [36, 37, 38].

Результаты и их анализ.

Анализ особенностей региональной атмосферной циркуляции над БМ

При анализе взаимосвязи вариаций теплового режима в БМ с региональными особенностями циркуляции атмосферы ключевым является характер переноса воздушных масс непосредственно над его акваторией. Как правило, исследователи приводят весьма упрощённую типовую схему развития тепловых процессов в Североевропейском бассейне (СЕБ) однозначно увязывая её с индексом Североатлантического колебания (САК) [11, 34, 39, 40]. Постулируется доминирование

зонального атмосферного переноса, который прослеживается на синоптических картах приземного давления при формальном многолетнем осреднении метеорологических данных как глубокая ложбина Исландского минимума, вытянутая к Шпицбергену.

Такое распределение приземного атмосферного давления ассоциируется с положительными значениями САК, с которыми связывается стабильная адвекция тёплых атлантических вод в Норвежское и Баренцево моря [40]. Действительно, при многолетнем осреднении климатическая планетарная фронтальная зона в тропосфере, которая в приземной атмосфере прослеживается в виде исландской циклонической ложбины, проходит по линии Исландия — о. Медвежий — о. Новая Земля, и отделяет арктические воздушные массы от умеренных. Северная часть этого региона находится под прямым влиянием Арктического максимума, а южная — под влиянием Исландского минимума. Предполагается, что такая фоновая картина лишь эпизодически нарушается случайной блокировкой западного переноса и усилением меридиональных движений в атмосфере, что отражается в отрицательных значениях САК. При этом не фиксируется и не описывается ключевой вопрос о преобладающем направлении меридионального атмосферного переноса непосредственно над исследуемым регионом БМ в условиях блокировки западного переноса. Часто применяемые для описания атмосферной циркуляции индексы САК или индексы Арктической Осцилляции (АО), не могут ответить на этот вопрос.

В реальных условиях при ослаблении зонального переноса над Атлантикой могут возникать два принципиально различных типа меридиональной циркуляции в атмосфере над БМ:

- усиление переноса воздуха с юга на север и заток тепла над Норвежским и Баренцевым морями (арктический антициклон ослаблен, усилен Азорский максимум, высотная фронтальная зона смещается на север Шпицбергена),

- усиление затока холодных воздушных масс с севера на юг над акваторией БМ (арктический антициклон интенсивно развит, высотная фронтальная зона в атмосфере смещается на юг с выходом на Скандинавию) (рис. 2).

Специфика формирования межгодовых вариаций тепла в БМ, обусловленных влиянием региональных меридиональных атмосферных процессов, часто ускользает от внимания исследователей, особенно в последние десятилетия. Между тем, подобные нарушения зонального переноса в атмосфере БМ не являются случайными, кратковременными или малозначащими [9, 23]. Более того, под влиянием длительных блокировок формируются экстремальные тепловые аномалии в атмосфере и море [20, 21, 26], которые определяют принципиально различные состояния климатического режима БМ.

Для эффективного описания зональных и меридиональных атмосферных процессов над западом БМ нами использовался известный методический подход на основе классификации макросиноптических процессов Вангенгейма-Гирса [9, 22], в соответствии с которым по географической локализации основных особенностей барического поля над Атлантико-Европейским районом различают зональный (W) и два типа меридиональной циркуляции — форма С (центральная) и форма Е (восточная). В толще тропосферы при форме W преобладают зональные

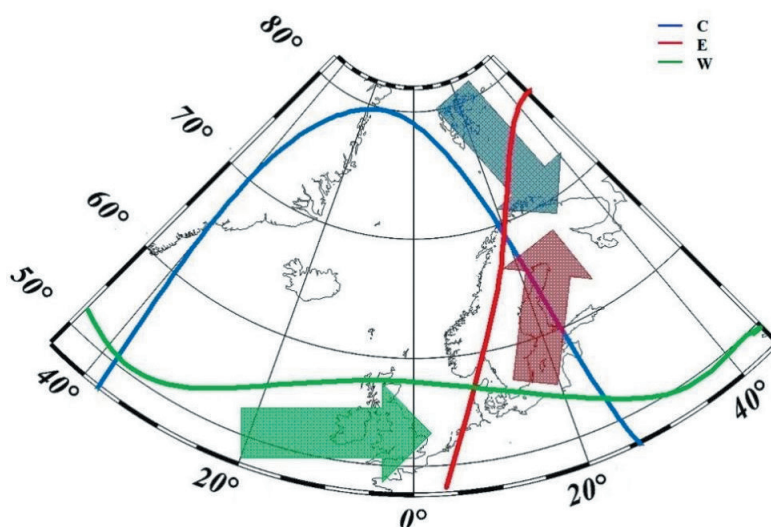


Рис. 2. Схема пространственного положения высотных фронтальных зон на изобарической поверхности 500 Гпа при основных типах циркуляции атмосферы [9]. Стрелки соответствующего цвета указывают направления преобладающего воздушного переноса.

Fig. 2. Scheme of the spatial position of high-altitude frontal zones on the 500 hPa isobaric surface for the main types of atmospheric circulation [9].

The arrows of the corresponding color indicate the directions of the prevailing air transport.

движения воздуха (рис. 2). С возникновением и развитием в тропосфере волн большой амплитуды нарастает процесс блокирования зонального переноса воздуха и происходит преобразование зональной формы циркуляции W в формы меридиональной циркуляции: центральную С или восточную Е. Сохранение направления основных переносов воздуха и географического распределения аномалий барического поля в течение нескольких суток понимается как естественный синоптический процесс (ЕСП), который относится к конкретному типу общей циркуляции атмосферы (ОЦА).

При меридиональной циркуляции типа С высотный гребень находится в исландском секторе и ориентирован по оси Азоры — Исландия — Гренландия, а над европейской территорией России по оси Новая Земля — Уральский хребет локализована высотная ложбина [23]. Типичная для такой формы ОЦА картина по срочным картам барической топографии 500 гПа (рис. 3 а) демонстрирует интенсивные северные воздушные переносы над районами БМ и Скандинавии.

При восточной форме циркуляции формы Е имеет место противоположная локализация высотных ложбин и гребней. Высотный гребень расположен над западом России и выходит на акваторию БМ, тогда как глубокая ложбина занимает западную Европу. Направление воздушных переносов при этом также противоположно циркуляции формы С (рис. 3 б): при форме Е усилены южные потоки, которые обеспечивают поступление теплого воздуха на акваторию БМ. Как

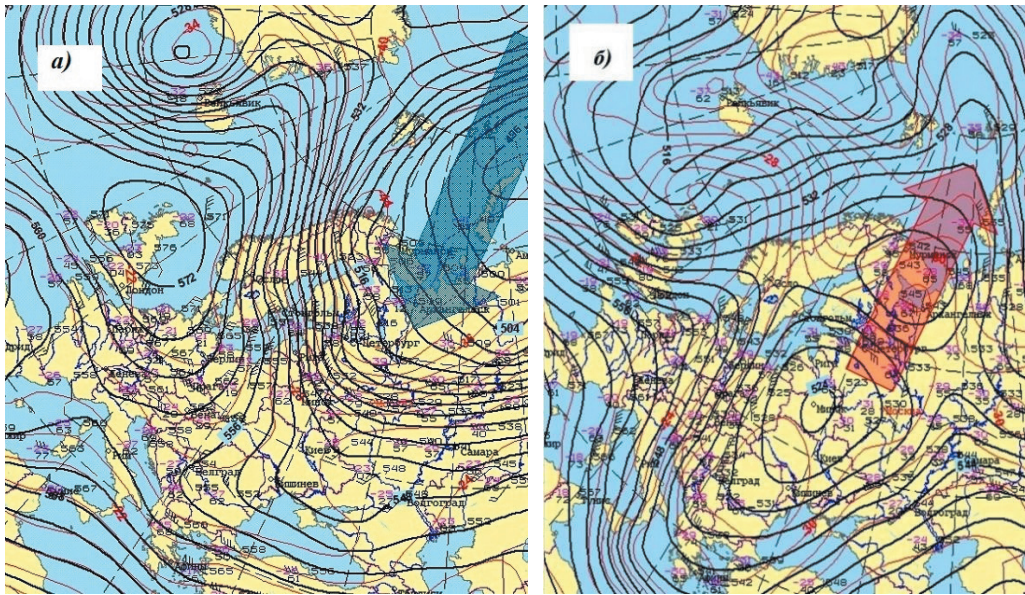


Рис. 3. Пространственное распределение геопотенциала на уровне 500 Гпа при меридиональной циркуляции атмосферы типа С (а) и Е (б).

Стрелками указаны воздушные переносы тепла (красная) и холода (синяя).

Fig. 3. Spatial distribution of geopotential at 500 hPa level under meridional circulation of atmosphere of type C (a) and E (b).

Arrows indicate air transport of heat (red) and cold (blue).

отмечается в работах [22, 26], при W- и E-формах над регионом Северной Атлантики наблюдается похожий зональный ветровой режим. Так, над акваторией БМ при форме Е фиксируется выраженный меридиональный перенос теплого воздуха на север. В этой фундаментальной особенности мы видим основную причину неэффективности использования индекса САК (как характеристики зонального переноса [32, 36]) для описания процессов формирования теплового режима в БМ, ибо северной границей влияния САК является область Исландской депрессии. Принципиальные различия воздушных переносов между типами атмосферной циркуляции Е и С в районах Норвежского и Баренцева морей ярко проявляются в полях приземной температуры воздуха, атмосферного давления, ветра, влажности, что в итоге определяет интенсивность потоков тепла между атмосферой и подстилающим морем, ярко выраженную в зимние сезоны [9, 31].

Степень влияния ОЦА на термохалинные и динамические процессы в море можно охарактеризовать с помощью следующих критериев:

- повторяемость доминирования формы циркуляции (количество дней за рассматриваемый временной интервал, когда наблюдается данная форма ОЦА);
- интенсивность, которая традиционно определяется как перенос массы воздуха геострофическим ветром над рассматриваемым районом в зональном и

меридиональном направлениях через горизонтальные градиенты давления в тропосфере. Классификация синоптических процессов Вангенгейма-Гирса представляется универсальным подходом к анализу и описанию метеорологических процессов в масштабах от суток (синоптический процесс), до десятков лет (синоптическая эпоха), что позволяет с ее помощью проследить формирование аномалий теплового режима БМ под влиянием атмосферных процессов для различных временных масштабов: от суток до десятилетий.

Влияние атмосферной циркуляции на сезонные и межгодовые вариации теплоотдачи в атмосфере

Теплоотдача в атмосферу является важнейшим фактором охлаждения атлантических вод в БМ [5, 6, 11, 23, 24]. В зимний сезон в условиях полярной ночи БМ практически не имеет прихода радиационного тепла, поэтому для зимнего сезона колебания температуры воды в деятельном слое определяются только балансом адвективного тепла Атлантических вод в Нордкапском течении (как приходной части) и теплоотдачи в атмосферу за счёт скрытого и явного потоков тепла (как расходной части в уравнении теплового баланса). Синоптическая изменчивость атмосферных процессов в этот период полностью определяет вариации теплоотдачи верхнего слоя вод [26, 31], а наибольшая сезонная и синоптическая изменчивость тепловых потоков в атмосферу концентрируется в западной части БМ. При этом, максимальная изменчивость потоков скрытого (LE) и явного тепла (P) тепла в атмосферу совпадает с зонами адвекции тепла атлантическими водами в районе центральной и южной ветвях Нордкапского течения в районе 71—73° с. ш., 20—30° в. д. [6, 7, 24]. Отметим, что процесс интенсивной адвекции тепла в БМ на фоне современного потепления достаточно хорошо изучен, а проблематика резких похолоданий и связанной с этим 2—5-годовой изменчивости исследована недостаточно.

Рассмотрим особенности процесса теплоотдачи в атмосферу для района формирования Мурманского течения вблизи м. Нордкап: 71—72° с.ш., 24—25° в.д., океанологические станции 1—3 разреза №3. Сопоставим многолетнюю динамику повторяемости формы С в зимний период и годовые аномалии температуры воды на Кольском меридиане ($TB_{\text{Кола}}$) за период с 1935 г. по 2015 г. Нетрудно заметить (рис. 4) высокое совпадение экстремумов межгодовой изменчивости этих временных рядов. Совместная вероятность экстремального максимума формы С и минимума $TB_{\text{Кола}}$ достигает 82 %. Аномально холодные годы в БМ и на Кольском меридиане (1941 г., 1942 г., 1947 г., 1963 г., 1966 г., 1987 г., 1997 г.) совпадают с максимумами повторяемости формы С зимой. Это можно объяснить крайне интенсивным охлаждением атлантических вод Мурманского течения в БМ в слое 0—200 м на участке от западной границы на 20° в.д. до Кольского меридиана на 33° в.д. в результате сильной теплоотдачи в атмосферу под влиянием полярных вторжений.

Для оценки интенсивности тёплых и холодных меридиональных вторжений в атмосферу на запад БМ воспользуемся меридиональным индексом Каца [32],

рассчитанным по среднемесячным данным архива [28] в зимний период с 1935 г. по 2015 г. для поверхности 500 Гпа в зоне 70—75° с.ш., 20—40° в.д. Он рассчитывался по среднемесячным данным архива [28] как градиент давления на карте геопотенциала 500 гПа между параллелями, ограничивающими рассматриваемую область. Его межгодовая изменчивость хорошо согласуется с повторяемостью меридиональной циркуляции формы С в зимний период: совпадают по времени практически все экстремумы (рис. 4), при чем коэффициент парной корреляции этих рядов составляет $r = 0,87$. Такая же высокая корреляция индекса Каца и годовых аномалий температуры воды на Кольском меридиане — $r = 0,79$ (рис. 4). Отметим чрезвычайно высокую повторяемость формы С в периоды с 1941 г. по 1942 г. и с 1963 г. по 1966 г. в сочетании с синхронными интенсивными полярными вторжениями (минимумами индекса Каца), которая совпала по времени с экстремальными минимумами температуры воды на Кольском меридиане.

При этом положительные значения рассчитанного меридионального индекса Каца, характеризующие меридиональный поток тёплого воздуха умеренных

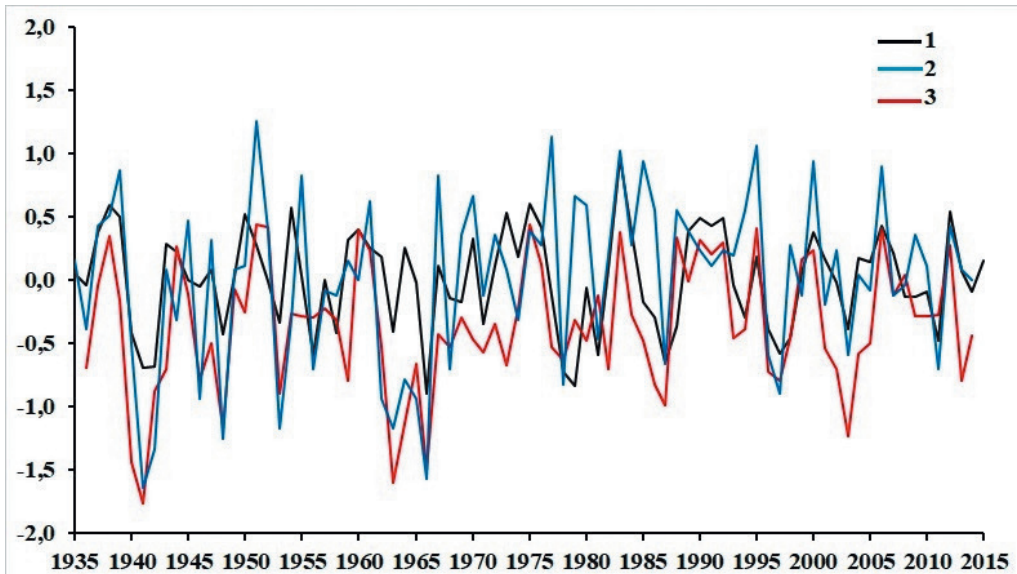


Рис. 4. Межгодовой ход повторяемости меридиональной циркуляции формы С (2) в зимний период и нормированный меридиональный индекс Каца (3) в зимний период в сравнении с аномалией годовой температуры воды в слое 0–200 м (1) на Кольском меридиане. Ряды стандартизированы, удалён тренд. Значения рядов 2 и 3 приведены с обратным знаком.

Fig. 4. Interannual course of the recurrence of the meridional circulation of type C (2) in the winter period and the normalized meridional Kats index (3) in the winter period in comparison with the anomaly of the annual anomalies of water temperature in the 0–200 m layer along the Kola meridian water temperature (1). The series are standardized, the long-period trend is removed. The values of rows 2 and 3 are given with the opposite sign.

широт, совпадают по времени с положительными аномалиями повторяемости меридиональной циркуляции формы Е. Рассчитанная корреляция межгодовых колебаний меридионального индекса Каца с повторяемостью формы Е в зимний период составила $r = 0,63$, а с аномалиями годовой температуры воды на Кольском меридиане $r = 0,71$. Таким образом, интенсификацию меридионального переноса на акваторию моря теплых воздушных масс умеренных широт при доминировании циркуляции типа ОЦА Е можно интерпретировать как фактор значимого уменьшения охлаждения атлантических вод на западе БМ и снижения теплоотдачи в атмосферу, что приводит к формированию положительных годовых аномалий температуры воды на Кольском меридиане.

Для периода 1940–х гг. нами проведён анализ взаимосвязей форм атмосферной циркуляции и формирования аномалий температуры воды поверхностного слоя на юго-западе БМ в пентадном, декадном, месячном и сезонном осреднении [31]. Было показано, что крупная годовая отрицательная аномалия температуры воды деятельного слоя на западе БМ представляет собой накопленный эффект, формирующийся вследствие интенсивных короткопериодных вторжений полярного воздуха с высокой повторяемостью в течение зимнего сезона. Так, в зимний сезон 1941 г. наблюдалась чрезвычайно высокая повторяемость меридиональной циркуляции формы С, которая сопровождалась крайне интенсивными заточками полярного воздуха на акваторию БМ. По данным береговых метеостанций, суточная аномалия температуры приземного воздуха при этом достигала -16°C и сопровождалась систематическим усилением северного ветра до 18 м/с. В результате интенсивного теплового и динамического воздействия на верхний слой океана резко выросли потоки тепла в атмосферу с поверхности воды. По нашим оценкам, среднесуточные значения суммарного потока тепла $P+LE$ неоднократно достигали $450\text{--}550\text{ Вт/м}^2$. Одновременно температура воды верхнего слоя скачкообразно снижалась за 5 дней на $0,7\text{--}1,1^{\circ}\text{C}$. Подобные аномальные потоки тепла в атмосферу встречаются нередко при интенсивных полярных вторжениях. Например, повторяющиеся вторжения холодного воздуха зимой 2002 г. даже в месячном масштабе осреднения формировали тепловые потоки до 500 Вт/м^2 [2], что обусловило резкое снижение температуры воды и вызвало чрезвычайно сильную неустойчивость в атмосфере с последующим развитием над водной поверхностью мезомасштабного полярного циклона.

Аналогичная экстремальность теплоотдачи фиксируется и в другие аномально холодные годы с преобладанием затора полярного воздуха. Анализируя потоки тепла в 1966 г., мы наблюдаем зимние максимумы суточного потока явного тепла до 360 Вт/м^2 и скрытого тепла до 290 Вт/м^2 , что в 3–5 раз превышает норму потоков в этом регионе. В среднемесячном осреднении поток явного тепла в январе 1966 г. составил 170 Вт/м^2 , а скрытого тепла — 140 Вт/м^2 , что почти на треть выше среднемноголетней нормы.

Подчеркнём, что повышение теплоотдачи в атмосферу зимой формируется только в периоды полярных вторжений при доминировании меридиональной циркуляции формы С вследствие экстремально высоких потоков тепла с поверхности свободной ото льда западной части БМ. Сравнивая годовой ход потоков

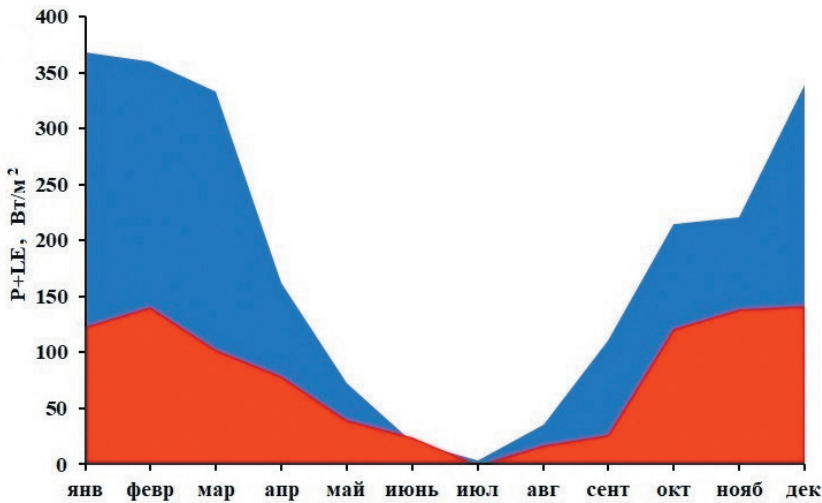


Рис. 5. Годовой ход суммарных ($P+LE$) потоков тепла ($\text{Вт}/\text{м}^2$) на юго-западе БМ в аномально теплый год (красный) и аномально холодный год (синий).

Fig. 5. Annual course of total ($P+LE$) heat fluxes (W/m^2) in the south-west of the Barents Sea in an abnormally warm year (red) and an abnormally cold year (blue).

тепла в аномально тёплый 1995 г. и аномально холодный 1997 г. (рис. 5), можно увидеть значимость зимних месяцев в формировании аномалий годового бюджета тепла в БМ: в аномально холодные годы поток тепла зимой в атмосферу более, чем в 2 раза превышает значения, характерные для теплого года. Наблюдается высокая межгодовая изменчивость потоков тепла в зимний сезон (амплитуда среднемесячных оценок превышает $200 \text{ Вт}/\text{м}^2$), которая в 5—7 раз выше их летней изменчивости.

Анализ межгодовой изменчивости зимней теплоотдачи в период с 1935 г. по 2015 г. показывает (рис. 6):

- синхронность максимумов среднесезонных потоков явного и скрытого тепла с высокой повторяемостью формы С (парная корреляция рядов составляет 0,81 и 0,74, соответственно), а также синхронность минимумов потоков явного и скрытого тепла с высокой повторяемостью формы Е (корреляция $-0,68$ и $-0,63$, соответственно);

- межгодовая изменчивость потерь тепла в атмосферу в БМ формируется почти полностью в результате зимних аномалий потоков тепла. Вклад средних зимних (декабрь—март) вариаций потоков тепла в формирование вариаций годовых составляет для явного тепла (78 %), для скрытого тепла (71 %);

- максимумы суммарной теплоотдачи зимой в аномально холодные годы обусловлен резким увеличением потока явного тепла (на 50—60 %) и его 2—3-кратным преобладанием над скрытым потоком, который растёт всего на 17 % от многолетней нормы.

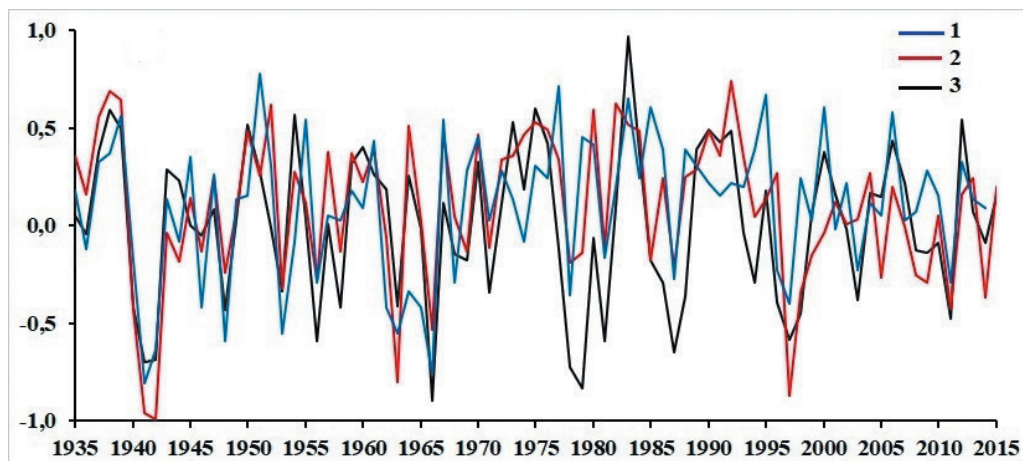


Рис. 6. Межгодовой ход повторяемости меридиональной атмосферной циркуляции формы С (1), средних суммарных ($P+LE$) потоков тепла (Вт/м^2) в атмосферу в зимний сезон в юго-западной части Баренцева моря (2) и аномалии температуры воды слоя 0—200 м на разрезе Кольский меридиан (3). Ряды стандартизованы. Значения рядов 1 и 32 приведены с обратным знаком.

Fig. 6. Interannual variation of the recurrence of the meridional atmospheric circulation of type C (1), average total ($P+LE$) heat fluxes (W/m^2) into the atmosphere during the winter season in the southwestern part of the Barents Sea (2), and anomalies of water temperature in the 0—200 m layer along the Kola meridian (3). The series are standardized.

The values of rows 1 and 2 are given with the opposite sign.

Полученные результаты позволяют заключить, что интенсивность меридиональных заточков тепла или холода в атмосфере в зимний период над БМ однозначно обусловлена типом меридиональной атмосферной циркуляции, значением индексов меридионального переноса тепла и холода в тропосфере, что определяет интенсивность теплоотдачи в атмосферу и формирование крупных аномалий температуры воды БМ. Усиление теплоотдачи в атмосферу вызывает охлаждение поверхностного слоя моря, что приводит к снижению вертикальной устойчивости воды и усилению зимней конвекции.

Влияние атмосферной циркуляции на сезонные и межгодовые вариации адвекции тепла

Адвекция тепла в БМ осуществляется водами атлантического происхождения, пересекающими западную границу моря в потоке Нордкапского и Норвежского прибрежного течений. Южная ветвь Нордкапского течения переносит теплые атлантические воды на восток параллельно берегу, следуя рельефу, отклоняется к югу и близко подходит к побережью Норвегии в районе м. Нордкап. Взаимодействуя здесь с распресненными водами Прибрежного течения, она

формирует основной поток Мурманского течения (рис. 1). Именно Мурманское течение и определяет средние характеристики воды на Кольском меридиане [24].

На своём пути от BSO до Кольского меридиана атлантические воды интенсивно трансформируются: теряют тепло, главным образом, за счёт теплоотдачи в атмосферу и снижают солёность в результате смешения с водами прибрежного течения. Такая средняя климатическая картина оказывается чрезвычайно изменчивой в синоптическом, сезонном и годовом осреднении. Однако достоверно проанализировать эту изменчивость удалось совсем недавно на основе продолжительных наблюдений за течениями на западной границе БМ, выполненных в последние 30 лет [33, 35]. Длительные инструментальные наблюдения течений и температуры воды на 9 станциях разреза BSO с дискретностью 20 мин позволили впервые достоверно оценить вариации и средние характеристики тепло- и массопереноса атлантическом вод в БМ в различных масштабах времени. Наблюдения показали, что генеральный перенос вод на разрезе происходит в восточном направлении. Однако в отдельные периоды времени продолжительностью от 1 до 19 дней течение на большей площади разреза может быть направлено в противоположную сторону и указывать на преобладающий отток вод из БМ. Смена направления течений происходит быстро, в течение нескольких часов практически синхронно во всей площади разреза до дна. Эти изменения всегда сопровождаются изменениями в поле приземного атмосферного давления и ветра над западом БМ.

Характер атмосферных ситуаций, которые формируют экстремальные колебания притока атлантических вод в БМ, можно интерпретировать в терминах классификации Вангенгейма-Гирса. Мы провели такое сравнение ежедневных данных этой типизации и наблюдений течений [34, 35]. Обобщенный результат в виде схем потоков течений на разрезе BSO для типовых форм ОЦА представлен на рис. 7. Наши оценки показывают, что существенное ослабление притока атлантических вод в БМ происходит синхронно с блокингом зонального атмосферного переноса, развитием высотного барического гребня над Норвежским морем,

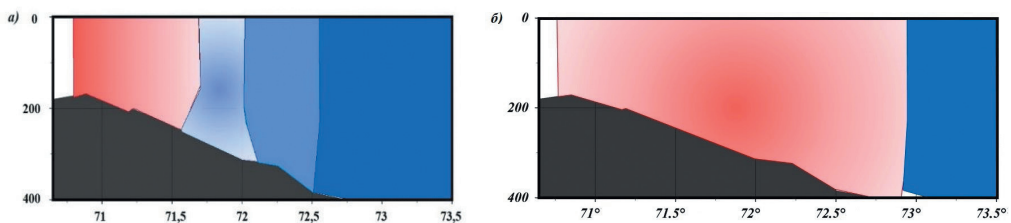


Рис. 7. Схемы пространственного распределения потоков воды на разрезе BSO для форм циркуляции атмосферы форм С (а) и Е (б).

Приток в Баренцево море — красного цвета,
отток из Баренцева в Норвежское море — синего цвета.

Fig. 7. Schemes of spatial distribution of water flows on the BSO section for atmospheric circulation forms of type C (a) and E (b).

Inflow to the Barents Sea — red, outflow from the Barents to the Norwegian Sea — blue.

формированием меридиональной атмосферной циркуляции формы С и усилением северных ветров в зоне BSO и на западе БМ. Вероятность таких совместных событий в исследуемых данных составила 93 %, а средняя продолжительность — 9 суток. И, наоборот, усиление притока атлантических вод в БМ однозначно синхронизировано с развитием синоптических процессов зонального типа W, (корреляция рядов повторяемости формы циркуляции W и среднесуточной зональной компоненты течения в BSO составила $r = 0,67$) или восточного типа E (корреляция рядов $r = 0,74$). В эти периоды преобладает ветровой перенос с юга и юго-запада, а распределение приземного давления характеризуется выраженной ложбиной Исландского минимума. Такие режимы повышенного притока в БМ могут сохраняться на период от 1 до 3 недель и связаны с интенсивностью развития Исландского минимума.

Подавляющая доля изменчивости скорости и направления течений сосредоточена в короткопериодной части спектра с периодами колебаний от 1 до 16 суток. Вариации суточных значений скорости течений более, чем в 5 раз превышают вариации среднемесячных скоростей и почти в 8 раз больше сезонных и межгодовых. Причём, в аномально тёплые годы, когда в зимний сезон преобладала атмосферная циркуляция формы E, происходит смещение максимума рассчитанной кривой вероятностей в сторону положительных значений и соответствующая асимметрия распределения вероятностей скорости течения. В холодные годы с преобладанием формы С возникает вторичный максимум распределения вероятностей, характеризующий высокую повторяемость оттока из БМ.

Межгодовая изменчивость скоростей течений формируется в наибольшей степени за счёт вариаций направления течения в зимние сезоны: средний приток атлантических вод в зимний период почти в 2 раза больше летнего и равен 1,7 Sv [35]. Но в аномально холодные годы при доминировании формы С и при сильных ветрах северной четверти (1997 г.) приток в зимний период падает до 0,9 Sv. В аномально тёплые годы при доминировании формы E и усилении южных ветров (1999 г.) средний приток в зимний сезон усиливается до 3,6 Sv.

Относительные вклады скорости течений и изменчивости температуры воды в формирование вариаций адвекции тепла атлантических вод в БМ неоднократно оценивались ранее [11, 36]. Однако полученные результаты весьма неоднозначны в силу недостатка фактических данных наблюдений за течениями и температурой. На основе материалов инструментальных наблюдений [29, 35] за период с 1997 г. по 2013 г. мы сделали подобные оценки на разрезе BSO в слое 100—200 м для различных масштабов осреднения по времени. В результате расчетов выявлено:

- при суточном осреднении вклад скорости течения в дисперсию потока тепла достигает 72 % (корреляция суточных аномалий скорости и потока тепла $r = 0,86$), причем ее вклад превосходит роль температурных вариаций в 3 раза;
- при сезонном осреднении (зима) вклады скорости и температуры в дисперсию адвекции тепла примерно равнозначны (соответственно 57 % и 43 %).

Для оценки межгодовых вариаций адвекции тепла в BSO были использованы результаты работы [11], в которой выполнено моделирование адвекции тепла за период с 1948 г. по 2006 г. с помощью региональной гидродинамической модели.

Модель учитывает короткопериодные вариации дрейфового и геострофического переноса через разрез BSO под влиянием суточных вариаций полей ветра и приземного атмосферного давления, которые показали хорошее совпадение с нашими оценками притока тепла по натурным данным инструментальных наблюдений за период с 1997 г. по 2001 г. [35]. Суммарный приток тепла через BSO в зимний период составляет до 70 % годового притока и потому играет ключевую роль в формировании климатических колебаний в БМ [4, 5, 24, 31]. Межгодовые вариации зимнего потока тепла через BSO в 3—5 раз превосходят его летнюю изменчивость, поэтому обоснованно полагаются надежным индикатором теплового состояния деятельного слоя БМ [34].

Приток тепла за счет атлантических вод в БМ оказывается в значительной степени зависимым от типа доминирующей региональной меридиональной атмосферной циркуляции. Сопряженность межгодовых колебаний притока тепла и характеристик атмосферной циркуляции над БМ наглядно демонстрирует рис. 8. Этот вывод подтверждается высокой корреляцией рядов межгодовых аномалий зимней (декабрь—март) адвекции тепла через BSO с вариациями меридиональной атмосферной циркуляции: повторяемостью формы С ($r = -0,79$), формы Е ($r = 0,71$) и меридиональным индексом Каца ($r = 0,84$).

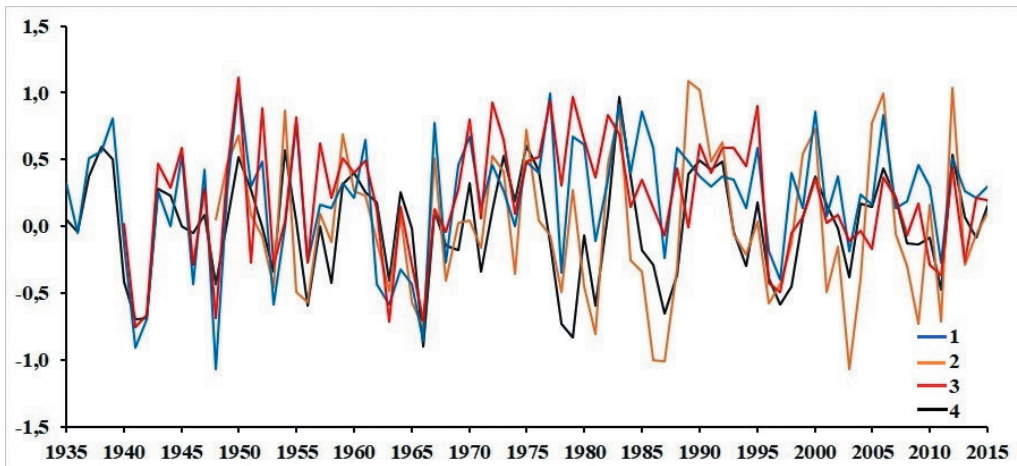


Рис. 8. Межгодовой ход повторяемости меридиональной атмосферной циркуляции формы С (1) в сравнении с притоком тепла через разрез BSO в зимний сезон (2), потоком тепла в атмосферу (3) и годовыми аномалиями температуры воды в слое 0—200 м на разрезе Кольский меридиан (4).

Ряды стандартизированы, удалён климатический тренд.

Fig. 8. Interannual variability of the C-type meridional atmospheric circulation (1) compared with the heat influx through the BSO section during the winter season (2), the heat flux into the atmosphere (3), and annual anomalies of water temperature in the 0—200 m layer along the Kola meridian (4).

The series have been standardized and the climate trend has been removed.

Можно с уверенностью утверждать, что в годы максимального развития меридиональной циркуляции атмосферы с интенсивным притоком полярного воздуха чаще всего наблюдается минимум зимнего притока тепла в БМ, что неизбежно формирует отрицательную аномалию годовой температуры деятельного слоя на Кольском меридиане. Совместная вероятность таких событий за рассматриваемый период времени составила 81 %.

Проведённый анализ позволяет заключить, что тип циркуляции атмосферы над БМ, преобладающий в холодную часть года, следует считать главным фактором формирования синоптических, сезонных, межгодовых вариаций скорости течений и температуры воды в BSO, которые формируют изменчивость адвекции тепла атлантических вод в БМ.

Влияние атмосферной циркуляции на межгодовые вариации параметров деятельного слоя БМ

Реакцию деятельного слоя БМ на вариации атмосферной циркуляции можно проследить на основе анализа пространственного распределения температуры и солёности на разрезе №3. В теплые годы при доминировании в зимние сезоны меридиональной циркуляции формы Е с выносом теплых воздушных масс и усиленной адвекцией тепла через BSO на разрезе №3 наблюдается устойчивая стратификация вод с выраженными ядрами Нордкапского и Норвежского прибрежного течений (рис. 9). Причем южнее 72,5° с.ш. устойчивость прослеживается в распределении как температуры, так и солёности с глубиной. Причина тому — усиление прибрежного Норвежского течения, переносящего в БМ теплые и распресненные воды с пониженной плотностью, которые выклиниваются в поверхностном слое 0—50 м до широты 72,5° с.ш., накрывая теплые атлантические воды Нордкапского течения, поэтому здесь снижена относительно нормы интенсивность теплоотдачи в атмосферу и, соответственно, не развито зимнее конвективное перемешивание. Оно развивается существенно восточнее и явно прослеживается только на долготе 31° в.д. (разрез Варде-N), где воды Мурманского течения уже отходят от побережья Норвегии к северу. В такие годы наблюдается общая положительная аномалия температуры воды в зимний сезон, что согласуется с данными наблюдений на Кольском меридиане.

Устойчивая в целом по стратификации картина меняется радикально в годы подавляющего развития зимой формы С, что подтверждается данными натурных наблюдений и результатами моделирования [11, 12, 26, 33]. Интенсивное выхолаживание верхнего слоя моря вследствие высокой теплоотдачи в атмосферу в период полярного вторжения холодного воздуха является спусковым механизмом начала глубокой зимней конвекции (рис. 9). Полярное вторжение сопровождается смещением глубоких циклонов из арктической зоны на акваторию Баренцева моря. Соответствующее штормовое усиление ветра (до 30 м/с) и резкое похолодание (на 10 °C) обуславливает скачкообразный рост суммарного потока тепла в атмосферу (со 100 Вт/м² до 300 Вт/м² в месячном осреднении), что приводит к резкому охлаждению верхнего слоя вод атлантического происхождения на 1—2 °C

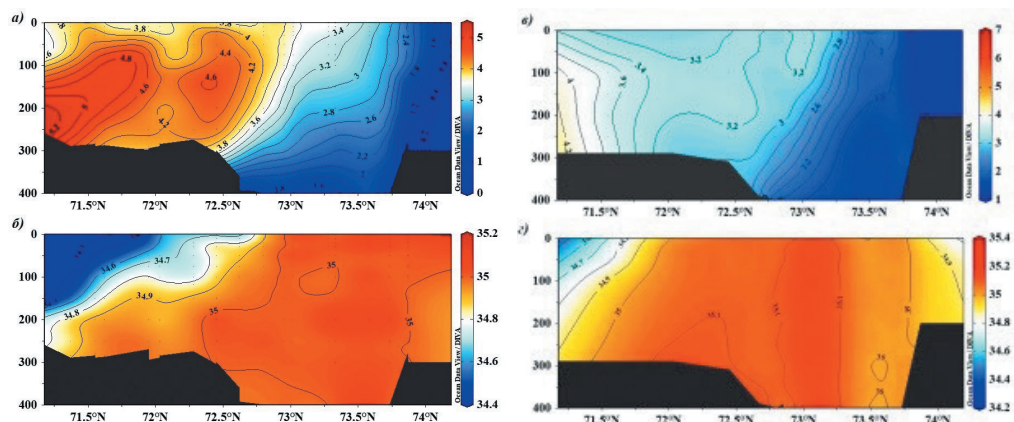


Рис. 9. Среднее распределение температуры и солёности на разрезе №3 (м. Нордкап — о. Медвежий) в зимний период: *а, б* — температура и солёность в теплый год; *в, г* — температура и солёность в холодный год.

Fig. 9. Average distribution of temperature and salinity in Section No. 3 (North Cape-Bear Island) in winter: *a, b* — temperature and salinity in a warm year; *c, d* — temperature and salinity in a cold year.

за сутки. Поверхностный слой теплых распресненных вод прибрежного течения полностью размывается, в результате формируется неустойчивость, вызывающая многократный рост теплоотдачи в атмосферу в период полярного вторжения [12].

Прибрежный фронт в районе м. Нордкап смещается к югу на 100—150 км на границу шельфа и фьордов с глубинами 100—200 м. Подобные вариации прибрежного фронта — это прямое следствие интенсивного динамического воздействия меридиональных атмосферных процессов. Сильные штормовые ветра формируют потоки дрейфовых и градиентных течений, которые тормозят зональный перенос вод на восток и смещают прибрежный фронт на юг до 71,5° с.ш. Атлантические воды Нордкапского течения в такой ситуации подвергаются интенсивной тепловой и динамической трансформации на фоне повышения турбулентности деятельного слоя и скачкообразного повышения неустойчивости вод вследствие высокой теплоотдачи в атмосферу. Это провоцирует интенсивную конвекцию, которая при непрерывном и продолжительном (до 20 суток) полярном вторжении проникает до 200—300 м, практически достигая дна. Дальнейшее охлаждение воды всего деятельного слоя будет продолжаться при сохранении интенсивной теплоотдачи в атмосферу. Такая ситуация представляется вполне возможной в случае длительного и неоднократно повторяющегося в зимний сезон вторжения полярного воздуха при доминировании формы С. Так формируется аномальное переохлаждение всего деятельного слоя с выраженной отрицательной аномалией температуры воды в сезонном и годовом масштабе осреднения.

В зимние сезоны, когда преобладает меридиональная циркуляция атмосферы формы С, средневзвешенная температура атлантических вод Нордкапского

течения в слое 0—200 м на входе в БМ уже может быть на 0,3—0,5 °C ниже многолетней нормы [24]. Отрицательная аномалия адвекции тепла обусловлена переохлаждением атлантических вод Норвежского атлантического течения. Это происходит в аномально холодные годы, когда над акваторией Норвежского моря доминируют полярные вторжения, которые усиливают теплоотдачу в атмосферу [9, 25]. В условиях интенсивных зимних вторжений полярного воздуха атлантические воды Нордкапского течения переохлаждены уже на долготе 24° в.д. и формируют Мурманское течение, будучи аномально холодными и практически полностью перемешанными до дна. Далее воды Мурманского течения, проходя в течение 2—3 месяцев от разреза №3 до Кольского меридиана, в годы преобладания интенсивных полярных вторжений теряют дополнительно относительно нормы ещё 1,0 °C во всем слое 0—200 м.

Могут ли фиксируемые аномалии теплообмена с атмосферой объяснить наблюдаемые межгодовые вариации температуры деятельного слоя БМ? В качестве первого приближения можно оценить воздействие вариаций теплоотдачи в атмосферу на конвективное перемешивание деятельного слоя в тёплый 1940 г. и холодный 1941 г., полагая, что океан пассивно реагирует на аномальное воздействие. Оценки параметров конвекции по методу Зубова показали, что в аномально тёплый год с преобладанием залива тёплых воздушных масс в условиях формы Е, средняя теплоотдача зимой снижена в среднем на 70 Вт/м², а конвекция за 100 дней проникает на глубину 70 м и охлаждает перемешанный слой на 0,4 °C. В аномально холодный год, когда на фоне высокой повторяемости формы С доминируют полярные вторжения, суммарная месячная теплоотдача повышена относительно многолетней нормы на 105 Вт/м² и конвекция за 100 дней охватит слой 200 м с понижением температуры слоя на 0,9 °C. Именно этот масштаб изменений и фиксируется наблюдениями в аномально тёплые и холодные годы исследуемого периода, когда зимняя повторяемость формы Е или формы С превышает климатическую норму на 30—40 суток. Сделанные оценки объясняют формирование межгодовой изменчивости теплосодержания деятельного слоя на западе БМ под влиянием региональных особенностей зимней атмосферной циркуляции.

Заключение

Результатами статистического анализа доказывается, что межгодовая изменчивость теплового режима деятельного слоя БМ находится под прямым влиянием вариаций региональной атмосферной циркуляции. Форма атмосферной циркуляции, преобладающая в зимний период над БМ, представляется ключевым управляющим механизмом, определяющим синхронные вариации адвекции тепла в Нордкапском течении и теплоотдачи в атмосферу на западе БМ, которые формируют сезонные и годовые аномалии температуры воды слоя 0—200 м на Кольском меридиане.

Применение типизации Вангенгейма-Гирса к анализу особенностей региональной атмосферной циркуляции эффективно описывает синоптические процессы над западом Баренцева моря. При смене типа циркуляции атмосферы,

преобладающего над Баренцевом море зимой, происходит синхронный скачок в межгодовом ходе океанической адвекции и теплоотдачи в атмосферу, сезонные и межгодовые вариации которых при этом превышают 2σ , что позволяет говорить о фактической смене теплового режима деятельного слоя на западе БМ.

При доминировании холодных полярных атмосферных вторжений, характерных для меридиональной циркуляции формы С, БМ переходит зимой в арктический режим, а при доминировании притока тёплого воздуха из умеренных широт в периоды атмосферной циркуляции формы Е — становится водоёмом с изменчивостью подобной умеренным морям. При этом, от 50 % до 70 % приходящего океанического тепла отдается в атмосферу в акватории БМ [10, 12, 36, 41]. Синхронные межгодовые колебания адвекции и теплоотдачи под влиянием меридиональных форм региональной атмосферной циркуляции формируют экстремальные колебания теплового режима БМ, которые напрямую влияют на климат арктического бассейна.

Полученные оценки взаимосвязей атмосферных процессов и теплового режима БМ имеют очевидную практическую ценность в настоящее время, когда короткопериодные межгодовые вариации температуры воды на разрезе «Кольский меридиан», носят в значительной степени экстремальный характер. Соответствующая изменчивость процессов атмосферной циркуляции возрастает столь интенсивно, что в ближайшее десятилетие общая циркуляция атмосферы над северной Атлантикой и СЕБ может претерпеть коренные изменения [14, 22, 36].

Наступившее десятилетие становится эпохой преобладания меридиональной циркуляции формы С с высокой повторяемостью полярных вторжений на акваторию БМ. Анализ недавних изменений атмосферной циркуляции в Арктике указывает на переход к меридиональной структуре потоков, что может привести к формированию стационарных погодных условий (блокирующих явлений), сопровождающихся экстремальными погодными явлениями.

Список литературы

1. Adlandsvik B., Loeng H. A study of the climatic system in the Barents Sea // *Polar Research*. 1991. Vol. 10. P. 45—49. doi: 10.3402/polar.v10i1.6726.
2. Иванов В. В., Архипкин В. С., Лемешко Е. М. и др. Изменение гидрологических условий в Баренцевом море как индикатор климатических трендов в Евразийской Арктике в XXI веке // *Вестник Московского университета. Сер. 5. Геогр.* 2022. № 1. С. 13—25. doi: 10.25624/0579-9414-2022-1-13-25.
3. Barnes E. A., Slingo J., Woollings T. A methodology for the comparison of blocking climatology across indices, models and climate scenarios // *Clim Dyn.* 2012. Vol. 38. No. 11—12. P. 2467—2481. doi: 10.1007/s00382-011-1243-6.
4. Smedsrud L. H. et al. The role of the Barents Sea in the Arctic climate system // *Rev. Geophys.* 2013. Vol. 51. P. 415—449. doi: 10.1002/rog.20017.
5. Smedsrud L. H., Muilwijk M., Brakstad A. et al. Nordic Seas heat loss, Atlantic inflow, and Arctic sea ice cover over the last century // *Rev. Geophys.* 2022. Vol. 60. P. 1—36. doi:10.1029/2020rg000725.
6. Адров Н. М. Природа энерговлагообмена водных и воздушных масс Баренцева моря. Мурманск: МГТУ, 2012. 64 с.
7. Latonin M. M., Bashmachnikov I. L., Semenov V. A. Enhanced wintertime convergence of atmospheric and oceanic heat transports in the Barents Sea region under present climate warming // *Russ. J. Earth Sci.* 2025. Vol. 25. P. 1—11. doi: 10.2205/2025ES000967.

8. Алексеев Г. В., Харланенкова Н. Е., Вязилова А. Е. Арктическое усиление: роль междуширотного обмена в атмосфере // *Фундаментальная и прикладная климатология*. 2023. Т. 9, № 1. С. 13—32. DOI: 10.21513/2410-8758-2023-1-13-32.
9. Гирс А. А. Многолетние колебания атмосферной циркуляции и долгосрочные метеорологические прогнозы. Л.: Гидрометеиздат, 1971. 280 с.
10. Алексеев Г. В., Кузмина С. И., Уразильдеева А. В. и др. Влияние атмосферных переносов тепла и влаги на усиление потепления в Арктике в зимний период // *Фундаментальная и прикладная климатология*. 2016. Т. 1. С. 43—63. doi: 10.21513/2410-8758-2016-1-43-63.
11. Sando A. B., Nilsen J. E., Gao Y. Importance of heat transport and local air-sea heat fluxes for Barents Sea climate variability // *J. Geophys. Res.* 2010. Vol. 115. No. C7. doi: 10.1029/2009JC005884.
12. Дианский Н. А., Панасенкова И. И., Фомин В. В. Исследование отклика верхнего слоя Баренцева моря на прохождение интенсивного полярного циклона в начале января 1975 года // *Мор. гидрофиз. журн.* 2019. Т. 35. № 6. С. 530—548. doi: 10.22449/0233-7584-2019-6-530-548.
13. Hakkinen S., Rhines P. B., Worthen D. L. Atmospheric blocking and Atlantic multidecadal ocean variability // *Science*. 2011. Vol. 334. No. 6056. P. 655—659. doi: 10.1126/science.1205127.
14. Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации / под ред. В. М. Катцова. СПб: Научные технологии, 2022. 676 с.
15. Sousa P. M., Trigo R. M., Barriopedro D., Soares P. M., Santos J. A. European temperature responses to blocking and ridge regional patterns // *Clim Dyn.* 2018. Vol. 50, No. 1—2. P. 457—477. doi: 10.1007/s00382-017-3620-2.
16. Brunner L., Schaller N., Anstey J. et al. Dependence of present and future European temperature extremes on the location of atmospheric blocking // *Geophys. Res. Lett.* 2018. Vol. 45. P. 6311—6320. doi: 10.1029/2018GL079509.
17. Sillmann J., Croci-Maspoli M., Kallache M. et al. Extreme cold winter temperatures in Europe under the influence of North Atlantic atmospheric blocking // *J. Clim.* 2011. Vol. 24. No. 22. P. 5899—5913. doi: 10.1175/2011JCLI4126.1.
18. Tyrlis E., Hoskins B. J. Aspects of a Northern Hemisphere atmospheric blocking climatology // *J. Atmos. Sci.* 2008. Vol. 65. P. 1638—1652. doi: 10.1175/2007JAS2448.1.
19. Woollings T., Barriopedro D., Methven J. Blocking and its response to climate change // *Curr. Clim. Change Rep.* 2018. Vol. 4. P. 287—300. doi: 10.1007/s40641-018-0108-z.
20. Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Часть 1. М., 2014. 58 с.
21. Small D., Atallah E. H., Gyakum J. R. An objectively determined blocking index and its northern hemisphere climatology // *J. Clim.* 2014. Vol. 27. P. 2948—2970. doi: 10.1175/JCLI-D-13-00162.1.
22. Дмитриева А. А., Дубравина В. Ф., Белязо В. А. Атмосферные процессы Северного полушария (1891—2018 гг.), их классификация и использование. СПб.: «СУПЕР Издательство», 2018. 306 с.
23. Кондратович К. В. Классификации макрометеорологических процессов и их использование для учёта воздействия атмосферы на гидрологический режим // *Труды ЛГМИ*. 1976. Вып. 58. С. 83—96.
24. Бойцов В. Д. Изменчивость температуры воды Баренцева моря и её прогнозирование. Мурманск: Изд-во ПИНРО, 2006. 292 с.
25. Алексеев Г. В., Глок Н. И., Смирнов А. В. и др. Влияние Северной Атлантики на климатические изменения в Баренцевом море и их предсказуемость // *Метеорология и гидрология*. 2016. № 7. С. 38—56.
26. Гирс А. А. Учёт развития макросиноптических процессов при изучении причин изменения фоновых характеристик гидросферы // *Труды ЛГМИ*. 1970. Вып. 32. С. 145—169.
27. Семенов В. А. Современные исследования климата Арктики: прогресс, смена концепций, актуальные задачи // *Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана*. 2021. Т. 57. № 1. С. 21—33. doi: 10.31857/S0002351521010119.
28. National Centers for Environmental Information. Электронный ресурс. URL: <https://www.ncei.noaa.gov/products/world-ocean-database-1>. Дата обращения 22.02.2021.
29. OpenDat NODC. Электронный ресурс. URL: <https://opendap1.nodc.no/thredds/catalog/physics/Mooring/BSO/catalog.html/> Дата обращения 22.12.2024.

30. Бочков Ю. А. Ретроспектива температуры воды в слое 0—200 м на разрезе «Кольский меридиан» в Баренцевом море (1900—1981 гг.) // Экология и промысел донных рыб СевероЕвропейского бассейна. Мурманск: Издво ПИНРО, 1982. С. 113—122.
31. Угрюмов А. И., Вайновский П. А., Густоев Д. В. К вопросу о механизме формирования аномально низких значений температуры воды на разрезе «Кольский меридиан» в середине XX века // Арктика и инновации. 2026. Т. 4 (в печати).
32. Кац А. Л. Сезонные изменения общей циркуляции атмосферы и долгосрочные прогнозы погоды. Л.: Гидрометеиздат. 1960. 270 с.
33. Ingvaldsen R., Asplin L., Loeng H. Velocity field of the western entrance to the Barents Sea // J. Geophys. Res. 2004a. Vol. 109. C030201. P. C030201.1—C030201.12. doi: 10.1029/2003JC001813.
34. Ingvaldsen R., Asplin L., Loeng H. The seasonal cycle in the Atlantic transport to the Barents Sea during the years 1997—2001 // Cont. Shelf Res. 2004b. Vol. 24. P. 1015—1032. doi: 10.1016/j.csr.2004.01.009.
35. Электронный ресурс «NOAA 20th Century Reanalysis Project». URL: https://psl.noaa.gov/data/20thC_Rean/ Дата обращения 22.08.2025.
36. Ожигин В. К., Ившин В. А., Трофимов А. Г. и др. Воды Баренцева моря: структура, циркуляция, изменчивость. Мурманск: ПИНРО. 2016. 260 с.
37. Вайновский П. А., Густоев Д. В. Статистическое прогнозирование временных рядов. СПб.: РГГМУ. 2019. 240 с.
38. Малинин В. Н. Статистические методы анализа гидрометеорологической информации. Том 2. Анализ временных рядов и случайных полей. СПб.: РГГМУ. 2020. 196 с.
39. Hurrell J. W., Kushnir Y., Ottersen G., Visbeck M. The North Atlantic Oscillation: Climatic Significance and Environmental Impact. Washington, DC: American Geophysical Union, 2003. 298 p. doi: 10.1029/134GM01.
40. Lien V. S., Schlichtholz P., Skagseth O., Vikebø F. B. Winddriven Atlantic Water flow as a direct mode for reduced Barents Sea ice cover // J. Climate. 2017. Vol. 30. P. 803—812. doi: 10.1175/JCLI-D-16-0241.1.
41. Малинин В. Н., Вайновский П. А. Когда наступит безледный режим регионов Арктики? // Ученые записки РГГМУ. 2019. №56. С. 98—109. doi: 10.33933/2074-2762-2019-56-98-109.

References

1. Adlandsvik B., Loeng H. A study of the climatic system in the Barents Sea. *Polar Research*. 1991; (10): 45—49. doi: 10.3402/polar.v10i1.6726.
2. Ivanov V. V., Arkhipkin V. S., Lemesenko E. M. et al. Changes in hydrological conditions in the Barents Sea as an indicator of climate trends in the Eurasian Arctic in the 21st century. *Vestnik Mosk. un-ta. Ser. 5. Geogr. = Moscow University Bulletin. 5: Geography*. 2022; (1): (13—25). doi: 10.25624/0579-9414-2022-1-13-25. (in Russ.).
3. Barnes E. A., Slingo J., Woollings T. A methodology for the comparison of blocking climatology across indices, models and climate scenarios. *Climate Dynamics*. 2012; 38 (11—12): 2467—2481. doi: 10.1007/s00382-011-1243-6.
4. Smedsrud L. H. et al. The role of the Barents Sea in the Arctic climate system. *Reviews of Geophysics*. 2013; (51): 415—449. doi: 10.1002/rog.20017.
5. Smedsrud L. H., Muilwijk M., Brakstad A. et al. Nordic Seas heat loss, Atlantic inflow, and Arctic sea ice cover over the last century. *Reviews of Geophysics*. 2022; 60 (e2020RG000725): 1—36. DOI: 10.1029/2020rg000725.
6. Adrov N. M. *Priroda energovлагообмена vodnih I vozdushnih mass Barentseva morya = The nature of energy and moisture exchange between water and air masses in the Barents Sea*. Murmansk: MSTU, 2012: 64 p. (in Russ.).
7. Latonin M. M., Bashmachnikov I. L., Semenov V. A. Enhanced wintertime convergence of atmospheric and oceanic heat transports in the Barents Sea region under present climate warming. *Russian Journal of Earth Sciences*. 2025; (25): 1—11. doi: 10.2205/2025ES000967.
8. Alekseev G. V., Kharlanenkova N. E., Vyazilova A. E. Arctic amplification: the role of meridional exchange in the atmosphere. *Fundamental'naya i prikladnaya klimatologiya = Fundamental and Applied Climatology*. 2023; 9(1): (13—32). DOI: 10.21513/2410-8758-2023-1-13-32. (in Russ.).

9. Girs A. A. *Mnogoletnie kolebaniya atmosfery tsirkulyatsii I dolgosrochnye meteorologicheskiye prognozy = Long-term fluctuations in atmospheric circulation and long-range meteorological forecasts*. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1971: 280 p. (in Russ.).
10. Alekseev G. V., Kuzmina S. I., Urazgildeeva A. V. et al. Influence of atmospheric heat and moisture transport on Arctic warming in winter. *Fundamental'naya i prikladnaya klimatologiya = Fundamental and Applied Climatology*. 2016; (1): (43—63). doi: 10.21513/2410-8758-2016-1-43-63. (in Russ.).
11. Sando A. B., Nilsen J. E., Gao Y. Importance of heat transport and local air–sea heat fluxes for Barents Sea climate variability. *Journal of Geophysical Research*. 2010; 115 (C7). doi: 10.1029/2009JC005884.
12. Dianskii N. A., Panasenkov I. I., Fomin V. V. Study of the upper layer of the Barents Sea response to the passage of an intense polar cyclone in early January 1975. *Morskoy Gidrofizicheskii Zhurnal = Marine Hydrophysical Journal*. 2019; 35(6): 530—548. doi: 10.22449/0233-7584-2019-6-530-548. (in Russ.).
13. Hakkinen S., Rhines P. B., Worthen D. L. Atmospheric blocking and Atlantic multidecadal ocean variability. *Science*. 2011; 334 (6056): 655—659. doi: 10.1126/science.1205127.
14. *The third assessment report on climate change and its impacts on the territory of the Russian Federation*. Edited by V. M. Kattsov. Rosgidromet. St. Petersburg: Naukoemkiye Tekhnologii, 2022: 676 p. (in Russ.).
15. Sousa P. M., Trigo R. M., Barriopedro D., Soares J. A., Santos J. A. European temperature responses to blocking and ridge regional patterns. *Climate Dynamics*. 2018; 50 (1—2): 457—477. doi: 10.1007/s00382-017-3620-2.
16. Brunner L., Schaller N., Anstey J. et al. Dependence of present and future European temperature extremes on the location of atmospheric blocking. *Geophysical Research Letters*. 2018; (45): 6311—6320. doi: 10.1029/2018GL079509.
17. Sillmann J., Croci-Maspoli M., Kallache M. et al. Extreme cold winter temperatures in Europe under the influence of North Atlantic atmospheric blocking. *Journal of Climate*. 2011; 24 (22): 5899—5913. doi: 10.1175/2011JCLI4126.1.
18. Tyrlis E., Hoskins B. J. Aspects of a Northern Hemisphere atmospheric blocking climatology. *Journal of the Atmospheric Sciences*. 2008; (65): 1638—1650. doi: 10.1175/2007JAS2448.1.
19. Woollings T., Barriopedro D., Methven J. Blocking and its response to climate change. *Current Climate Change Reports*. 2018; (4): 287—300. doi: 10.1007/s40641-018-0108-z.
20. *Vtoroi otsenochnyi doklad ob izmeneniyah klimata na territorii Rossiiskoi Federatsii — Second Roshydromet assessment report on climate change and its impacts on the territory of the Russian Federation*. Moscow: Roshydromet. 2014: (1). 58 p. (in Russ.).
21. Small D., Atallah E. H., Gyakum J. R. An objectively determined blocking index and its northern hemisphere climatology. *Journal of Climate*. 2014; (27): 2948—2970. doi: 10.1175/JCLI-D-13-00162.1.
22. Dmitrieva A. A., Dubravina V. F., Belyazo V. A. *Atmosferniye protsessy Severnogo polushariya (1891—2018 gg.) = Atmospheric processes of the Northern Hemisphere (1891—2018): their classification and application*. St. Petersburg: SUPER Publishing, 2018: 306 p. (in Russ.).
23. Kondratovich K. V. Classifications of macrometeorological processes and their use for assessing the impact of the atmosphere on hydrological regime. *Trudy Leningradskogo Gidrometeorologicheskogo Instituta = Proceedings of the Leningrad Hydrometeorological Institute*. 1976; (58): (83—96). (in Russ.).
24. Boitsov V. D. *Izmenchivost temperaturi vodi Barentseva mrya I ee prognozirovaniye = Variability of water temperature in the Barents Sea and its forecasting*. Murmansk: PINRO Publishing, 2006: 292 p. (in Russ.).
25. Alekseev G. V., Glok N. I., Smirnov A. V. et al. Influence of the North Atlantic on climate changes in the Barents Sea and their predictability. *Meteorologiya i Gidrologiya = Meteorology and Hydrology*. 2016; (7): (38—56). (in Russ.).
26. Girs A. A. Accounting for the development of macrosynoptic processes in studying the causes of changes in background characteristics of the hydrosphere. *Trudy Leningradskogo Gidrometeorologicheskogo Instituta = Proceedings of Leningrad Hydrometeorological Institute*. 1970; (32): (145—169). (in Russ.).
27. Semenov V. A. Modern studies of the Arctic climate: progress, paradigm shifts, and current challenges. *Izvestiya RAN, Fizika Atmosfery I Okeana = Proceedings of the Russian Academy of Sciences*,

- Atmospheric and Oceanic Physics*. 2021; 57 (1): (21—33). doi: 10.31857/S0002351521010119. (in Russ.).
28. Электронный ресурс «National Centers for Environmental Information». URL: <https://www.ncei.noaa.gov/products/world-ocean-database-1>. Дата обращения 22.02.2021.
 29. Электронный ресурс «OpenDat NODC» URL: <https://opendap1.nodc.no/thredds/catalog/physics/Mooring/BSO/catalog.html/> Дата обращения 22.12.2024.
 30. Bochkov Yu. A. Retrospective of water temperature in the 0–200 m layer along the Kola Meridian section in the Barents Sea (1900—1981). *Ekologiya i Promysel Glubokovodnykh Rub v Severo-Evropeyskom Basseyne = Ecology and fisheries of bottom fish in the NorthEuropean basin*. Murmansk: PINRO Publishing, 1982; (113—122). (in Russ.).
 31. Ugryumov A. I., Vainovsky P. A., Gustoev D. V. On the mechanism of formation of anomalously low water temperature values at the Kola meridian section in the mid-20th century. *Arktika i Innovatsii = Arctic and Innovations*. 2026; 4 (in print). (in Russ.).
 32. Kats A.L. *Sezonniye izmeneniya obshei tsirkulatsii atmosfery i dolgosrochniye prognozi pogodi = Seasonal changes in the general atmospheric circulation and long-range weather forecast*. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1960: 270 p. (in Russ.).
 33. Ingvaldsen R., Asplin L., Loeng H. Velocity field of the western entrance to the Barents Sea. *Journal of Geophysical Research*. 2004a. (109), C030201. P. C03021.1—C03021.12. doi: 10.1029/2003JC001813.
 34. Ingvaldsen R., Asplin L., Loeng H. The seasonal cycle in the Atlantic transport to the Barents Sea during the years 1997—2001. *Continental Shelf Research*. 2004b; (24): 1015—1032. doi: 10.1016/j.csr.2004.01.009.
 35. Электронный ресурс «NOAA 20th Century Reanalysis Project». URL: https://psl.noaa.gov/data/20thC_Rean/ Дата обращения 22.08.2025.
 36. Ozhigin V. K., Ivshin V. A., Trofimov A. G. *Vodi Barentseva morya: struktura, tsirkulatsiya izmenchivost = Waters of the Barents Sea: structure, circulation, and variability.* = Murmansk: PINRO, 2016: 260 p. (in Russ.).
 37. Vainovsky P. A., Gustoev D. V. *Statisticheskoye prognozirovanie vremennih ryadov = Statistical forecasting of time series*. St. Petersburg: RSHU Publ., 2019: 240 p. (in Russ.).
 38. Malinin V. N. *Statisticheskie metody analiza gidrometeorologicheskoi informatsii. = Statistical methods for the analysis of hydrometeorological information*. St. Petersburg: RSHU Publ., 2020: 2. 196 p. (in Russ.).
 39. Hurrell J. W., Kushnir Y., Otttersen G., Visbeck M. The North Atlantic Oscillation: Climatic Significance and Environmental Impact. Washington, DC: American Geophysical Union, 2003; 298. doi: 10.1029/134GM01.
 40. Lien V. S., Schlichtholz P., Skagseth O., Vikebø F. B. Winddriven Atlantic Water flow as a direct mode for reduced Barents Sea ice cover. *Journal of Climate*. 2017; (30): 803—812. doi: 10.1175/JCLI-D-16-0241.1.
 41. Malinin V. N., Vainovsky P. A. When will the Arctic regions become ice-free? *Uchenye zapiski RGGMU = Scientific notes of RSHU*. 2019. (56): (98—109). doi: 10.33933/2074-2762-2019-56-98-109. (in Russ.).

Сведения об авторах

Угрюмов Александр Иванович, доктор географических наук, профессор, профессор кафедры метеорологических прогнозов, Российский государственный гидрометеорологический университет, ugryumov-met@mail.ru.

Вайновский Павел Антонович, кандидат географических наук, свободный исследователь, pv974@yandex.ru.

Густов Дмитрий Владимирович, кандидат географических наук, доцент кафедры прикладной океанографии и комплексного управления прибрежными зонами, Институт гидрологии и океанологии, Российский государственный гидрометеорологический университет, gustoev@mail.ru.

Informations about authors

Ugryumov Alexander I., Doctor of Geographical Sciences, Professor, Professor of the Department of Meteorological Forecasts, Russian State Hydrometeorological University.

Vainovsky Pavel A., Candidate of Geographical Sciences, free researcher.

Gustoev Dmitry V., Candidate of Geographical Sciences, Associate professor of the Department of Applied Oceanography and Integrated Coastal Zone Management, Institute of Hydrology and Oceanology, Russian State Hydrometeorological University.

Конфликт интересов: конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила 06.10.2025

Принята в печать после доработки 07.05.2026

The article was received on 06.10.2025

The article was accepted after revision on 07.05.2026

Гидрометеорология и экология. 2026. № 83. С. 255—268.

Hydrometeorology and Ecology. 2026;(83):255—268.

МЕТЕОРОЛОГИЯ

Научная статья

УДК [551.509.615+551.509.616]:629.73-519

doi: 10.33933/2713-3001-2026-83-255-268

Перспективы применения беспилотных летательных аппаратов в работах по воздействиям на переохлажденные облака и туманы

***Степан Владимирович Антонов, Сергей Михайлович Двоеглазов,
Евгений Николаевич Николаев, Андрей Михайлович Петрунин,
Николай Александрович Платонов, Андрей Викторович Частухин,
Георгий Георгиевич Щукин***

АНО «Агентство атмосферных технологий», Москва, Россия, attech@mail.ru

Аннотация. В статье рассмотрены вопросы применения БПЛА в работах по искусственному регулированию осадков (ИРО) и рассеянию переохлажденных туманов. Приводятся характеристики БПЛА, позволяют применять их в работах по ИРО, дано описание комплекса средств воздействия и измерительной аппаратуры. Анализируются результаты численного моделирования процесса распространения аэрозоля йодистого серебра при воздействии на облака с БПЛА пиропатронами ПВ-26 и рассеяния переохлажденного тумана при воздействии на него жидким азотом.

Ключевые слова: воздействия, беспилотные летательные аппараты, средства воздействия, переохлажденные облака и туманы.

Для цитирования: Антонов С. В., Двоеглазов С. М., Николаев Е. Н. и др. Перспективы применения беспилотных летательных аппаратов в работах по воздействиям на переохлажденные облака и туманы // Гидрометеорология и экология. 2026. № 83. С. 255—268. doi: 10.33933/2713-3001-2026-83-255-268.

Original article

Prospects for the use of unmanned aerial vehicles in work on influencing supercooled clouds and fogs

Stepan V. Antonov, Sergei M. Dvoeglazov, Evgeniy N. Nikolaev, Andrey M. Petrunin, Nikolai A. Platonov, Andrey V. Chastukhin, Georgy G. Shchukin

ANO “Agency of Atmospheric Technologies”, Moscow, Russia, attech@mail.ru

Summary: In recent years, many organizations engaged in research in cloud physics and active influences (AE) have increasingly focused on exploring the potential of unmanned aerial vehicles (UAVs) in experimental and industrial applications. The widespread use of UAVs in the military field in recent years has given a powerful impetus to the development of this area of experimental meteorology. This creates certain prerequisites for the use of this type of aircraft in AE studies on meteorological processes. An additional factor determining the attention paid to the use of such aircraft in AE studies is the observed reduction in the fleet of meteorological laboratory aircraft and aircraft equipped with AE tools. Although the development of civilian aircraft in Russia has recently received increased attention, replacing aircraft in AE studies that have reached the end of their service life will pose a major challenge in the coming years. This paper examines the use of UAVs in artificial precipitation regulation (APR) and the dispersal of supercooled fog. The feasibility of using UAVs with various types of reagents is assessed, the characteristics of the UAVs proposed for use in these studies are presented, and a description of the active intervention system using various reagents and measuring equipment for obtaining operational information on cloud and fog characteristics is provided. The results of numerical modeling of the spread of silver iodide aerosol when UAVs impact clouds with PV-26 pyrotechnic cartridges and the dispersal of supercooled fog from UAVs when exposed to liquid nitrogen are presented. These results demonstrate the feasibility and effectiveness of using the selected UAVs in atmospheric anti-aircraft operations.

Keywords: influences, unmanned aerial vehicles, means of influence, supercooled clouds and fogs.

For citation: Antonov S. V., Dvoeglazov S. M., Nikolaev E. N. et al. Prospects for the use of unmanned aerial vehicles in work on influencing supercooled clouds and fogs *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydrometeorology and Ecology*. 2026;(83):(255—268). doi: 10.33933/2713-3001-2026-83-255-268. (In Russ.).

Введение

Широкое использование БПЛА в качестве беспилотного транспорта для логистических целей [1, 2], в сельском хозяйстве [3], для мониторинга окружающей среды [4, 5, 6, 7], дистанционного зондирования атмосферы [8, 9, 10] и др. обусловило необходимость проведения исследований по обоснованию возможностей применения их для воздействия на атмосферные процессы и явления. Следует отметить, что уже более 10 лет Агентством атмосферных технологий с учетом имеющегося многолетнего опыта самолетных воздействий [11, 12] ведутся исследования возможности применения БПЛА в работах по воздействию на атмосферные процессы [13].

Наиболее перспективным представляется применение БПЛА в работах по ИРО, поскольку технология этих работ достаточно отработана и уже не один

десяток лет показывает положительные результаты как в работах по улучшению погодных условий, так и в работах по искусственному увеличению осадков. Дополнительным фактором, определяющим внимание к вопросу применения летательных аппаратов в работах по ИРО, является наблюдаемое в последние годы сокращение в стране самолетного парка.

Другим перспективным направлением является использование БПЛА в работах по борьбе с туманами. В первую очередь это относится к переохлажденным туманам, поскольку технология их рассеяния наземными генераторами жидкого азота достаточно эффективно применялась российскими специалистами на автодорогах и в аэропортах [11]. В тоже время опыт проведенных работ показал, что применение наземных генераторов, даже в мобильном варианте, имеет существенные ограничения из-за рельефа местности и отсутствия плотной сети дорог. Эти ограничения могут быть преодолены при использовании БПЛА для рассеяния переохлажденных туманов.

Целью работы является обоснование возможности применения БПЛА в работах по воздействию на переохлажденные облака и туманы как нового направления в экспериментальной метеорологии, для чего приведены результаты анализа характеристик существующих российских БПЛА и оценивание пригодности их для выполнения такого рода работ. Методами численного моделирования исследованы процессы распространения йодистого серебра при проведении воздействия на переохлажденные облака и процесс воздействия на переохлажденный туман жидким азотом в конкретных метеорологических ситуациях, приведены примеры созданных в Агентстве комплексов технических средств воздействия и измерительной аппаратуры для БПЛА.

Цель работы состоит в обосновании возможности применения БПЛА в работах по воздействию на переохлажденные облака и туманы.

Основные задачи:

- обзор применения БПЛА в работах по искусственному регулированию осадков и рассеянию переохлажденных туманов;
- использование БПЛА при моделировании воздействия на переохлажденные облака и туманы реагентами;
- характеристика комплексов технических средств воздействия и измерительной аппаратуры для БПЛА.

Обзор применения БПЛА в работах по искусственному регулированию осадков

Рассматривая перспективы применения БПЛА в работах по ИРО, необходимо учитывать их особенности:

- крейсерская скорость большинства БПЛА ниже пилотируемых самолетов;
- управление работой технических средств воздействия осуществляется с земли по радиоканалу;
- большинство технических средств размещается на внешней подвеске БПЛА, в том числе устройство для порционного сброса порошкообразного реагента;

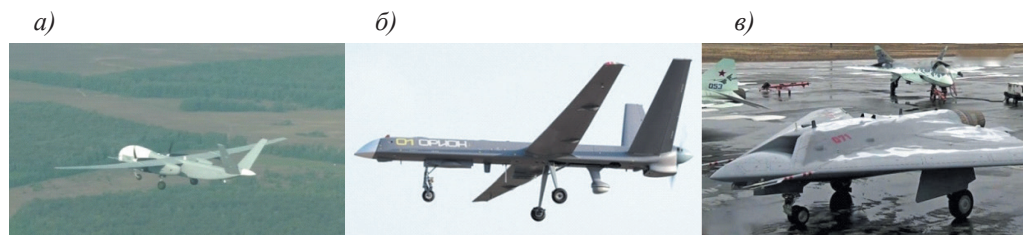


Рис. 1. Беспилотные летательные аппараты: а) «Альтиус»; б) «Орион»; в) «Охотник».

Fig. 1. Unmanned aerial vehicles: a) «Altius»; b) «Orion»; c) «Hunter».

— более жесткие ограничения по массе полезной нагрузки по сравнению с самолетами;

— полеты часто выполняются в условиях высокой влажности и обледенения.

С учетом вышеизложенного лишь некоторые производимые в России беспилотные системы могут быть использованы в работах по ИРО. При этом наиболее критическими параметрами являются продолжительность и высота полета, а также их полезная нагрузка.

На рис. 1. представлены 3 беспилотных летательных аппарата: Альтиус, Орион, Охотник, а в табл. 1 приведены основные летно-технические характеристики, которые позволяют применять их в работах по ИРО.

Таблица 1

Летно-технические характеристики тяжелых российских БПЛА

Heavy Russian UAVs

Летно-технические характеристики / Тип БПЛА	«Альтиус»	«Орион»	«Охотник»
Продолжительность полёта, ч	48	24	5—6
Крейсерская скорость, км/ч	200	200	1000
Практический потолок, м	12 000	7500	18000
Полезная нагрузка, кг	2000	200	До 8000

Сотрудниками Агентства АТТЕХ выполнена оценка возможности применения вышеперечисленных БПЛА в работах по ИРО с применением льдообразующих реагентов (пиропатронов ПВ-26 и генераторов САГ-26 йодистого серебра), хладореагентов (гранулированная углекислота и жидкий азот) и порошкообразных реагентов. На основе проведенного численного моделирования выработаны основные технические требования к средствам воздействия и начата работа по созданию их опытных образцов.

Обзор применения БПЛА в работах по рассеянию переохлажденных туманов

Перспективным представляется также применение БПЛА в работах по рассеянию переохлажденных туманов. Высоты полетов и условия эксплуатации



Рис. 2. Беспилотные летательные аппараты: а) OG-25; б) «Енисей-М».

Fig. 2. Unmanned aerial vehicles: а) OG-25; б) «Yenisey-M».

БПЛА позволяют использовать в этих работах оборудованные средствами воздействия квадрокоптеры и небольшие летательные аппараты самолетной схемы.

В табл. 2 приведены основные характеристики легких российских БПЛА, которые планируется использовать в экспериментах по рассеянию переохлажденных туманов (рис. 2).

Таблица 2

Летно-технические характеристики легких российских БПЛА

Light Russian UAVs

Летно-технические характеристики / Тип БПЛА	OG-25	Енисей-М
Продолжительность полёта	3 ч	20 мин
Крейсерская скорость, км/ч	100	50
Практический потолок, м	5500	500
Полезная нагрузка, кг	10	10

Использование БПЛА при моделировании воздействия на переохлажденные облака и туманы реагентами

При оценке перспектив использования БПЛА в работах по ИРО выполнено математическое моделирование процесса распространения различных видов реагентов при воздействии на различные типы облаков. Для этого использовалась созданная в Агентстве АТТЕХ нестационарная трёхмерная численная модель «SeedDisp», предназначенная для расчёта переноса реагента в заданном трехмерном поле ветра. Модель ограничена мезомасштабной областью размерами по горизонтали от нескольких десятков до нескольких сотен километров и по вертикали включает всю тропосферу. В модели учитывается рельеф местности. Характеристики атмосферного пограничного слоя рассчитываются с помощью метода энергетического баланса и теории подобия. Исходными данными для расчёта

являются данные наземных метеорологических наблюдений и данные радиозондирования. При расчёте переноса реагента в поле скорости ветра комбинируются лагранжев и эйлеров подходы. При решении уравнения переноса частиц на боковых границах области используются граничные условия, которые зависят от направления переноса воздуха через границу области.

Для моделирования в работе выбрана метеорологическая ситуация, имевшая место в Республике Татарстан 6 мая 2023 г., когда в приземном слое наблюдался северо-западный перенос со скоростью 10—15 км/ч, а на высоте 3000—4000 м (высоты полета воздействия) наблюдался ветер юго-западного направления со скоростью 55—80 км/ч. Температура воздуха у земли была 9 °С, нулевая изотерма находилась на высоте 1000 м, верхняя граница на высоте 4000 м.

На рис. 3 приведены результаты численного моделирования распространения частиц йодистого серебра при воздействии с БПЛА пиропатронами ПВ-26.

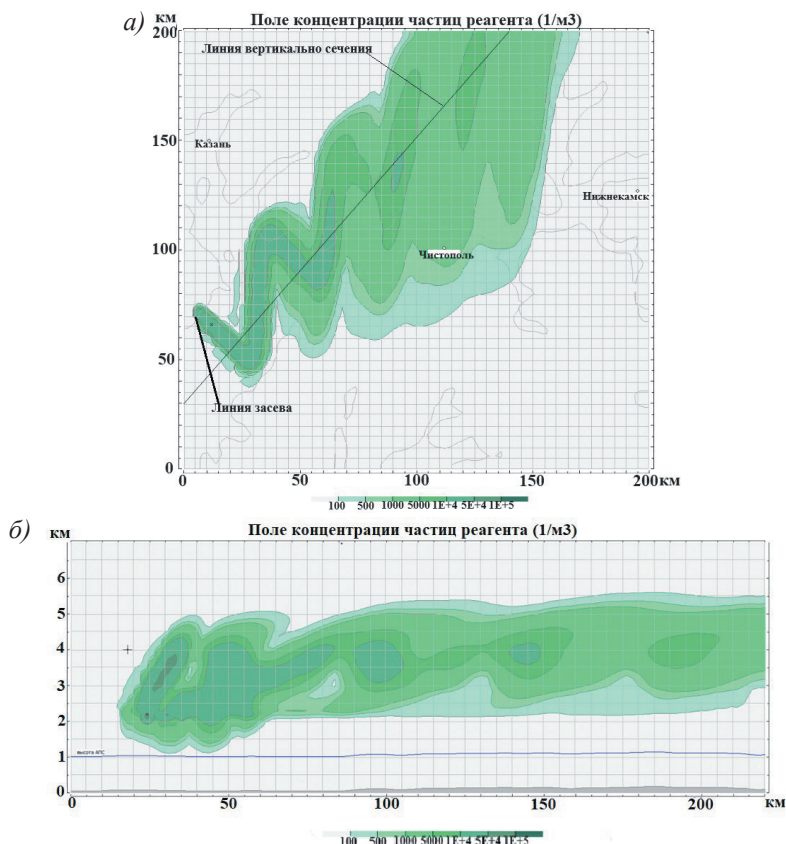


Рис. 3. Концентрации льдообразующих частиц в горизонтальной (а) и вертикальной (б) плоскостях через 3 часа после начала воздействий ПВ-26.

Fig. 3. Concentrations of ice-forming particles in the horizontal (a) and vertical (b) planes 3 hours after the start of exposure to PV-26.

Из рис. 3 видно, что зоны распространения реагента с концентрацией 10^4 частиц/ м^3 и выше при воздействии располагались в слое 2000—4500 м в переохлаждённой части облаков, что приводит к изменению микрофизических и динамических процессов в облаках, позволяющих повысить результативность процессов осадкообразования. При этом для достижения таких значений концентрации реагента требуется около 200 пиропатронов ПВ-26.

Для моделирования воздействия на переохлаждённый туман с БПЛА путем диспергирования жидкого азота была использована разработанная в Агентстве АТТЕХ нестационарная трёхмерная численная модель «Fog Seeding» [14]. Нестационарная трёхмерная численная модель представляет собой модель эволюции тумана при искусственном рассеянии его в пограничном слое атмосферы в области масштабом от нескольких сотен метров до нескольких километров. Для расчета трёхмерных полей видимости используются значения температуры, направления и скорости ветра, дальности видимости. На основе этих значений определяются трёхмерные поля метеорологических величин, необходимые для расчета процесса рассеяния тумана. Процесс рассеяния тумана описывается в модели с использованием системы уравнений, определяющих изменение во времени и пространстве температуры и влажности воздуха, водности тумана, концентрации ледяных частиц, вырабатываемых генераторами, а также их массы. Эти величины необходимы для расчета конденсационного роста ледяных кристаллов за счет испаряющихся капель тумана и распространения эффекта просветления в пространстве.

Решение уравнений модели выполняется с помощью численных конечно-разностных методов. Расчеты выполняются на конечно-разностной сетке, имеющей равные шаги в обоих направлениях по горизонтали $\Delta y = \Delta x$, и переменный логарифмически увеличивающийся шаг по вертикали Δz , при этом вблизи поверхности земли $\Delta z = 1$ м.

В качестве иллюстрации результатов численного моделирования воздействия на переохлаждённый туман рассмотрен случай для реальных синоптических условий, наблюдавшихся в Московской области 7 ноября 2018 г., в районе аэродрома Чкаловский, которые стали причиной образования сильного тумана с дальностью видимости менее 50 м.

На рис. 4 приведены результаты численного моделирования воздействия на переохлажденный туман (изменение дальности видимости) через 60 мин после начала воздействия; также наблюдается эффект от воздействия на переохлажденный туман, проявляющийся в увеличении дальности видимости до значений 500—1000 м.

Результаты численного моделирования показывают принципиальную перспективность применения БПЛА в работах по ИРО и рассеянию переохлажденных туманов.

Комплекс средств воздействия, размещенных на БПЛА

Наиболее перспективным с точки зрения реализации представляется разработка комплекса воздействия с БПЛА пиротехническими генераторами (пиропатронами) йодистого серебра. Основные элементы данного комплекса отработаны

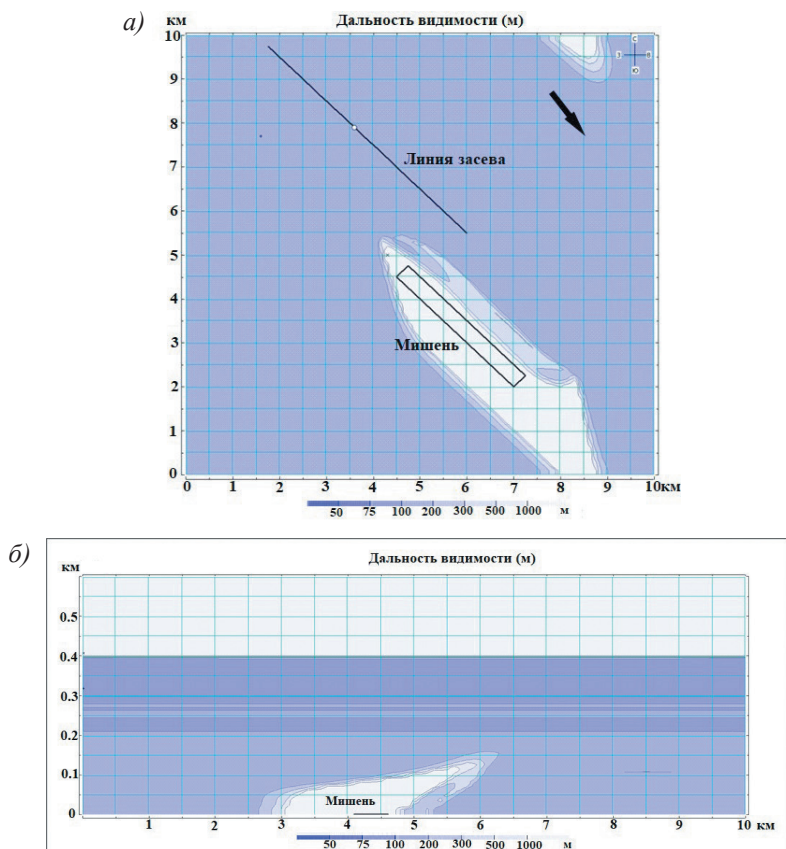


Рис. 4. Результаты численных расчетов воздействия на туман через 60 минут:
а) горизонтальное сечение; б) вертикальное сечение.

Fig. 4. Results of numerical calculations of the impact on fog after 60 minutes:
a) horizontal section; b) vertical section.

Агентством АТТЕХ в самолетном комплексе «Дождь» и системе передачи данных «земля—борт—земля».

Первые эксперименты по подвеске пиротехнических аэрозольных генераторов йодистого серебра на БПЛА были проведены в Агентстве АТТЕХ в 2017 г., когда управляемый с земли комплекс генераторов САГ-26 был размещен на гексакоптере DJI S900 (рис. 5 а). В 2025 г. Агентством создан и прошел с положительными результатами опытный образец устройства воздействия пиротехническими аэрозольными генераторами САГ-26 для БПЛА OG-25 (рис. 5 б).

При создании устройств для воздействия на облака грубодисперсными порошками целесообразно использовать опыт, накопленный Агентством АТТЕХ при применении в работах по метеозащите и при оборудовании самолета Су-30 устройствами КМГУ-2, приспособленными для сброса упаковок с грубодисперсным

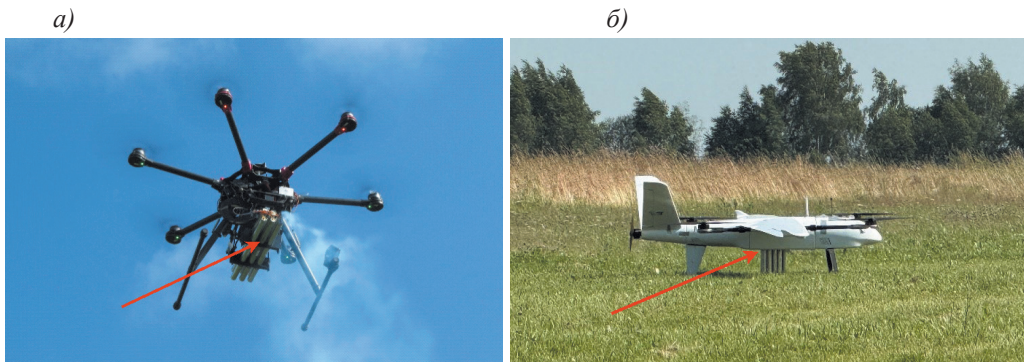


Рис. 5. Комплекс САГ-26 на БПЛА: а) DJI S900; б) OG-25.

Fig. 5. SAG-26 complex on UAVs: a) DJI S900; b) OG-25.

порошком. Аналогичные контейнеры, дооборудованные дистанционной системой управления сбросом, могут использоваться для порционного сброса упаковок с порошкообразными реагентами и углекислотой с борта БПЛА.

Работы по созданию устройств для воздействия с БПЛА жидким азотом ведутся в Агентстве АТТЕХ с 2017 г. Для экспериментальной отработки комплекса рассеяния переохлажденных туманов в Агентстве созданы несколько опытных образцов генераторов мелкодисперсных частиц льда, которые устанавливаются на БПЛА, и начаты их натурные испытания. В табл. 3 приведены основные технические характеристики опытного образца ГМЧЛ-БП4, а на рис. 6 показан БПЛА с установленным на нем опытным образцом генератора мелкодисперсных частиц льда на жидком азоте.



Рис. 6. БПЛА с установленным малогабаритным ГМЧЛ.

Fig. 6. UAV with installed small-sized gigantic manned GMCHL.

Характеристики ГМЧЛ-БП4
Characteristics of GMChL-BP4

Характеристики	ГМЧЛ-БП4
Габаритные размеры, мм	400×273×220
Масса генератора (без азота) кг;	3
Полезный объем сосуда л;	4
Массовый расход, г/с	1
Время работы, мин	40

Комплекс измерительной аппаратуры, установленный на БПЛА

Другой проблемой, которую предстоит рассмотреть при исследовании возможности использования БПЛА в работах по воздействию на переохлажденные облака и туманы, является состав устанавливаемого метеорологического оборудования и приемопередающих устройств. Опыт проведения оперативных работ по ИРО позволил определить основные метеопараметры (температура, скорость и направление ветра в слое), необходимые для проведения воздействия с указанной целью. Именно эти данные, измеряемые в реальном масштабе времени и оперативно передаваемые в Пункт управления, определяют решение о проведении воздействия.

При проведении работ по рассеянию переохлажденных туманов основными метеорологическими параметрами являются температура, скорость и направление ветра, вертикальная протяженность и дальность видимости.

Самым распространенным методом получения данных о вертикальном профиле температуры и ветра в пограничном слое атмосферы является радиозондирование атмосферы. Однако ограниченное число пунктов радиозондирования и редкий выпуск радиозондов практически исключают использование этих данных в качестве оперативного источника информации.

Для оперативного получения вертикальных профилей температуры, направления и скорости ветра также могут быть использованы современные отечественные средства дистанционного зондирования, такие как: Волна-3, Волна-4, ЛАТАН-3, ПЛВ-300, ПЛВ-5000, ПЛВ-10000, МТП-5 и др. [15]. Однако стоимость таких комплексов достаточно высока, что практически исключает их применение в оперативных работах по АВ.

Создание комплекса метеорологической аппаратуры БПЛА для работ по ИРО целесообразно вести путем модификации существующего самолетного измерительного комплекса с учетом конструктивных особенностей и условий применения БПЛА, поскольку применяемый в настоящее время самолетный ИВК хорошо показал себя в работах по метеозащите мегаполисов [11].

При проведении работ по рассеянию переохлажденных туманов в составе комплекса измерительной аппаратуры предлагается использовать датчик температуры, ультразвуковой анемометр и измеритель видимости для беспилотных

летательных аппаратов. Основные характеристики этих датчиков приведены в табл. 4.

Таблица 4

Основные характеристики датчиков, используемых на БПЛА

Main characteristics of sensors

Характеристика	Значение / диапазон
Диапазон измерения температуры	от -10 до $+85$ °C
Уровень точности измерения температуры	$\pm 0,25$ %
Диапазон измерения скорости ветра	$0-60$ м/с
Погрешность измерения скорости ветра	± 4 %
Диапазон измерения направления ветра	$0-359$ °
Погрешность измерения направления ветра	± 4 °
Диапазон измерения видимости	$10-10\,000$ м
Точность измерения видимости	± 5 %

Для получения вертикального профиля направления и скорости ветра на этапе отработки экспериментального образца комплекса можно использовать сбрасываемый зонд, созданный в Агентстве АТТЕХ [16]. Передача метеопараметров с БПЛА будет осуществляться по радиоканалу с помощью радиомодуля с антенной блока сбора информации. Поскольку Пункт управления работами должен располагаться непосредственно в районе проведения работ, прием сигнала будет осуществляться радиомодулем приемного блока с отображением метеопараметров на мониторе компьютера.

Заключение

1. Выполненные теоретические исследования подтверждают принципиальную возможность применения БПЛА в работах по воздействию на переохлажденные облака и туманы с целью перераспределения осадков и улучшения дальности видимости на автодорогах и в аэропортах.

2. Проведенный анализ характеристик российских БПЛА показывает, что некоторые из них (после оснащения специально разработанными средствами воздействия) могут быть использованы для проведения исследований и в работах по воздействию на переохлажденные облака и туманы.

3. Применение БПЛА в работах по ИРО позволит в определенной мере заменить самолеты с истекающим сроком летной годности, а в работах по борьбе с туманами — преодолеть ограничения, связанные с рельефом местности и отсутствием плотной сети дорог.

4. Выполняемые Агентством атмосферных технологий исследования и создаваемые комплексы средств воздействия и измерительной аппаратуры для БПЛА позволят существенно расширить арсенал наземных и авиационных средств воздействия на переохлажденные облака и туманы и заменить в оперативных работах устаревшие самолетные средства и дорогостоящие наземные устройства

дистанционного зондирования и могут составить основу нового направления исследований в экспериментальной метеорологии.

Список литературы

1. Андреев Н. А. Перспективы применения беспилотного транспорта в России / Н. А. Андреев // Отходы и ресурсы. 2023. Т. 10. №1. URL: <https://resources.today/PDF/42ECOR123.pdf>. — doi: 10.15862/42ECOR123.
2. Максимова С. Е., Духин С. В. Геоинформационный подход к построению оптимального маршрута беспилотного воздушного судна с учетом ограничений по метеорологическим условиям // Гидрометеорология и экология. 2024. № 77. С. 739—749. doi: 10.33933/2713-3001-2024-77-739-749.
3. Дьяченко А. В., Леденёва М. В., Чуб М. В. Применение беспилотных летательных аппаратов в сельском хозяйстве как способ повышения урожайности и обеспечения продовольственной безопасности Российской Федерации // Бизнес. Образование. Право. 2025. № 3(72). С. 25—31. doi: 10.25683/VOLBI.2025.72.1380.
4. Шарафутдинов А. А., Имамутдинов С. А., Мухаметьянова А. Н. и др. Применение беспилотных летательных аппаратов для дистанционного мониторинга окружающей среды // Сетевое издание «Нефтегазовое дело». 2018. №2. С. 99—116.
5. Зосимович Н. Беспилотники для экологического мониторинга. М.: LAP Lambert Academic Publishing. 2013. 484 с.
6. Лучников А. И. Современные тенденции применения БПЛА в исследовании природных сред. Анализ зарубежных публикаций // Гидрометеорология и экология. 2025. № 80. С. 530—546. doi: 10.33933/2713-3001-2025-80-530-546.
7. Ершова А. А., Голубева Е. А., Антонов В. А. и др. Сравнительный анализ результатов учета морского мусора наземными и дистанционными (БПЛА) методами на побережье архипелага Новая Земля в 2023 г. // Гидрометеорология и экология. 2025. № 81. С. 699—717. doi: 10.33933/2713-3001-2025-81-699-717.
8. Цепелев В. Ю. О возможности вертикального зондирования атмосферы при помощи мобильного аэрологического комплекса, размещенного на беспилотном летательном аппарате // Гидрометеорология и экология. 2024. № 76. С. 437—450.
9. Watts A. C., Ambrosia V. G., Hinkley E. A. Unmanned aircraft systems in remote sensing and scientific research: Classification and considerations of use // Remote Sensing. 2012. vol. 4. P. 1671—1692.
10. Chin-Chung Chang, Chin-Yuan Chang, Jia-Lin Wang et all. An optimized multicopter UAV sounding technique (MUST) for probing comprehensive atmospheric variables // Chemosphere. 2020. vol. 254, Art. 126867.
11. Колосков Б. П., Корнеев В. П., Щукин Г. Г. Методы и средства модификации облаков, осадков и туманов. Изд. РГГМУ. 2012. 241 с.
12. Корнеев В. П., Колосков Б. П., Бычков А. А., Петрунин А. М. и др. Активные воздействия на облака с целью улучшения условий погоды в мегаполисах // Метеорология и гидрология. 2022. № 7. С. 61—70.
13. Антонов С. В., Бычков А. А., Корнеев В. П., Щукин Г. Г. Перспективы применения беспилотных летательных аппаратов в работах по искусственному регулированию осадков // Сборник материалов VI Всероссийской научной конференции «Проблемы военно-прикладной геофизики и контроля состояния природной среды». СПб. 2020. С. 20—25.
14. Частухин А. В., Сергеев Б. Н., Колосков Б. П. Моделирование рассеяния переохлажденного тумана с использованием трехмерной численной модели Fog Seeding // Учёные записки Российского государственного гидрометеорологического университета. 2017. № 49. С. 47—57.
15. Борейшо А. С., Коняев М. А., Ким А. А. Лидарные комплексы для исследования атмосферы. Санкт-Петербург: Изд-во «Лань», 2024. 243 с.
16. Антонов С. В., Бычков А. А., Сергеев Б. Н. и др. Теоретическое обоснование применения беспилотных летательных аппаратов в работах по воздействию на переохлажденные туманы // Труды ВКА им. А. Ф. Можайского. СПб. 2018. № 662. С. 13—17.

References

1. Andreev N. A. Prospects for the Use of Unmanned Transport in Russia. *Otkhody i resursy = Waste and Resources*. 2023; (10):(1): doi: 10.15862/42ECOR123. (In Russ.).
2. Maksimova S. E., Duhin S. V. Geoinformation approach to constructing an optimal route for an unmanned aerial vehicle taking into account meteorological restrictions. *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydrometeorology and Ecology*. 2024; (77):(739—749). doi: 10.33933/2713-3001-2024-77-739-749 (In Russ.)
3. Dyachenko A. V., Ledeneva M. V., Chub M. V. Use of unmanned aerial vehicles in agriculture as a way to increase crop yields and ensure food security of the Russian Federation. *Biznes. Obrazovaniye. Pravo. = Business. Education. Law*. 2025; 3(72):(25—31). doi: 10.25683 / VOLBI.2025.72.1380. (In Russ.).
4. Sharafutdinov A. A., Imamutdinov S. A., Mukhametyanova A. N. et al. Use of unmanned aerial vehicles for remote monitoring of the environment. *Setevoye izdaniye «Neftegazovoye delo» = Online publication «Oil and Gas Business»*. 2018; (2):(99 —116). (In Russ.).
5. Zosimovich N. *Bespilotniki dlya ekologicheskogo monitoringa = Drones for environmental monitoring*. Moscow: LAP Lambert Academic Publishing, 2013: 484 p. (In Russ.).
6. Luchnikov A. I. Current trends in the use of UAVs in the study of natural environments. Analysis of foreign publications. *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydrometeorology and Ecology*. 2025; (80):(530—546). doi: 10.33933/2713-3001-2025-80-530-546. (In Russ.).
7. Ershova A. A., Golubeva E. A., Antonov E. V. et al. Comparison of results of ground-based and remote (UAV) methods of marine debris monitoring on the coast of the Novaya Zemlya archipelago in 2023. *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydrometeorology and Ecology*. 2025; (81):(699—717). doi: 10.33933/2713-3001-2025-81-699-717. (In Russ.).
8. Tsepelev V. Yu. On the possibility of vertical sounding of the atmosphere using a mobile aerological complex placed on an unmanned aerial vehicle. *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydrometeorology and Ecology*. 2024; (76):(437—450). (In Russ.).
9. Watts A. C., Ambrosia V. G., Hinkley E. A. Unmanned aircraft systems in remote sensing and scientific research: Classification and considerations of use. *Remote Sensing*. 2012; (4):(1671—1692).
10. Chin-Chung Chang, Chin-Yuan Chang, Jia-Lin Wang et al. An optimized multicopter UAV sounding technique (MUST) for probing comprehensive atmospheric variables. *Chemosphere*. 2020; (254): Art. 126867.
11. Koloskov B. P., Korneev V. P., Shchukin G. G. *Metody i sredstva modifikatsii oblakov, osadkov i туманов. = Methods and means of modifying clouds, precipitation and fogs*. St. Petersburg: RGGMU, 2012:241 p. (In Russ.).
12. Korneev V. P., Koloskov B. P., Bychkov A. A., Petrunin A. M. et al. Active influence on clouds in order to improve weather conditions in megacities. *Meteorologiya i gidrologiya = Meteorology and hydrology*. 2022;(7):(61—70). (In Russ.).
13. Antonov S. V., Bychkov A. A., Korneev V. P., Shchukin G. G. Prospects for the use of unmanned aerial vehicles in artificial precipitation control. *Sbornik materialov VI Vserossiiskoi nauchnoi konferentsii «Problemi voenno-prikladnoi geofiziki i cotrolya sostoya prirodnoi sredi» = Collection of materials of the VI All-Russian scientific conference «Problems of military-applied geophysics and monitoring of the state of the natural environment»*. 2020; (20—25). (In Russ.).
14. Chastukhin A. V., Sergeev B. N., Koloskov B. P. Modeling of supercooled fog dispersion using a three-dimensional numerical model Fog Seeding. *Uchenie zapiski Rossiiskogo gidrometeorologicheskogo universiteta = Scientific Notes of the Russian State Hydrometeorological University*. 2017;(49):(47—57). (In Russ.).
15. Boreysho A. S., Konyaev M. A., Kim A. A. Lidar systems for atmospheric research. *Izdatelstvo Lan = Lan Publishing House*. (244):(243). (In Russ.).
16. Antonov S. V., Bychkov A. A., Sergeev B. N., Chastukhin A. V., Shchukin G. G. Theoretical justification for the use of unmanned aerial vehicles in works on the impact on supercooled fogs. *Trudi Voенno-kosmicheskoi akademii imeni A. F. Mozhaiskogo = Proceedings of the A. F. Mozhaisky Military Space Academy*. 2018;(662):(13—17). (In Russ.).

Информация об авторах

Антонов Степан Владимирович, ведущий инженер, АНО «Агентство АТТЕХ», klybok777@gmail.com.

Двоеглазов Сергей Михайлович, ведущий инженер, АНО «Агентство АТТЕХ», s.m.dvoeglazov@mail.ru.

Николаев Евгений Николаевич, инженер, АНО «Агентство АТТЕХ», jn81@yandex.ru.

Петрунин Андрей Михайлович, кандидат физико-математических наук, заместитель директора по оперативным проектам, АНО «Агентство АТТЕХ», a.m.petrinin@mail.ru.

Платонов Николай Александрович, ведущий инженер, АНО «Агентство АТТЕХ», n-a-platonov@mail.ru.

Частухин Андрей Викторович, кандидат физико-математических наук, заместитель директора по научной работе, АНО «Агентство АТТЕХ», a.chastuhin@mail.ru.

Щукин Георгий Георгиевич, доктор физико-математических наук, профессор, консультант, АНО «Агентство АТТЕХ», ggshchukin@mail.ru.

Information about authors

Antonov Stepan V., leading engineer, ANO «Atmospheric Technology Agency».

Dvoeglazov Sergey M., Lead Engineer, ANO «Atmospheric Technology Agency».

Nikolaev Evgeny N., Engineer, ANO «Atmospheric Technology Agency».

Petrinin Andrey M., PhD (Phys. and Math. Sci.), Deputy Director for Operational Projects, ANO «Atmospheric Technology Agency».

Platonov Nikolay A., Lead Engineer, ANO «Atmospheric Technology Agency»

Chastukhin Andrey V., PhD (Phys. and Math. Sci.), Deputy Director for Research, ANO «Atmospheric Technology Agency».

Shchukin Georgy G., Grand PhD (Phys. and Math. Sci.), Professor, Consultant, ANO «Atmospheric Technology Agency».

Конфликт интересов: конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила 07.03.2026

Принята в печать 29.05.2026

The article was received on 07.03.2026

The article was accepted on 29.05.2026

Гидрометеорология и экология. 2026. № 83. С. 269—293.

Hydrometeorology and Ecology. 2026;(83):269—293.

Научная статья

УДК 551.510.41:546.214

doi: 10.33933/2713-3001-2026-83-269-293

Отклонения общего содержания озона во время глобальных ионосферных бурь

*Антон Михайлович Жмодиков^{1,2}, Тимофей Викторович Шлендер^{1,2},
Александр Николаевич Красовский¹, Вероника Вадимовна Жучкевич¹,
Сергей Константинович Бородко¹, Александр Георгиевич Светашев^{1,2},
Алексей Евгеньевич Яротов^{1,2}*

¹ Учреждение БГУ «Национальный научно-исследовательский центр мониторинга озоносферы» (ННИЦ МО БГУ), Минск, Беларусь, nomrec@bsu.by

² Факультет географии и геоинформатики БГУ

Аннотация. В работе исследовались отклонения общего содержания озона (ОСО) в периоды интенсивных ионосферных бурь как для полушарий в отдельности, так и в полярной зоне Северного и Южного полушария. Для этого использовался метод наложенных эпох. Показано, что ионосферные бури планетарного масштаба создают значительные условия уменьшения ОСО в последующие 4,5 дня после начала бури, особенно в холодный сезон года и при западной фазе квазидвухлетнего колебания в полярных зонах. Выявлена существенная зональную анизотропию отклика во внетропических широтах. Значительная часть выявленных аномалий не достигает строгих критериев статистической значимости, что отражает высокий уровень естественной variability атмосферы и ограниченность выборки событий.

Ключевые слова: ионосферная буря, общее содержание озона, метод наложенных эпох, квазидвухлетнее колебание, положительные и отрицательные отклонения.

Благодарности. Работа выполнена при поддержке научной государственной подпрограммы «Развитие деятельности Белорусской антарктической станции» государственной программы №20213749 «Научная и инновационная деятельность Национальной академии наук Беларуси» на 2021—2025 гг.

Для цитирования: Жмодиков А. М., Шлендер Т. В., Красовский А. Н. и др. Отклонения общего содержания озона во время глобальных ионосферных бурь // Гидрометеорология и экология. 2026. № 83. С. 269—293. doi: 10.33933/2713-3001-2026-83-269-293.

Total ozone variations during global ionospheric storms

**Anton M. Zhmodikov^{1,2}, Timofey V. Shlender^{1,2}, Aliaksandr N. Krasouski¹,
Veronika V. Zhuchkevich¹, Sergey K. Borodko¹, Aleksandr G. Svetashev^{1,2},
Aliaksei E. Yarotau^{1,2}**

¹ National Ozone Monitoring Research and Education Center of the Belarusian State University, Minsk, Belarus, nomrec@bsu.by

² The Faculty of Geography and Geoinformatics

Summary. The article investigates the influence of intense planetary ionospheric storms on the spatial distribution of total atmospheric ozone in both hemispheres. Stratospheric ozone plays a key role in the Earth's climate system by regulating the radiative balance, determining the thermal structure of the stratosphere, and influencing large-scale atmospheric circulation. Variations in ozone concentration can therefore affect dynamical processes in the middle atmosphere and potentially propagate their influence to the troposphere. In this context, disturbances of the upper atmosphere caused by solar activity, including geomagnetic and ionospheric storms, are considered as possible drivers of short-term changes in atmospheric composition. Enhanced ionization during such events leads to the production of reactive nitrogen and hydrogen species, which participate in catalytic ozone destruction processes. Understanding the atmospheric response to ionospheric storms is therefore important for clarifying the mechanisms linking solar-terrestrial interactions with variability in the middle atmosphere.

The main objective of the study is to identify statistically significant variations in the spatial distribution of total ozone associated with strong ionospheric storms and to determine the factors that modulate this response. Particular attention is paid to hemispheric differences, polar regions, seasonal conditions, and the phase of the quasi-biennial oscillation. To reveal systematic patterns in ozone variability, the superposed epoch method was applied, allowing the typical atmospheric response to storm events to be extracted from multiple time series. This approach makes it possible to distinguish storm-related signals from background variability and improves the signal-to-noise ratio in the analysis of atmospheric data.

The selection of ionospheric storm events was carried out using the planetary W index of ionospheric disturbance provided by IZMIRAN. A total of 37 intense ionospheric storms observed between 1994 and 2025 were selected according to the criterion $Wp\text{-mean} \geq +6$. These events represent the strongest disturbances of the ionosphere and are therefore expected to produce the most pronounced atmospheric effects. For each event, time series of total column ozone were analyzed in relation to the storm onset. Ozone data were obtained from the MERRA-2 atmospheric reanalysis. The analysis was performed separately for the Northern and Southern Hemispheres and for their polar regions in order to identify regional differences in ozone response.

A significant zonal anisotropy of the response was revealed at extratropical latitudes: positive anomalies with maxima in the Arctic sector (up to +40 Dobson units) predominate in the Northern Hemisphere, while persistent negative anomalies, localized primarily over East Antarctica (up to -40 Dobson units), predominate in the Southern Hemisphere. A significant portion of the identified anomalies do not achieve strict statistical significance criteria, reflecting the high level of natural variability in the atmosphere and the limited sample of events. However, they exhibit spatial consistency with the centers of ozone anomalies, indicating the physical nature of the observed TOC response to ionospheric storms. The obtained results may be useful for accounting for the dependencies between TOC and the ionosphere in the modeling and forecasting of atmospheric processes.

Keywords: ionospheric storm, total ozone content, superimposed epoch method, quasi-biennial oscillation, positive and negative deviations.

Acknowledgments. This work was supported by the state scientific subprogram «Development of the Belarusian Antarctic Station» of state program No. 20213749 «Scientific and Innovative Activities of the National Academy of Sciences of Belarus» for 2021—2025.

For citation: Zhmodikov A. M., Shlender T. V., Krasouski A. N. et al. Total ozone variations during global ionospheric storms *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydrometeorology and Ecology*. 2026;(83):(269—293). doi: 10.33933/2713-3001-2026-83-269-293. (In Russ.).

Введение

Исследования последних десятилетий выявили ключевую роль озона в атмосферных процессах. Поглощая ультрафиолетовую солнечную радиацию, озон в стратосфере определяет ее термический и динамический режимы, причем изменения распределения стратосферного озона напрямую влияют на радиационный баланс стратосферы, вызывая изменения температуры и циркуляции, которые, в свою очередь, влияют на региональный климат тропосферы. Большинство исследований стратосферного озона было сосредоточено на последствиях химического разрушения озона из-за озоноразрушающих веществ, но в последнее десятилетие основное внимание уделяется оценке двусторонней связи между стратосферным озоном и климатической системой через радиационные, динамические и химические процессы [1].

Озон в средней атмосфере рассматривается рядом исследователей как чувствительное промежуточное звено, через которое воздействие проявлений солнечной активности (вариаций уровней электромагнитного солнечного излучения в разных диапазонах, выброса корональных масс) на верхнюю атмосферу передаются в тропосферу [2, 3]. Связь стратосферного озона с приземным климатом в глобальном и региональном масштабах, механизмы, посредством которых вариации солнечной активности через вариации озона могут передаваться в нижние слои атмосферы, давно обсуждаются в научном сообществе [4, 5].

Одним из проявлений солнечной активности в земной атмосфере являются геомагнитные бури, которые представляют собой резкое возмущение магнитного поля Земли, вызванное взаимодействием ее магнитосферы и потока заряженных частиц, возникших в результате солнечных вспышек и корональных выбросов. Геомагнитные бури, приводят к резким возмущениям плотности, состава и структуры ионосферы — ионосферным бурям. Во время таких событий значительно увеличивается или уменьшается полное электронное содержание (ПЭС) ионосферы за счет изменений содержания электронов в верхней ее части, слое F [напр., 6, 7]. Развитие и динамика ионосферных бурь обычно основана на эволюции ПЭС, поскольку это наиболее легкодоступный ионосферный параметр. Из-за индивидуального характера каждой такой бури и сложности, протекающих во время нее процессов, ионосферная буря обычно описывается положительной фазой (увеличение ПЭС) и отрицательной фазой (уменьшение ПЭС) по сравнению с поведением этого параметра в спокойные дни [8, 9].

Важной частью реакции ионосферы на такие события является изменение состава и содержания малых составляющих атмосферы на высотах нижней мезосферы и верхней стратосферы, особенно в полярных регионах вследствие выпадения высокоэнергичных частиц из радиационных поясов, которые могут проникать на высоты нижней ионосферы и вызывать дополнительную ионизацию в нижней ионосфере (слой D). Геомагнитные бури вызывают интенсивное

и быстрое выпадение релятивистских электронов, длящееся иногда достаточно долго, в верхние слои атмосферы [10].

Прямым химическим эффектом от вторжения высокоэнергичных частиц является образование радикалов семейства нечетного водорода ($\text{HO}_x = \text{H}, \text{OH}, \text{HO}_2$) и радикалов нечетного азота ($\text{NO}_x = \text{N}, \text{NO}, \text{NO}_2$), которые приводят к каталитическому разрушению молекул озона. Время жизни HO_x мало, действие HO_x сильно локализовано во времени и пространстве и может наблюдаться только во время выпадения частиц в области, где происходит ионизация. NO_x являются более стабильными соединениями, особенно в условиях полярной ночи, и могут переноситься далеко от того места, где образовались, и могут приводить к ощутимому воздействию на озон в стратосфере [11, 12, 13].

Помимо выпадения высокоэнергичных частиц из радиационных поясов, к образованию радикалов семейства нечетного водорода и азота приводят и другие проявления солнечной активности — мощные солнечные протонные вспышки, когда в верхнюю атмосферу попадают высокоэнергичные протоны и ионы [14, 15, 16]. Такие события происходят обычно во время максимумов солнечной активности и, по сравнению с выпадением частиц из радиационных поясов, происходят реже.

Непосредственно исследований влияния ионосферных возмущений на общее содержание озона (ОСО) очень мало. По большей части представлены работы, где оценивается влияние геомагнитных бурь (и как следствие ионосферных бурь) на содержание стратосферного озона. Например, анализ данных наземных наблюдений ОСО за период с 1963 г. по 1988 г. с использованием метода наложенных эпох позволил найти значительное влияние сильных геомагнитных бурь ($A_p > 40$) вблизи широтного круга 50° с.ш. в зимний период и при восточной фазе квазидвухлетнее колебание (КДК) в периоды высокой солнечной активности. Отмечается, что наблюдаемые эффекты развиты лучше всего в европейском секторе, где сразу после сильной бури наблюдается значительное увеличение общего содержания озона, которое авторы связывают с перераспределением озона [17, 18]. В отличие от Северного полушария (СП), где при определенных условиях наблюдается эффект, в высоких широтах Южного полушария (ЮП) заметное влияние геомагнитных бурь на ОСО не отмечается [19].

Исследование долготного распределения ОСО, предшествующее солнечным протонным событиям, в нескольких широтных зонах обеих полушарий, показало статистически значимое уменьшение озона вдоль широтных кругов 70° с.ш. и 70° ю.ш., отсутствие статистически значимых эффектов в средних широтах (40° ю.ш.) и статистически значимое увеличение в низких широтах (20° ю.ш.) в отдельных регионах [2020]. Данное исследование воздействия геомагнитных бурь на концентрацию озона за период с ноября 2001 г. по январь 2002 г. выявило увеличение озона после начала геомагнитных бурь в полярных областях и увеличение содержания концентраций озона как до, так и после начала сильной магнитной бури в экваториальном регионе, локализованном над Тихим океаном. В работе [21] проведен анализ двух сильных геомагнитных бурь и спокойных условий, сопровождавшихся эффектом Форбуша, в результате которого было установлено, что наблюдаемые изменения стратосферного озона подтверждают

идею о существовании дополнительного источника озона в нижней стратосфере. Ионно-молекулярные реакции каталитического образования озона инициируются вторичной ионизацией, вызванной космическим излучением на этих высотах.

В работе [22] анализ реакции ОСО на интенсивные геомагнитные бури в зоне Южно-Атлантической магнитной аномалии, отличающейся слабым магнитным полем и повышенным потоком энергичных частиц, показал статистически значимое снижение ОСО в течение 7—10 дней после начала каждого события (–4,4% ... –6,0%). Анализ вертикальных профилей показал увеличение в столбе атмосферы нечетного азота на высотах средней и верхней стратосферы и отсутствие существенных изменений в профиле озона.

Исследование вкладов возмущений магнитного поля Земли в изменения полярного озона по сравнению с потоком солнечного УФ-излучения в верхних слоях атмосферы показало, что геомагнитная активность оказывает отрицательное воздействие (уменьшение содержания озона) на полярный озон в обоих полушариях, эффекты геомагнитной активности имеют тот же порядок величины, что и эффекты потока солнечного УФ-излучения, а воздействие геомагнитной активности на полярный озон оказались более значительными в полярных широтах ЮП, чем в СП [23]. Реакция атмосферы на солнечное излучение и геомагнитную активность исследуется также в численных экспериментах с использованием модели Whole Atmosphere Community Climate Model (WACCM) для идеализированных сценариев, сочетающих высокое и низкое солнечное радиационное воздействие с высокой и низкой геомагнитной активностью. Сравнение результатов разных численных экспериментов позволило установить более значительное влияние геомагнитной активности на концентрации нечетного азота и озона в ЮП, чем в СП для всех сценариев и большинства сезонов [24].

Вопрос о том, как именно бури в ионосфере влияют на озоновый слой, все еще до конца не исследован. Это понимание важно для построения целостной модели взаимодействия между собой средних и низких слоев атмосферы Земли, поэтому целью настоящей работы является анализ отклонений ОСО в периоды развития интенсивных ионосферных бурь (по параметру ПЭС) как для полушарий в отдельности, так и в полярной зоне Северного и Южного полушарий.

Данные и методы

Для анализа вариаций пространственного распределения ОСО, связанных с ионосферными бурями, использовался метод наложенных эпох. Метод наложенных эпох — статистический метод, используемый для изучения типичной реакции системы на какое-либо событие путем усреднения множества временных рядов («эпох»), привязанных к ключевым событиям (реперным датам), что позволяет повысить соотношение сигнал/шум. Метод часто используется в исследованиях в области геофизики, астрономии. Реализация метода проводится путем выбора моментов времени t_0 (реперной даты), когда происходит изучаемое событие, выделения временных рядов для каждого события вокруг реперной даты; наложения всех полученных эпох друг на друга и вычисления среднего значения для каждого момента времени внутри эпохи [25, 26].

Выбор событий сильных возмущений в ионосфере проводился на основе данных ИЗМИРАН (каталог планетарных ионосферных бурь, W индекса за период с 1994 г. по 2025 г., среднесуточные значения) [27]. Планетарный ионосферный W индекс (W_p) определяется по отклонениям ПЭС от невозмущенных условий и рассчитывается на основе глобальных карт ПЭС ионосферы, генерируемых Лабораторией реактивного движения NASA [28]. Индекс W_p является медианой от локальных индексов W , базовая формула которого определяется как логарифмическое отклонение текущего значения ПЭС от медианы за предыдущие 27 дней [8, 9]:

$$W = \log \left(\frac{\text{TEC}}{\text{TEC}_{\text{med}}} \right),$$

где TEC — total electric content (ПЭС).

Планетарные ионосферно-плазмосферные бури характеризуются значением $W_p\text{-mean} > 4$ и пиковым значением $W_p\text{-max} \geq 6$ [9, 29]. За доступный период было выбрано 37 событий сильных ионосферных бурь по среднему значению индекса $W_p\text{-mean} \geq +6$, поскольку такие бури будут наиболее ярко отражать исследуемую связь. Начало и конец возмущения выбирались по изменению величины индекса W_p согласно каталогу (начальный день, пиковый день, конечный день) (табл. 1). Средняя продолжительность ионосферной бури с индексом $W_p\text{-mean} \geq +6$ —108 часов или 4,5 дня.

Таблица 1

Пример каталога планетарных ионосферных бурь с фильтром $W_p\text{-mean} \geq 6$

An example of a catalog of planetary ionospheric storms with a $W_p\text{-mean} \geq 6$ filter

Start	UT	Peak	UT	$W_p\text{-max}$	End day	UT	Hrs	$W_p\text{-mean}$
19980331	12	19980401	10	7,8	19980405	6	115	6,5
19980701	0	19980702	0	7,9	19980705	6	103	7,2
19980801	0	19980801	14	7,6	19980805	10	107	6,5
19980901	0	19980901	16	8,9	19980905	0	97	7,8
19981101	0	19981104	8	7,2	19981105	0	97	6,7
19981107	12	19981108	10	8,5	19981113	0	133	6,0
19990531	20	19990602	23	9,1	19990605	1	102	7,4
19990630	23	19990701	23	8,4	19990705	8	106	6,7
19990731	21	19990802	23	7,6	19990805	7	107	6,0
20000406	19	20000406	23	8,9	20000408	13	43	6,2
20000715	9	20000716	1	9,7	20000717	11	51	6,4

Данные ОСО реанализа MERRA-2 (временное разрешение 1 ч) использовались для определения отклонений ОСО от многолетних средних значений (1980—2025 гг.), для устранения детерминированной сезонной составляющей ОСО. Отклонения ОСО рассматривались в период развития ионосферных бурь [30, 31]. Все случаи ионосферных бурь группировались относительно СП и ЮП, восточной и западной фазы квазидвухлетнего колебания (КДК) [32] (см. табл. 2) для сезонов года.

Для построения картосхем отклонений ОСО в период развития ионосферных бурь каждое событие было разделено на периоды: период развития бури (дата начала и конца бури, согласно каталогу ИЗМИРАН, начало бури — 0 день), период до начала бури (–5 дней — 0 день), и период после бури (0 день — +5 дней). Далее была проведена фильтрация всех случаев бурь в зависимости от смены циркуляции в стратосфере на теплый (декабрь—май) и холодный (июнь—ноябрь) сезоны для ЮП, а для СП — на теплый (июнь—ноябрь) и холодный (декабрь—май).

После производилось усреднение значений ОСО за все 37 случаев бурь для всего полушария по периодам (–5 дней — 0 день, период развития бури, 0 день — +5 дней) и по сезонам года. Далее были рассчитаны отклонения ОСО по периодам от многолетней нормы 1980—2025 гг. отдельно для теплого и холодного сезона.

Для поправки на множественные сравнения при анализе пространственного распределения применялся метод Бенджамини-Хохберга (FDR), а для карт разницы отклонений между периодами применялся t -критерий с построением его пространственного распределения. В качестве уровней значимости при применении FDR использовались доверительные интервалы 95 % и 90 %. Применение доверительного интервала 90 % вызвано пространственной связностью ОСО и большим количеством факторов, влияющих на него и ослабевающих его сигнал на ионосферные возмущения, а также относительно небольшой выборкой данных по мощным ионосферным возмущениям, ограниченной временем наблюдений за ними [33].

По аналогичным причинам для карт разницы отклонений от нормы анализировались области со значением модуля t -критерия Стьюдента $|t| \geq 1$, где обычно используется полученное значение $|t| > 1,96$ (при большой выборке), то результат считается значимым на уровне $p < 0,05$. Применение значений $|t| \geq 1$ не дает возможности доказать зависимость, но оно может быть использовано для описания устойчивых тенденций при распределении областей с $|t| \geq 1$ как пространственно связанных структур, так и физически обоснованных [34].

Обработка, построение и визуализация картосхем производилась в разработанном программном комплексе библиотек Python.

Таблица 2

Список ионосферных бурь с $Wp\text{-mean} \geq 6$ и их классификация по фазам КДК за период с 1994 г. по 2025 г.

List of ionospheric storms with $Wp\text{-mean} \geq 6$ and their classification by QBO phases for the period 1994—2025

Номер	Дата начала бури	Фаза КДК
1	31.03.1998	восточная
2	01.07.1998	западная
3	01.08.1998	западная
4	01.09.1998	западная
5	01.11.1998	западная
6	07.11.1998	западная
7	31.05.1999	западная
8	30.06.1999	западная

Номер	Дата начала бури	Фаза КДК
9	31.07.1999	западная
10	06.04.2000	восточная
11	15.07.2000	западная
12	19.03.2001	восточная
13	11.04.2001	восточная
14	19.05.2001	восточная
15	30.09.2002	западная
16	29.01.2003	восточная
17	26.02.2003	восточная
18	31.03.2003	восточная
19	29.05.2003	западная
20	17.08.2003	западная
21	24.07.2004	западная
22	07.11.2004	западная
23	31.10.2005	западная
24	14.12.2005	восточная
25	01.05.2011	восточная
26	01.10.2011	западная
27	31.10.2011	западная
28	30.11.2011	восточная
29	31.01.2012	восточная
30	24.02.2014	восточная
31	01.04.2014	восточная
32	17.03.2015	восточная
33	29.11.2015	восточная
34	31.03.2016	восточная
35	30.04.2016	восточная
36	13.10.2016	западная
37	31.10.2016	западная

Результаты и обсуждение

Отклонения ОСО в полярном регионе

Для полярной области СП вариации ОСО во время ионосферных бурь оценивались по отклонениям от многолетних средних значений. Известно, что на межсуточные вариации озона существенно влияют динамические процессы в стратосфере. Интенсивность этих процессов, изменчивость ОСО в обоих полушариях особенно сильно проявляется поздней зимой и весной и ослабевает в летнее время и осенью. КДК в экваториальной стратосфере модулируют циркуляцию и распределение малых газовых примесей в стратосфере и содержание стратосферного озона в полярных областях [35], поэтому анализ отклонений ОСО (в полярном регионе от 63° до 90° широты) выполнялся для разных выборок — для всех ситуаций ионосферных возмущений независимо от сезона года и фаз КДК

и для конкретных сезонов года и фаз КДК. Результаты анализа вариаций ОСО во время сильных ионосферных бурь в полярной области обоих полушарий представлены на рисунках 1—3.

Общий эффект снижения ОСО в полярных областях СП и ЮП начинается до начала развития ионосферных бурь (–3 день) и длится в среднем 5 дней (до +2 дня, после начала бури 0 день). Отрицательное отклонение полярного значения ОСО от нормы при ионосферных бурях со значением $W_p > 6$ в СП достигает до –2 ... –3 ед. Д., в ЮП, которое отличается большими отклонениями ОСО — до –3 ... –4 ед. Д. (рис. 1 а). Снижение ОСО в полярных областях при бурях

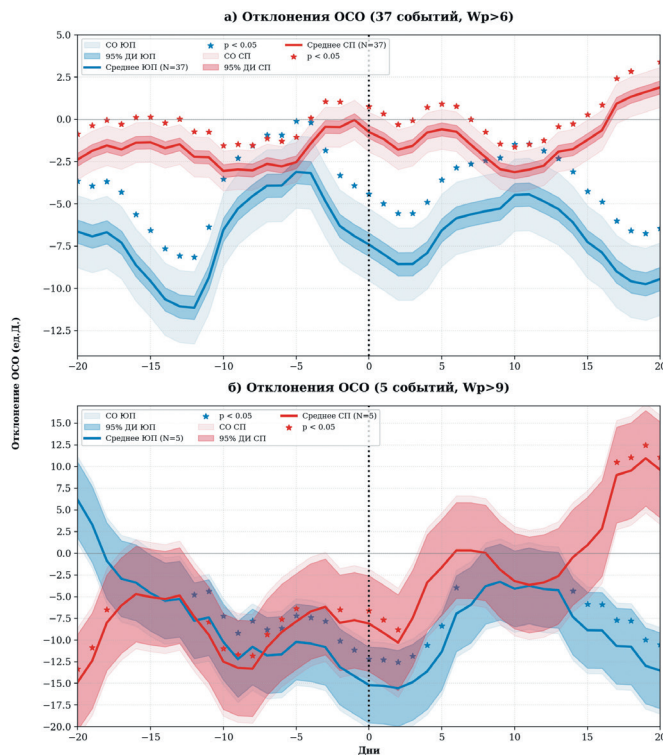


Рис. 1. Отклонения значений ОСО от многолетних средних величин для полярной области (63—90° ш.) СП и ЮП: а) для всех случаев ионосферных бурь (37 шт.) с W_p -mean индексом $\geq +6$; б) для случаев ионосферных бурь (5 шт.) с индексом выше 9.

Крупным пунктиром отмечено начало бури («0» день). СО — оценка стандартного отклонения, 95 % ДИ — доверительный интервал, среднее — отклонение значений ОСО.

Fig. 1. Deviations of TO values from long-term averages for the polar region (63–90° latitude) of the NH and SH: а) for all cases of ionospheric storms (37 cases) with a W_p -mean index $\geq +6$; б) for cases of ionospheric storms (5 cases) with an index above 9.

The large dotted line indicates the start of storm («0» day). SD — the standard deviation estimate, 95 % CI — the confidence interval, mean — the deviation of the TOC values.

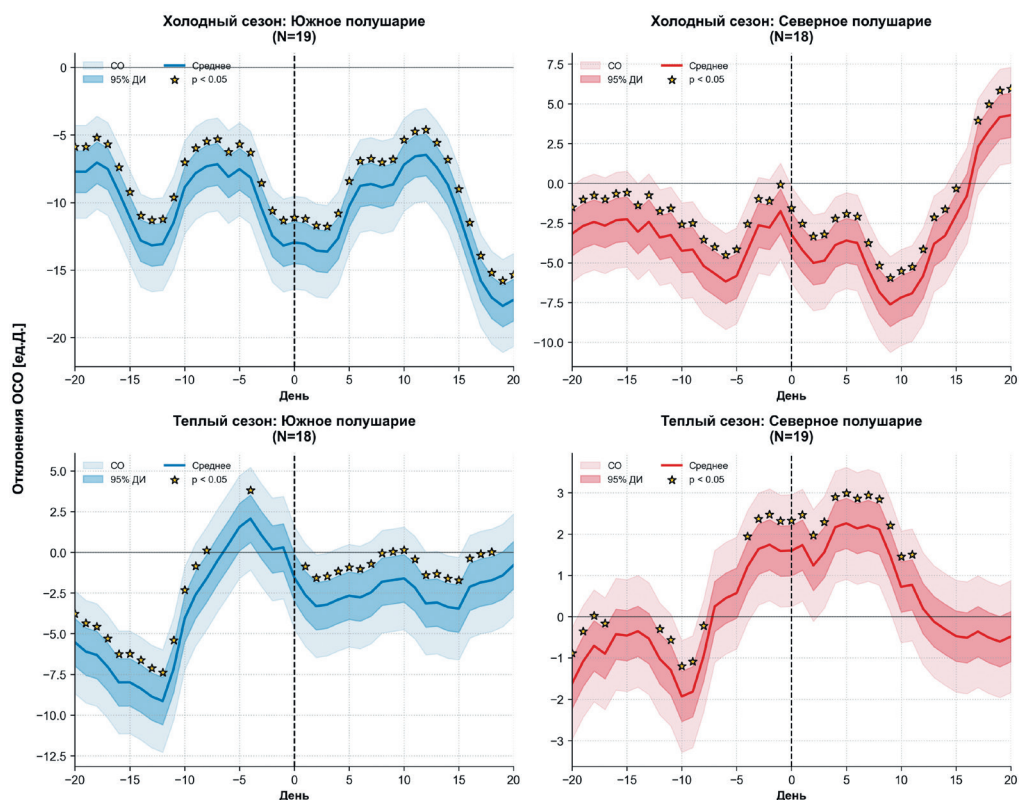


Рис. 2. Отклонения значений ОСО от многолетних средних величин для полярной области (63—90° ш.) СП и ЮП для всех случаев ионосферных бурь (37 шт.) по сезонам года: теплый сезон, холодный сезон.

Крупным пунктиром отмечено начало бури («0» день). СО — оценка стандартного отклонения, 95 % ДИ — доверительный интервал, среднее — отклонение значений ОСО.

Fig. 2. Deviations of TO values from long-term averages for the polar region (63–90° latitude) of the NH and SH for all cases of ionospheric storms (37 cases) by seasons: warm season, cold season.

The large dotted line indicates the start of storm (“0” day). SD — the standard deviation estimate, 95 % CI — the confidence interval, mean — the deviation of the TOC values.

с $W_p > 9$ достигает до $-4 \dots -5$ ед. Д. в СП и $-5 \dots -6$ ед. Д. в ЮП (рис. 1 б). После общего эффекта снижения ОСО наблюдается его резкий рост и восстановление к $+7 \dots +10$ дню в СП особенно для бурь с индексом выше 9, в то время как для ЮП к $+7 \dots +10$ дню наблюдается снижение ОСО, также более заметное для бурь с $W_p > 9$ (рис. 1). Для графиков отклонений ОСО во время бурь с $W_p > 6$ (рис. 1 а), статистически значимые точки ($p < 0,05$) идут сплошным рядом после начала бури, что подтверждает значимость снижения озона для большинства случаев. Меньшая плотность значимых точек после начала бури для графиков отклонений

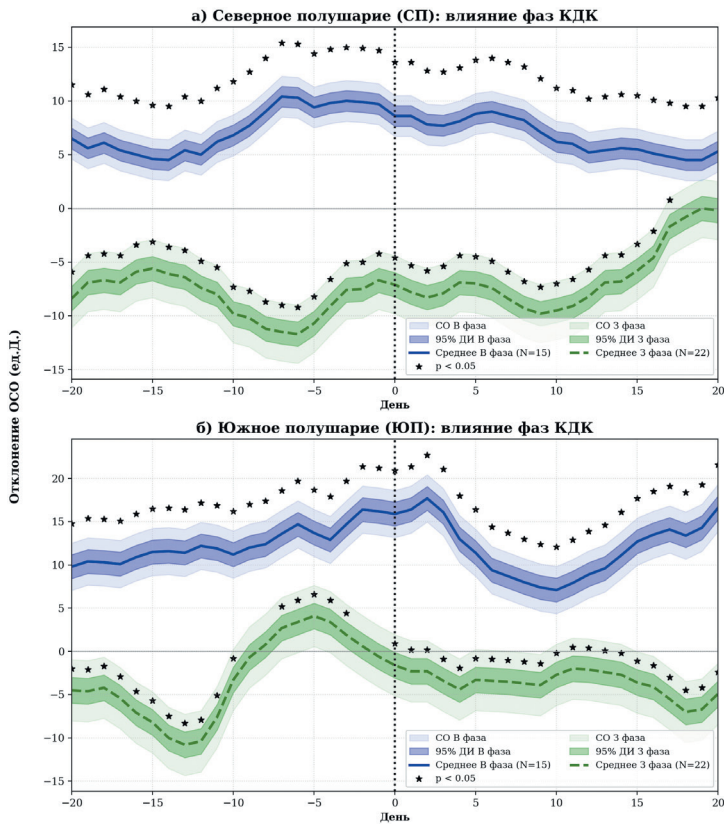


Рис. 3. Отклонения значений ОСО от многолетних средних величин для полярной области (63—90° ш.) СП и ЮП для всех случаев ионосферных бурь (37 шт.) для восточной (В-фаза) и западной (З-фаза) фаз КДК.

Крупным пунктиром отмечено начало бури («0» день). СО — оценка стандартного отклонения, 95 % ДИ — доверительный интервал, среднее — отклонение значений ОСО.

Fig. 3. Deviations of TO values from long-term averages for the polar region (63–90° latitude) of the NH and SH for all cases of ionospheric storms (37 cases) for the eastern and western phases of the QBO.

The large dotted line indicates the start of storm («0» day). SD — the standard deviation estimate, 95 % CI — the confidence interval, mean — the deviation of the TOC values.

ОСО во время бурь с $W_p > 9$ (рис. 1 б) может объясняться малым количеством случаев в выборке.

Для теплого и холодного сезонов ЮП характерно отрицательное отклонение ОСО за пять дней до пика бури, а также ослабление снижения ОСО на пятый — десятый дни после пика бури (рис. 2). Для СП в теплый сезон незначительно проявляется эффект снижения ОСО, в некоторые дни наблюдаются даже положительные отклонения, что указывает на доминирование динамических процессов

над радиационно-химическим воздействием и подтверждается коротким рядом статистически значимых точек после нулевого дня. Холодный сезон СП имеет аналогичную тенденцию отклонений ОСО, как и в ЮП, подтверждаемую рядом значимых точек. Разделение всех рассматриваемых событий бурь по фазам КДК (рис. 3) демонстрирует тот же эффект снижения ОСО как в день начала ионосферной бури, так и в последующие четыре дня. Восточная фаза КДК имеет в некоторые дни незначительное положительное отклонение ОСО обоих полушарий. Западная фаза КДК отличается только снижением ОСО во все дни развития ионосферной бури. Закономерности, демонстрируемые ходом всех графиков по фазам КДК, подтверждаются рядами статистически значимых точек.

Наличие ионосферной бури отражается на снижении полярного озона обоих полушарий. Только в период развития восточной фазы КДК и теплого сезона года наблюдается некоторое незначительное положительное отклонение ОСО в полярной области СП (до +2 ед. Д.). При западной фазе КДК и холодного сезона года наблюдается отрицательное отклонение ОСО, и после пика бури («0» день) еще большее снижение ОСО в последующие 3—4 дня.

Отклонение ОСО для СП и ЮП

Для выявления вариаций ОСО в связи с ионосферными бурями в глобальных масштабах была проведена процедура осреднения в каждой точке сетки СП и ЮП для трех периодов развития ионосферных бурь. Период до начала бури: –5 день — 0 день; период бури: 0 день — начало и конец бури; период после бури: 0 день — +5 день с дальнейшим нахождением их отклонений от многолетней нормы 1980—2025 гг. На рис. 4 приведены распределения отклонений ОСО в обоих полушариях для всех исследуемых случаев ионосферных бурь, $Wp\text{-mean} \geq +6$.

Полученные для обоих полушарий распределения отклонений ОСО подтверждают приведенные ранее результаты для полярных областей. Наибольшие положительные отклонения ОСО от нормы 1980—2025 гг. в период до ионосферной бури в СП (рис. 4 а) наблюдаются в Арктическом секторе от Канадского Арктического архипелага до северо-восточной части Евразии (+25 ед. Д.). В данных районах также наблюдается область FDR-значимости ($p < 0,1$). В период ионосферной бури в СП (рис. 4 б) наибольшие положительные отклонения от нормы наблюдаются над Восточно-Сибирским морем и морем Лаптевых (до +25 ед. Д.), а также на севере Канады и над Аляской (до +20 ед. Д.). Перечисленные районы располагаются в области FDR-значимости ($p < 0,05$). В период после ионосферной бури в СП (рис. 4 в) наблюдаются схожие тенденции отклонений ОСО, как во время ионосферной бури.

В ЮП (рис. 4 г—е) наибольшие отклонения ОСО от нормы 1980—2025 гг. наблюдаются в периоды до (рис. 4 г) и после (рис. 4 е) ионосферной бури (до –23,5 ед. Д.) с центром аномалий, локализованных над Восточной Антарктидой. Для обоих периодов данный район располагается в области FDR-значимости ($p < 0,05$). В период ионосферной бури (рис. 4 д) центр отрицательной аномалии ОСО над Антарктидой менее выражен (до –16 ед. Д.) по сравнению с периодами до и после ионосферной бури и уменьшился по площади.

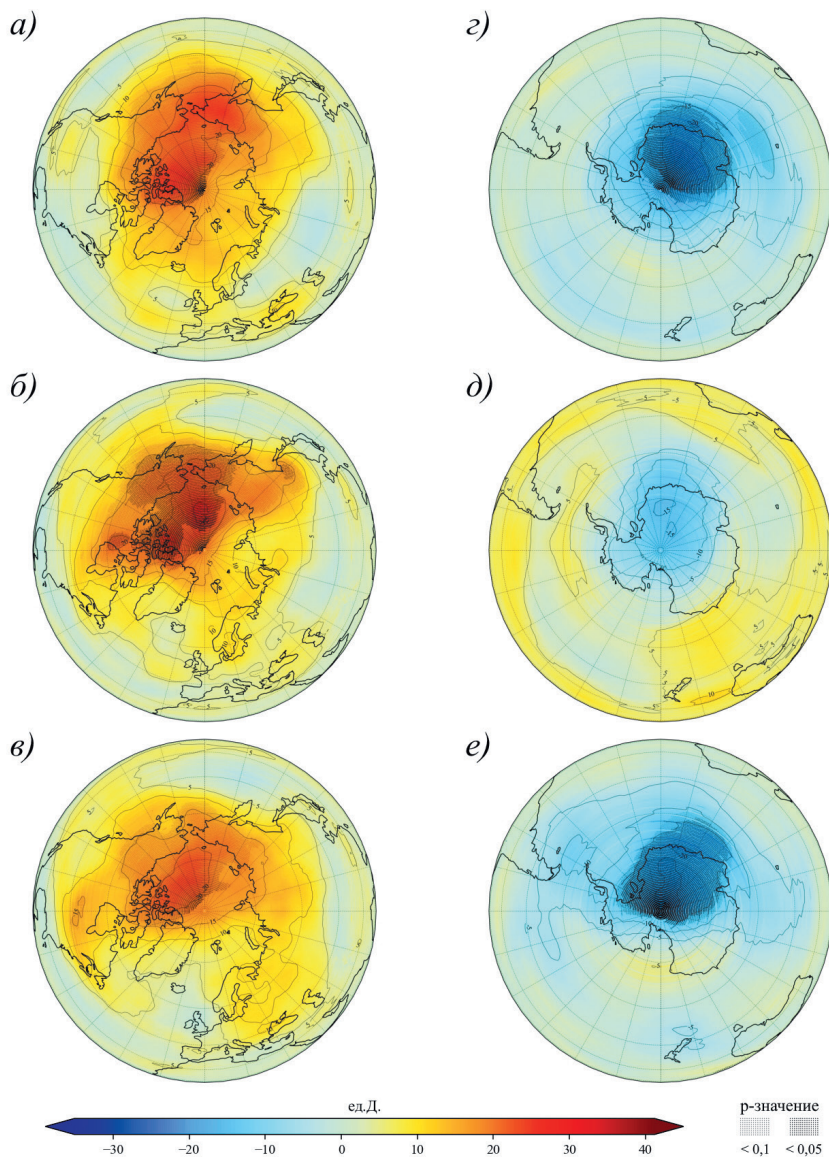


Рис. 4. Осредненные карты отклонений значений ОСО от многолетней нормы 1980—2025 гг. в единицах Добсона (ед. Д.) для всех случаев ионосферных бурь, $W_p\text{-mean} \geq +6$ (37 случаев) для СП (а, б, в) и ЮП (г, д, е): а, г) период: –5 дней — 0 день; б, д) период: 0 день — начало и конец бури; в, е) период: 0 день — +5 дней.

Fig. 4. Average deviations of TOC assessment maps for the 1980—2025 norms in Dobson units (DU) for all cases of ionospheric storms, $W_p\text{-mean} \geq +6$ (37 cases) for the NH (а, б, в) and SH (г, д, е): а, г) period: –5 days — 0 day; б, д) period: 0 day — start and final of storm; в, е) period: 0 day — +5 days.

Сезонность эффектов распределения отклонений ОСО

Далее рассмотрим сезонность эффектов глобального распределения отклонений ОСО в период развития ионосферных бурь. Для СП в теплый сезон (рис. 5 *а—в*) наибольшие отклонения ОСО от нормы 1980—2025 гг. наблюдаются в периоды до и во время бури над территорией Аляски и Чукотки (+26,2 ед. Д.). В период после бури максимальные отклонения ОСО постепенно снижаются. Несмотря на наличие относительно значительных отклонений, области FDR-значимости отсутствуют для всех карт, что может быть связано с уменьшением выборки случаев. Также по представленным картам видно, что в теплый сезон для тихоокеанского сектора преобладают положительные отклонения ОСО, в то время как атлантический сектор характеризуется нейтральным состоянием или незначительными отрицательными отклонениями ОСО.

Холодный сезон в СП (рис. 5 *г—е*) отличается большими отклонениями ОСО от нормы до, во время и после ионосферной бури, чем теплый. Наибольшие отклонения положительного знака наблюдаются во время ионосферной бури в районе Канадского Арктического архипелага (до +41 ед. Д.). В период до ионосферной бури, наблюдается значительный максимум отклонений до +34 ед. Д. севернее Канадского Арктического архипелага. Зона максимумов отклонений ОСО (до +40 ед. Д.) в период ионосферной бури сохраняется и в период после ионосферной бури с областью FDR-значимости ($p < 0,1$). Для холодного сезона в период после ионосферной бури в районе южнее Камчатки наблюдается формирование зоны отрицательных отклонений ОСО (–10 ед. Д.). Стоит отметить, что все перечисленные области не подкреплены FDR-штриховкой, причиной этого может являться недостаточность объема выборки, тем не менее, описанные отклонения могут быть следствием развития полярного стратосферного вихря в холодный период, который динамически и химически перераспределяет и разрушает молекулы озона [36—39].

В теплый сезон с наступлением бури падение ОСО в СП (рис. 6 *а*) достигает до 11 ед. Д. в районе Гренландии. Слабее проявляются области роста ОСО над территорией Сибири и северной частью Тихого океана, где рост достигает до 7,92 ед. Д. После ионосферной бури в СП за теплый сезон наиболее заметен рост ОСО на 9,7 ед. Д. южнее Аляски (рис. 6 *б*). С наступлением ионосферной бури в холодный сезон в СП (рис. 6 *в*) наблюдается рост ОСО до +29 ед. Д. для северо-востока Северной Америки. В низких и средних широтах тихоокеанского сектора наблюдается рост ОСО до +15 ед. Д. Снижение ОСО наиболее выражено севернее Таймыра и в средних широтах на востоке Тихого океана (до –22 ед. Д.). После бури (рис. 6 *г*) наблюдается рост ОСО на ~15 ед. Д. над западной Сибирью. Над территорией Аляски после бури наблюдается снижение ОСО на 17 ед. Д. Возможно, такое чередование положительных и отрицательных отклонений ОСО по всему СП может быть сопоставимо с числом волн Россби и планетарной динамикой верхней тропосферы и нижней стратосферы [40, 41]. Отсутствие зон значимости (менее $p = 2$) после поправки FDR для обоих сезонов может быть связано с недостаточным объемом выборок.

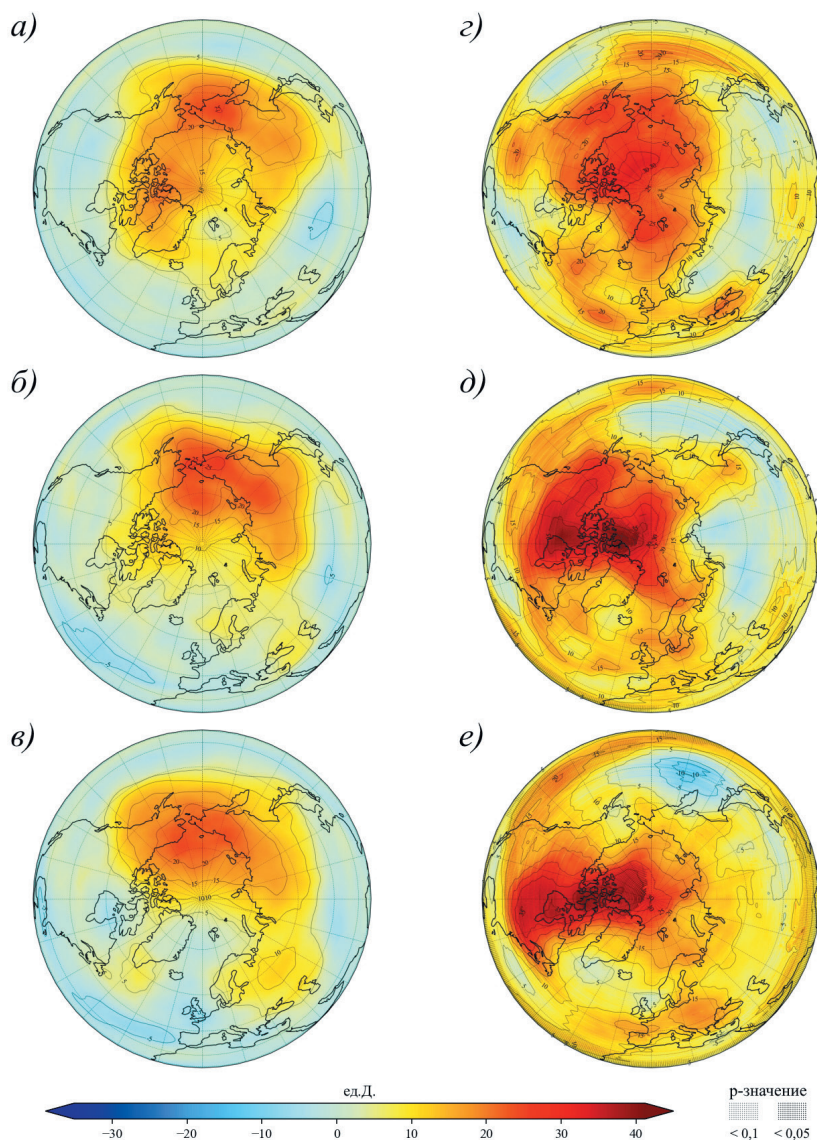


Рис. 5. Осредненные карты изменения отклонений ОСО (ед. Д.) от нормы 1980—2025 гг. во время ионосферных бурь для СП: а, б, в) для теплого сезона (июнь—ноябрь); г, д, е) для холодного сезона (декабрь—май): а, г) период: –5 дней — 0 день; б, д) период: 0 день — начало и конец бури; в, е) период: 0 день — +5 дней.

Fig. 5. Averaged maps of changes in TOC deviations (DU) from the norm for 1980—2025 during ionospheric storms for the NH: а, б, в) for the warm season (June—November); г, д, е) for the cold season (December—May): а, г) period: –5 days — 0 day; б, д) period: 0 day — start and final of storm; в, е) period: 0 day — +5 days.

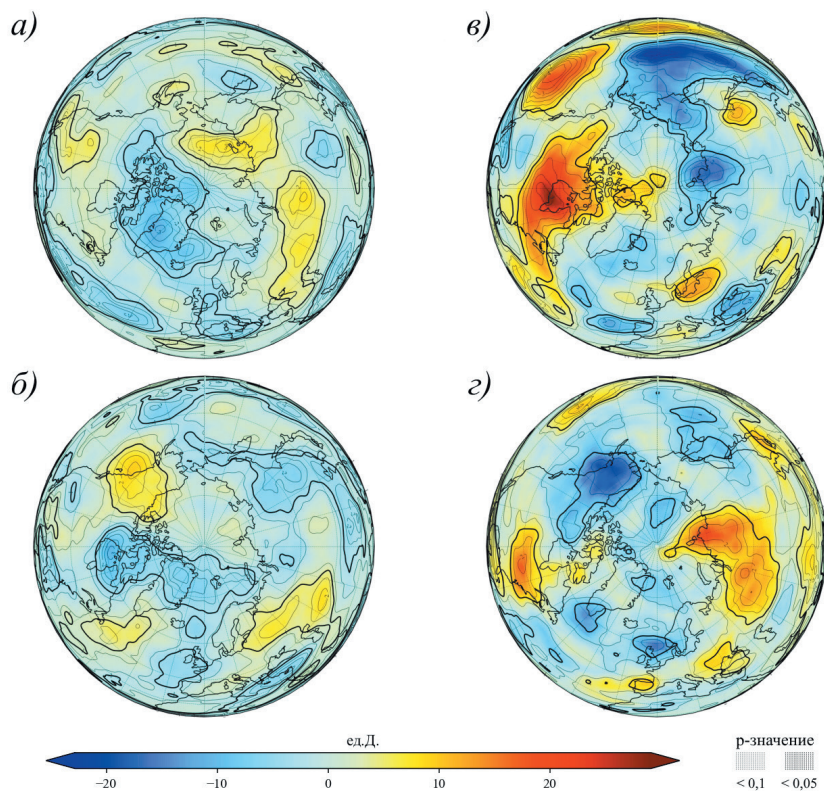


Рис. 6. Картограммы разности значений ОСО (ед. Д.) для СП в периоды до и во время бури (а, в), во время и после бури (б, г): а, б) для теплого сезона (июнь—ноябрь); в, г) для холодного сезона (декабрь—май).

Изолинии — значения t -критерия Стьюдента.

Сплошные толстые линии — значения t -критерия Стьюдента $|t| \geq 1$.

Fig. 6. Schematic maps of the difference in TOC values (DU) for the NH in the periods: before and during the storm (a, в), during and after the storm (б, г). a, б) for the warm season (June—November); в, г) for the cold season (December—May).

Isolines are Student's t -test values. Solid thick lines are Student's t -test values ($|t| \geq 1$).

В ЮП в теплый сезон (рис. 7 а—в) отклонения ОСО от нормы характеризуются примерно равной амплитудой для всех периодов. В период до ионосферной бури центр отрицательной аномалии (–15 ед. Д.) локализован над Антарктидой, а положительная аномалия (до +10 ед. Д.) наблюдается у тихоокеанского побережья Антарктиды. В период ионосферной бури до +17,41 ед. Д. усилилось отклонение ОСО в районе тихоокеанского побережья Антарктиды, обширные области с отклонениями 10—15 ед. Д. охватывают средние широты всех трех океанов. В период после ионосферной бури выделяется область отрицательного отклонения до –15 ед. Д., которая располагается над Антарктидой. В холодный сезон

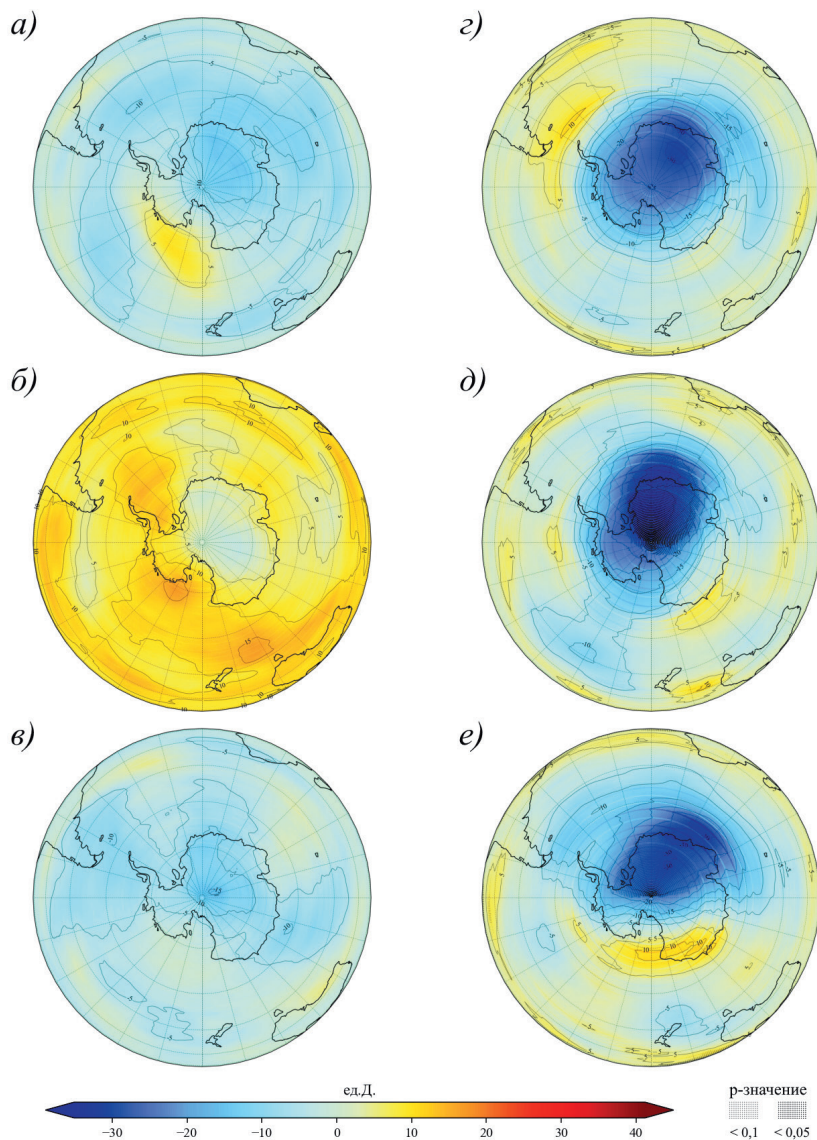


Рис. 7. Осредненные карты изменения отклонений ОСО (ед. Д.) от нормы 1980—2025 гг. во время ионосферных бурь для ЮП: а, б, в) для теплого сезона (декабрь—май); з, д, е) для холодного сезона (июнь—ноябрь): а, з) период: –5 дней — 0 день; б, д) период: 0 день — начало и конец бури; в, е) период: 0 день — +5 дней.

Fig. 7. Averaged maps of changes in TOC deviations (DU) from the 1980—2025 norm during ionospheric storms for the SH: а, б, в) for the warm season (December—May); з, д, е) for the cold season (June—November): а, з) period: –5 days — 0 day; б, д) period: 0 day — start and final of storm; в, е) period: 0 day — +5 days.

в ЮП (рис. 7 $z-e$), как и в СП, амплитуда отклонений ОСО от нормы выше, чем в теплый период. Наибольшие отклонения наблюдаются в период ионосферной бури в районе Восточной Антарктиды (до $-35,0$ ед. Д.). Данный район выделяется отрицательными отклонениями ОСО от нормы во все периоды, но в период ионосферной бури и после нее, здесь присутствует штриховка FDR: с $p < 0,05$ для периодов бури и с $p < 0,1$ для периода после нее.

Карты разности отклонений ОСО от нормы в теплый сезон представлены на рисунке 8 $a, б$. С наступлением ионосферной бури (рис. 8 a), наиболее интенсивные центры роста ОСО (до $+22,7$ ед. Д.) локализованы над югом Индийского и

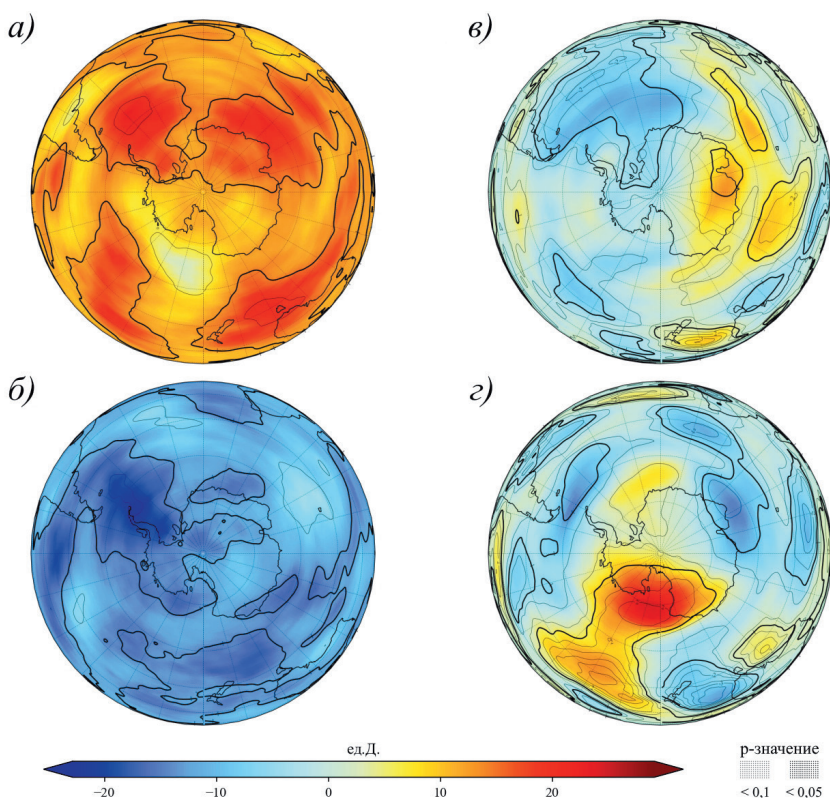


Рис. 8. Картосхемы разности значений ОСО (ед. Д.) для ЮП в периоды до и во время бури ($a, в$), во время и после бури ($б, г$): $a, б$) для теплого сезона (июнь—ноябрь); $в, г$) для холодного сезона (декабрь—май).

Изолинии — значения t -критерия Стьюдента.

Сплошные толстые линии — значения t -критерия Стьюдента ($|t| \geq 1$).

Fig. 8. Schematic maps of the difference in TOC values (DU) for the SH in the periods: before and during the storm ($a, в$), during and after the storm ($б, г$): $a, б$) for the warm season (June—November); $в, г$) for the cold season (December—May).

Isolines are Student's t -test values. Solid thick lines are Student's t -test values ($|t| \geq 1$).

Атлантического океанов. С окончанием ионосферной бури (рис. 8 б), наибольшее снижение ОСО (–22,8 ед. Д.) наблюдается в районе Антарктического полуострова. На обеих картах, области $t = 1$ охватывают внетропическое пространство ЮП, при этом t достигает 1,5 лишь в областях максимального роста или снижения ОСО.

В холодный сезон в период бури (рис. 8 в) наблюдаются области с разным знаком, что может быть вызвано сильным влиянием полярного вихря. Рост ОСО (до +13,4 ед. Д.) наблюдается на юге Индийского океана, в то время как снижение ОСО (до –12,4 ед. Д.) наиболее выражено на юге Атлантического океана. После бури (рис. 8 г) наибольший рост ОСО (до +24,3 ед. Д.) наблюдается над тихоокеанским побережьем Антарктиды, наибольшее снижение ОСО (до –14,9 ед. Д.) отмечается в южных частях Индийского и Атлантического океанов. На обеих картах области с $|t| \geq 1,0$ занимают крупные районы, связанные с местами наибольшего изменения ОСО, где $|t|$ достигало 2—3,5. FDR-крап не проявился для всех карт разности для обоих сезонов, что может быть связано с малым объемом выборок данных. Несмотря на то, что локальные значения t -критерия не везде достигают порога 0,05, высокая пространственная корреляция между отклонениями ОСО и возмущениями ионосферы указывает на наличие системного геофизического отклика.

Заключение

Рассмотрены эффекты отклика ОСО на интенсивные ионосферные бури (по планетарному индексу $W_p\text{-mean} \geq +6$) в полярной зоне (63—90° ш.) обоих полушарий. Наиболее сильный эффект отрицательного отклонения ОСО наблюдается в СП особенно в холодный сезон года и при западной фазе КДК (до –15 ... –20 ед. Д.), где снижение значений ОСО начинается в день начала бури и сохраняется в течение последующих около 4,5 дней. После завершения интенсивной ионосферной бури наблюдается восстановление и резкий рост ОСО в обоих полушариях полярных зон.

Анализ пространственных распределений ОСО по всей территории полушарий показал существенную зональную анизотропию озонного отклика внетропических широт, которая может быть связана с воздействием планетарных волн и особенностями атмосферной циркуляции. Установлено, что значительная часть выявленных аномалий не всегда достигает строгих критериев статистической значимости, что свидетельствует о недостаточной выборке случаев, высоком уровне естественной вариабельности атмосферы, но при этом аномалии обладают пространственной когерентностью с областями экстремумов отклонений озона.

В СП в целом преобладают положительные отклонения ОСО, наиболее выраженные в арктическом секторе (до +41 ед. Д.), которые сохраняются на всех этапах развития ионосферной бури и постепенно ослабевают после ее завершения, отражая восстановление озоносферы. В ЮП, напротив, доминируют отрицательные аномалии, локализованные преимущественно над Восточной Антарктидой (до –35,0 ед. Д.), что указывает на тесную связь с устойчивыми циркуляционными и химическими процессами, характерными для области озоновой дыры.

В теплый период отклонения ОСО в обоих полушариях менее выражены, в ЮП они статистически незначимы, что может быть обусловлено недостаточным объемом выборки данных. В холодный сезон для обоих полушарий, напротив, наблюдаются более интенсивные и пространственно организованные аномалии ОСО, особенно в полярных регионах, где влияние полярного вихря усиливает как динамическую, так и химическую перестройку озоносферы. Таким образом, обширные области с уровнем значимости ($p < 0,15$, $|t| = 1-2$) пространственно согласованы с центрами аномалий озона, что свидетельствует о физической природе наблюдаемого эффекта отклика ОСО на ионосферные бури.

Список литературы

1. Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2022. Geneva: World Meteorological Organization, 2022. 66 p. [Электронный ресурс]: сайт. URL: <https://ozone.unep.org/system/files/documents/Scientific-Assessment-of-Ozone-Depletion-2022-Executive-Summary.pdf> (дата обращения: 08.10.2025).
2. Gray L. J., Beer J., Geller M. et al. Solar influences on climate // *Reviews of Geophysics*. 2010. Vol. 48, № 4. RG4001. doi: 10.1029/2009RG000282.
3. Ward W., Seppälä A., Yiğit E. et al. Role of the Sun and the middle atmosphere/thermosphere/ionosphere in climate (ROSMIC): A retrospective and prospective view // *Progress in Earth and Planetary Science*. 2021. Vol. 8. Art. 47. doi: 10.1186/s40645-021-00433-8.
4. Kilifarska N. Mechanism of lower stratospheric ozone influence on climate // *International Review of Physics*. 2012. Vol. 6. No. 3. P. 279—289. doi: 10.1134/S1069351315050067.
5. Красовский А. Н., Шлендер Т. В., Бородко С. К. и др. Наследие Чижевского А. Л. о солнечно-земных связях. Роль озонового механизма. Развитие географических исследований в Беларуси в XX—XXI веках.: материалы международной научной и практической конференции. Минск; 2021. С. 71—91. [Электронный ресурс]: сайт. URL: <https://elib.bsu.by/handle/123456789/268237> (дата обращения: 08.10.2025).
6. Белаховский В. Б., Будников П. А., Калишин А. С. и др. Влияние геомагнитных возмущений на сцинтилляции ГНСС-сигналов и возникновение ГИТ в авроральных и субавроральных широтах // *Солнечно-земная физика*. 2023. Т. 9, № 3. С. 58—72. doi: 10.12737/szf-93202307.
7. Pansong C., Kenpankho P. Low-Latitude Ionospheric Responses to Two Matched Intense Equinoctial Geomagnetic Storms: A Case-Based Comparison Between Solar Cycles 24 and 25 // *Annales Geophysicae*. 2026. Vol. 69. doi: 10.4401/ag-9415.
8. Гуляева Т. Л. Показатели изменчивости ионосферы во время геомагнитных бурь по наблюдениям GPS // *Солнечно-земная физика*. 2008. Т. 2. Вып. 12. С. 152—156.
9. Gulyaeva T. L., Stanislawski I. Derivation of a planetary ionospheric storm index // *Annales Geophysicae*. 2008. Vol. 26, No. 8. P. 2645—2648. doi: 10.5194/angeo-26-2645-2008.
10. Rodger C. J., Clilverd M. A., Seppälä A. et al. Radiation belt electron precipitation due to geomagnetic storms: Significance to middle atmosphere ozone chemistry // *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. 2010. Vol. 115. A11320. doi: 10.1029/2010JA015599.
11. Кривошук А. А., Репнев А. И. Воздействие космических факторов на озоносферу Земли. М.: ГЕОС, 2009. 384 с.
12. Sinnhuber M., Nieder H., Wieters N. Energetic particle precipitation and the chemistry of the mesosphere/lower thermosphere // *Surveys in Geophysics*. 2012. Vol. 33. P. 1281—1334. doi: 10.1007/s10712-012-9201-3.
13. Rozanov E. V. Effect of Precipitating Energetic Particles on the Ozone Layer and Climate // *Russian Journal of Physical Chemistry B*. 2018. Vol. 12. P. 786—790. doi: 10.1134/S1990793118040152.
14. Friederich F., Sinnhuber M., Funke B. et al. Local impact of solar variation on nitrogen dioxide in the lower mesosphere and upper stratosphere from 2007 to 2012 // *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2014. Vol. 14. P. 4055—4064. doi: 10.5194/acp-14-4055-2014.

15. Seppälä A., Clilverd M. A., Beharrell M. J. et al. Substorm-induced energetic electron precipitation: Impact on atmospheric chemistry // *Geophysical Research Letters*. 2015. Vol. 42. No. 19. P. 8172—8176. doi: 10.1002/2015GL065523.
16. Seppälä A., Clilverd M. A., Rodger C. J. et al. The effects of hard-spectra solar proton events on the middle atmosphere // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2008. Vol. 113. A11311. doi: 10.1029/2008JA013517.
17. Danilov A. D., Laštovička J. Effects of geomagnetic storms on the ionosphere and atmosphere // *International Journal of Geomagnetism and Aeronomy*. 2001. Vol. 2, No. 3. P. 209—224.
18. Laštovička J., Mlch P. Is ozone affected by geomagnetic storms? // *Advances in Space Research*. 1999. Vol. 24, № 5. P. 631—640. doi: 10.1016/S0273-1177(99)00103-9.
19. Laštovička J., Křižan P. Impact of strong geomagnetic storms on total ozone at southern higher middle latitudes // *Studia Geophysica et Geodaetica*. 2008. Vol. 53. No. 2. P. 151—156. doi: 10.1007/s11200-008-0009-z.
20. Mansilla G. A. Variation of total ozone during 24 August 2005 magnetic storm: A case study // *Atmospheric and Climate Sciences*. 2013. Vol. 3. No. 4. P. 475—480. doi: 10.4236/acs.2013.34049.
21. Kilifarska N., Peqini K. Impact of Forbush decreases and geomagnetic storms on the atmospheric ozone profiles // *Earth and Space Science*. 2023. Vol. 10. No. 7. Art. e2023EA002954. doi: 10.1029/2023EA002954.
22. Zossi M. M., Zotto E. M., Mansilla G. A. Can geomagnetic storms affect stratospheric ozone and reactive nitrogen in the South Atlantic Anomaly zone? // *Pure and Applied Geophysics*. 2021. Vol. 178. No. 1. P. 141—154. doi: 10.1007/s00024-020-02633-7.
23. Huang C., Huang F., Zhang X. et al. The contribution of geomagnetic activity to polar ozone changes in the upper atmosphere // *Advances in Meteorology*. 2017. Vol. 2017. No. 1. Article 1729454. doi: 10.1155/2017/1729454.
24. Tartaglione N., Toniazzo T., Orsolini Y., Otterå O. H. Impact of solar irradiance and geomagnetic activity on polar reactive nitrogen, ozone and temperature in WACCM simulations // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. 2020. Vol. 209. 105398. doi: 10.1016/j.jastp.2020.105398.
25. Singh, Y. P. Statistical considerations in superposed epoch analysis and its applications in space research // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. 2006. Vol. 68, No. 7. P. 803—813. doi: 10.1016/j.jastp.2006.01.007.
26. Walton S. D., Murphy K. R. Superposed epoch analysis using time-normalization: A Python tool for statistical event analysis // *Frontiers in Astronomy and Space Sciences*. 2022. Vol. 9. 1000145. doi: 10.3389/fspas.2022.1000145.
27. ИЗМИРАН. Ионосферная погода. [Электронный ресурс]: сайт. URL: <https://www.izmiran.ru/ionosphere/weather/storm/> (дата обращения: 19.11.2025).
28. Global Differential GPS (GDGPS) System [Электронный ресурс]. URL: <https://gdgps.jpl.nasa.gov>. (дата обращения: 19.11.2025).
29. Stanislawski I., Gulyaeva T. L. Ionospheric W index based on global navigation satellite system total electron content in the operational use for navigation systems // *Satellite Positioning: Methods, Models and Applications* / ed. S. Jin. Rijeka: In Tech, 2015. P. 155—169. doi: 10.5772/59902.
30. NASA Ozone Watch. [Электронный ресурс]: сайт. URL: <https://ozonewatch.gsfc.nasa.gov> (дата обращения: 19.11.2025).
31. Gelaro R. et al. The Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications, Version 2 (MERRA-2) // *Journal of Climate*. 2017. Vol. 30. No. 14. P. 5419—5454. doi: 10.1175/JCLI-D-16-0758.1.
32. The Quasi-Biennial-Oscillation (QBO) Data Serie. [Электронный ресурс]: сайт. URL: <https://www.geo.fu-berlin.de/en/met/ag/strat/produkte/qbo/index.html> (дата обращения: 19.11.2025).
33. Tinsley B. A., Zhou L. Effects of global circuit downward current flow on atmospheric dynamics: modeling of relevant cloud microphysics // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2014. Vol. 119. No. 10. P. 5905—5920. doi: 10.1002/2013JD020601.
34. Laštovička J., Křižan P. Geomagnetic storms, Forbush decreases of cosmic rays and total ozone at northern higher middle latitudes // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. 2005. Vol. 67, No. 1—2. P. 119—124. doi: 10.1016/j.jastp.2004.07.021.

35. Wang W., Tian W., Zhang J. et al. Zonally asymmetric influences of the quasi-biennial oscillation on stratospheric ozone // *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2022. Vol. 22. No. 20. P. 13695—13711. doi: 10.5194/acp-22-13695-2022.
36. Wohltmann I., von der Gathen P., Lehmann R. et al. Near-complete local reduction of Arctic stratospheric ozone by severe chemical loss in spring 2020 // *Geophysical Research Letters*. 2020. Vol. 47. Art. 20. e2020GL089547. doi: 10.1029/2020GL089547.
37. Tsvetkova N. D., Vargin P. N., Lukyanov A. N. et al. Studying chemical ozone depletion and dynamic processes in the Arctic stratosphere in the winter 2019/2020 // *Russian Meteorology and Hydrology*. 2021. Vol. 46. P. 606—615. doi: 10.3103/S1068373921090065.
38. Зуев В. В., Савельева Е. С. Аномальное разрушение озона в Арктике с января по апрель 2020 г.: динамика полярного вихря под влиянием планетарных волн // *Исследование Земли из космоса*. 2021. No. 1. С. 41—52. doi: 10.31857/S0205961421010115.
39. Зоркальцева О. С., Антохина О. Ю., Гочаков А. В., Артамонов М. Ф. Эволюция стратосферного полярного вихря на примере зимних периодов 2022–2024 гг. // *Солнечно-земная физика*. 2025. Т. 11, No. 2. doi: 10.12737/szf-112202508.
40. Zhang C., Zhang C., Grytsai A., Evtushevsky O. et al. Rossby waves in total ozone over the Arctic in 2000–2021 // *Remote Sensing*. 2022. Vol. 14. 2192. doi: 10.3390/rs14092192.
41. Riishøjgaard L. P., Källén E. On the correlation between ozone and potential vorticity for large-scale Rossby waves // *Journal of Geophysical Research*. 1997. Vol. 102, № D7. P. 8793—8804. doi: 10.1029/96JD03059.

References

1. *Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2022*. Geneva: World Meteorological Organization, 2022; 66 p. Available at: <https://ozone.unep.org/system/files/documents/Scientific-Assessment-of-Ozone-Depletion-2022-Executive-Summary.pdf> (accessed 08.10.2025).
2. Gray L. J., Beer J., Geller M. et al. Solar influences on climate. *Reviews of Geophysics*. 2010; (48): (4): RG4001. doi: 10.1029/2009RG000282.
3. Ward W., Seppälä A., Yiğit E. et al. Role of the Sun and the middle atmosphere/thermosphere/ionosphere in climate (ROSMIC): A retrospective and prospective view. *Progress in Earth and Planetary Science*. 2021; (8):47. doi:10.1186/s40645-021-00433-8.
4. Kilifarska N. Mechanism of lower stratospheric ozone influence on climate. *International Review of Physics*. 2012; 6(3): 279—289. doi: 10.1134/S1069351315050067.
5. Krasovskiy A. N., Shlender T. V., Borodko S. K. et al. Nasledie Chizhevskogo A.L. o solnechno-zemnykh svyazyakh. Rol' ozonovogo mekhanizma = Chizhevsky's legacy on solar-terrestrial relations. The role of the ozone mechanism. *Razvitie geograficheskikh issledovaniy v Belarusi v XX—XXI vekakh: materialy mezhdunarodnoy nauchnoy i prakticheskoy konferentsii* = Development of geographical research in Belarus in the XX—XXI centuries: materials of the international scientific and practical conference. Minsk, 2021; (71—91). Available at: <https://elib.bsu.by/handle/123456789/268237> (accessed 08.10.2025). (In Russ.).
6. Belakhovsky V. B., Budnikov P. A., Kalishin A. S. et al. Vliyanie geomagnitnykh vozmushcheniy na stsintillyatsii GNSS-signalov i vozniknovenie GIT v avroral'nykh i subavroral'nykh shirotakh = Influence of geomagnetic disturbances on GNSS signal scintillations and GIC occurrence at auroral and subauroral latitudes. *Solnechno-zemnaya fizika = Solar-Terrestrial Physics*. 2023; 9(3): (58—72). doi: 10.12737/szf-93202307. (In Russ.).
7. Pansong C., Kenpankho P. Low-Latitude Ionospheric Responses to Two Matched Intense Equinoctial Geomagnetic Storms: A Case-Based Comparison Between Solar Cycles 24 and 25. *Annales Geophysicae*. 2026; (69). doi: 10.4401/ag-9415.
8. Gulyaeva T. L. Pokazateli izmenchivosti ionosfery vo vremiya geomagnitnykh bur' po nablyudeniya GPS = Indices of ionospheric variability during geomagnetic storms from GPS observations. *Solnechno-zemnaya fizika = Solar-Terrestrial Physics*. 2008; 2(12):(152—156). (In Russ.).
9. Gulyaeva T. L., Stanislawski I. Derivation of a planetary ionospheric storm index. *Annales Geophysicae*. 2008; 26(8): 2645—2648. doi: 10.5194/angeo-26-2645-2008.

10. Rodger C. J., Clilverd M. A., Seppälä A. et al. Radiation belt electron precipitation due to geomagnetic storms: Significance to middle atmosphere ozone chemistry. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. 2010; (115): A11320. doi: 10.1029/2010JA015599.
11. Krivolutskiy A. A., Repnev A. I. *Vozdeystvie kosmicheskikh faktorov na ozonosferu Zemli* = Impact of cosmic factors on the Earth's ozonosphere. Moscow: GEOS, 2009; 384 p. (In Russ.).
12. Sinnhuber M., Nieder H., Wieters N. Energetic particle precipitation and the chemistry of the mesosphere/lower thermosphere. *Surveys in Geophysics*. 2012; (33): 1281—1334. doi: 10.1007/s10712-012-9201-3.
13. Rozanov E. V. Effect of Precipitating Energetic Particles on the Ozone Layer and Climate. *Russian Journal of Physical Chemistry B*. 2018; (12): 786—790. doi: 10.1134/S1990793118040152.
14. Friederich F., Sinnhuber M., Funke B. et al. Local impact of solar variation on nitrogen dioxide in the lower mesosphere and upper stratosphere from 2007 to 2012. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2014; (14): 4055—4064. doi: 10.5194/acp-14-4055-2014.
15. Seppälä A., Clilverd M. A., Beharrell M. J. et al. Substorm-induced energetic electron precipitation: Impact on atmospheric chemistry. *Geophysical Research Letters*. 2015; 42(19): 8172—8176. doi: 10.1002/2015GL065523.
16. Seppälä A., Clilverd M. A., Rodger C. J. et al. The effects of hard-spectra solar proton events on the middle atmosphere. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2008; (113): A11311. doi: 10.1029/2008JA013517.
17. Danilov A. D., Laštovička J. Effects of geomagnetic storms on the ionosphere and atmosphere. *International Journal of Geomagnetism and Aeronomy*. 2001; 2(3): 209—224.
18. Laštovička J., Mlch P. Is ozone affected by geomagnetic storms? *Advances in Space Research*. 1999; 24(5): 631—640. doi: 10.1016/S0273-1177(99)00103-9.
19. Laštovička J., Křížan P. Impact of strong geomagnetic storms on total ozone at southern higher middle latitudes. *Studia Geophysica et Geodaetica*. 2008; 53(2):151—156. doi: 10.1007/s11200-008-0009-z.
20. Mansilla G. A. Variation of total ozone during 24 August 2005 magnetic storm: A case study. *Atmospheric and Climate Sciences*. 2013; 3(4): 475—480. doi: 10.4236/acs.2013.34049.
21. Kilifarska N., Pegini K. Impact of Forbush decreases and geomagnetic storms on the atmospheric ozone profiles. *Earth and Space Science*. 2023; 10(7): e2023EA002954. doi: 10.1029/2023EA002954.
22. Zossi M. M., Zotto E. M., Mansilla G. A. Can geomagnetic storms affect stratospheric ozone and reactive nitrogen in the South Atlantic Anomaly zone? *Pure and Applied Geophysics*. 2021; 178(1): 141—154. doi: 10.1007/s00024-020-02633-7.
23. Huang C., Huang F., Zhang X. et al. The contribution of geomagnetic activity to polar ozone changes in the upper atmosphere. *Advances in Meteorology*. 2017; 2017(1): 1729454. doi: 10.1155/2017/1729454.
24. Tartaglione N., Toniazio T., Orsolini Y., Otterå O. H. Impact of solar irradiance and geomagnetic activity on polar reactive nitrogen, ozone and temperature in WACCM simulations. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. 2020; (209): 105398. doi: 10.1016/j.jastp.2020.105398.
25. Singh Y. P. Statistical considerations in superposed epoch analysis and its applications in space research. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. 2006; 68(7): 803—813. doi: 10.1016/j.jastp.2006.01.007.
26. Walton S. D., Murphy K. R. Superposed epoch analysis using time-normalization: A Python tool for statistical event analysis. *Frontiers in Astronomy and Space Sciences*. 2022; (9): 1000145. doi: 10.3389/fspas.2022.1000145.
27. IZMIRAN. Ionosfernaya pogoda = Ionospheric weather. Available at: <https://www.izmiran.ru/ionosphere/weather/storm/> (accessed 19.11.2025). (In Russ.).
28. Global Differential GPS (GDGPS) System. Available at: <https://gdgps.jpl.nasa.gov> (accessed 19.11.2025).
29. Stanislawski I., Gulyaeva T. L. Ionospheric W index based on global navigation satellite system total electron content in the operational use for navigation systems. In: Jin S. (ed.) *Satellite Positioning: Methods, Models and Applications*. Rijeka: InTech, 2015; 155—169. doi: 10.5772/59902.
30. NASA Ozone Watch. Available at: <https://ozonewatch.gsfc.nasa.gov> (accessed 19.11.2025).
31. Gelaro R. et al. The Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications, Version 2 (MERRA-2). *Journal of Climate*. 2017; 30(14):5419—5454. doi: 10.1175/JCLI-D-16-0758.1.

32. The Quasi-Biennial-Oscillation (QBO) Data Serie. Available at: <https://www.geo.fu-berlin.de/en/met/ag/strat/produkte/qbo/index.html> (accessed 19.11.2025).
33. Tinsley B. A., Zhou L. Effects of global circuit downward current flow on atmospheric dynamics: modeling of relevant cloud microphysics. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2014; 119(10): 5905—5920. doi: 10.1002/2013JD020601.
34. Laštovička J., Krizán P. Geomagnetic storms, Forbush decreases of cosmic rays and total ozone at northern higher middle latitudes. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. 2005; 67 (1—2): 119—124. doi: 10.1016/j.jastp.2004.07.021.
35. Wang W., Tian W., Zhang J. et al. Zonally asymmetric influences of the quasi-biennial oscillation on stratospheric ozone. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2022; 22(20): 13695—13711. doi: 10.5194/acp-22-13695-2022.
36. Wohltmann I., von der Gathen P., Lehmann R. et al. Near-complete local reduction of Arctic stratospheric ozone by severe chemical loss in spring 2020. *Geophysical Research Letters*. 2020; (47):20: e2020GL089547. doi: 10.1029/2020GL089547.
37. Tsvetkova N. D., Vargin P. N., Lukyanov A. N. et al. Studying chemical ozone depletion and dynamic processes in the Arctic stratosphere in the winter 2019/2020. *Russian Meteorology and Hydrology*. 2021; (46): (606—615). doi: 10.3103/S1068373921090065. (In Russ.).
38. Zuev V. V., Savelieva E. S. Abnormal ozone depletion in the Arctic from January to April 2020: dynamics of the polar vortex under the influence of planetary waves. *Issledovanie Zemli iz kosmosa = Earth Research from Space*. 2021; (1): (41—52). doi: 10.31857/S0205961421010115. (In Russ.).
39. Zorkaltseva O. S., Antokhina O. Yu., Gochakov A. V., Artamonov M. F. Evolution of the stratospheric polar vortex on the example of winter periods of 2022—2024. *Solnechno-zemnaya fizika = Solar-Terrestrial Physics*. 2025; (11): (2). doi: 10.12737/szf-112202508. (In Russ.).
40. Zhang C., Zhang C., Grytsai A., Evtushevsky O. et al. Rossby waves in total ozone over the Arctic in 2000—2021. *Remote Sensing*. 2022; (14): 2192. doi: 10.3390/rs14092192.
41. Riishøjgaard L. P., Källén E. On the correlation between ozone and potential vorticity for large-scale Rossby waves. *Journal of Geophysical Research*. 1997; 102(D7): 8793—8804. doi: 10.1029/96JD03059.

Информация об авторах

Жмодиков Антон Михайлович, младший научный сотрудник, ННИЦ МО БГУ, nomrec@bsu.by.
 Шлендер Тимофей Викторович, научный сотрудник, ННИЦ МО БГУ, shlenderTV@bsu.by.
 Красовский Александр Николаевич, ведущий научный сотрудник, кандидат физико-математических наук, доцент, ННИЦ МО БГУ, krasovsky@bsu.by.
 Жучкевич Вероника Вадимовна, старший научный сотрудник, ННИЦ МО БГУ, nomrec@bsu.by.
 Бородко Сергей Константинович, научный сотрудник, ННИЦ МО БГУ, skbarodka@gmail.com.
 Светашев Александр Георгиевич, кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией биофотоники, ННИЦ МО БГУ, asvetashev@tut.by.
 Яротов Алексей Евгеньевич, кандидат географических наук, профессор, доцент, директор ННИЦ МО БГУ, yarotau@bsu.by.

Information about authors

Zhmodikov Anton M., junior research fellow, National Ozone Monitoring Research and Education Center of the Belarusian State University.
 Shlender Timofey V., research fellow, National Ozone Monitoring Research and Education Center of the Belarusian State University.
 Krasouski Aliaksandr N., Leading Researcher, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, National Ozone Monitoring Research and Education Center of the Belarusian State University.
 Zhuchkevich Veronika V., senior research fellow, National Ozone Monitoring Research and Education Center of the Belarusian State University.
 Borodko Sergey K., research fellow, National Ozone Monitoring Research and Education Center of the Belarusian State University.

А. М. ЖМОДИКОВ, Т. В. ШЛЕНДЕР, А. Н. КРАСОВСКИЙ и др.

Svetashev Aleksandr G., Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Head of the Biophotonics Laboratory, National Ozone Monitoring Research and Education Center of the Belarusian State University.

Yarotau Aliaksei E., Candidate of Geographical Sciences, Professor, Associate Professor, Director of NOMREC BSU, National Ozone Monitoring Research and Education Center of the Belarusian State University.

Конфликт интересов: Конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила 04.12.2025

Принята в печать после доработки 20.05.2026

The article was received on 04.12.2025

The article was accepted after revision on 20.05.2026

Гидрометеорология и экология. 2026. № 83. С. 294—304.

Hydrometeorology and Ecology. 2026;(83):294—304.

Научная статья

УДК 621.371:556.55(203)(282.247.212)

doi: 10.33933/2713-3001-2026-83-294-304

Модельное представление возникновения сверхрефракции радиоволн сантиметрового диапазона над обширными водными поверхностями на примере Ладожского озера

***Анатолий Дмитриевич Кузнецов¹, Владимир Юрьевич Жуков¹,
Виктория Сергеевна Никитина², Татьяна Евгеньевна Симакина¹***

¹ Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург, Россия

² Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Санкт-Петербург, Россия, victoriaflint01@gmail.com

Аннотация. В статье рассматриваются сроки, в которые ДМРЛ-С, расположенный в поселке Воейково Ленинградской области, фиксировал северный берег Ладожского озера в качестве цели. Приводятся доказательства наличия сверхрефракции волн в исследуемые сроки. Рассматривается физическая природа появления сверхрефракции над водной поверхностью. Выдвигается гипотеза о том, что в тёплые дни при стабильной атмосфере, сопровождающейся приподнятой температурной инверсией, над озером посредством бризовой циркуляции формируется призма, ограниченная линиями равных концентраций водяного пара. Клинь призмы выступает на сушу, создавая зону влажного и прохладного воздуха, в которой происходит преломление радиоволны по типу сверхрефракции. Приводится модель траектории распространения волны над озером при сверхрефракции.

Ключевые слова: атмосферная рефракция, сверхрефракция, радиолокация, коэффициент преломления, моделирование.

Для цитирования: Кузнецов А. Д., Жуков В. Ю., Никитина В. С., Симакина Т. Е. Модельное представление возникновения сверхрефракции радиоволн сантиметрового диапазона над обширными водными поверхностями на примере Ладожского озера // Гидрометеорология и экология. 2026. № 83. С. 294—304. doi: 10.33933/2713-3001-2026-83-294-304.

Original article

A model illustrating superrefraction of centimeter-wave radio signals over large water surfaces using Lake Ladoga as an example

**Anatoly D. Kuznetsov¹, Vladimir Yu. Zhukov¹,
Victoria S. Nikitina², Tatiana E. Simakina¹**

¹ Russian State Hydrometeorological University, Saint Petersburg, Russia

² Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, Saint Petersburg, Russia,
victoriaflint01@gmail.com

Summary. The article explores the periods during which the DMLR-C located in Voeikovo settlement, in the Leningrad region, recorded the northern shoreline of Lake Ladoga as a target. The study presents evidence confirming the presence of superrefraction phenomena of radio waves within these specific time-frames. The authors analyze the physical mechanisms responsible for the occurrence of superrefraction over water surfaces, aiming to deepen the understanding of the atmospheric conditions that facilitate such optical and radio wave phenomena. A hypothesis is proposed suggesting that during warm days, under stable atmospheric conditions characterized by an elevated temperature inversion layer, a refractive prism can form over the lake. This prism is believed to be bounded by lines of equal water vapor concentration, effectively creating a lens-like structure. The apex of this prism extends onto land, resulting in a zone of moist, cool air. Within this zone, radio waves experience bending, similar to the effect observed in superrefraction events, which enhances the distance and clarity of radio wave propagation. The paper details a model describing the trajectory of radio waves as they pass over the lake under conditions of superrefraction. The model takes into account the influence of the proposed refractive prism and its interaction with the atmospheric layers. The research findings contribute to a more comprehensive understanding of atmospheric refraction mechanisms, especially over large aquatic surfaces, which is vital for improving the accuracy of radar and radio observations in such environments. Furthermore, this study has practical implications for the field of radio science and remote sensing, offering insights that could enhance the reliability and precision of radar detection and measurement near expansive water bodies. By understanding the conditions under which superrefraction occurs, scientists and engineers can better predict and compensate for these effects, thereby increasing the effectiveness of communication, navigation, and observation systems operating in these regions. Overall, this research advances the theoretical knowledge of atmospheric optical phenomena and opens pathways for future studies aimed at managing the challenges posed by atmospheric refraction in various applications.

Keywords: atmospheric refraction, superrefraction, radar, refractive index, modeling.

For citation: Kuznetsov A. D., Zhukov V. Yu., Nikitina V. S., Simakina T. E. A model illustrating superrefraction of centimeter-wave radio signals over large water surfaces using Lake Ladoga as an example *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydrometeorology and Ecology*. 2026;(83):(294—304). doi: 10.33933/2713-3001-2026-83-294-304. (In Russ.).

Введение

Точность решения радиолокационных задач во многом определяется необходимостью учета типов рефракции радиоволн в атмосфере. Различные виды рефракции по-разному воздействуют на траектории распространения радиоволн, что необходимо учитывать для повышения точности радиолокационных измерений. Глубокое понимание этих процессов важно для правильной интерпретации радиолокационных сигналов и повышения качества наблюдений.

Актуальность исследований по разработке методов и средств для учета типов рефракции радиоволн обусловлена прежде всего важностью правильного учета искривления луча, что позволило бы повысить точность определения координат метеорологических целей радиолокационными методами. Особую роль такой учет играет при интерпретации данных, получаемых с помощью современных метеорологических радиолокационных станций (МРЛ, ДМРЛ).

Установлено, что наибольшие погрешности в определении координат исследуемых объектов возникают именно из-за явления сверхрефракции [1]. Такой тип рефракции нередко наблюдается над крупными водными поверхностями, что подтверждается многолетними наблюдениями, проводящимися ДМРЛ-С «Воейково» в посёлке Воейково Ленинградской области.

В жаркие летние дни при наличии температурной инверсии и стабильных атмосферных метеоусловий (блокирующего антициклона, малоградиентного теплового сектора циклона или размытого барического поля) радиолокатор фиксирует в качестве цели контуры северного берега Ладожского озера. На рис. 1 показан такой пример. Поскольку радиолуч при этом явно достигает поверхности земли, делается вывод о наличии сверхрефракции. Это означает, что траектория распространения радиоволны в подобных условиях изгибается значительно сильнее, чем при обычных условиях, что влияет на точность определения координат объектов.

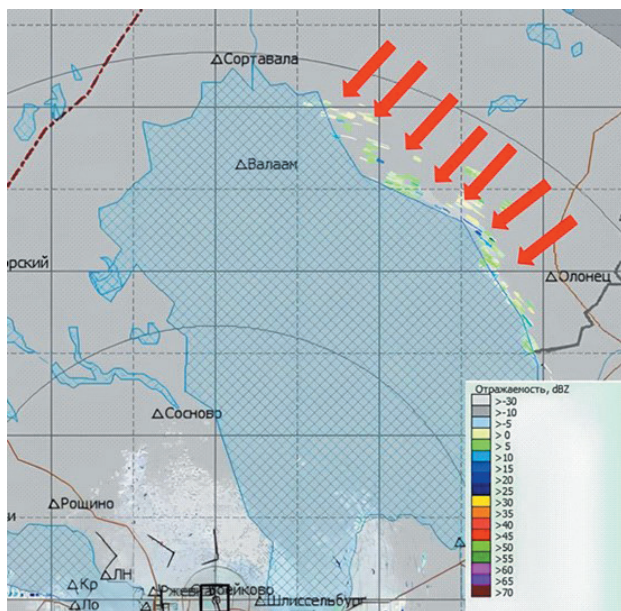


Рис. 1. Случай сверхрефракции, отображенный на радиолокационной карте в канале вертикальной отражаемости, зарегистрированный 10 сентября 2024 г. в 12:00 ВСВ.

Fig. 1. A superrefraction event displayed on a radar map in the vertical reflectivity channel, recorded on September 10, 2024, at 12:00 UTC.

В настоящее время исследования влияния типов рефракции ограничиваются рассмотрением преимущественно безводной подстилающей поверхности. Такие исследования подробно освещены в более ранних работах авторов [1, 2, 3]. В то же время в монографии по распространению радиоволн над морской поверхностью [4] рассматриваются условия сверхрефракции и особенности тропосферного распространения радиоволн над однородной водной поверхностью, включая механизмы формирования приповерхностных волноводов в атмосфере.

Однако, несмотря на наличие исследований, посвящённых сверхрефракции над водой, механизм её формирования в условиях пространственного перехода от суши к водной поверхности остаётся недостаточно изученным. Это особенно важно в связи с наблюдаемыми искажениями радиолокационных изображений в прибрежных зонах водоёмов, проявляющимися, например, в виде ложных целей или смещённых отражений, в том числе в районе Ладожского озера. Указанный переходный режим характеризуется резкой сменой теплофизических свойств подстилающей поверхности и соответствующими изменениями вертикальных профилей температуры и влажности в приземном слое атмосферы, что может приводить к локальному формированию условий сверхрефракции и аномальному распространению радиоволн.

Предмет исследования

В сентябре 2024 г. наблюдалось 14 дней с появлением сверхрефракции над Ладожским озером. В эти периоды ДМРЛ-С «Воейково» фиксировал очертания северного берега озера, аналогичные представленным на рис. 1. Такие случаи имели место 2, 4, 6-15, 17 и 25 сентября, преимущественно в период с 9 до 14 часов по Всемирному координированному времени (ВСВ).

Следует отметить, что обнаруженные цели абсолютно точно не связаны с метеорологическими явлениями. Доказательством этому служит, во-первых, анализ синоптических карт за указанные сроки, который показывает отсутствие облачности (0 баллов) на северном побережье Ладожского озера. Во-вторых, получаемая картина отражаемости от берега идентична для всех сроков, что является невозможным в случае регистрации сигнала от метеорологических целей. В-третьих, величина модуля коэффициента кросскорреляции поляризационных составляющих отраженного сигнала для полученных целей не превышает 0,6, что подтверждает вывод о том, что цель, наблюдаемая локатором, не является метеорологической.

Анализ данных аэрологических зондирований, включающих высотные профили влажности, температуры и давления, показал, что в дни наблюдения сверхрефракции, в 00 часов ВСВ присутствовала приземная температурная инверсия, а в 12 часов ВСВ — приподнятая на высоте 2—3 км. Исходя из этого, можно предположить, что именно наличие таких слоёв с температурной инверсией является основной причиной возникновения условий для сверхрефракции и сильного искривления луча.

Вместе с тем, в существующей литературе рассмотрена общая связь температурной инверсии с возникновением сверхрефракции и тропосферных волноводных

режимов. Однако этот вопрос не исследован для переходных зон «суша—вода», где наблюдается резкая перестройка приземного слоя атмосферы.

Цель статьи заключается в анализе механизмов формирования сверхрефракции в переходных условиях, поскольку без их учёта затруднена разработка методов компенсации погрешностей определения координат целей, возникающих вследствие аномального искривления траекторий радиоволн.

Механизм связи температурной инверсии и сверхрефракции над протяженной водной поверхностью

В случае приподнятой инверсии над водой водяной пар может циркулировать в подинверсионном слое под действием бриза. В таком случае влажность воздуха в этом слое достигает максимальных значений, что приводит к искривлению траектории электромагнитной волны с образованием сверхрефракции, поскольку волна переходит из оптически менее плотного слоя в оптически более плотный слой атмосферы.

В настоящее время аэрологическое зондирование над внутренними водными объектами России не проводится. Отсутствие высотных распределений метеовеличин над водой усложняет понимание механизма образования сверхрефракции. Однако можно предположить, что обнаруженная зондом приподнятая инверсия распространяется и над акваторией Ладоги.

Ладожское озеро — крупный водоем с большой площадью поверхности. Из-за своей протяженности и объема озеро обладает высокой теплоемкостью, что замедляет нагрев и охлаждение воды по сравнению с сушей. Это приводит к тому, что, во-первых, в теплый период вода в озере прогревается медленнее, чем окружающая суша. Во-вторых, испарение с поверхности озера насыщает нижний слой атмосферы влагой, повышая влажность воздуха над поверхностью воды и в прибрежной зоне.

В теплое время суток, особенно с утра и примерно до 13—15 часов по местному времени, солнечная радиация нагревает поверхность озера. В результате испарения воды с поверхности нижний слой атмосферы интенсивно насыщается водяным паром. При этом влажный воздух у поверхности воды может быть относительно прохладным, особенно если вода еще не сильно прогрелась, что создает условия для возникновения устойчивого вертикального слоя с высокой влажностью. Высота такого слоя будет примерно соответствовать высоте нижней границы температурной инверсии, поскольку выше этого слоя наблюдается резкое падение значений парциального давления водяного пара, а, следовательно, и влажности воздуха. Значения парциального давления будут постепенно уменьшаться от уровня поверхности воды, где парциальное давление равно давлению насыщения, до высоты температурной инверсии, где его значение должно быть рассчитано в соответствии с погодными условиями.

В результате подобного распределения линии равных значений парциального давления водяного пара формируют над озером призму. Такая призма представляет собой трехмерную область с резким вертикальным и горизонтальным

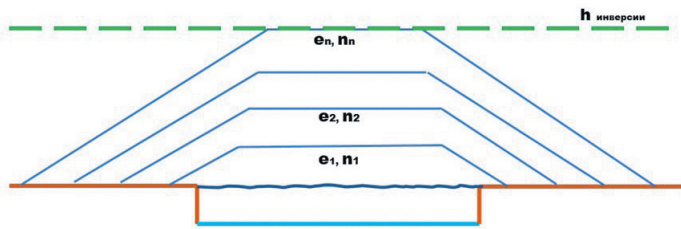


Рис. 2. Призма, образованная линиями равных значений парциального давления водяного пара (так же и коэффициента преломления).

Fig. 2. A prism formed by lines of equal values of partial pressure of water vapor (as well as refractive index).

градиентом парциального давления. Снизу она ограничена поверхностью озера, сверху — слоем инверсии, а по бокам распространяется на прилегающую сушу, формируя над сушей клин влажного и прохладного воздуха (рис. 2). В клине высокая влажность, а температура воздуха ниже, чем в окружающем более сухом и теплом воздухе над сушей.

Механизм формирования такой структуры следующий: в дневное время поверхность суши нагревается быстрее, чем поверхность озера, и это создает область пониженного давления над сушей и более высокого давления над озером. В результате более холодный и влажный воздух с озера начинает перемещаться в сторону суши: формируется дневная бризовая циркуляция [5]. Дневной бриз переносит прохладный и влажный воздух с поверхности Ладожского озера на сушу, поднимая его в слои атмосферы, ограниченные высотой нижней границы инверсии.

При антициклональном характере погоды (в случае ясного неба и при слабом ветре) вертикальное перемешивание воздуха ограничено. Влажный воздух, поднимающийся с озера, оказывается «заперт» под более теплым и сухим воздухом над сушей, поэтому клиновидная структура линий равных значений парциального давления водяного пара может довольно долго сохраняться, проникая вглубь суши.

Таким образом, призма, образуемая линиями равных значений парциального давления водяного пара, представляет собой особое распределение влажности, характерное для территории Ладожского озера и его прибрежных зон, возникающее при приподнятой температурной инверсии и поддерживаемое дневным бризом и устойчивой стратификацией атмосферы. В рамках данной работы такая структура рассматривается как модельное представление и гипотеза, требующая дальнейшей верификации на основе данных реальных наблюдений. Именно такая структура, согласно предложенной модели, эффективно способствует возникновению сверхрефракции радиоволн, фиксируемой ДМРЛ-С в поселке Воейково. Радиолокационный луч проходит через клин призмы, постепенно распространяясь из слоев с низкими значениями парциального давления в слои с высоким его значением. Следовательно, траектория волны постепенно проходит от слоев

с низкими значениями коэффициента преломления n к слоям с высокими значениями. То есть луч переходит из менее оптически плотных слоев в более оптически плотные, что вызывает его преломление и изгиб траектории, соответствующий сверхрефракции. При отсутствии приподнятой температурной инверсии призма влажного воздуха не формируется, и, как следствие, не возникает сверхрефракция радиоволн, поскольку температура с высотой имеет стандартный ход.

Таким образом, сверхрефракция над водоемами (в частности над Ладожским озером) возможна лишь при стечении нескольких метеорологических факторов. Во-первых, необходима приподнятая температурная инверсия. Во-вторых, требуется динамическая устойчивость атмосферы. Совокупная оценка этих условий позволяет прогнозировать возникновение сверхрефракции в приземных слоях атмосферы акватории.

Моделирование траектории распространения радиоволн при сверхрефракции над водоемами

Очевидно, что при радиолокационном зондировании участка атмосферы над озером волна, прежде всего, пройдет через клиновидную структуру, образованную линиями равных значений парциального давления водяного пара над берегом и над прибрежной частью озера, а затем через плоскопараллельный участок над самим озером. Геометрия распространения луча в клине призмы над сушей будет соответствовать рис. 3. Здесь α — угол места лоатора; β — угол между лучом и поверхностью клина, образованного линиями равных значений парциального давления водяного пара; γ — угол наклона клина; φ — угол падения луча; ψ — угол преломления луча; ν — угол между направлением луча и горизонталью; n_1 и n_2 — коэффициенты преломления в первом и втором слое.

Для аналитического расчета траектории луча необходимо знать расстояние от точки расположения радиолокатора до начала клиновидной части призмы. Для этого необходимо учесть особенности распространения бризовой циркуляции. Согласно исследованиям влияния Ладожского озера на климат прибрежных зон [5], бриз распространяется на расстояние 15 км от берега в обе стороны.

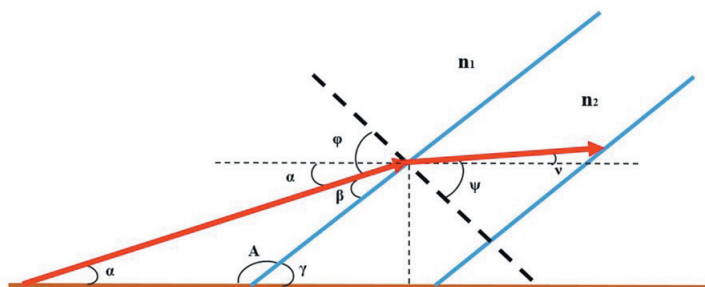


Рис. 3. Геометрия луча, проходящего через клин призмы (пояснения в тексте).

Fig. 3. Geometry of a beam passing through a prism wedge (explanation in the text).

Следовательно, воздух, насыщенный водяным паром, распространяется от озера вглубь суши именно на это расстояние. Здесь следует отметить, что при рассмотрении другого водоема, эта цифра может быть скорректирована в соответствии с особенностями местной циркуляции.

На верхней границе инверсионного слоя происходит обратное распространение сухого воздуха над озером. Значит, содержание водяного пара будет определяться, с одной стороны, его распространением на сушу от озера с одновременным подъемом вверх, что приводит к уменьшению парциального давления, а с другой стороны, перемещением сухого воздуха в верхних слоях инверсии над озером. Следовательно, парциальное давление водяного пара у поверхности земли на расстоянии 15 км от берега в сторону суши будет равно парциальному давлению на расстоянии 15 км от берега в сторону водной поверхности на верхней границе инверсионного слоя. Это приводит к равным значениям коэффициента преломления воздуха в точке начала клина на суше и в подинверсионном слое над водой ($n = n'$ на рис. 4).

Угол наклона линий равных значений парциального давления водяного пара (угол γ на рис. 3) определяется геометрическими соотношениями с учетом высоты нижней границы инверсии, которая находится по данным аэрологического зондирования.

Затем для построения траектории луча с учетом значения угла наклона клина, необходимо определять углы падения и преломления в каждом слое и значения наклонной дальности и высоты луча при переходе из одного слоя в другой. В первом приближении можно допустить, что расстояние между двумя соседними слоями с разными значениями коэффициента преломления равно 100 м. Количество таких слоев должно быть определено исходя из высоты нижней границы слоя

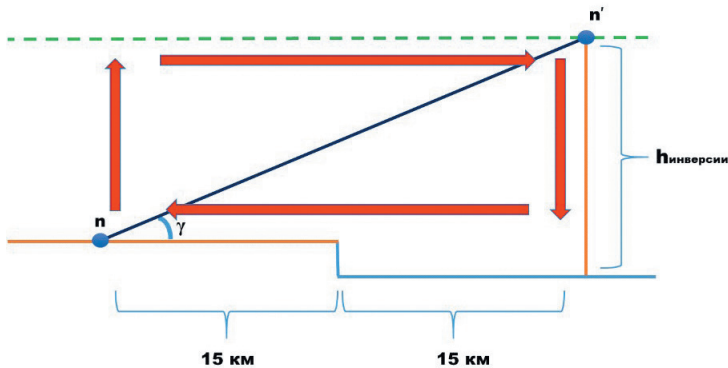


Рис. 4. Схематичное изображение процессов, происходящих при формировании клина.

Красными стрелками обозначено направление бризовой циркуляции, зеленый пунктир — нижняя граница инверсии.

Fig. 4. Schematic representation of the processes occurring during wedge formation.

The red arrows indicate the direction of breeze circulation, the green dotted line is the lower boundary of the inversion.

инверсии. Подробная методика расчета траектории, основанная на элементарной геометрии, описана в ранних работах авторов [2, 3].

Следует также учитывать, что в данном случае расчет состоит из трех этапов. Первый этап — расчет траектории волны над сушей и высоты ее входа в клин призмы; второй этап — расчет высоты ее перехода в слоях равного содержания водяного пара и горизонтальной дальности при прохождении через клин призмы; третий этап — расчет траектории на плоскопараллельном участке над озером.

Такая модель позволяет, зная характеристики атмосферы над сушей, рассчитать траекторию хода радиоволны над водной поверхностью и определить форму луча. Затем, с учетом полученной информации определить погрешности, характеризующие отклонение формы луча от стандартной. Такие погрешности следует вносить в качестве поправок в координаты исследуемых целей и делать соответствующие выводы.

Заключение

В рамках проведенного исследования было установлено, что явление сверхрефракции радиоволн сантиметрового диапазона над обширными водными поверхностями возникает в специфических метеоусловиях, связанных с наличием устойчивых температурных инверсий. Показано, что в жаркую и тихую погоду при стабильной атмосфере над поверхностью водоема формируется призматическая структура, ограниченная линиями равных значений парциального давления водяного пара, которая выступает клином на сушу и создает условия для сильного искривления траектории радиоволн.

Анализ данных аэрологических зондирований и радиолокационных наблюдений подтвердил гипотезу о связи между наличием температурной инверсии и появлением сверхрефракции: приподнятая инверсия способствует циркуляции водяного пара, что создает условия для формирования слоя с повышенным показателем преломления и, следовательно, для возникновения сверхрефракции.

Разработана модель распространения луча в призматической структуре, образованной линиями равных значений парциального давления водяного пара над поверхностью воды. Подчеркивается, что расчет траектории будет состоять в таком случае из трех отдельных этапов.

Полученные результаты расширяют понимание физических механизмов возникновения атмосферной рефракции и ее влияния на точность радиолокационного зондирования. В дальнейшем рекомендуется проведение аэрологических зондирований над внутренними водоемами России для детализации характеристик атмосферы. Это позволит повысить надежность моделирования распространения волн над водой и увеличить точность радиолокационных наблюдений.

Список литературы

1. Жуков В. Ю., Кузнецов А. Д., Никитина В. С. Исследование возможности прогнозирования искривления траектории радиоволн в тропосфере земли // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2024. № 3(55). С. 5—15. DOI: 10.24412/2221-2574-2024-3-5-15. — EDN BUIGBA.

2. Жуков В. Ю., Кузнецов А. Д., Никитина В. С. Разработка метода прогнозирования рефракции радиоволн в тропосфере // Метеорология и гидрология. 2026. № 2. С. 97—101. DOI: 10.52002/0130-2906-2026-2-97-103.
3. Жуков В. Ю., Кузнецов А. Д., Никитина В. С. Моделирование влияния рефракции на определение координат цели при производстве радиолокационных наблюдений // Труды Военно-космической академии им. А. Ф. Можайского. 2023. № 688. С. 55—60.
4. Еремка В. Д., Кабанов В. А., Логвинов Ю. Ф. и др. Особенности распространения радиоволн над морской поверхностью. Под редакцией В. Б. Разказовского. — С.: Вебер, 2013. 217 с.
5. Румянцев В. А., Кондратьев С. А. Ладога. Санкт-Петербург: Издательство Института озероведения РАН. 2013. 568 с.

References

1. Zhukov V. Yu., Kuznetsov A. D., Nikitina V. S. A study into the possibility of predicting the curvature of radio wave trajectories in the Earth's troposphere. *Radiotekhnicheskie i telekommunikacionnye sistemy = Radio engineering and telecommunication systems*. 2024;(3):(5—15). (In Russ.). DOI: 10.24412/2221-2574-2024-3-5-15.
2. Zhukov V. Yu., Kuznetsov A. D., Nikitina V. S. Development of a method for predicting radio wave refraction in the troposphere. *Meteorologiya i gidrologiya = Meteorology and hydrology*. 2022;(2):(97—101). (In Russ.). DOI: 10.52002/0130-2906-2026-2-97-103.
3. Zhukov V. Yu., Kuznetsov A. D., Nikitina V. S. Modeling the influence of refraction on the determination of target coordinates during radar observations. *Trudy Voenno-kosmicheskoy akademii im. A. F. Mozhaitskogo = Proceedings of the A.F. Mozhaisky Military Aerospace Academy*. 2023;(688):(55—60). (In Russ.).
4. Eremka V. D., Kabanov V. A., Logvinov Yu. F., Myshchenko I. M., Razskazovskii V. B., Roenko A. N. *Osobennosti rasprostraneniya radiovoln nad morskoi poverkhnost'yu = Features of Radio Wave Propagation over the Sea Surface*. Sevastopol: Veber, 2013; 217 p. (In Russ.).
5. Rumyantsev V. A., Kondrat'ev S. A. *Ladoga = Ladoga Lake*. Saint Petersburg: Izdatel'stvo Instituta ozeroovedeniya RAN, 2013; 568 p. (In Russ.).

Информация об авторах

Кузнецов Анатолий Дмитриевич, доктор физико-математических наук, профессор кафедры экспериментальной физики атмосферы Российского государственного гидрометеорологического университета, kuznetsov1946@inbox.ru.

Жуков Владимир Юрьевич, доктор физико-математических наук, профессор кафедры экспериментальной физики атмосферы Российского государственного гидрометеорологического университета, vuzhukov2002@list.ru.

Никитина Виктория Сергеевна, ассистент кафедры физики Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I, victoriaflint01@gmail.com.

Симакина Татьяна Евгеньевна, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры экспериментальной физики атмосферы Российского государственного гидрометеорологического университета, tatiana.simakina@gmail.com.

Information about authors

Kuznetsov Anatoly Dmitrievich, Doctor of Sciences (Phys. and Mat.), Professor, Department of Experimental Atmospheric Physics, Russian State Hydrometeorological University.

Zhukov Vladimir Yur'evich, Doctor of Sciences (Phys. and Mat.), Professor, Department of Experimental Atmospheric Physics, Russian State Hydrometeorological University.

Nikitina Victoria Sergeevna, teaching assistant, Department of Physics, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University.

Simakina Tatyana Evgenevna, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Department of Experimental Atmospheric Physics, Russian State Hydrometeorological University.

Конфликт интересов: Конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила 20.04.2026

Принята в печать 27.05.2026

The article was received on 20.04.2026

The article was accepted on 27.05.2026

Гидрометеорология и экология. 2026. № 83. С. 305—322.

Hydrometeorology and Ecology. 2026;(83):305—322.

Научная статья

УДК 551.509.323

doi: 10.33933/2713-3001-2026-83-305-322

Применение метода латентных переменных к анализу временных рядов температуры воздуха

***Светлана Владимировна Морозова, Алексей Раисович Файзлыев,
Валерия Андреевна Морозова***

Саратовский государственный университет им. Н. Г. Чернышевского, Саратов, Россия,
swetwl@yandex.ru

Аннотация. В статье рассматривается возможность применения метода латентных переменных (LGM) к анализу временных рядов температуры воздуха. Для анализа выбраны временные ряды аномалий приповерхностной температуры воздуха Северного полушария. Исследование временных рядов проводилось с разбивкой на естественные климатические периоды состояния земной климатической системы. Расчеты выполнены на языке R с использованием библиотеки lavaan. Результаты расчетов представлены графически. Проведено сравнение расчетов по модели LGM с расчетами, выполненными с применением метода наименьших квадратов. Результаты, полученные методом LGM, хорошо согласуются с результатами, полученными другими способами аппроксимации, что указывает на перспективность его применения в гидрометеорологических и экологических исследованиях.

Ключевые слова: модель скрытого роста, латентные переменные, климатическая изменчивость.

Для цитирования: Морозова С. В., Файзлыев А. Р., Морозова В. А. Применение метода латентных переменных к анализу временных рядов температуры воздуха // Гидрометеорология и экология. 2026. № 83. С. 305—322. doi: 10.33933/2713-3001-2026-83-305-322.

Original article

Application of the latent variable method to the analysis of air temperature time series

***Svetlana V. Morozova, Alexey R. Faizliev,
Valeria A. Morozova***

Saratov State University, Saratov, Russia, swetwl@yandex.ru

Summary. Using the latent growth model, an analysis of time series of surface air temperatures in the Northern Hemisphere for the period from 1880 to 2024 was performed. The available time interval was divided into natural climatic periods of the state of the earth's climate system: 1) the period between the end of the Little Ice Age in Europe in the early 19th century and the beginning of the second wave of global warming; 2) the first phase of global warming; 3) the phase of relative cooling; 4) the second

phase of global warming. Calculations were performed for each time interval. The calculations were performed in the R programming language using the lavaan library. The following were selected as latent variables: i is the mean; s is the characteristic of the linear term of the trend; q is the variable characterizing the description of the series of the original data by a quadratic function (quadratic trend); r is the variable characterizing the description of the series of the original data by a third-degree polynomial (cubic trend). In addition, the covariances between the variables i and s were calculated. The calculation results are presented graphically. The LGM model's calculations are compared with those performed using the ordinary least squares method. The LGM results are in good agreement with those obtained using other approximation methods, indicating its potential for use in hydrometeorological and environmental studies. The latent variable method allows for the simultaneous evaluation of both the variance and polynomial components of statistical analysis. Time series analysis linked to natural climatic periods revealed a decline in the Earth's climate system's protective mechanisms for maintaining climatic and ecological equilibrium.

Keywords: latent growth model, latent variables, climate variability.

For citation: Morozova S. V., Faizliev A. R., Morozova V. A. Application of the latent variable method to the analysis of air temperature time series. *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydrometeorology and Ecology*. 2026;(83):(305—322). doi: 10.33933/2713-3001-2026-83-305-322. (In Russ.).

Введение

Статистический анализ метеорологических данных, в частности временных рядов, довольно хорошо разработан и очень полно представлен во многих учебных пособиях, например, в [1, 2]. Статистические приемы, применяемые к анализу временных рядов, очень разнообразны и позволяют решать большой круг задач — восстанавливать данные, исследовать на случайность, аппроксимировать различными функциями, выделять периодические составляющие, находить их связность.

Однако успешно апробированные и прекрасно себя зарекомендовавшие методы требуют постоянного совершенствования, а возникающие перед человечеством новые научные и практические задачи способствуют разработке и применению новых статистических приемов. Подтверждением этому может быть конференция «*Инновационные методы математики и физики в экологических и гидрометеорологических исследованиях*», проведенная в 2024 г. Российским государственным гидрометеорологическим университетом (РГГМУ).

В последние десятилетия в связи с мощным развитием компьютерной техники интенсивно развиваются новые направления многомерного анализа, к которым относится и структурное моделирование. Оно включает естественное развитие и объединение таких методов, как множественная линейная регрессия, дисперсионный анализ, факторный анализ [3, 4]. Одним из способов структурного моделирования являются модели скрытого роста (Latent Growth Model, LGM) или латентные кривые, которые позволяют выявлять изменения во времени, принимая во внимание иерархическую структуру данных, и оцениваются с помощью моделирования структурными уравнениями (Structural Equation Modeling (SEM)). Достоинством модели скрытого роста служит то, что она «*в определенной степени интегрирует идеи линейного регрессионного анализа, факторного и дисперсионного анализа и позволяет использовать преимущества всех этих методов одновременно*» [5].

Метод латентных переменных, как и многие другие, позволяет уменьшать размерность данных, при этом латентные переменные не могут быть измерены в явном виде, а их влияние выявляется через математическую модель. Задачи, которые можно решать с применением LGM, довольно разнообразны, однако их суть заключается в выделении роли неявного фактора (факторов) в наступлении какого-либо события или в развитии процесса.

Наиболее широкое распространение LGM получила преимущественно в экономике, машинном обучении, биоинформатике, социальных науках в зарубежных исследованиях [6—10] и частично в отечественных работах [11—13]. Однако в гидрометеорологии, насколько нам известно, метод LGM еще не использовался, поэтому целью данной работы является попытка оценки возможности применения модели скрытого роста к метеорологическим данным, изменения которых происходят под совокупным действием множества зачастую скрытых и не всегда понятных факторов.

Материалы и методы исследования

В качестве исходных данных использовались временные ряды аномалий средней месячной приповерхностной температуры воздуха Северного полушария, рассчитанные по отношению к базовому периоду с 1961 г. по 1990 г. Данные выбирались с сайта <https://crudata.uea.ac.uk/cru//data//temperature/> [14] за период с 1880 г. по 2024 г. Использовался массив HadCRUT5, который, в отличие от предыдущих версий (HadCRUT4), не использует подстроечные сетки, а применяет гауссовский процесс с простой ковариационной структурой [15]. Считается, что такой способ более продуктивен в устранении погрешностей/неопределенностей, особенно над водной поверхностью [15].

Исследуемый временной ряд разбит на естественные климатические периоды (е.к.п.) — интервалы, в которые главная характеристика климата — температура воздуха — показывает однонаправленную тенденцию изменения. В соответствии с рекомендациями [16—19] в настоящей статье будем придерживаться следующего деления на естественные климатические периоды:

- 1) промежуток между окончанием малого ледникового периода в Европе и началом развития первой волны глобального потепления (1880—1907 гг.);
- 2) первая волна глобального потепления (1908—1943 гг.);
- 3) период стабилизации (1944—1974 гг.);
- 4) вторая волна глобального потепления (1975—2024 гг.).

Расчёты выполнялись на языке программирования R с использованием библиотеки lavaan (<https://lavaan.ugent.be>) [20]. Язык R, аналогичный языку S (Bell Labs, сейчас язык считается устаревшим), разрабатывался сотрудниками Оклендского технологического университета (Auckland University of technology), Новая Зеландия и назван по первой букве имен разработчиков — Ross Ihaka и Robert Gentleman. Язык появился в 1993 г., широко используется для статистической обработки данных и работы с графикой.

Преимущества этого языка программирования — бесплатный открытый исходный код, в язык встроены готовые методы статистического анализа и инструменты визуализации. Универсальная сфера применения — статистические вычисления, анализ данных и машинное обучение. Библиотека lavaan (Latent variable analysis) — специфический инструмент для моделирования структурными уравнениями (SEM), позволяющий оценивать и проверять сложные причинно-следственные связи между переменными.

Модель можно задать двумя способами: аналитическим и графическим. При аналитическом способе используется система линейных уравнений множественной регрессии и ковариационные соотношения. Уравнение, используемое в расчете LGM, напоминает уравнение регрессии, но, в отличие от регрессионных моделей, в которых исследуется связь между переменными в один и тот же момент времени, LGM позволяет анализировать, как изменяются данные во времени. Временные интервалы выбираются произвольно в зависимости от поставленной задачи. В нашем случае временной интервал — один месяц.

Этапы решения поставленной задачи

1. *Формулировка гипотезы.* Гипотеза: существуют измеряемые и латентные переменные, которые взаимодействуют друг с другом. В нашем случае измеряемыми переменными являются аномалии средних месячных значений температуры воздуха, латентными — линейные и нелинейные статистики. Характер связи между переменными может быть детерминированный (причинно-следственный) или корреляционный/ковариационный.

2. *Анализ данных.* Сначала с помощью минимизирующей процедуры вычисляются оценки для регрессионных коэффициентов, вариаций и ковариаций независимых переменных. Чаще всего используется метод наименьших квадратов. В нашем случае использовался метод максимального правдоподобия (Maximum Likelihood, ML). Метод максимального правдоподобия применяется в случае многомерной нормальности данных. При нарушении нормальности распределения или гетероскедастичности (неравномерности дисперсионных остатков) применяются робастные подходы.

Суть метода максимального правдоподобия — найти такие значения, при которых вероятность получения наблюдаемых значений была бы максимальной, для чего итеративно рассчитываются средние, дисперсии, регрессионные коэффициенты (параметры модели).

Для реализации этапов модели используется формула (1), в соответствии с которой решаются уравнения (2). Общий вид формулы и уравнений приведены ниже. Поскольку изменения температуры рассматривались в 12 точках (месяцах), то имеем двенадцать уравнений, в которых используются четыре латентных фактора: среднее значение, линейная зависимость, квадратичный тренд и кубический тренд (полином третьей степени).

$$t_j = \lambda_0(i + \xi_i) + \lambda(s + \xi_s) + \lambda^2(q + \xi_q) + \lambda^3(r + \xi_r) \quad (1)$$

$$\begin{aligned}
 t_0 &= 1 \cdot i + \xi_i + \varepsilon_0 \\
 t_1 &= 1 \cdot i + 1 \cdot s + 1 \cdot q + 1 \cdot r + \xi_i + \xi_s + \xi_q + \xi_r + \varepsilon_1 \\
 t_2 &= 1 \cdot i + 2 \cdot s + 2^2 \cdot q + 2^3 \cdot r + \xi_i + 2 \cdot \xi_s + 2^2 \cdot \xi_q + 2^3 \cdot \xi_r + \varepsilon_2 \\
 &\dots \\
 t_{11} &= 1 \cdot i + 11 \cdot s + 11^2 \cdot q + 11^3 \cdot r + \xi_i + 11 \cdot \xi_s + 11^2 \cdot \xi_q + 11^3 \cdot \xi_r + \varepsilon_{11}
 \end{aligned} \tag{2}$$

где t — аномалии температуры; i — среднее; s — характеристика линейного тренда (наклон); q — переменная, обозначающая квадратичный тренд; r — переменная, обозначающая кубический тренд (полином третьей степени); λ — параметр, показывающий номер момента времени (шаг временного ряда), относительно которого формируется тренд; $\xi_i, \xi_s, \xi_q, \xi_r$ — случайные составляющие (возмущения), соответствующие отдельным компонентам модели; ε — невязка.

Графический способ задания модели представлен на рис. 1. На схеме (рис. 1) разделены два вида переменных: слева — фактические, исследуемые нами величины — аномалии температур воздуха. В вертикальных квадратах буквами $t_1, t_2, t_3, t_4, \dots, t_{12}$ обозначены аномалии температуры для месяцев с января по декабрь. Поясним, что помещенная в квадрат буква t_1 означает ряд средних месячных аномалий января, t_2 — февраля и т. д. То есть, в каждом квадрате имеется множество точек, соответствующих определенному месяцу. Слева от каждого квадрата в кружках представлены остатки, или невязки модели.

На схеме справа (рис. 1) в кружках показаны рассчитываемые, или латентные, переменные. В качестве латентных переменных (согласно алгоритму расчета в R -пакете) поочередно выступают: i — среднее; s — характеристика линейного члена тренда; q — переменная, характеризующая описание рядов исходных данных квадратичной функцией (квадратичный тренд); r — переменная, характеризующая описание рядов исходных данных полиномом третьей степени (кубический тренд).

От каждой латентной переменной к каждому квадрату проведены стрелки, показывающие принцип расчета. От кружка, в который помещена первая латентная переменная i , проведены фиолетовые стрелки. Они показывают, что для всех рядов аномалий температуры рассчитаны средние значения. У конца каждой фиолетовой стрелки проставлена фиолетовым цветом цифра «1». Она показывает, что рассчитанное среднее значение для января распространяется на все остальные месяцы, т. е. на графике была бы прямая линия, параллельная оси абсцисс с ординатой «средняя температура января». Если бы за начало работы модели был выбран февраль, то всем остальным месяцам ставилась бы в соответствие средняя температура февраля и т. д. Для данного способа аппроксимации рассчитывается своя невязка (ε).

От второй латентной переменной, обозначенной буквой s и помещенной в кружок под первой латентной переменной i , к каждому квадрату проведены зеленые стрелки. У конца каждой стрелки проставлены соответствующим цветом цифры от «0» до «11». Цифра «0» у первой стрелки означает, что вторую латентную переменную s невозможно рассчитать только по одной «точке», которая

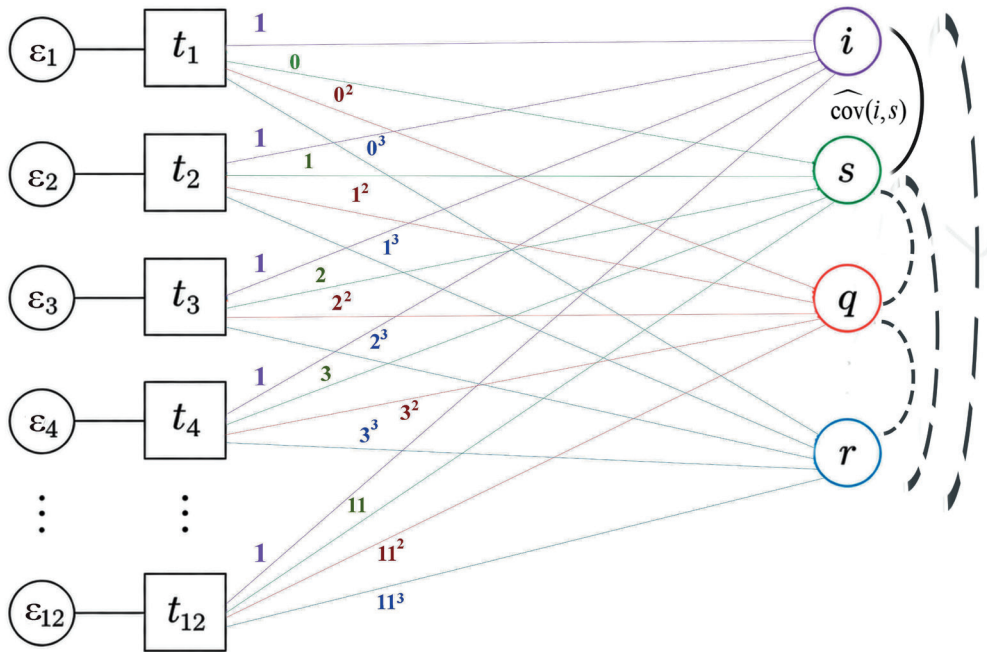


Рис. 1. Графическая интерпретация модели LGM.

Fig.1. Graphical representation of the Latent Growth Model (LGM).

получается при преобразовании ряда t_1 . Каждый следующий порядковый номер (от «1» до «11») показывает поочередное прибавление «точки» для расчета угла наклона линейного тренда. Цифра «1» показывает, что для построения линейного тренда использованы две «точки» — t_1 и t_2 , «2» — использованы уже три точки — t_1 , t_2 , и t_3 , и т. д. Опять же для каждого случая аппроксимации рассчитаны остатки (ϵ_j).

От третьей латентной переменной q к каждому квадрату проведены красные стрелки, цифры около каждой стрелки, как и в предыдущем случае, показывают поочередное прибавление новой «точки», вторая степень отражает расчет квадратичной функции.

От кружка с переменной r к каждому квадрату проведены синие стрелки, числовое обозначение которых показывает расчет кубического тренда (полинома третьей степени). Дуга на графике, соединяющая две латентные переменные i и s , означает, что между средними значениями и углами наклонов рассчитывается ковариация. Особенность расчета ковариационной зависимости заключается в том, что в качестве одного ряда используется исходный временной ряд первого месяца, от которого стартует модель (в нашем случае январь) и угловыми коэффициентами линий тренда соответствующего года (в построении линии тренда участвуют все двенадцать месяцев).

Пунктирными дугами на рисунке показаны все возможные при расчетах ковариационные зависимости. В нашем случае рассчитывается ковариация только между двумя первыми латентными переменными.

Отметим, что параллельно с применением метода латентных переменных приводим результаты расчетов классическими методами статистического анализа, применяемых к временным рядам, а именно метод наименьших квадратов (МНК).

В расчетах по стандартной модели LGM предполагается, что остатки наблюдаемых переменных имеют нормальное распределение с нулевым средним и некоторой дисперсией. В пакете lavaan по умолчанию для каждого исходного временного ряда оценивается своя остаточная дисперсия. Таким образом, модель уже допускает разные остаточные дисперсии в разные моменты времени, то есть исследование на гетероскедастичность уже «встроено» в модель [6, 9, 11]. В нашем случае модель оценивает двенадцать (по числу месяцев) отдельных параметров дисперсий ошибок.

Таким образом, модель LGM по умолчанию корректно учитывает гетероскедастичность, оценивая отдельные остаточные дисперсии для каждого исходного временного отрезка. Это делает её более гибкой и надёжной по сравнению с методами, предполагающими гомоскедастичность (МНК) [6, 9, 11].

Результаты исследования

Для пояснения сути применяемого нами метода LGM на рис. 2 приведены линии тренда, построенные для первых двух лет исследуемых рядов. Видим, что

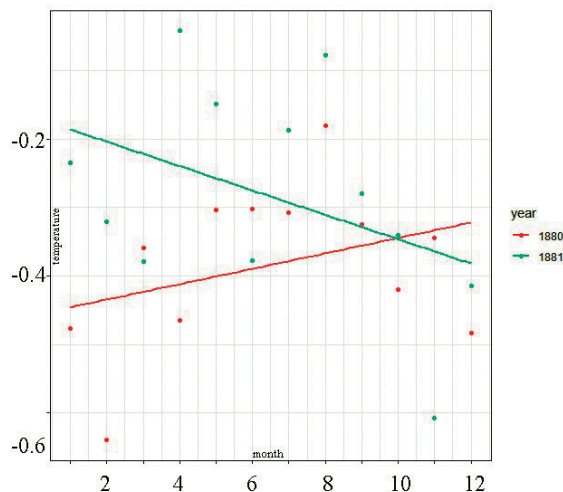


Рис. 2. Линии тренда, построенные по аномалиям средней месячной температуры для 1880 г. и 1881 г. (по данным архива HadCRUT5) [14].

Fig. 2. Trend lines plotted based on mean monthly temperature anomalies for 1880 and 1881 (based on HadCRUT5 archive data) [14].

в одном году аномалии температуры от месяца к месяцу уменьшаются, в другом — растут. Таким образом, для оценки возможности применения метода LGM в гидрометеорологии выбрана наипростейшая — рассмотреть, как изменяются аномалии средних месячных температур от месяца к месяцу в различные естественные климатические периоды.

Анализ результатов расчетов по периодам климатической изменчивости.

Рассмотрим первый период (1880—1907 гг.). В табл. 1 приведены статистические оценки работы модели по данным об аномалиях приповерхностной температуры воздуха Северного полушария в период между окончанием малого ледникового периода в Европе и началом развития первой волны глобального потепления.

Таблица 1

Оценка работы модели на временном периоде с 1880 г. по 1907 г.
Evaluation of the model's performance over the period 1880—1907

Латентная переменная (обозначение, размерность)	Оценка	Стандартное отклонение	Z-value (на сколько стандартных отклонений индивиду- альное значение отстоит от среднего уровня)	P-value (уровень значимости, < 0,05)
i , °C	−0,602	0,056	−10,833	0,000
s , °C/мес	0,035	0,025	1,441	0,150
q , интерпретация физически сложна, размерность не выведена	0,008	0,004	1,01	0,072
r , интерпретация физически сложна, размерность не выведена	−0,001	0,0003	−3,693	0,000
Оценка ковариаций переменных i и s				
$cov(i, s)$	−0,004	0,001	−2,491	0,013

Примечание: В этой и во всех приведенных ниже таблицах полужирным шрифтом указаны статистически значимые характеристики при 5 % уровне значимости. Переменные i , s , q , r — описание результатов работы модели полиномами 0-ой, 1-ой, 2-ой и 3-ей степеней соответственно.

Проведем анализ табл. 1. Значение −0,6 °C — это среднее значение температуры для всех январей выбранного периода (среднее многолетнее для всех январей на интервале с 1880 г. по 1907 г.).

Согласно табл. 1 статистически значимой при описании изменений аномалий приповерхностной температуры воздуха на Северном полушарии в период с 1880 г. по 1907 г. стала аппроксимация временных рядов полиномом третьей степени.

Ковариация переменных, представленная в табл. 1, рассчитана между данными двух рядов. Один ряд (i) — значения аномалий температуры январей, вошедших в интервал с 1880 г. по 1907 г., другой ряд — значения угловых коэффициентов линейных трендов для каждого индивидуального года. (Можно посмотреть, есть ли связь между январскими аномалиями и внутригодовой изменчивостью аномалий температуры. Если за начало отсчета работы модели взять февральские температуры, то можно посмотреть, есть ли связь между февральскими аномалиями и дальнейшим изменением аномалий в другие месяцы).

Метод LGM позволяет одновременно оценить дисперсии каждого временного ряда (табл. 2).

Таблица 2

Оценка дисперсий временных рядов температуры на временном периоде с 1880 г. по 1907 г.

Estimation of dispersions of temperature time series in the period 1880—1907

Исследуемая переменная, °C	Дисперсия, °C	Стандартное отклонение, °C	Z-value, без размерности (показывает, на сколько стандартных отклонений индивидуальное значение отстоит от среднего уровня, °C	P-value (уровень значимости, < 0,05)
t_1	0,080	0,030	3,444	0,001
t_2	0,058	0,017	3,434	0,001
t_3	0,051	0,015	3,493	0,000
t_4	0,019	0,006	3,284	0,001
t_5	0,005	0,002	2,479	0,013
t_6	0,014	0,004	3,432	0,001
t_7	0,007	0,002	3,223	0,001
t_8	0,006	0,002	3,032	0,002
t_9	0,006	0,002	2,868	0,004
t_{10}	0,011	0,004	3,016	0,003
t_{11}	0,052	0,015	3,517	0,000
t_{12}	0,035	0,011	3,270	0,001

Согласно табл. 2, дисперсии оказались значимы для всех месяцев года. Наибольший разброс относительно среднего значения характерен для зимних месяцев, наименьший — для месяцев теплого полугодия, что соответствует климату. Для каждого периода рассчитаны доверительные интервалы для 95-% уровня значимости. Укажем, что табличные значения дисперсий приведены только для первого е.к.п.. Для остальных периодов на графиках показаны доверительные интервалы.

На рис. 3 а представлен вариант аппроксимации изменения средних месячных аномалий температуры полиномом третьей степени, полученной методом LGM. На этом рисунке виден сглаженный временной ход средних месячных аномалий температуры. Можно отметить, что в первом е.к.п. средние месячные аномалии с января по август по модулю уменьшались и сдвигались в сторону положительных значений. В летне-осенний период аномалии температуры становились больше по модулю и смещались в сторону более низких значений.

На рис. 3 б представлена аппроксимация того же временного ряда, полученного методом наименьших квадратов, причем линиями представлены все варианты аппроксимации: линейная — короткий пунктир; квадратичная — длинный пунктир; красная линия — полиномом третьей степени. Синяя линия отражает фактическое изменение средних месячных аномалий. На этом же рисунке приведены уравнения различных способов аппроксимации и их оценка по R^2 .

Согласно рис. 3 б, наилучшим способом представления исходных данных также оказалась полиномиальная с третьей степенью полинома, по которой прослеживается зависимость, описанная выше (рис. 3 а).

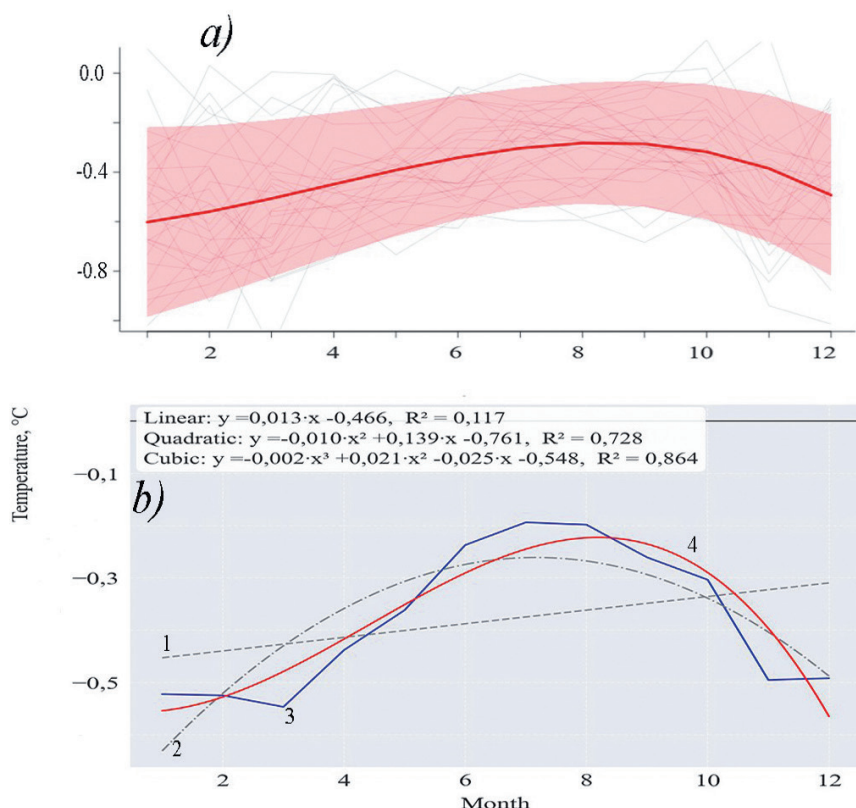


Рис. 3. Изменение аномалий температуры во времени в первый е.к.п. (1880—1907 гг.).
 а) на основе модели LGM с выделением аппроксимации полиномом третьей степени;
 б) аппроксимация зависимостей с оценкой по R^2 ,

где 1 — линейный тренд, 2 — квадратичный тренд, 3 — фактическое изменение
 среднемесячных аномалий, 4 — полином третьей степени.

Fig. 3. Temporal dynamics of the temperature anomalies during the first experimental climatic period (1880—1907). *a*) based on the LGM model with the allocation of a third-degree polynomial approximation; *b*) approximation of dependencies with an R^2 estimate, where 1 is a linear trend, 2 is a quadratic trend, 3 is the actual change in average monthly anomalies, 4 is a third-degree polynomial.

Укажем, что метод LGM позволяет оценить дисперсии остатков работы модели (табл. 2). Приведем результаты оценки дисперсий для первого е.к.п. (табл. 2).

В табл. 3 приведены оценки работы модели методом LGM для первой волны глобального потепления.

Согласно табл. 3, аппроксимация временных рядов аномалий температуры воздуха в этот естественный климатический период оказалась значимой для всех используемых статистик.

Таблица 3

Оценка работы модели на временном периоде с 1908 г. по 1943 г.

Evaluation of the model's performance over the period 1908—1943

Латентная переменная (обозначение, размерность)	Оценка	Стандарт- ное откло- нение	Z-value (на сколько стандартных отклонений индивидуальное значение отстоит от среднего уровня)	P-value (уровень значимо- сти, < 0,05)
i , °C	-0,248	0,047	-5,314	0,000
s , °C/мес	-0,048	0,019	-2,550	0,011
q , интерпретация физически сложна, размерность не выведена	0,018	0,0004	4,771	0,000
r , интерпретация физически сложна, размерность не выведена	-0,001	0,0002	-5,289	0,000
Оценка ковариаций переменных i и s				
$cov(i, s)$	-0,002	0,001	-2,023	0,043

На рис. 4 *а* приведена визуализация работы модели LGM, на рис. 4 *б* — методом наименьших квадратов.

Отметим, что два варианта расчетов показывают наилучшую аппроксимацию полиномом третьей степени.

По характеру изменений аномалий температуры в первый и второй е.к.п. можно отметить следующее. В первую волну глобального потепления (рис. 4) характер изменения средних месячных аномалий температуры несколько другой. В месяцы с октября по февраль аномалии по модулю уходят в область больших значений по отрицательной шкале, а в месяцы с марта по сентябрь аномалии становятся меньше, приближаясь к области положительных значений. Первая волна глобального потепления, известная как «потепление Арктики» [16], характеризуется потеплением именно весенне-летне-осеннего сезонов. Данный результат также согласуется с ранее выявленным фактом о превышении скорости роста летних температур над зимними в первую волну глобального потепления [17, 18].

В табл. 4 приведены статистические оценки аппроксимации изменений аномалий температуры воздуха в период стабилизации. В этот период изменения аномалий температуры от месяца к месяцу лучше всего описываются полиномом третьей степени. Визуализация работы модели показана на рис. 5 *а*.

Таблица 4

Оценка работы модели на временном периоде с 1944 г. по 1974 г.

Evaluation of the model's performance over the period 1944—1974

Латентная переменная (обозначение, размерность)	Оценка	Стандарт- ное откло- нение	Z-value (на сколько стандартных отклонений индивидуальное значение отстоит от среднего уровня)	P-value (уровень значимо- сти, < 0,05)
i , °C	-0,047	0,043	-1,089	0,276
s , °C/мес	-0,023	0,020	-1,164	0,244
q , интерпретация физически сложна, размерность не выведена	0,007	0,004	1,940	0,052

Латентная переменная (обозначение, размерность)	Оценка	Стандарт- ное откло- нение	Z-value (на сколько стандартных отклонений индивидуальное значение отстоит от среднего уровня)	P-value (уровень значимо- сти, < 0,05)
r , интерпретация физически сложна, размерность не выведена	-0,0005	0,0002	-2,275	0,023
Оценка ковариаций переменных i и s				
$cov(i, s)$	-0,001	0,001	-1,903	0,057

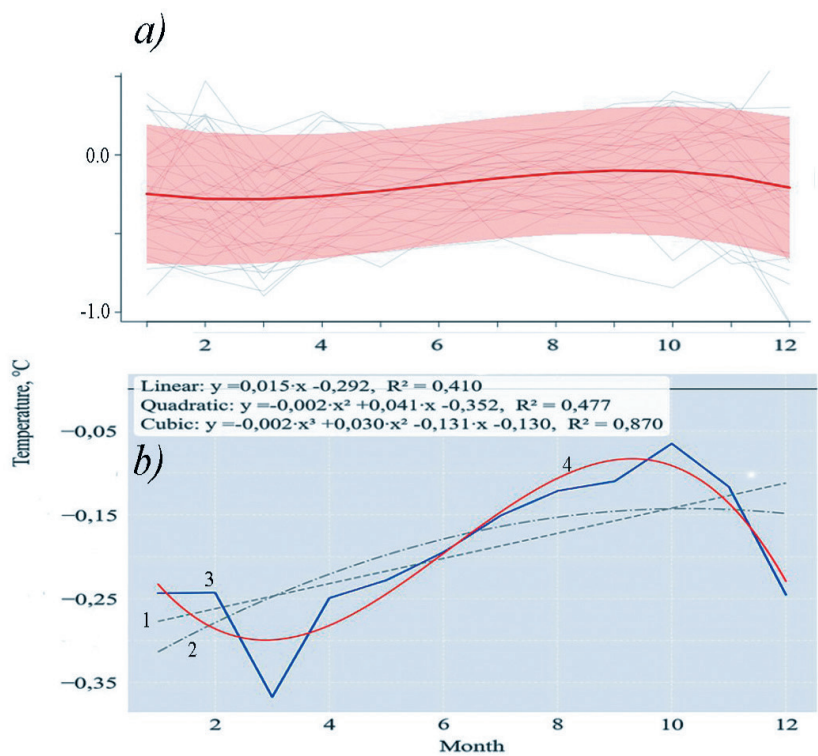


Рис. 4. Изменение аномалий температуры во времени на основе модели LGM в первую волну глобального потепления (1908—1943 гг.).
а) на основе модели LGM с выделением аппроксимации полиномом третьей степени;
б) аппроксимация зависимостей с оценкой по R^2 ,
где 1 — линейный тренд, 2 — квадратичный тренд, 3 — фактическое изменение среднемесячных аномалий, 4 — полином третьей степени

Fig. 4. Temporal dynamics of the temperature anomalies during the first experimental climatic period (1908—1943). a) based on the LGM model with the allocation of a third-degree polynomial approximation; b) approximation of dependencies with an R^2 estimate, where 1 is a linear trend, 2 is a quadratic trend, 3 is the actual change in average monthly anomalies, 4 is a third-degree polynomial

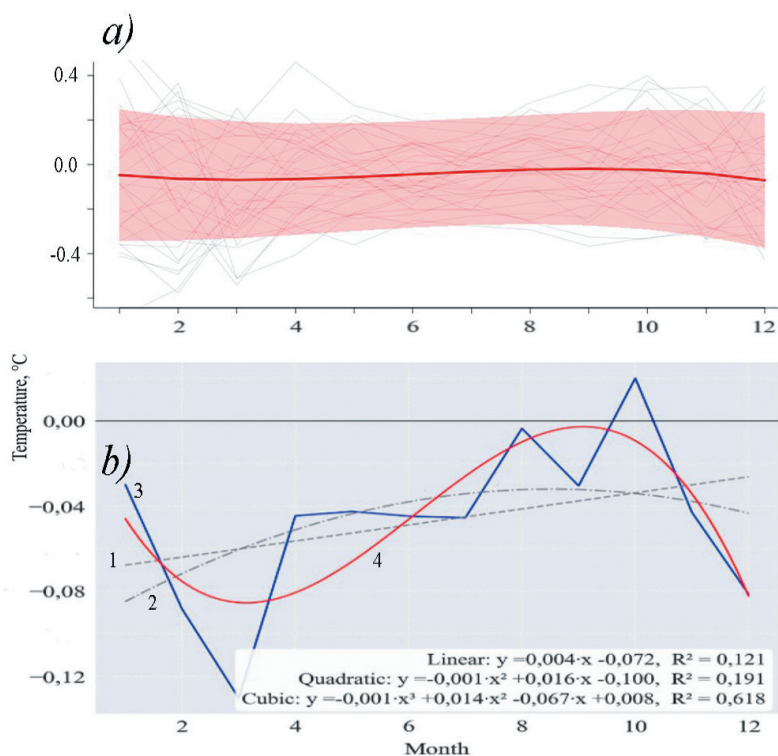


Рис. 5. Изменение аномалий температуры во времени на основе модели LGM в период стабилизации (1944—1974 гг.). а) на основе модели LGM с выделением аппроксимации полиномом третьей степени; б) аппроксимация зависимостей с оценкой по R^2 , где 1 — линейный тренд, 2 — квадратичный тренд, 3 — фактическое изменение среднемесячных аномалий, 4 — полином третьей степени

Fig. 5. Temporal dynamics of the temperature anomalies during the first experimental climatic period (1944—1974). а) based on the LGM model with the allocation of a third-degree polynomial approximation; б) approximation of dependencies with an R^2 estimate, where 1 is a linear trend, 2 is a quadratic trend, 3 is the actual change in average monthly anomalies, 4 is a third-degree polynomial.

Как видно на рис. 5 а, характер изменения аномалий в этот естественный климатический период идентичен предыдущему с той лишь разницей, что амплитуда полиномиальной кривой существенно меньше. Отклонения температуры от нормы располагаются вблизи нуля градусов, что хорошо отражает тенденцию периода стабилизации, в который температуры росли очень слабо или вообще снижались. Кроме того, половина лет этого е.к.п. вошла в интервал для расчета климатической нормы. Согласно рис. 5 б, аномалии температуры по полиномиальной кривой не выходят за $-0,1$ °C, что также хорошо согласуется с результатом по LGM.

Табл. 5 показывает результаты аппроксимации временных рядов аномалий приповерхностной температуры воздуха, на рис. 6 представлена графическая интерпретация результата в период развития второй волны глобального потепления.

Таблица 5
Оценка работы модели на временном периоде с 1975 г. по 2024 г.
Evaluation of the model's performance over the period 1975—2024

Латентная переменная (обозначение, размерность)	Оценка	Стандарт- ное откло- нение	Z-value (на сколько стандартных отклонений индивидуальное значение отстоит от среднего уровня)	P-value (уровень значимо- сти, < 0,05)
i , °C	0,630	0,059	10,597	0,000
s , °C/мес	−0,042	0,015	−2,859	0,004
q , интерпретация физически сложна, размерность не выведена	0,005	0,003	1,727	0,084
r , интерпретация физически сложна, размерность не выведена	−0,0005	0,0008	−0,663	0,508
Оценка ковариаций переменных i и s				
$cov(i^{\wedge}, s)$	0,001	0,001	0,622	0,534

Как видно из рис. 6, иллюстрирующего характер изменения температуры во вторую волну глобального потепления, средние месячные аномалии в течение года изменяются слабо. Наибольшими они были в холодный период года, к лету заметна тенденция их уменьшения. Данный результат также выделяет особенность второй волны глобального потепления — рост температур именно холодной части года. Слабые изменения аномалий температуры отражает неоднородность развития второй волны глобального потепления — фазу активного роста температур (1975—1995 гг.) и фазу замедления потепления (1996—2010 гг.) [18, 21], приведшую в нулевых годах XXI в. к приостановке потепления.

Следует отметить, что по фактическим данным наиболее сильно средние месячные аномалии температуры отклонялись от средних многолетних в сторону понижения в марте, а во вторую волну глобального потепления — в мае и июле.

Анализируя ковариацию между скрытыми переменными i и s (табл. 1—4), можно отметить значимость ковариационной зависимости в первые три естественных климатических периода состояния ЗКС (в третьем периоде — на 10 % уровне значимости). Отрицательная ковариация, указывающая на «сходимость» анализируемых рядов и обратную зависимость между переменными, отмечается в первых трех е.к.п. В четвертый естественный климатический период сходимость рядов исчезает, ковариация оказывается положительной. Укажем, что для этого периода характерна интенсификация антропогенной нагрузки на земную климатическую систему. Также отметим, что в течение первых трех естественных климатических периода ковариация от одного е.к.п. к другому ослабевает.

Учитывая такие результаты, можно сделать климатически важное заключение: в период с конца XIX в. по настоящее время при усилении роли антропогенных факторов снижается способность земной климатической системы по поддержанию климато-экологического равновесия. Ослабление защитных механизмов

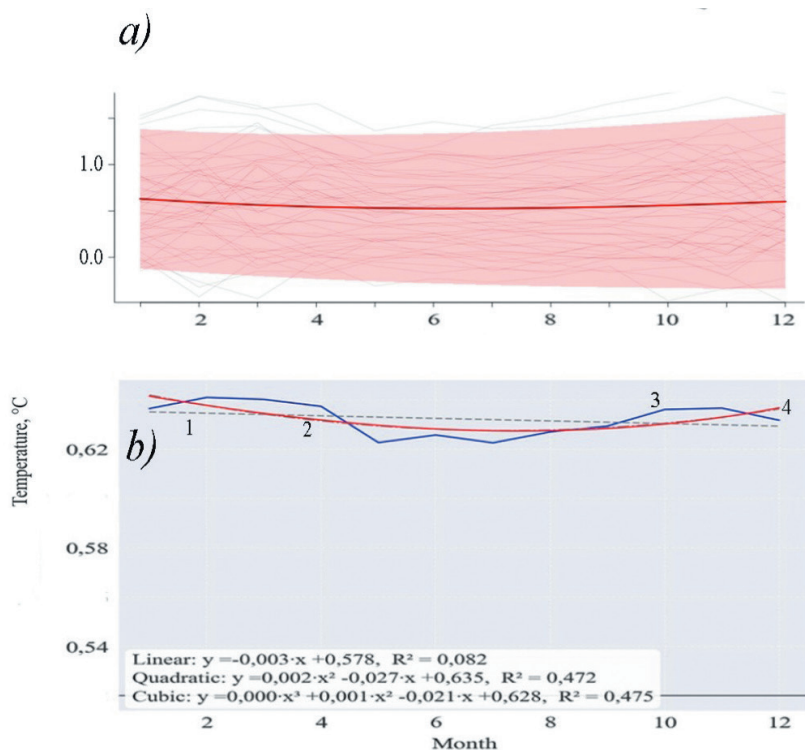


Рис. 6. Изменение аномалий температуры во времени во вторую волну глобального потепления (1975—2024 гг.). а) на основе модели LGM с выделением аппроксимации полиномом третьей степени; б) аппроксимация зависимостей с оценкой по R^2 ,

где 1 — линейный тренд, 2 — квадратичный тренд, 3 — фактическое изменение среднемесячных аномалий, 4 — полином третьей степени

Fig. 6. Temporal dynamics of the temperature anomalies during the first experimental climatic period (1975—2024). a) based on the LGM model with the allocation of a third-degree polynomial approximation; b) approximation of dependencies with an R^2 estimate, where 1 is a linear trend, 2 is a quadratic trend, 3 is the actual change in average monthly anomalies, 4 is a third-degree polynomial

ЗКС, выражающихся в работе отрицательных обратных связей, в скором времени может привести к прохождению земной климатической системой точки бифуркации (невозврата), следствием чего станет переход ЗКС в качественно новое состояние, что негативно скажется на существовании человечества.

Заключение

В результате проведенного исследования можно сформулировать следующие выводы:

1. Метод латентных переменных к гидрометеорологическим исследованиям был применен впервые.

2. Модель LGM представляет собой лучший в настоящее время способ сжатия данных в случае многомерного статистического анализа. Модель корректно учитывает гетероскедастичность, что делает её более гибкой и надёжной по сравнению с методами, предполагающими гомоскедастичность. Результаты, полученные методом LGM по анализу временных рядов температуры воздуха, хорошо согласуются с результатами, полученными другими способами аппроксимации, что указывает на перспективность его применения в гидрометеорологических и экологических исследованиях.

3. Анализ временных рядов методом LGM позволил сделать вывод о снижении защитных механизмов земной климатической системы по поддержанию в ней климато-экологического равновесия.

Список литературы

1. Малинин В. Н. Статистические методы анализа гидрометеорологической информации. СПб.: РГГМУ, 2008. 406 с.
2. Малинин В. Н. Статистические методы анализа гидрометеорологической информации. Изд. 2, испр. и доп. СПб.: РГГМУ, 2020. 424 с.
3. Митина О. В. Структурное моделирование: состояние и перспективы // Вестник Пермского государственного педагогического университета. Сер. 1. Психология. 2005. № 2. С. 3—15.
4. Bentler P. M. EQS 6 Structural Equations Program Manual. Encino, CA: Multivariate Software, Inc. 2006. 422 p. Электронный ресурс. ISBN 1-885898-03-7 5 (дата обращения 5.05.2025).
5. Митина О. В., Барабанщиков В. А. Моделирование латентных изменений с помощью структурных уравнений // Экспериментальная психология. 2008. № 1. С. 131—148. Электронный ресурс: сайт. URL: [https://psyjournals.ru/journals/exppsy/archive/2008_n1/Mitina] (дата обращения: 08.04.2025).
6. Hancock G. R., Lawrence F. R. Using latent growth models to evaluate. Structural equation modeling: A second course. 2006. 702 p.
7. Preacher K. J. Latent growth curve models // The reviewer's guide to quantitative methods in the social sciences. Routledge, 2018. P. 178—192.
8. Duncan T. E., Duncan S. C. An introduction to latent growth curve modeling // Behavior therapy. 2004. V. 35. No 2. P. 333—363.
9. Duncan T. E., Duncan S. C. The ABC's of LGM: An Introductory Guide to Latent Variable Growth Curve Modeling // Soc Personal Psychol Compass. 2009. No. 3(6). P. 979—991. Doi: 10.1111/j.1751-9004.2009.00224.x. PMID: 20577582; PMCID: PMC2888524.
10. Sterba S. K. Fitting Nonlinear Latent Growth Curve Models With Individually Varying Time Points // Structural Equation Modeling: A Multidisciplinary Journal. 2014. No. 21(4). P. 630—647. Электронный ресурс: сайт. URL: [https://doi.org/10.1080/10705511.2014.919828] (дата обращения: 08.8.2025).
11. Ильясов Р. Х. «Латентные» корреляции потоков в экономике: сплайн-анализ // Известия Санкт-Петербургского экономического университета. 2021. № 1. С. 36—41.
12. Корневский Н. А., Шуткин А. Н., Бойцова Е. А., Корневская Е. Н. и др. Использование теории измерения латентных переменных для оценки уровня психоэмоционального напряжения // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2015. №. 3. С. 103—118.
13. Крупенкова Н. В. Социологическое измерение: становление моделей с латентными переменными (часть 2) // Социология: методология, методы, математическое моделирование. 2008. №. 27. С. 48—83.
14. Ряды аномалий приповерхностной температуры воздуха [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://crudata.uea.ac.uk/cru/data/temperature/> (дата обращения 20.02.2024).
15. Morice P., Colin P., John J. Kennedy, et al. An updated assessment of near-surface temperature change from 1850: The HadCRUT5 date set // Journal o Geophysical Research: Atmospheres. 2021. V. 126. No. 3. P. 1—28. doi:10.1029/2019JD032361.

16. Шерстюков Б. Г. Региональные и сезонные закономерности изменений современного климата. Обнинск: изд-во ВНИИГМИ–МЦД. 2008. 246 с.
17. Груза Г. В., Ранькова Э. Я. Наблюдаемые и ожидаемые изменения климата России: температура воздуха. Обнинск: ФГБУ «ВНИИГМИ–МЦД». 2012. 194 с.
18. Морозова С. В. Роль планетарных объектов циркуляции в глобальных климатических процессах. Саратов: изд-во Саратовского университета. 2019. 132 с.
19. Морозова С. В., Полянская Е. А., Алимпиева М. А. Особенности межгодовой изменчивости температуры воздуха Северного и Южного полушарий по данным архива HadCRUT5 // Гидрометеорология и экология. 2003. № 72. С. 429—431. doi: 10.33933/2713–3001–2023–72–420–43.
20. Rosseel Y. Lavaan: An R Package for Structural Equation Modeling // Journal of Statistical Software. 2012. Vol.48. No. 2. P. 1—36. URL <http://www.jstatsoft.org/v48/i02/>
21. Кононова Н. К. Классификация циркуляционных механизмов Северного полушария по Б. Л. Дзердзеевскому. М.: Воентехиздат. 2009. 372 с.

References

1. Malinin V. N. *Statisticheskiye metody analiza gidrometeorologicheskoy informatsii = Statistical methods for Analysis Hydrometeorological Information*. St. Petersburg.: RGGMU, 2008: 406 p. (In Russ.).
2. Malinin V. N. *Statisticheskiye metody analiza gidrometeorologicheskoy informatsii = Statistical Methods for Analyzing Hydrometeorological Information*. 2nd edition, revised and expladed. St. Petersburg: RGGMU, 2020: 424 p. (In Russ.).
3. Mitina O. V. Structural modeling: status and prospects. *Vestnik. Permskogo gosudarstvennogo pedagogicheskogo universiteta. Ser.1. Psikhologiya = Bulletin of Perm State Pedagogical University. Series 1. Psychology*. 2005; (2): (3—15). (In Russ.).
4. Bentler P. M. EQS 6 Structural Equations Program Manual. Encino, CA: Multivariate Software, Inc. 2006.: 422 p. ISBN 1-885898-03-7 (access data 5.05.2025).
5. Mitina O. V., Barabanshchikov V. A. Modeling latent changes using structural equations. *Ekspериментal'naya psikhologiya = Experimental Psychology*. 2008; (1): (131—148). URL: [https://psyjournals.ru/journals/exppsy/archive/2008_n1/Mitina/] (access date: 08.04.2025). (In Russ.).
6. Hancock G. R., Lawrence F. R. Using latent growth models to evaluate. *Structural equation modeling: A second course*. 2006:702 p.
7. Preacher K. J. Latent growth curve models. *The reviewer's guide to quantitative methods in the social sciences*. Routledge, 2018. (178—192).
8. Duncan T. E., Duncan S. C. An introduction to latent growth curve modeling. *Behavior therapy*, 2004. 35 (2): (333—363).
9. Duncan T. E., Duncan S. C. The ABC's of LGM: An Introductory Guide to Latent Variable Growth Curve Modeling // *Soc Personal Psychol Compass*, 2009. 3(6): (9799—91). Doi: 10.1111/j.1751–9004.2009.00224.x. PMID: 20577582; PMCID: PMC2888524.
10. Sterba S. K. Fitting Nonlinear Latent Growth Curve Models With Individually Varying Time Points // *Structural Equation Modeling: A Multidisciplinary Journal*, 2014. 21(4): (630—647). URL: [<https://doi.org/10.1080/10705511.2014.919828>] (access date: 08.8.20)
11. Ilyasov R. Kh. “Latent” correlations of flows in the economy: spline-analysis. *Izvestiya Sankt–Peterburgskogo ekonomicheskogo universiteta = Bulletin of the St. Petersburg University of Economics*. 2021; (1):(36—41). (In Russ.).
12. Korenevsky N. A., Shutkin A. N., Boytsova E. A. et al. Using the theory of measuring latent variables to assess the level of psychoemotional stress. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravleniye, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoye priborostroyeniye = Bulletin of the South-West State University. Series: Management, computing, informatics. Medical instrument making*. 2015; (3): (103—118). (In Russ.).
13. Krupenkova N. V. Sociological measurement: formation of models with latent variables (part 2). *Sotsiologiya: metodologiya, metody, matematicheskoye modelirovaniye = Sociology: methodology, methods, mathematical modeling*. 2008; (27):(48—83). (In Russ.).
14. Ryady anomalii pri poverkhnostnoy temperatury vozdukh. Available at: <https://crudata.uea.ac.uk/cru/data/temperature/> (accessed on: 20.02.2024).

15. Morice P., Colin P., Kennedy J. et al. An updated assessment of near-surface temperature change from 1850: The HadCRUT5 date set *Journal o Geophysical Research: Atmospheres*, 2021. 126(3.):(1—28.). doi:10.1029/2019JD032361.
16. Sherstyukov B. G. *Regional'nyye i sezonnyye zakonomernosti izmeneniy sovremennogo klimata = Regional and seasonal patterns of modern climate change*. Obninsk, izd-vo VNNIGMI–MTSD, 2008: 246 p. (In Russ.).
17. Gruza G. V., Ran'kova E. YA. *Nablyudayemyye i ozhidayemyye izmeneniya klimata Rossii: temperatura vozdukha = Observed and expected climate changes in Russia: air temperature*. Obninsk, izd-vo FGBU «VNIIGMI-MCD», 2012: 194 p. (In Russ.).
18. Morozova S. V. Rol' planetarnykh ob'yektov tsirkulyatsii v global'nykh klimaticheskikh protsessakh = *The Role of Planetary Circulation Objects in Global Climate Processes*. Saratov, izd-vo Saratovskogo universiteta, 2019: 132 p. (In Russ.).
19. Morozova S. V., Polyanskaya E. A., Alimpieva M. A. Peculiarities of interannual variability of near-surface air temperature in the Northern and Southern Hemispheres according to HadCRUT5 archive data. *Gidrometeorologiya i ekologiya = Hydrometeorology and Ecology*. 2023;(72):(429—431). doi: 10.33933/2713–3001–2023–72–420–43. (In Russ.).
20. Rosseel Y. Lavaan: An R Package for Structural Equation Modeling. *Journal of Statistical Software*, 2012. 48(2):(1—36). URL <http://www.jstatsoft.org/v48/i02/>
21. Kononova N. K. *Klassifikatsiya tsirkulyatsionnykh mekhanizmov Severnogo polushariya po B. L. Dzerdzeyevskomu = Classification of circulation mechanisms of the Northern Hemisphere according to B. L. Dzerdzeevsky*. M.: Voenyatekhizdat, 2009: 372 p. (In Russ.).

Информация об авторах

Морозова Светлана Владимировна, кандидат географических наук, доцент кафедры метеорологии и климатологии, Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского, swetwl@yandex.ru.

Файзлыев Алексей Раисович, кандидат экономических наук, доцент кафедры теории функций и стохастического анализа, Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского, swetwl@yandex.ru.

Морозова Валерия Андреевна, старший преподаватель кафедры картографии и геоинформатики, Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского, swetwl@yandex.ru.

Information about authors

Morozova Svetlana V., Cand. Sc (Geogr.), associate professor of the meteorology and climatology, Saratov State University, Saratov.

Faizliev Alexey R., Cand. Sc (Econ.), associate professor of the function theory and stochastic analysis, Saratov State University, Saratov.

Morozova Valeria A., senior lecturer of the cartography and geoinformatics, Saratov State University, Saratov.

Конфликт интересов: конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила 19.09.2025

Принята в печать после доработки 07.05.2026

The article was received on 19.09.2025

The article was accepted after revision on 07.05.2026

Гидрометеорология и экология. 2026. № 83. С. 323—339.

Hydrometeorology and Ecology. 2026;(83):323—339.

ГЕОЭКОЛОГИЯ

Научная статья

УДК 551.513.7:551.464(262.5)

doi: 10.33933/2713-3001-2026-83-323-339

Связь Восточно-Атлантического колебания с аномалиями водородного показателя pH в глубоководной части Чёрного моря

Елена Александровна Гребнева^{1, 2}, Михаил Борисович Шилин²

¹ Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН, Севастополь, Россия, grebneva@ibss-ras.ru

² Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. Проанализированы статистические взаимосвязи между состоянием Восточно-Атлантического колебания (ВАК) и изменениями водородного показателя (pH) в поверхностных водах глубоководной части Чёрного моря. На основе данных биогеохимического реанализа за период с 1992 г. по 2022 г. и методики разностных композитов установлено, что в холодное время года значительное повышение pH (до 0,028 единиц) обнаружено в феврале в ответ на январскую отрицательную аномалию ВАК. Отрицательная аномалия ВАК в ноябре и декабре сопровождается положительными аномалиями pH от 0,012 до 0,016 ед. в течение этих месяцев. В тёплый сезон, с мая по июль, положительные аномалии ВАК не проявляют синхронных изменений в поле pH. Однако через 3—6 месяцев формируются устойчивые отрицательные аномалии pH осенью и зимой. Эти отклонения постепенно увеличиваются от –0,014 до –0,022 единиц.

Ключевые слова: Чёрное море, водородный показатель pH, Восточно-Атлантическое колебание (ВАК), биогеохимический реанализ, сезонный отклик, фитопланктон.

Благодарности: Работа выполнена в рамках государственных заданий: ФИЦ ИнБЮМ по теме «Функциональные, метаболические и молекулярно-генетические механизмы адаптации морских организмов к условиям экстремальных экотопов Черного и Азовского морей и других акваторий Мирового океана» (№ гос. регистрации 124030100137-6); ФГБОУ ВО «РГГМУ» «Бесшовное численное моделирование одновременного изменения климата, погоды, газового и аэрозольного состава атмосферы в глобальном и региональном масштабах и создание цифровой географической информационной системы обработки баз данных о составе и структуре атмосферы» (№ FSZU-2023-0002).

Для цитирования: Гребнева Е. А., Шилин М. Б. Связь Восточно-Атлантического колебания с аномалиями водородного показателя pH в глубоководной части Чёрного моря // Гидрометеорология и экология. 2026. № 83. С. 323—339. doi: 10.33933/2713-3001-2026-83-323-339

Relationship between the East Atlantic Oscillation and pH anomalies in the deep-water part of the Black Sea

Elena A. Grebneva^{1, 2}, Mikhail B. Shilin²

¹ A.O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas, Russian Academy of Sciences, Sevastopol, Russia, E-mail: grebneva@ibss-ras.ru

² Russian State Hydrometeorological University, St. Petersburg, Russia

Summary. The Black Sea, as a semi-enclosed basin, experiences anthropogenic acidification at rates comparable to those observed in the open waters of the North Atlantic. Against the background of a long-term downward trend in pH, quasi-periodic pH oscillations associated with natural climate variability are recorded in the deep-sea part of the basin. Based on the CMEMS BS-Biogeochemistry biogeochemical reanalysis (1992–2022), this study provides, for the first time, a statistically significant assessment of the East Atlantic Oscillation (EA) influence on the formation of pH anomalies in the Black Sea surface waters for all months of the year. The composite difference method was applied after removing the quadratic trend from both pH series and the EA index, which allowed for a correct isolation of interannual variability.

The relationship between the EA and pH is shown to have a pronounced seasonal character. During the cold period (November to March), the negative EA anomaly (EA–) induces an almost synchronous pH increase of 0.012–0.028 units, with a maximum in February (+0.028) in response to the January EA signal. Spatially, positive pH anomalies are predominantly localized in the central-western part of the sea. During the warm season, the positive EA anomaly (EA+) leads to a delayed (by 3–6 months) pH decrease ranging from –0.01 to –0.032 units. The strongest negative response is observed in December (–0.032) following the July EA+ signal, with anomalies consistently confined to the central-eastern part of the sea and intensifying from the first to the second month of manifestation. No statistically significant pH response was found for the positive EA phase in the cold season or for the negative EA phase in the warm season.

The proposed mechanism involves changes in atmospheric circulation, vertical mixing, production-destruction processes, and seasonal cyclonic circulation in the eastern part of the sea. However, it is emphasized that the identified relationships are purely statistical; the physical mechanisms remain hypothetical and require further verification using additional marine environment parameters.

Keywords: Black Sea, hydrogen index (pH), East Atlantic Oscillation (EAO), biogeochemical reanalysis, seasonal response, phytoplankton.

Acknowledgments: The work was carried out within the framework of state assignments: the Federal Research Center «Institute of Biology of the Southern Seas» under the topic «Functional, metabolic and molecular genetic mechanisms of adaptation of marine organisms to the conditions of extreme ecotopes of the Black and Azov Seas and other areas of the World Ocean» (State Registration No. 124030100137-6); and the Russian State Hydrometeorological University under the topic «Seamless numerical modeling of simultaneous changes in climate, weather, gas and aerosol composition of the atmosphere on global and regional scales, and development of a digital geographic information system for processing databases on atmospheric composition and structure» (No. FSZU-2023-0002)

For citation: Grebneva E. A., Shilin M. B. Relationship between the East Atlantic Oscillation and pH anomalies in the deep-water part of the Black Sea *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydrometeorology and Ecology*. 2026;(83):(323–339). doi: 10.33933/2713-3001-2026-83-323-339. (In Russ.).

Введение

Формирование климата Европы и Средиземноморско-Черноморского бассейна в значительной мере обусловлено циркуляционными процессами Северной

Атлантики, которые задают основную пространственно-временную изменчивость региональных гидрометеорологических условий [1, 2]. Среди них наиболее значимыми для Атлантико-Европейского региона, включая акваторию Чёрного моря, являются Североатлантическое (САК), Восточно-Атлантическое (ВАК), Скандинавское (СК) и Восточно-Атлантическое — Западнороссийское (ВАЗРК) колебания, которые оказывают определяющее влияние на формирование погодных условий [1, 3]. Изменения состояния природных процессов в системе океан—атмосфера, которые отражаются в индексах этих колебаний, формируют аномалии атмосферного давления, температуры воздуха, количества осадков и скорости приповерхностного ветра. Для морских акваторий это приводит к модификации стратификации водной толщи, увеличению интенсивности вертикального перемешивания, усилению процессов апвеллинга и даунвеллинга [4, 5, 6].

Совокупное воздействие рассмотренных процессов оказывает значительное влияние как на гидрохимический режим акватории, так и на функционирование региональных экосистем [7, 8, 9]. Ключевым гидрохимическим показателем, наиболее чувствительным к таким изменениям, является водородный показатель (рН), который служит важным индикатором состояния морских экосистем. Значения рН интегрируют динамику биогеохимических процессов, происходящих в морской среде.

Современные исследования сфокусированы на глобальных трендах изменения рН поверхностных вод Мирового океана. Снижение значения рН связано с поглощением океаном атмосферного углекислого газа (CO_2) на фоне его роста в атмосфере. Примером такого изменения служит интенсивное закисление поверхностных вод Северной Атлантики. В субполярных районах этой акватории за 26-летний период наблюдений (1981—2007 гг.) был выявлен устойчивый тренд снижения рН со скоростью $-0,0022 \pm 0,0004$ единицы в год [10]. Снижение рН в Северной Атлантике за период с 1993 г. по 2017 г. достигло $-0,017$ единиц на десятилетие [11].

Одним из наиболее ощутимых последствий закисления является сокращение концентрации карбонат-ионов в морской воде. Поскольку карбонаты необходимы для формирования и поддержания кальциевых структур у ряда морских организмов (например, кораллов и моллюсков), их дефицит представляет серьёзную угрозу для морской биоты [12, 13]. Помимо этого, закисление оказывает угнетающее воздействие на некоторые физиологические функции морских обитателей, особенно рыб. Уменьшение рН может нарушать работу хеморецепторных систем рыб, включая системы обоняния. Это может ухудшить их способность распознавать ключевые сигналы окружающей среды: наличие хищников, источников пищи или особей для размножения, что непосредственно угрожает устойчивости популяций [14, 15].

Не менее важным аспектом закисления являются его долгосрочные последствия для полузамкнутых морей. Чёрное море как внутриконтинентальный бассейн Атлантического океана также демонстрирует устойчивую тенденцию к уменьшению рН равную $-0,024$ ед. рН за 10 лет, сопоставимую по скорости с процессами закисления в Северной Атлантике [16]. Однако помимо глобального

антропогенного тренда в глубоководных частях Чёрного моря фиксируются выраженные квазипериодические колебания значений рН с периодичностью около 10 лет [17]. Наложение этих естественных квазипериодических флуктуаций значительной амплитуды на общий отрицательный тренд создаёт условия для достижения экстремально низких значений рН в отдельные периоды. Это может значительно увеличивать нагрузку на уязвимые морские экосистемы.

Таким образом, возникает необходимость определить, какая доля общей изменчивости рН в Чёрном море связана с описанными квазипериодическими климатическими процессами. Этот анализ позволит дать точную оценку климатических изменений величин рН и улучшить прогнозирование их динамики. Одним из подходов для решения этой задачи является изучение статистической связи между изменениями величины рН и состоянием основных крупномасштабных атмосферных циркуляционных мод. Например, в исследовании [18] было проверено предположение о том, что квазипериодические колебания рН могут быть связаны с гидрометеорологическими вариациями, обусловленными воздействием таких атмосферных мод, как САК, ВАК, СК и ВАЗПК. На основе архивных данных за период с 1957 г. по 1996 г. обнаружено, что ВАК оказывает статистически значимое влияние на формирование аномалий рН в зимний период. Однако эта взаимосвязь была установлена только для данных, усреднённых за четырёхмесячный зимний сезон (ноябрь—февраль), что связано с недостаточной плотностью и однородностью имеющегося архива измерений.

Целью данного исследования является выполнение углублённого анализа и обеспечение надёжной статистической оценки связи между состоянием ВАК и значениями рН в поверхностном слое Чёрного моря во все месяцы года. Для достижения этой цели использованы однородные данные современного биогеохимического реанализа за период с 1992 г. по 2022 г. [19].

Данные

Среднемесячные данные о величине рН за период с января 1992 г. по декабрь 2022 г. были выбраны из массива биогеохимического реанализа CMEMS BS-Biogeochemistry (BLKSEA_MULTIYEAR_BGC_007_005) [19]. Реанализ основан на ассимиляции данных натурных и спутниковых наблюдений с использованием численной модели, объединяющей гидродинамический модуль NEMO 4.2 и биогеохимический блок BAMBHI [8, 20]. В результате получен согласованный трёхмерный набор данных с горизонтальным разрешением около 2,5 км и 59 вертикальными уровнями [8, 19, 20]. Сравнительный анализ величин рН, полученных в рамках данного биогеохимического реанализа, с натурными измерениями за период с 2019 г. по 2020 г., выполненный в работе [21], подтвердил достаточную точность воспроизведения величин рН для Чёрного моря.

Исследуемый регион охватывает центральную часть Черного моря, ограниченную изобатой 1000 м и координатами 42,23°—44,65° с.ш. 29°—41,3° в.д. Выбор данной области обусловлен необходимостью минимизации влияния прибрежных процессов, которые могут искажать климатические изменения величины рН. Кроме того, в работе использован среднемесячный индекс ВАК, рассчитанный

за аналогичный временной интервал. Данные индекса были получены в NOAA Climate Prediction Centre [22].

Методика. Композитный анализ

В рамках анализа связи между состоянием ВАК и величиной pH в Черном море использовался метод композитного анализа. Расчёт включал несколько последовательных этапов.

Аномалии pH были определены для каждого узла пространственной сетки путём удаления долгопериодного тренда. Проведена проверка долгопериодной изменчивости pH по всем узлам сетки (493 узла по широте $\times$ 138 узлов по долготе) исследуемого региона. Для демонстрации динамики pH в указанный период на рис. 1 приведены временные ряды январских значений в четырех узлах сетки.

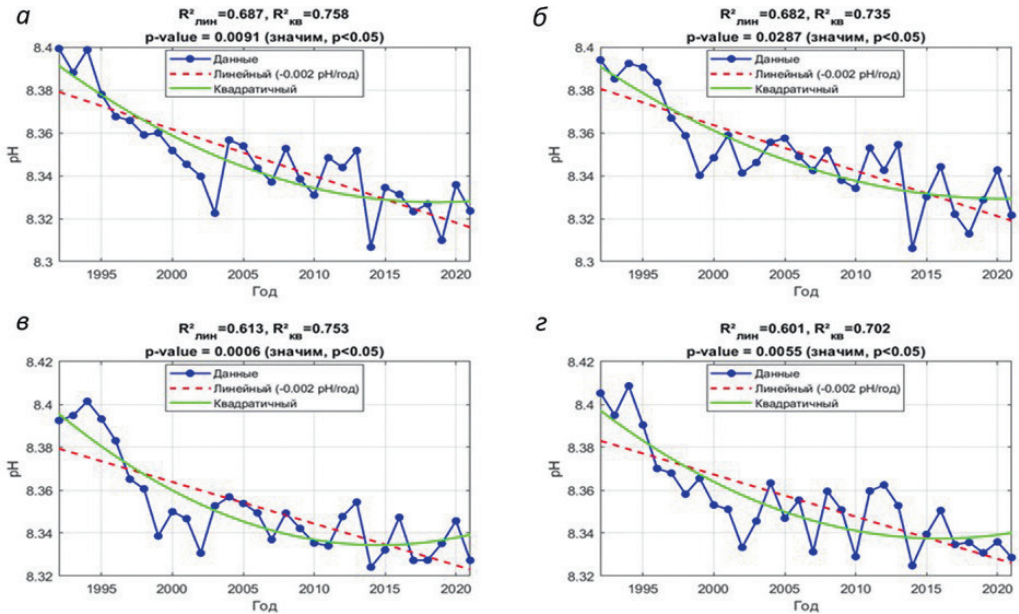


Рис. 1. Временные ряды pH среднемесячных значений в январе (синие маркеры) с наложенными линейным (красный пунктир) и квадратичным (зелёная сплошная линия) трендами для четырёх узлов глубоководной части Чёрного моря. Координаты выбранных репрезентативных узлов: 41,82° с.ш., 29,70° в.д. (а); 42,35° с.ш., 32,20° в.д. (б); 43,00° с.ш., 35,00° в.д. (в); 43,80° с.ш., 37,30° в.д. (г). Подписи содержат значения R^2 и p -value для квадратичного члена.

Fig. 1. Time series of January mean pH values (blue markers) with superimposed linear (red dashed line) and quadratic (green solid line) trends for four sites in the deep-water part of the Black Sea. Coordinates of the selected representative sites: 41.82° N, 29.70° E (a); 42.35° N, 32.20° E (b); 43.00° N, 35.00° E (c); 43.80° N, 37.30° E (d).

The labels include R^2 and p -values for the quadratic term.

Анализ показал, что долгопериодное снижение рН имеет нелинейный характер: с 1992 г. по 2005 г. отмечалось более интенсивное подкисление, а после 2005 г. темпы снижения замедлились. Точка перехода подкисления большинства узлов пространственной сетки была зафиксирована в интервале с 2004 г. по 2006 г. Это подтверждает, что выявленный характер изменчивости является устойчивым и не связан со случайными флуктуациями выборки.

За каждый месяц периода с 1992 г. по 2021 г. выполнен расчет трендов. Средний коэффициент детерминации R^2 для 12 месяцев квадратичной модели составил 0,67, тогда как для линейной модели он был равен 0,54. То есть, нелинейные модели существенно лучше описывают дисперсию временных рядов рН. Статистическая значимость квадратичной модели была подтверждена F-тестом [23] ($p < 0,05$) практически для всех узлов исследуемой акватории.

На следующем этапе для каждого месяца года был составлен временной ряд индекса ВАК за период с 1992 г. по 2022 г. Для достижения сопоставимости методик обработки данных из временных рядов для каждого календарного месяца был удален квадратичный тренд. Такая операция направлена на выделение межгодовых колебаний индекса и сохранение положительных и отрицательных отклонений относительно долгопериодной тенденции. После удаления квадратичного тренда межгодовые колебания индекса ВАК остались неизменными, сохраняя значительные отклонения от нейтрального состояния (рис. 2 а, б). Данный подход позволяет эффективно фильтровать долгопериодные изменения, которые недостаточно разрешимы при рассматриваемой длительности временного ряда и не входят в область настоящего исследования.

На следующем этапе анализа для детрендированных временных рядов индекса ВАК было рассчитано среднеквадратическое отклонение (σ) [26]. В ходе работы проводился отбор лет, в которые значения индекса были выше или ниже среднего уровня на 1σ (рис. 2). Это позволило выделить две группы лет: с положительными и отрицательными аномалиями. Количество таких лет варьируется от 5 до 8 для каждого месяца года, что составляет не менее 17 % общего объема данных во временных рядах. Для каждой из отобранных групп лет рассчитывались средние значения, среднеквадратические отклонения и дисперсии аномальных величин рН. На завершающем этапе исследования определялся «чистый» климатический сигнал изменений рН в Чёрном море, вызванный воздействием ВАК. Этот сигнал оценивался как полуразность между средними по выборке значениями для каждого узла пространственной сетки (так называемый полуразностный композит). Статистическую значимость различий между композитными аномалиями проверяли методом t -критерия Стьюдента при уровне доверия $p < 0,1$.

Проведенный анализ выполнялся как синхронно, так и с учетом временного сдвига. В рамках синхронного анализа композитные карты значений рН строились на тот же период, что и положительные или отрицательные аномалии ВАК. Для изучения задержанного отклика повторный анализ проводили с временным сдвигом до шести месяцев, учитывая лидирование индекса ВАК. Например, при сдвиге на шесть месяцев данные рН за июль сопоставлялись с состоянием индекса ВАК в январе того же года.

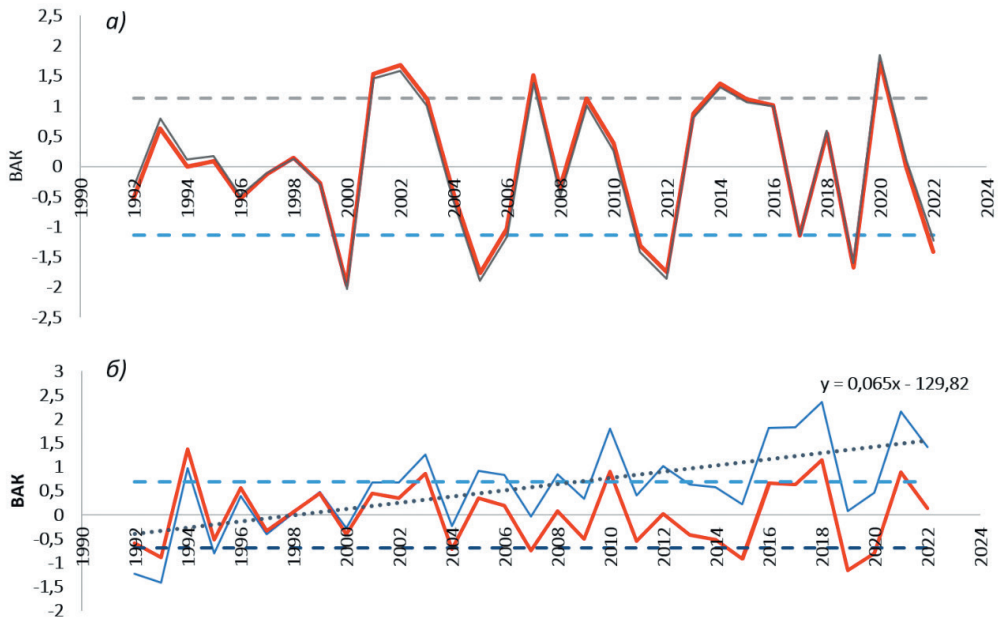


Рис. 2. Временной ряд среднемесячных значений индекса Восточно-Атлантического колебания (ВАК) в январе (а) и июле (б) за период с 1992 г. по 2022 г.

Пунктирная линия — линия тренда, голубой график — исходный ряд; красный график — ряд после удаления долгопериодного тренда квадратичной модели и прямые линии пороговые значения $\pm 1\sigma$.

Fig. 2. Time series of the East Atlantic Oscillation (EAO) index mean monthly values in January (a) and July (b) for the period 1992—2022.

Dashed line – trend line; blue line — original series; red line — series after removing the long-term quadratic trend; straight lines — threshold values $\pm 1\sigma$.

Результаты и обсуждение

Связь между состоянием ВАК и значениями рН в поверхностном слое Чёрного моря имеет выраженную сезонную зависимость (рис. 3).

Анализ показал, что в холодный период года практически одновременно с отрицательными аномалиями ВАК возникают положительные аномалии рН. Так, при отрицательных значениях ВАК в январе, феврале, марте, ноябре и декабре отмечаются устойчивые положительные аномалии рН в пределах от +0,012 до +0,028 (рис. 3). В тёплое время года, напротив, положительные аномалии ВАК сопровождаются отрицательными отклонениями рН с задержкой от 3 до 6 месяцев (рис. 3). Например, при майской положительной аномалии ВАК отмечается снижение рН в октябре в диапазоне от –0,008 до –0,01 и в ноябре — от –0,008 до –0,014. При положительной аномалии ВАК в июне фиксируются отрицательные отклонения рН с сентября по декабрь в пределах от –0,014 до –0,022 (рис. 3). При аномалии ВАК в июле формируются отрицательные отклонения рН в ноябре

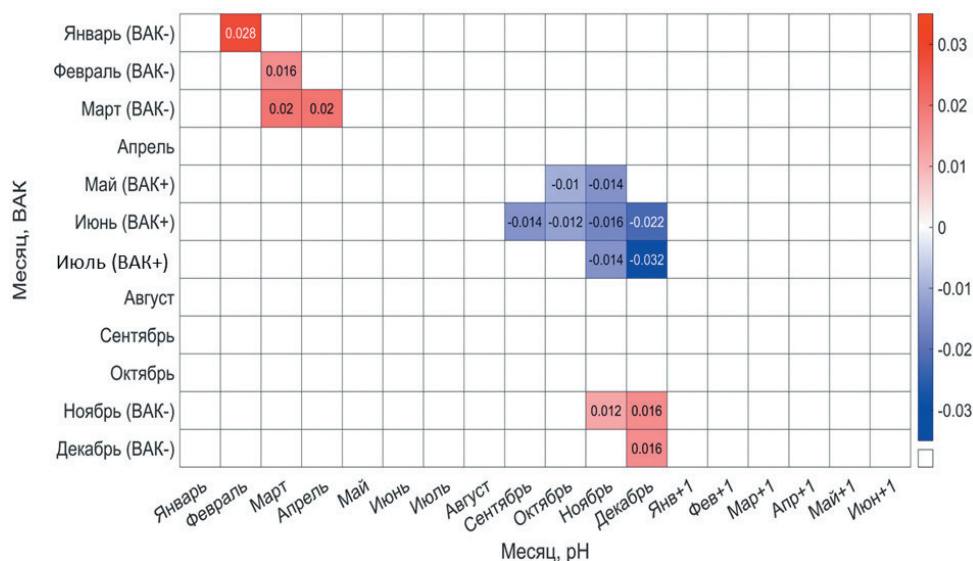


Рис. 3. Максимальные величины аномалий полуразностного композита, характеризующие отклик водородного показателя на изменчивость ВАК, по месяцам года.

Fig. 3. Maximum anomaly values of the half-difference composite characterizing the response of the hydrogen index to EAO variability by month of the year.

(от $-0,008$ до $-0,014$) и декабре (от $-0,02$ до $-0,032$) (рис. 3). В описанных случаях, при запаздывающем отклике прослеживается устойчивая тенденция к усилению отрицательных аномалий рН от первого месяца их возникновения ко второму.

Дополнительно анализ пространственных данных на основе карт полуразностного композита показал преобладание изменения полей от одного месяца к другому. В частности, на рис. 4 а и рис. 4 б демонстрируются поля для холодного периода. На рис. 4 а видно, что при синхронном сигнале область значимых положительных аномалий рН (от $0,008$ до $0,012$) охватывает центральную часть моря. При запаздывающем отклике (индекс ВАК в ноябре, а значение рН в декабре) величина положительных аномалий рН увеличивается до $0,016$ в центральной части моря, при этом область статистически значимых отклонений смещается западнее относительно исходного положения синхронного сигнала (рис. 4 б).

Выявленная почти синхронная реакция рН на зимнюю отрицательную аномалию индекса ВАК в холодный сезон согласуется с ранее полученными результатами, основанными на данных натурных наблюдений за период с 1957 г. по 1996 г. В работе [18] с применением композитного анализа временных рядов было установлено, что в период отрицательной аномалии индекса ВАК фиксируется положительная аномалия рН (около $+0,09$ ед.), а при положительной аномалии индекса ВАК обнаружена отрицательная аномалия рН (в среднем $-0,08$ ед.). Важно отметить, что из-за ограниченности данных в [18] анализ проводился на величинах, усреднённых за четырёхмесячные интервалы, причем

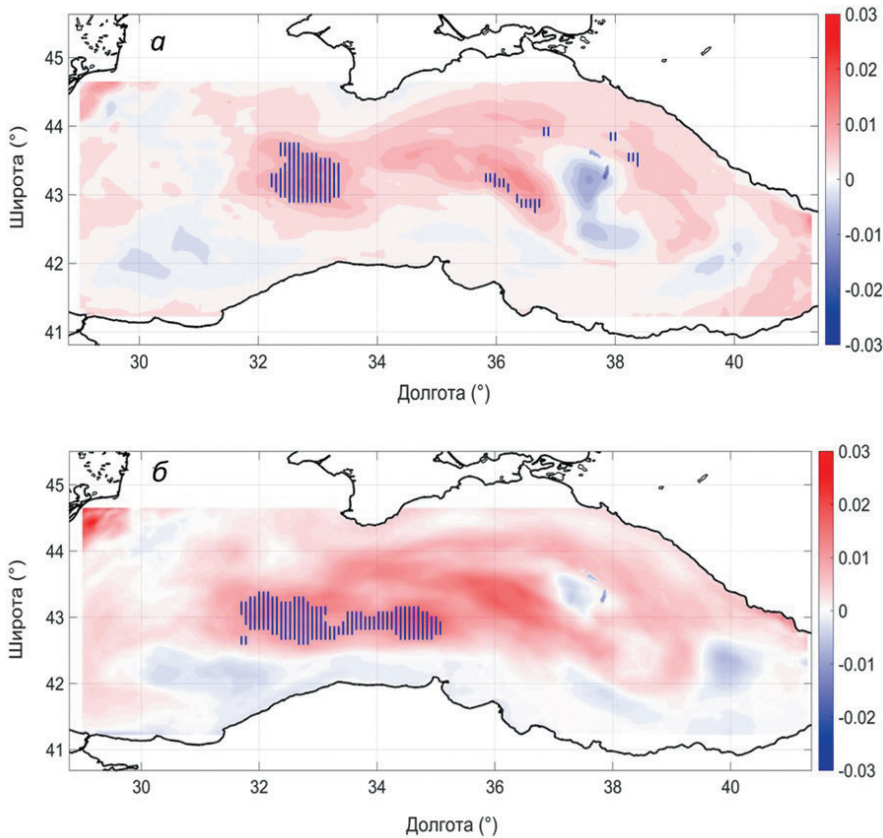


Рис. 4. Поле полуразностного композита для Восточно-Атлантического колебания в ноябре — синхронный сигнал (а) и поле полуразностного композита водородного показателя pH в декабре на сигнал ВАК в ноябре — запаздывающий сигнал (б).

Синие вертикальные линии обозначают область значимости при отрицательной аномалии ВАК–.

Fig. 4. (a) Half-difference composite field of the hydrogen index (pH) for the East Atlantic Oscillation in November — synchronous signal; (b) half-difference composite field of the hydrogen index (pH) for the EAO signal in November — delayed signal in December.

Blue vertical lines indicate the significance area for the negative EAO anomaly (EAO–).

аномалии индекса ВАК рассматривались после удаления долгопериодного линейного тренда.

Предполагаемый механизм влияния ВАК на pH можно объяснить изменениями в атмосферной циркуляции и связанными с этим биогеохимическими процессами. При отрицательной аномалии индекса происходит ослабление зонального переноса воздушных масс и усиление циклонической активности в Черноморско-Средиземноморском регионе [27, 28]. Это приводит к увеличению ветрового воздействия и, соответственно, к усилению вертикального турбулентного

перемешивания в верхнем слое моря. Результаты других исследований показывают, что в такие зимы, особенно в восточной части Черного моря, происходит существенный рост биомассы фитопланктона за счёт поступления биогенных элементов из подповерхностных слоёв моря [29]. Поскольку процесс активного фотосинтеза сопровождается потреблением растворённого углекислого газа, то это вызывает повышение рН в поверхностных водах, что согласуется с результатами [30].

В тёплый период года статистически значимый сигнал выявляется для положительной аномалии ВАК (рис. 3). Этот сигнал проявляется с запаздывающим откликом, который выражается через отрицательные аномалии рН. Положительные аномалии индекса ВАК, фиксируемые в мае, июне и июле, не вызывают немедленного изменения величины рН. Соответствующий отклик в виде отрицательных аномалий формируется с задержкой от трех до шести месяцев, достигая наибольших значений в декабре (рис. 3).

Пространственная структура данного воздействия сохраняет устойчивость при различных временных интервалах запаздывания. Анализ композитных полей указывает на их отчетливую взаимосвязь между последовательными месяцами, аналогично наблюдениям, сделанным для холодного периода года. Отрицательные аномалии рН устойчиво приурочены к центральным и восточным частям акватории (рис. 5 а, б).

Дополнительно был проанализирован отклик рН на июльский сигнал ВАК. В ноябре средняя отрицательная аномалия рН варьируется от $-0,008$ до $-0,014$ единиц рН, достигая максимума в центральной и восточной частях акватории (рис. 5 а). К декабрю значения аномалий возрастают до $-0,016 \dots -0,032$ единиц рН, что делает данный сигнал наиболее выраженным среди всех запаздывающих реакций (рис. 5 б). При этом пространственная структура отрицательных аномалий остается неизменной, что свидетельствует о продолжении развития и возможной адвекции модифицированных водных масс.

Потенциальный механизм выявленных запаздывающих связей может быть объяснён следующим образом. Преобладание положительной аномалии ВАК обуславливает доминирование зональной атмосферной циркуляции. В свободной атмосфере это явление сопровождается крупномасштабной отрицательной барической аномалией над акваторией Северной Атлантики, в то время как над регионом Средиземного и Чёрного морей формируется область повышенного атмосферного давления [22]. Такой устойчивый антициклонический режим в тёплый сезон благоприятствует формированию положительных температурных аномалий, маловетреной погоды и уменьшению интенсивности вертикального перемешивания морских вод, создавая условия для прогрева поверхностного слоя воды [22, 27].

Согласно классическим представлениям, подобные условия в весенне-летний период могут существенно изменять сезонный цикл развития фитопланктона [29], способствуя развитию сообществ, адаптированных к условиям летней стратификации (например, кокколитофорид) [32], и обеспечивая предпосылки для накопления органического вещества в фотическом слое. Впоследствии органическое

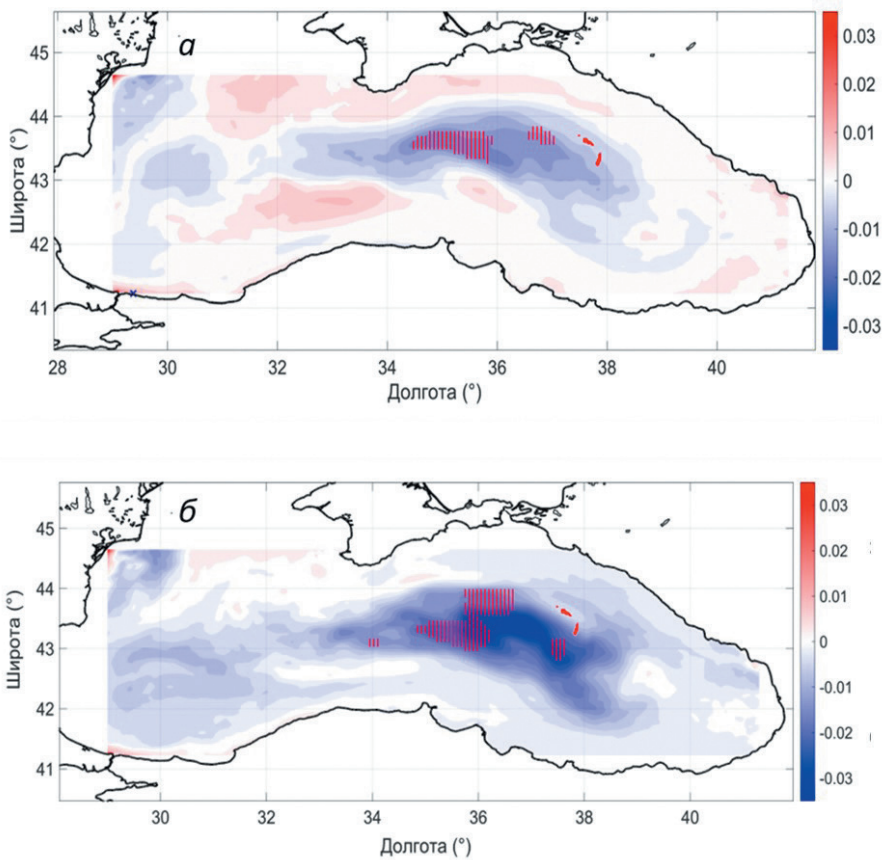


Рис. 5. Поле полуразностного композита водородного показателя pH в ноябре на сигнал ВАК в июле — запаздывание 4 м (а) полуразностного композита водородного показателя pH в декабре на сигнал ВАК в июле — запаздывание 5 м (б).

Красные вертикальные линии обозначают область значимости при ВАК+.

Fig. 5. Half-difference composite fields of the hydrogen index (pH):
(a) November response to the July EAO signal (4-month lag);
(b) December response to the July EAO signal (5-month lag).

Red vertical lines indicate the significance area for the positive EAO anomaly (EAO +).

вещество погружается и претерпевает реминерализацию в подповерхностных слоях, что приводит к снижению значений pH в этих зонах [8, 9].

С началом осенне-зимнего периода усиление ветров вызывает активацию вертикального перемешивания и общей циклонической циркуляции в Чёрном море [33]. Однако эти процессы характеризуются пространственной неоднородностью. Наиболее интенсивный и устойчивый подъём глубинных вод отмечается в восточной части моря, что объясняется наличием постоянной области циклонической

активности, существующей здесь круглый год и резко усиливающейся в холодные месяцы года [34]. Начиная с ноября—декабря, происходит переход к стадии доминирования интенсивной циклонической циркуляции, максимум которой приходится на восточную часть моря в период с января по март [33]. Этот вывод подтверждается анализом сезонных изменений динамических высот водной толщи [32].

Таким образом, усиливающаяся к осени и зиме циклоническая циркуляция в восточной части Чёрного моря выполняет ключевую роль в процессе вертикального поднятия вод из подповерхностных слоёв к поверхности моря. Этот усиленный вертикальный обмен способствует выносу богатых продуктами реминерализации летнего органического вещества масс воды с низкими значениями pH. Следовательно, летний атмосферный режим (положительное состояние ВАК), способствовавший аккумуляции органического вещества на поверхности, через механизмы сезонной вертикальной циркуляции приводит к проявлению сигнала подкисления поверхностных вод в конце осени и начале зимы, особенно выраженному в восточной части моря.

Заключение

В результате выполненного анализа удалось подробно описать статистические взаимосвязи между фазами ВАК и изменениями pH в поверхностных водах Чёрного моря, подчеркнув их сложный и сезонно обусловленный характер.

Установлено, что в холодный период года отрицательная аномалия ВАК сопровождается статистически значимым откликом в виде положительных аномалий pH, которые проявляются как одновременно, так и с задержкой на следующий месяц. Наиболее заметное увеличение pH фиксируется в феврале в ответ на январский сигнал ВАК (до +0,028 единиц). Устойчивые положительные аномалии обнаруживаются и далее: +0,016 ед. в марте при февральском сигнале ВАК, а также +0,02 ед. pH в марте и апреле в связи с мартовской фазой ВАК. Отрицательная фаза ВАК в ноябре и декабре вызывает возникновение положительных аномалий pH от 0,012 до 0,016 ед. в течение ноября и декабря. Эти изменения пространственно локализуются преимущественно в центральной и западной частях акватории. Для положительной фазы ВАК статистически значимого отклика pH в холодный период выявлено не было.

В тёплый период года характер связей изменяется. Положительные аномалии ВАК, обнаруживаемые с мая по июль, не являются причиной немедленных откликов поля pH, однако спустя 3–6 месяцев формируются устойчивые отрицательные аномалии. Так, майская фаза ВАК+ коррелирует с появлением аномалии pH в октябре (–0,01 единиц) и ноябре (–0,014 единиц), июньская — с сентября по декабрь с постепенным увеличением аномалии от –0,014 до –0,022 единиц, а июльская — с максимальным снижением pH в ноябре (–0,014 единиц) и декабре (–0,032 единиц). В каждом из этих случаев прослеживается тенденция к усилению отрицательных аномалий от первого месяца ко второму. Пространственная структура данных изменений сосредоточена преимущественно в центральной и восточной частях акватории Чёрного моря.

Таким образом, результаты исследования подтверждают выраженную сезонную динамику связи рН с фазами ВАК. В холодное время года выражена доминирующая синхронная положительная зависимость с отрицательной фазой ВАК, тогда как положительная фаза ВАК в летний период демонстрирует отсроченный отрицательный сигнал, усиливающийся осенью и зимой.

Важно отметить, что выявленные связи имеют исключительно статистический характер и не подтверждают наличие причинно-следственной зависимости. Совпадения результатов могут быть обусловлены влиянием сторонних факторов или являться следствием ложной корреляции. Физическое объяснение предполагает косвенное влияние фаз ВАК на гидрометеорологические условия и биогеохимические процессы, но остаётся на уровне гипотезы. Дальнейшее исследование с привлечением дополнительных параметров морской среды необходимо для проверки причинно-следственных механизмов данного явления.

Список литературы

1. Белокопытов В. Н. Климатические изменения гидрологического режима Черного моря: Дисс. д-ра геогр. наук (спец. 25.00.28). Севастополь: ФГБУН «Морской гидрофизический институт РАН». 2007. 377 с.
2. Полонский А. Б., Башарин Д. В., Воскресенская Е. Н. и др. Североатлантическое колебание: описание, механизмы и влияние на климат Евразии // Морской гидрофизический журнал. 2004. № 2. С. 42—57.
3. Barnston A. G., Livezey R. E. Classification, seasonality and persistence of low-frequency atmospheric circulation patterns // Monthly Weather Review. 1987. Vol. 115, № 6. P. 1083—1126.
4. Аверьянова Е. А., Губарев А. В., Полонский А. Б. Влияние североатлантического и восточно-атлантического колебаний на завихренность касательного напряжения трения ветра над Черным морем // Метеорология и гидрология. 2022. № 1. С. 24—35.
5. Евстигнеев В. П., Наумова В. А., Воскресенская Е. Н. и др. Ветроволновые условия прибрежной зоны Азово-Черноморского региона. С.: ИПТС, 2017. 320 с.
6. Lionello P., Bhand J., Buzzi A., et al. Cyclones in the Mediterranean region: Climatology and effects on the environment // Developments in earth & environmental sciences. 2006. Vol. 14. P. 325—372.
7. Oguz T., Dippner J. W., Kaymaz Z. Climatic regulation of the Black Sea hydro-meteorological and ecological properties... // Journal of Marine Systems. 2006. Vol. 60. Iss. 3-4. P. 235—248. DOI: 10.1016/j.jmarsys.2005.11.011.
8. Grégoire M., Soetaert K. Carbon, nitrogen, oxygen and sulfide budgets in the Black Sea: A biogeochemical model of the whole water column coupling the oxic and anoxic parts // Ecological Modelling. 2010. Vol. 221. No. 19. P. 2287—2301.
9. Podymov O. I., Yakushev E. V., Kostyleva A. V. On Interannual Variability of Chemical Characteristics of Redox Layer and Cold Intermediate Layer of the Black Sea // Chemical Structure of Pelagic Redox Interfaces. 2013. P. 121—135. DOI: 10.1007/978_2011_122.
10. Lauvset S. K., Gruber N. Long-term trends in surface ocean pH in the North Atlantic // Marine Chemistry. 2014. Vol. 162. P. 71—76.
11. Leseurre C., Monaco C. I. Lo., Reverdin G., et al. Ocean carbonate system variability in the North Atlantic Subpolar surface water (1993—2017) // Biogeosciences. 2020. Vol. 17. P. 2553—2577.
12. Ross P. M., Parker L., Byrne M. The impact of ocean acidification on reproduction, early development and settlement of marine organisms // Water. 2011. Vol. 3. no. 4. P. 1005-1030. <https://doi.org/10.3390/w3041005>.
13. Zhao X., Guo C., Han Y., et al. Ocean acidification decreases mussel byssal attachment strength and induces molecular byssal responses // Marine Ecology Progress Series. 2017. Vol. 565. P. 67—77. DOI: 10.3354/meps11992.

14. Munday P. L., Dixon D. L., McCormick M. I. et al. Replenishment of fish populations is threatened by ocean acidification // *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2010. Vol. 107(29). P. 12930—12934. DOI: 10.1073/pnas.1004519107.
15. Cripps I. L., Munday P. L., McCormick M. I. Ocean acidification affects prey detection by a predatory reef fish // *PLoS ONE*. 2011. Vol. 6, № 7. Art. e22736. DOI: 10.1371/journal.pone.0022736.
16. Гребнева Е. А., Шилин М. Б. Анализ долгосрочных изменений pH в Чёрном море: Верификация данных реанализа Cmems BS-Biogeochemistry и натурных измерений // *Естественные и технические наук*. 2025. № 3. С. 198—211. DOI: 10.25633/ETN.2025.03.19.
17. Полонский А. Б., Гребнева Е. А. О межгодовой изменчивости величины pH в поверхностном слое глубоководной части Черного моря // *Системы контроля окружающей среды*. 2022. № 2(48). С. 12—21.
18. Полонский А. Б., Гребнева Е. А. Влияние Восточно-Атлантического колебания на аномалии pH в верхнем слое открытой части Черного моря // *Системы контроля окружающей среды*. 2023. Вып. 1 (51). С. 15—26. DOI: 10.33075/2220-5861-2023-1-15-26.
19. Grégoire M., Vandenbulcke L., Capet A. Black Sea Biogeochemical Reanalysis (CMEMS BS-Biogeochemistry) (Version 1) [Data set]. Copernicus Monitoring Environment Marine Service (CMEMS). 2020: [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://doi.org/10.25423/CMCC/BLKSEA_REANALYSIS_BIO_007_005_BAMHBI (Дата обращения: 13.01.2025).
20. Grégoire M., Raick C., Soetaert K. Numerical modeling of the deep Black Sea ecosystem functioning during the late 80's (eutrophication phase) // *Progress in Oceanography*. 2008. No. 76 (9). P. 286—333.
21. Полонский А. Б., Гребнева Е. А. Верификация данных ре-анализа CMEMS BS-Biogeochemistry по величине pH в Черном море с использованием результатов прямых измерений // *Системы контроля окружающей среды*. 2024. № 1(55). С. 112—118. DOI: 10.33075/2220-5861-2024-1-112-118.
22. NOAA/National Weather Service, Center for Climate Prediction. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/teledoc/ea_map.shtml (дата последнего обращения: 06.09.2022 г.).
23. Харьков О. А., Соловьев А. Г. Статистические методы и математическое моделирование: учебное пособие. А.: СГМУ, 2017. 164 с.
24. Thoning K. W., Tans P. P., Komhyr W. D. Atmospheric carbon dioxide at Mauna Loa Observatory, 2. Analysis of the NOAA/GMCC data, 1974–1985 // *Journal of Geophysical Research*. 1989. Vol. 94. P. 8549–8565. DOI: 10.1029/JD094iD06p08549.
25. Jenkins G. M., Watts D. G. Spectral Analysis and Its Applications. San Francisco: Holden-Day. 1968. Pp. 243—238.
26. Школьный Е. П. Обработка и анализ гидрометеорологической информации / Е. П. Школьный, И. Д. Лоева, Л. Д. Гончарова. Одесса, 2000. 600 с.
27. Бардин М. Ю., Платова Т. В., Самохина О. Ф. Особенности изменчивости циклонической активности в умеренных широтах Северного полушария, связанные с ведущими модами атмосферной циркуляции в Атлантико-Европейском секторе // *Фундаментальная и прикладная климатология*. 2015. Т. 2. С. 14—40.
28. Нестеров Е. С. О восточно-атлантическом колебании циркуляции атмосферы // *Метеорология и гидрология*. 2009. № 12. С. 32—40.
29. Грезе В. Н. Основы биологической продуктивности Черного моря. К.: Наук. Думка, 1979. 392 с.
30. Добржанская М. А. Основные черты гидрохимического режима Черного моря // *Труды СБС ЛИ СССР*. 1960. Т. 13. С. 325—378.
31. Cokacar T., Oguz T., Kubilay N. Satellite-detected early summer coccolithophore blooms and their interannual variability in the Black Sea // *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*. 2004. Vol. 51. Issue 8. P. 1017—1031. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dsr.2004.03.007>.
32. Иванов В. А., Белокопытов В. Н. Океанография Чёрного моря. Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2011. 210 с.
33. Ефимов В. В., Анисимов А. Е. Климатические характеристики изменчивости поля ветра в Черноморском регионе — численный реанализ региональной атмосферной циркуляции // *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*. 2011. Т. 47. № 3. С. 1—13.

References

1. Belokopytov V. N. Klimaticheskie izmeneniya gidrologicheskogo rezhima Chernogo mory. Climate changes in the hydrological regime of the Black Sea. Dr. Sci. (Geogr.) Dissertation (spec. 25.00.28). Sevastopol: MGI RAN, 2007: 377 p. (In Russ.).
2. Polonsky A. B., Basharin D. V., Voskresenskaya E. N., et al. The North Atlantic Oscillation: description, mechanisms, and impact on the climate of Eurasia. *Morskoy gidrofizicheskiy zhurnal = Marine Hydrophysical Journal*. 2004; (2): (42—59). (In Russ.).
3. Barnston A. G., Livezey R. E. Classification, seasonality and persistence of low-frequency atmospheric circulation patterns. *Monthly Weather Review*. 1987; 115(6): 1083—1126. DOI: 10.1175/1520-0493(1987)115<1083:CSAPOL>2.0.CO;2.
4. Averyanova E. A., Gubarev A. V., Polonsky A. B. Influence of the North Atlantic and East Atlantic oscillations on the vorticity of wind stress over the Black Sea. *Meteorologiya i gidrologiya = Russian Meteorology and Hydrology*. 2022; (1): (24—35). (In Russ.).
5. Yevstigneyev V. P., Naumova V. A., Voskresenskaya Ye. N. et al. *Vetrovolnovyye usloviya pribrezhnoy zony Azovo-Chernomorskogo regiona = Wind and wave conditions of the coastal zone of the Azov-Black Sea region*. Sevastopol: IPTS, 2017: 320 p. (In Russ.).
6. Lionello P., Bhend J., Buzzi A. et al. Cyclones in the Mediterranean region: Climatology and effects on the environment. *Developments in earth & environmental sciences*. 2006; (14): 325—372. DOI: 10.1016/S1571-9197(06)80009-1.
7. Oguz T., Dippner J. W., Kaymaz Z. Climatic regulation of the Black Sea hydro-meteorological and ecological properties. *Journal of Marine Systems*. 2006; 60(3-4):235—248. DOI: 10.1016/j.jmarsys.2005.11.011.
8. Grégoire M., Soetaert K. Carbon, nitrogen, oxygen and sulfide budgets in the Black Sea: A biogeochemical model of the whole water column coupling the oxic and anoxic parts. *Ecological Modelling*. 2010; 221(19):2287—2301. DOI: 10.1016/j.ecolmodel.2010.06.007.
9. Podymov O. I., Yakushev E. V., Kostyleva A. V. On Interannual Variability of Chemical Characteristics of Redox Layer and Cold Intermediate Layer of the Black Sea. In: Yakushev E.V. (ed.), *Chemical Structure of Pelagic Redox Interfaces: Observation and Modeling*. Berlin, Heidelberg: Springer; 2013: 121—136. DOI: 10.1007/978-2011_122.
10. Lauvset S. K., Gruber N. Long-term trends in surface ocean pH in the North Atlantic. *Marine Chemistry*. 2014; (162): 71—76. DOI: 10.1016/j.marchem.2014.03.009.
11. Leseurre C., Monaco C. Lo., Reverdin G. et al. Ocean carbonate system variability in the North Atlantic Subpolar surface water (1993—2017). *Biogeosciences*. 2020; (17):2553—2577. DOI:10.5194/bg-17-2553-2020.
12. Ross P. M., Parker L., Byrne M. The impact of ocean acidification on reproduction, early development and settlement of marine organisms. *Water*. 2011; 3(4):1005—1030. DOI:10.3390/w3041005.
13. Zhao X., Guo C., Han Y. et al. Ocean acidification decreases mussel byssal attachment strength and induces molecular byssal responses. *Marine Ecology Progress Series*. 2017; 565(6): 7—77. DOI: 10.3354/meps11992.
14. Munday P. L., Dixon D. L., McCormick M. I., et al. Replenishment of fish populations is threatened by ocean acidification. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2010; 107(29):12930—12934. DOI: 10.1073/pnas.1004519107.
15. Cripps I. L., Munday P. L., McCormick M. I. Ocean acidification affects prey detection by a predatory reef fish. *PLoS ONE*. 2011; 6(7): e22736. DOI: 10.1371/journal.pone.0022736.
16. Grebneva E. A., Shilin M. B. Analysis of long-term pH changes in the Black Sea: Verification of Cmems BS-Biogeochemistry reanalysis data and field measurements. *Yestestvennyye i tekhnicheskkiye nauki = Natural and technical sciences*. 2025; (4): (198—211). doi: 10.25633/ETN.2025.03.19. (In Russ.).
17. Polonsky A. B., Grebneva E. A. On interannual variability of pH in the surface layer of the deep-water part of the Black Sea. *Sistemy kontrolya okruzhayushchey sredy = Environmental Control Systems*. 2022; 2(48): (12—21). DOI: 10.33075/2220-5861-2026-1-08-22. (In Russ.).
18. Polonsky A. B., Grebneva E. A. Influence of the East Atlantic Oscillation on pH anomalies in the upper layer of the open part of the Black Sea. *Sistemy kontrolya okruzhayushchey sredy = Environmental Control Systems*. 2023; 1(51): (15—26). DOI: 10.33075/2220-5861-2023-1-15-26. (In Russ.).

19. Grégoire M., Vandenbulcke L., Capet A. Black Sea Biogeochemical Reanalysis (CMEMS BS-Biogeochemistry) (Version 1) [Data set]. Copernicus Monitoring Environment Marine Service (CMEMS). 2020. Available at: https://doi.org/10.25423/CMCC/BLKSEA_REANALYSIS_BIO_007_005_BAM-HBI (accessed on: 13.01.2025).
20. Grégoire M., Raick C., Soetaert K. Numerical modeling of the central Black Sea ecosystem functioning during the eutrophication phase. *Progress in Oceanography*. 2008; 76(9): 286—333. DOI: 10.1016/j.pcean.2008.01.002
21. Polonsky A. B., Grebneva E. A. Verification of the CMEMS BS-Biogeochemistry reanalysis data on pH in the Black Sea using direct measurement results. *Sistemy kontrolya okruzhayushchey sredy = Environmental Control Systems*. 2024; 1(55): (112—118). DOI: 10.33075/2220-5861-2024-1-112-118. (In Russ.).
22. NOAA/National Weather Service, Center for Climate Prediction. Available at: https://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/teledoc/ea_map.shtml (accessed on: 06.09.2022).
23. Kharkova O. A., Solov'ev A. G. *Statisticheskie metody i matematicheskoe modelirovanie: uchebnoe posobie = Statistical methods and mathematical modeling: textbook*. Arkhangelsk: SGMA, 2017: 164 p. (In Russ.).
24. Thoning K. W., Tans P. P., Komhyr W. D. Atmospheric carbon dioxide at Mauna Loa Observatory, 2. Analysis of the NOAA/GMCC data, 1974—1985. *Journal of Geophysical Research*. 1989; (94): 8549—8565. DOI: 10.1029/JD094iD06p08549.
25. Jenkins G. M., Watts D. G. *Spectral Analysis and Its Applications*. San Francisco: Holden-Day, 1968: 525 p.
26. Shkol'nyy E. P., Loeva I. D., Goncharova L. D. *Obrabotka i analiz gidrometeorologicheskoy informatsii = Processing and analysis of hydrometeorological information*. Odessa, Ministry of Education of Ukraine; 2000: 600 p. (In Russ.).
27. Bardin M. Yu., Platova T. V., Samokhina O. F. Features of the variability of cyclonic activity in the Northern Hemisphere mid-latitudes associated with the leading modes of atmospheric circulation in the Atlantic-European sector. *Fundamental'naya i prikladnaya klimatologiya = Fundamental and Applied Climatology*. 2015; (2): (14—40). (In Russ.).
28. Nesterov E. S. On the East Atlantic Oscillation of atmospheric circulation. *Meteorologiya i gidrologiya = Meteorology and Hydrology*. 2009; (12): (32—40). (In Russ.).
29. Greze V. N. *Osnovy biologicheskoy produktivnosti Chernogo moray = Fundamentals of biological productivity of the Black Sea*. K.: Naukova Dumka, 1979: 392 p. (In Russ.).
30. Dobrzanskaya M. A. Main Features of the Hydrochemical Regime of the Black Sea. *Trudy SBS LI SSSR = Proceedings of the Sevastopol Biological Station LI USSR*. 1960; (13): (325—378). (In Russ.).
31. Cokacar T., Oguz T., Kubilay N. Satellite-detected early summer coccolithophore blooms and their interannual variability in the Black Sea. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*. 2004; 51(8): 1017—1031. DOI: 10.1016/j.dsr.2004.03.007.
32. Ivanov V. A., Belokopytov V. N. *Okeanografiya Chornogo moray = Oceanography of the Black Sea*. Sevastopol: ECOSY-Hydrophysica. 2011: 210 p. (In Russ.).
33. Efimov V. V., Anisimov A. E. Climatic Parameters of WindField Variability in the Black Sea Region: Numerical Reanalysis of Regional Atmospheric Circulation. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2011; 47(3): 350—361. DOI: 10.1134/S0001433811030030.

Информация об авторах

Гребнева Елена Александровна, младший научный сотрудник Отдела функционирования морских экосистем, Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН, grebneva@ibss-ras.ru.

Шилин Михаил Борисович, доктор географических наук, профессор Российский государственный гидрометеорологический университет, shilin@rshu.ru.

Information about authors

Grebneva Elena Aleksandrovna, Junior Researcher, Department of Marine Ecosystem Functioning, A. O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS, Sevastopol, Russia.

Shilin Mikhail Borisovich, doctor of Geographical Sciences, Professor, Russian State Hydrometeorological University.

Конфликт интересов: Конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила 12.02.2026

Принята в печать после доработки 22.05.2026

The article was received on 12.02.2026

The article was accepted after revision on 22.05.2026

Гидрометеорология и экология. 2026. № 83. С. 340—357.

Hydrometeorology and Ecology. 2026;(83):340—357.

ГЕОИНФОРМАТИКА

Научная статья

УДК 502.175:551.508:556.07

doi: 10.33933/2713-3001-2026-83-340-357

Территориальные мониторинги гидрометеорологической и экологической обстановки: ситуационно-предиктивная поддержка технических средств наблюдения за воздушной средой

Александр Константинович Беляев, Сергей Иванович Биденко

АО «НПО «Импульс», Санкт-Петербург, Россия, alexbel3101@gmail.com

Аннотация. Разработана геоинформационная методика территориально-предиктивной оценки состояния и прогноза технического состояния средств наблюдения и измерения территориально распределённых мониторингов контроля состояния воздушной среды. Методика объединяет средства геопространственного анализа окружающей среды и аппарат предиктивной аналитики технического состояния приборов и оборудования. Это позволяет оперативно определять, локализовывать и прогнозировать сбои и отказы оборудования с учетом воздействия деструктивных факторов внешней и внутренней обстановки; сокращать время технического обслуживания и увеличивать межсервисный интервал; строить территориально и ситуационно-ориентированную логистику эксплуатации региональной сети метеорологических станций.

Ключевые слова: геомоделирование, предиктивная аналитика, геоситуационная интеграция, региональная метеорологическая сеть, геоуниверсальная логистика технического обслуживания.

Для цитирования: Беляев А. К., Биденко С. И. Территориальные мониторинги гидрометеорологической и экологической обстановки: ситуационно-предиктивная поддержка технических средств наблюдения за воздушной средой // Гидрометеорология и экология. 2026. № 83. С. 340—357. doi: 10.33933/2713-3001-2026-83-340-357.

GEOINFORMATICS

Original article

Territorial Monitoring of Hydrometeorological and Environmental Conditions in the Air Environment: A Predictive Approach to Supporting Observation Systems

Alexander K. Belyaev, Sergey I. Bidenko

JSC «SPA «Impulse», St. Petersburg, Russia, alexbel3101@gmail.com

Summary. A geoinformation methodology has been developed for territorial-predictive assessment and forecasting of the technical condition of observation and measurement stations used in territorially

© Беляев А. К., Биденко С. И., 2026

distributed air-environment monitoring networks. The methodology integrates geospatial environmental analysis with predictive analytics of the technical condition of automatic weather stations equipment. This makes it possible to promptly identify, localize, forecast equipment malfunctions and failures while accounting for destructive factors of the external and internal situation; reduce maintenance time and increase the service interval; develop territorially and situation-oriented logistics for technical operation of a regional meteorological station network.

Keywords: geomodeling, predictive analytics, geosituational integration, regional meteorological network, geo-dependent maintenance logistics.

For citation: Belyaev A. K., Bidenko S. I. Territorial Monitoring of Hydrometeorological and Environmental Conditions in the Air Environment: A Predictive Approach to Supporting Observation Systems. *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydrometeorology and Ecology*. 2026;(83):(340—357). doi: 10.33933/2713-3001-2026-83-340-357. (In Russ.).

Введение

Территориальные мониторинги широко используются в последние десятилетия для сбора, обработки и освещения гидрометеорологической (ГМ-), экологической и другой геоситуационной информации.

Гидрометеорологические (ГМ-) факторы окружающей среды являются важными акторами в системе обеспечения экологического благополучия региона (территории) [1, 2]. ГМ-факторы постоянно используются в промышленности, транспорте, природопользовании, рекреационных системах. Знание параметров ГМ- и экологической ситуации обеспечивает качество хозяйственной и социальной деятельности в регионе [3].

Для обеспечения потребителей пространственной ГМ-информацией в системах территориального мониторинга широко используются различные автоматические и автоматизированные средства наблюдения за параметрами гидрометеорологической среды (рис. 1). Современная наземная наблюдательная сеть

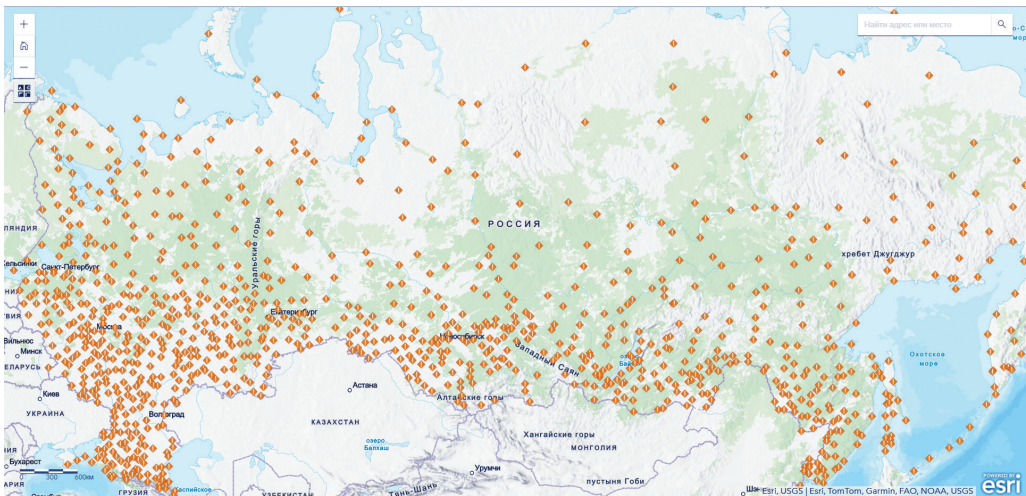


Рис. 1. Пространственное распределение метеорологических станций Росгидромета на территории Российской Федерации [8].

Fig. 1. Spatial distribution of Roshydromet meteorological stations across the Russian Federation [8].

Росгидромета [4, 5] и ведомственных/отраслевых систем [6] опирается на широкое применение автоматических метеорологических станций (АМС) и автоматизированных метеорологических комплексов (АМК) [7]. Наряду с полнофункциональными станциями и комплексами в составе территориально распределенных контуров наблюдений применяются отдельные геосенсоры и специализированные датчики, формирующие локальные потоки измерений и дополняющие станционные наблюдения на конкретных площадках.

Эффективность применения отдельных элементов наблюдения существенно возрастает при их группировке или использовании в составе локальных и региональных сетей, что применяется в Росгидромете (рис. 2) и других ведомствах [5].

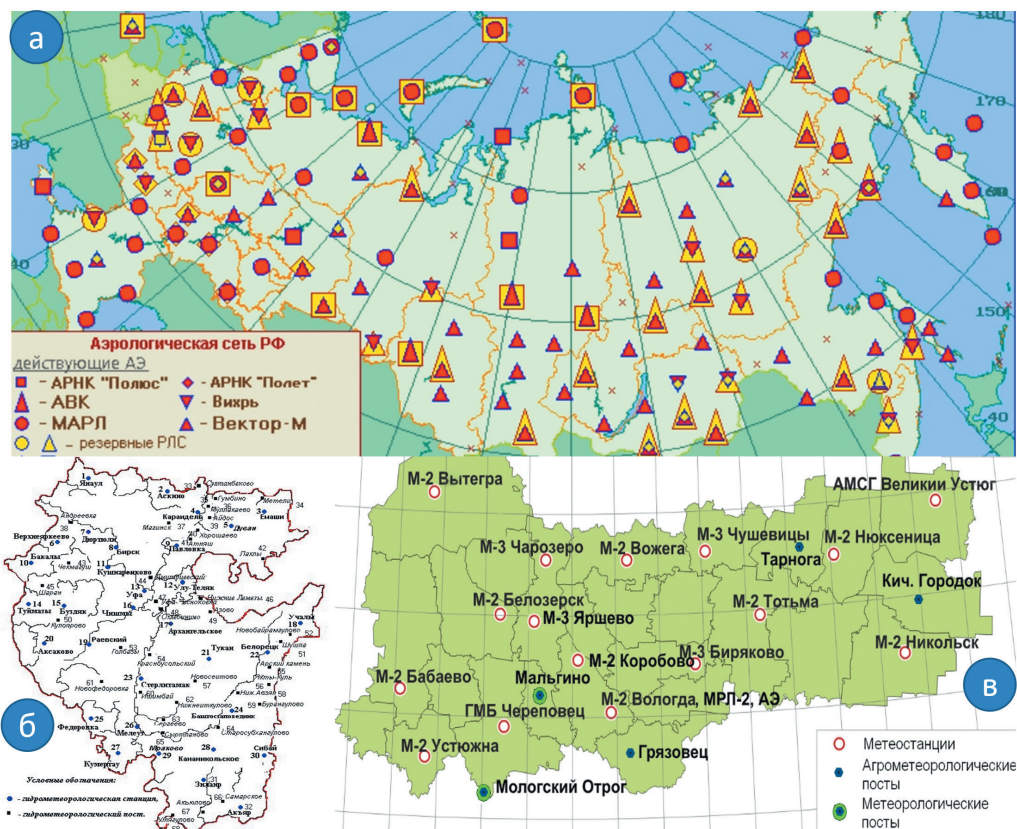


Рис. 2. Примеры пространственной организации АМС и постов наблюдения:

а) аэрологическая сеть РФ [9]; б) региональная метеорологическая сеть Республики Башкортостан [10]; в) региональная метеорологическая сеть Вологодской области [11].

Fig. 2. Examples of the spatial organization of meteorological observation networks:

а) the upper-air network of the Russian Federation [9]; б) the regional meteorological network of the Republic of Bashkortostan [10]; в) the regional meteorological network of Vologda Oblast [11].

При этом результат работы таких станций представляет собой совокупность синхронизированных временных рядов метеорологических величин с разными значениями дискретности. Это обуславливает критичность непрерывности регистрации и устойчивости каналов измерения/передачи для качества оперативной и режимной информации.

Опыт эксплуатации распределенных сетей АМС/АМК показывает наличие ряда специфических трудностей в вопросах их применения [12]. Однотипные станции, размещенные в разных географических, техногенных и логистических условиях, могут характеризоваться неодинаковой частотой сбоев и особенностями в техническом обслуживании и ремонте (ТОиР) [13]. Это возникает вследствие различий в условиях размещения, воздействиях геосреды (температура, влажность, давление, осадки, радиационный фон, освещенность, ветер, доступность) и инфраструктурных ограничениях обслуживания. Для станций специального назначения (аэродромные, дорожные, судовые, экологические и др.) спектр эксплуатационных воздействий шире за счет требований отраслевых технологий и режимов работы, что повышает вариативность отказов и риск потери данных. Эффективность сетей АМС/АМК также во многом определяется вопросами оптимальной эксплуатации отдельных технических средств.

Традиционная схема эксплуатации АМС/АМК зачастую ориентирована на плановое обслуживание, локальную диагностику неисправностей и восстановление работоспособности после выявленного сбоя [14, 15]. Такой подход не позволяет учитывать пространственно-временную неоднородность условий эксплуатации, прогнозировать изменение технического состояния станций/их подсистем на заданном горизонте и выделять участки инфраструктуры с повышенным риском ухудшения работоспособности. Вместе с этим динамика состояния таких средств носит стохастический характер, поскольку определяется совокупностью случайных внутренних и внешних воздействий, включая деградацию элементов, режимы контроля, климатические и эксплуатационные факторы [16, 17].

Цель статьи состоит в обосновании геоинформационной методики территориально-предиктивной оценки технического состояния АМС/АМК, объединяющей пространственное описание размещения объектов, их атрибутивные характеристики (датчики, контроллеры, каналы связи, питание), эксплуатационные данные (сбои, замены, обслуживание) и факторные признаки среды в единой схеме предиктивной оценки готовности [18]. В качестве стохастического ядра применяется аппарат непрерывных цепей Маркова, позволяющий описывать переходы между дискретными техническими состояниями и рассчитывать вероятности пребывания объекта в каждом из них. Данный подход показал свою эффективность в различных отраслях, связанных с моделированием процесса эксплуатации технических систем [19, 20]. При этом для адаптивной параметризации геозависимых интенсивностей отказов используются методы машинного обучения [21] по данным эксплуатации и параметрам факторов окружающей среды, обеспечивающие учёт нелинейных зависимостей деградации оборудования [13, 22].

Формализация геомодели сети АМС/АМК

В работе предложена геомодель обстановки территориально-распределённой сети автоматизированных/автоматических метеорологических станций (комплексов) общего и специального назначения, объединяющая пространственное размещение объектов, их атрибутивно-содержательные характеристики, условия эксплуатации и прогнозные оценки состояния. Геомодель можно представить в виде:

$$GM = \langle GO, Rel, Loc, Atr \rangle, \quad (1)$$

где GO — множество геообъектов сети АМС/АМК, Rel — множество отношений между ними, Loc — пространство размещения объектов, Atr — пространство содержательных признаков.

Каждый геообъект (АМС/АМК или ее ключевая подсистема) $Gobj_i \in GO$, $i = \overline{1, n}$ задаётся парой пространственной и атрибутивно-содержательной компонентов:

$$Gobj_i = (Sp_i, At_i), \quad i = \overline{1, n}, \quad (2)$$

где Sp_i — характеризует пространственное положение и конфигурацию объекта, а At_i — его технические, ресурсные, эксплуатационные и текущие признаки, влияющие на состояние, n — количество объектов наблюдения.

Такое представление позволяет рассматривать готовность распределенной наблюдательной сети не изолированно по отдельным станциям, а с учетом их территориального расположения, условиями функционирования и историей эксплуатации. Изменение технического состояния станции трактуется как результат совместного воздействия внутренних процессов деградации измерительных и передающих каналов и внешних факторов среды и эксплуатации.

Для количественного учёта влияния территориальных условий на вероятность отказа вводится геодепендентная функция интенсивности отказов:

$$\lambda_i(t) = \lambda_i^0 \varphi_i(G_i(t)), \quad i = \overline{1, n}, \quad (3)$$

где λ_i^0 — базовая интенсивность отказов при номинальных условиях эксплуатации, $G_i(t)$ — совокупность факторов среды и эксплуатации для объекта $Gobj_i$, φ_i — корректирующая функция, учитывающая влияние этих факторов на интенсивность отказов.

Такое представление связывает геомодель размещения и состояния станции с ее предиктивным аппаратом. В зависимости от объёма и структуры данных функция φ_i может быть задана аналитически, статистически или с использованием методов машинного обучения. В последнем случае обучаемый компонент позволяет учитывать нелинейные и скрытые зависимости между условиями эксплуатации и вероятностью деградации объекта.

Требуется на основе геомодели GM , эксплуатационных данных и геодепендентной функции интенсивности отказов построить подход, обеспечивающий оценку

изменения технического состояния АМК/АМС на заданном горизонте прогнозирования, ранжирование станций по степени риска выхода из работоспособного состояния и формирование приоритетного перечня объектов, территориальных сегментов для первоочередного контроля и технического обслуживания.

Задача сводится к схеме предиктивной оценки готовности наблюдательной сети, в которой пространственные характеристики, содержательные признаки и факторные воздействия используются как единая основа для расчёта вероятностей технических состояний и территориально ориентированного приоритизирования контроля.

Для описания динамики технического состояния АМС/АМК использован формализм непрерывных цепей Маркова с конечным числом состояний [19]. Альтернативные подходы в виде регрессионных моделей надёжности, сетевых моделей Петри, имитационного моделирования также применимы для анализа сложных систем. Однако регрессионные модели описывают систему усреднённо и не позволяют отслеживать динамику переходов между конкретными техническими состояниями, что критично для оценки эксплуатационной готовности. Сетевые модели Петри и имитационные схемы Монте-Карло обеспечивают высокую гибкость, но их использование в задачах анализа территориально-распределённых систем сопряжено с высокой сложностью построения и трудностями интеграции с пространственными моделями технического состояния, где требуется многократное обновление параметров по сегментам и временным срезам.

Аппарат цепей Маркова подходит для моделирования эксплуатации АМС/АМК, поскольку динамика технического состояния оборудования станции обладает свойствами Марковского процесса:

- конечное число чётко определённых дискретных состояний («работоспособен», «обслуживание», «скрытый отказ» и др.);
- случайный характер переходов между состояниями с интенсивностями, зависящими от факторов среды и режимов эксплуатации;
- вероятность перехода определяется текущим состоянием.

Выбранный подход позволяет формировать матрицу интенсивностей переходов, адаптированную к условиям конкретных участков, на основе данных эксплуатации и данных о геосреде. Это позволяет рассчитывать вероятности нахождения оборудования в различных состояниях на заданном временном горизонте. Определён перечень природных, техногенных, антропогенных и эксплуатационных факторов, которые формируют территориально-обусловленные угрозы деградации и отказов средств мониторинга.

Воздействия описываются через совокупность признаков $G_i(t)$, определяющих состояние и характеристики станции:

$$G_i(t) = \{T_i, W_i, H_i, P_i, E_i, V_i, D_i\}, \quad i = \overline{1, n}, \quad (4)$$

где T_i — температура в зоне размещения объекта, W_i — скорость ветра, H_i — уровень влажности, P_i — давление, E_i — уровень электромагнитных помех, V_i — вибрационные нагрузки, D_i — динамические эксплуатационные воздействия (ремонт, обслуживание, сбой).

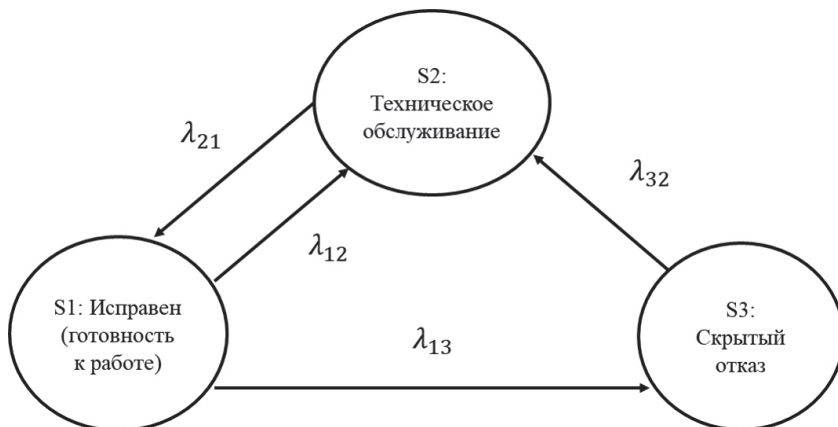


Рис. 3. Графовое представление технических состояний системы АМС/АМК:
 S1 — работоспособное состояние; S2 — выявленный отказ, обслуживание; S3 — скрытый отказ;
 λ_{13} — геодеpendимая интенсивность отказов; λ_{12} , λ_{32} — интенсивность диагностирования;
 λ_{21} — интенсивность восстановления.

Fig. 3. State transition graph of an automatic meteorological station/automated meteorological complex:

S1 — operable state; S2 — detected failure, maintenance; S3 — latent failure;
 λ_{13} — geo-dependent failure rate; λ_{12} , λ_{32} — diagnostic rate; λ_{21} — recovery rate.

При осуществлении пространственной дискретизации обслуживаемая территория Ω разбивается на ячейки ω_i , $i = \overline{1, m}$, каждая из которых соответствует отдельному сегменту наблюдательной сети (по условиям среды и доступности).

Далее представлена модель непрерывно контролируемой в процессе эксплуатации АМС с периодическим техническим обслуживанием. Введены обозначения: 1 — работоспособное состояние (готовность к работе), 2 — техническое обслуживание, 3 — скрытый отказ (до проведения технического обслуживания). Граф состояний системы представлен на рис. 3.

Единственное работоспособное состояние технического объекта — состояние готовности к работе 1, в связи с чем основной показатель надежности — вероятность данного состояния P_1 . При анализе технического риска основной параметр — вероятность отказа $Q = P_3$. Параметры $t_{\text{ТО}}$, λ_{32} , $\tau_{\text{ТО}}$, λ_{12} , λ_{13} , λ_{21} могут быть определены по результатам испытаний либо задаваться регламентом технического обслуживания, в связи с чем при построении модели считаем их известными. Переход 3→2 отражает обнаружение скрытого отказа при очередном ТО, поэтому в базовой постановке λ_{32} принимается равной интенсивности начала ТО λ_{12} . Эволюция вероятностей нахождения системы в одном из состояний описывается системой дифференциальных уравнений Колмогорова (5), что обеспечивает возможность оперативного пересчёта надёжностных характеристик при изменении условий и формирует основу для динамического прогноза технического состояния:

$$\begin{cases} \frac{dP_1(t)}{dt} = -\left(\lambda_i(t) + \frac{1}{t_{\text{ТО}}}\right)P_1(t) + \frac{1}{\tau_{\text{ТО}}}P_2(t), \\ \frac{dP_2(t)}{dt} = \frac{1}{t_{\text{ТО}}}P_1(t) - \frac{1}{\tau_{\text{ТО}}}P_2(t) + \frac{1 + \lambda_i(t)t_{\text{ТО}}}{\lambda_i(t)t_{\text{ТО}}^2}P_3(t), \\ \frac{dP_3(t)}{dt} = \lambda_i(t)P_1(t) - \frac{1 + \lambda_i(t)t_{\text{ТО}}}{\lambda_i(t)t_{\text{ТО}}^2}P_3(t). \end{cases} \quad (5)$$

Нормирующее условие:

$$P_1(t) + P_2(t) + P_3(t) = 1. \quad (6)$$

Начальные условия:

$$P_1(0) = 1, P_2(0) = P_3(0) = 0. \quad (7)$$

Полагая, что при построении оптимальной стратегии управления надёжностью и программой ТОиР станции АМК/АМС (пункта наблюдений) периодичность технического обслуживания $\tau_{\text{ТО}}$, выбранная в качестве управляющего параметра, может изменяться во времени, введены следующие обозначения:

$$x_1(t) = P_1(t), \quad x_2(t) = P_2(t), \quad x_3(t) = 1 - x_1(t) - x_2(t),$$

$$u(t) = \frac{1}{t_{\text{ТО}}}, \quad \mu = \frac{1}{\tau_{\text{ТО}}}, \quad t \in [0, T]. \quad (8)$$

С учетом введенных обозначений сформулирована к задаче оптимального управления, где целью решения задачи является минимизация вероятности нахождения станции АМК/АМС в неработоспособном состоянии во временном промежутке от 0 до T . Требуется минимизировать функционал:

$$I(u) = \int_0^T e^{-\delta t} [1 - x_1(t) - x_2(t)] dt, \quad (9)$$

при динамических ограничениях:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1(t) &= -(\lambda_i(t) + u(t))x_1(t) + \mu x_2(t), \quad t \in [0, T], \\ \dot{x}_2(t) &= -\frac{1}{\lambda_i(t)}u^2(t)x_1(t) - \left(\mu + u(t) + \frac{1}{\lambda_i(t)}u^2(t)\right)x_2(t) + \\ &\quad + \left(\frac{1}{\lambda_i(t)}u(t) + 1\right)u(t), \quad t \in [0, T], \end{aligned} \quad (10)$$

с начальными условиями:

$$x_1(0) = X_1^0, \quad x_2(0) = X_2^0, \quad u(0) = Y^0, \quad (11)$$

при ограничении на управление:

$$Y_{\min} \leq u(t) \leq Y_{\max}, \quad t \in [0, T]. \quad (12)$$

Сложность аналитического моделирования надёжности станций АМК/АМС обусловлена стохастическим характером внешних факторов (метеонагрузка, режимы эксплуатации, качество энергоснабжения и устойчивость каналов связи), влияющих на работоспособность и не учитываемых в базовых моделях.

Наряду с техническими параметрами функционирования оборудования необходимо учитывать влияние многочисленных факторов геосреды (температура, ветер, осадки, излучение и др.). Для их учёта используется аппарат искусственных нейронных сетей (ИНС), как дополнительное управляющее воздействие в правой части динамических уравнений (5). Это позволяет получить значения геозависимой интенсивности отказов $\lambda_i(t)$, определяющей переход из работоспособного состояния в состояние отказа в ячейке ω_i .

Выделены основные группы факторов, оказывающих наибольшее влияние на состояние станций:

- климатические (температура, влажность, осадки, ветер, обледенение, перепады температур, циклы перехода через 0);
- техногенные и внешние воздействия (вибрации и ударные нагрузки для дорожных/судовых/передвижных станций, загрязнение, запылённость, электромагнитные помехи, аварии);
- антропогенные и организационные (ошибки персонала, несанкционированный доступ, нарушения регламентов, вандализм);
- инфраструктурно-эксплуатационные (качество электроснабжения и автономного питания, устойчивость каналов связи, удалённость и доступность обслуживания).

Агрегированные нормированные признаки формируются по совокупности факторов $G_i(t)$:

$$x_j^{(G)}(t) = \varphi_j(G_i(t)), \quad j = 1, 2, \quad i = \overline{1, n}, \quad (13)$$

где φ_j — функция нормализации/агрегации (например, факторные компоненты либо две интегральные группы факторов).

ИНС-аппроксимация $\lambda_i(t)$ задаётся выражениями:

$$g_1(t) = G_1 \left(\sum_{j=1}^2 \omega_{1j}(t) x_j^{(G)}(t) - \psi_1 \right), \quad (14)$$

$$g_2(t) = G_2 \left(\sum_{j=1}^2 \omega_{2j}(t) x_j^{(G)}(t) - \psi_2 \right), \quad (15)$$

$$\lambda_i(\tau) = G_0(\omega_{01}(t)g_1(t) + \omega_{02}(t)g_2(t) - \psi_0), \quad \lambda_i(t) \geq 0, \quad i = \overline{1, n}, \quad (16)$$

где $\omega_{ij}(t)$ — весовые коэффициенты ИНС, ψ_0, ψ_1, ψ_2 — параметры сдвига, $t \in [0, T]$, функция G_0 выбирается так, чтобы обеспечить неотрицательность интенсивности, например, экспоненциальной.

Оценка $\lambda_i(t)$, полученная по приведённой нейросетевой схеме, используется в формальной системе (5) и в динамических ограничениях задачи оптимального управления (6), (7), (12).

Для решения данной задачи может быть применена ее дискретная аппроксимация с использованием явных разностных схем, введены сопряженные переменные и построены приближенные траектории [15]. В результате дискретной аппроксимации из условий стационарности функции Лагранжа в дискретной задаче оптимального управления с применением метода проекции градиента может быть построено приближённое решение задачи управления надёжностью станции/сегмента сети АМК/АМС.

Геоинформационная методика представления и оценки состояния сети АМС/АМК

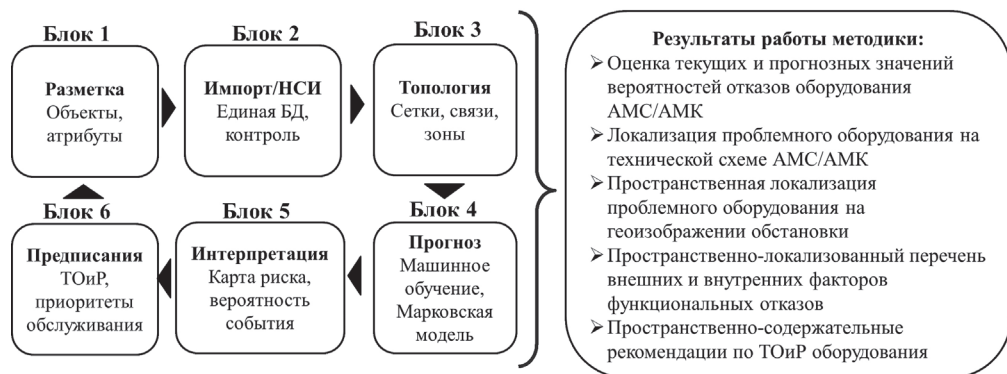
Переход от формализованной модели технических состояний к прикладной процедуре оценки требует объединения пространственных данных о размещении пунктов наблюдений, эксплуатационно-событийной информации, факторных характеристик территории и расчетных модулей прогноза в едином контуре анализа. В связи с этим предложена методика, обеспечивающая не только расчет вероятностей неблагоприятных состояний для отдельных АМС/АМК, но и последующее территориальное представление результатов в форме зон приоритетного контроля и обслуживания.

Геоинформационная методика территориальнопредиктивной оценки технического состояния сети АМС/АМК основана на геомодели состояния и реализуется в виде многоуровневой блочной структуры. Ключевыми компонентами методики являются:

- (1) геомодель системы АМС/АМК и её подсистем;
- (2) территориальная декомпозиция (деление на ячейки) и пространственные отношения;
- (3) параметризация технического состояния на основе данных эксплуатации, самодиагностики и контроля качества временных рядов;
- (4) учёт факторов геосреды и инфраструктурной доступности;
- (5) прогнозирование риска неблагоприятного состояния на основе Марковской модели с модулем уточнения параметров методами машинного обучения;
- (6) ситуационная интерпретация прогноза и формирование пространственно-привязанных предписаний по контролю данных и ТОиР;
- (7) обратная связь и адаптация моделей.

Состав и структура обобщенной геоинформационной методики оценки состояния сети АМС/АМК представлены на рис. 4.

Выходными результатами методики являются: прогнозная вероятность неблагоприятного состояния по станции, ранжированный перечень объектов контроля, визуализация приоритетных зон технического обслуживания и перечень пространственно-содержательных рекомендаций по поддержанию функциональной и пространственно-структурной целостности.



Обратная связь (блок 6 – блок 1): циклический переход с учетом реализованных ситуационно-предиктивных императивов

Рис. 4. Структура обобщённой методики территориальнопредиктивной оценки состояния технических средств сети АМС/АМК:

ТОиР — техническое обслуживание и ремонт; НСИ — нормативно-справочная информация.

Fig. 4. Structure of the geoinformation methodology for territorially predictive assessment of the state of an AMS/AMC network:

TMR — technical maintenance and repair; NRI — normative reference information, (MD — master data).

Программная реализация геоинформационной методики включает:

— клиентскую часть — вебинтерфейс (Razor Pages) с интерактивной картой OpenStreetMap/Leaflet, реестрами объектов и эксплуатационных событий, реестрами нормативно-справочной информации (НСИ);

— серверную часть — ASP.NET Core (MVC), сервисы ведения геомодели, расчёта оценок, импорта/экспорта данных из реестров, подготовки рекомендаций;

— хранилище — PostgreSQL с расширением PostGIS для пространственных и эксплуатационных данных.

Предиктивный аппарат вынесен во внешний Python-контур (реализация гибридной Марковской модели) с обменом через RESTAPI с основным ПО. Картографические слои и территориальная сетка покрытия подготавливаются в ГИС-платформе (QGIS/ArcGIS) и импортируются в формате GeoJSON. Логическая модель данных включает следующие сущности: Station (станции, пункты наблюдения), StationEvent (события), Zone/Grid (ячейки), FactorLayer (геофакторы), StateHistory (история состояний), Forecast (прогноз), Recommendation/WorkOrder (рекомендации и задания), что обеспечивает накопление истории и воспроизводимость геоконтроллинга процесса технической эксплуатации сети АМС/АМК.

Для преодоления ограничений метода предиктивной аналитики предложена интеграция с аппаратом геоинформатики и геопространственного анализа [16, 18]. Суть новой ситуационно-предиктивной методики состоит в том, что при оценке и прогнозировании технического состояния приборов и оборудования

наряду со статистическими данными по функционированию технических средств учитывается: прямое и прогнозируемое воздействие на них деструктивных факторов природной, техногенной и социальной геосреды; факторы геоситуации для организации процедур ремонта и технического обслуживания. При этом данные из внешних источников наполняют геомодель представления обстановки в сети АМС/АМК в части описания параметрических особенностей функционирования АМС/АМК. С использованием установленных значений параметров геоинформационной модели и аналитических зависимостей на основе Марковского аппарата рассчитываются прогнозные значения вероятности нахождения отдельных геообъектов в состояниях работоспособности, обслуживания и отказа. При этом выполняется расчет значений геоинформационной интенсивности отказов с использованием методов машинного обучения для обработки векторов параметров из состава геомодели. Полученные объектные оценки агрегируются по ячейкам покрытия и переводятся в пространственное представление зон приоритетного контроля и обслуживания с окрашиванием в зависимости от прогнозного состояния станций.

Схема, представленная на рис. 5, отражает переход от исходных пространственных, эксплуатационных и факторных данных к двум взаимосвязанным уровням результата: объектному и территориальному. На объектном уровне формируется оценка текущего и прогнозируемого технического состояния отдельных станций. На территориальном уровне осуществляется агрегация этих оценок по ячейкам покрытия и выделяются участки повышенного риска. Такое представление позволяет использовать единый массив данных как для технической интерпретации состояния отдельных АМС/АМК, так и для пространственного планирования контрольных и обслуживающих мероприятий.

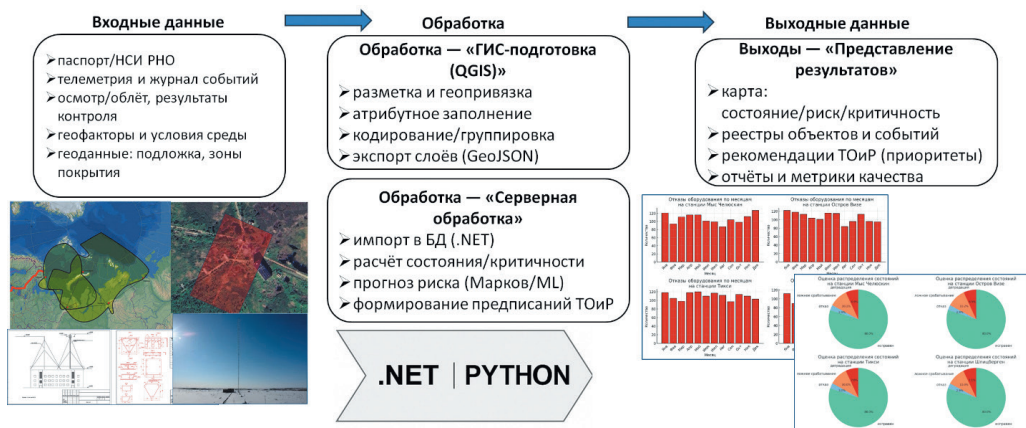


Рис. 5. Схема геоинформационного представления и оценки технического состояния и риска отказа объектов АМС/АМК.

Fig. 5. Geoinformation scheme for representing and assessing the technical state of an AMS/AMC network.

Верификация разработанной методики выполнена на территориальной схеме сети наземных автоматизированных метеорологических станций. В объектный состав включены 45 средств наблюдения, в том числе 12 метеостанций общего назначения, 3 авиационные метеостанции, 12 дорожных метеостанций.

На рис. 6 приведены результаты базового варианта предиктивной методики, реализованного как ранжирование станций АМС/АМК по прогнозируемому риску неблагоприятного состояния на фиксированный момент времени t_0 . Продемонстрировано формирование приоритетного перечня контроля станций при сопоставимых параметрах прогноза и ресурсных ограничениях на объём первоочередных проверок. Полученные объектные ранжирования используются как исходные данные при переходе к предиктивно-геоинформационным процедурам, при реализации которых дополнительно формируется территориальное поле риска и адресные рекомендации по ячейкам покрытия.

В таблице ранжирования станции упорядочены по убыванию прогнозного значения вероятности нахождения в состоянии отказа; цветовая индикация отражает уровень приоритета контроля; числовое значение в строке соответствует расчетной прогнозной оценке риска на фиксированный горизонт.

Объектное ранжирование не позволяет в полной мере учитывать пространственную концентрацию рисков и различия в условиях обслуживания соседних участков наблюдательной сети. Необходим переход к территориально-интерпретируемой постановке, в которой оценки по отдельным станциям сопоставляются с ячейками покрытия, а результаты представляются в форме зон приоритетного контроля. Такой переход позволяет объединить прогноз по объектам с географическим контекстом эксплуатации и подготовить основу для планирования профилактических работ по сегментам территории.



Рис. 6. Пример объектного ранжирования станций АМС/АМК по прогнозному риску неблагоприятного состояния.

Fig. 6. Example of station-level ranking of AMS/AMC units by the predicted risk of adverse state.

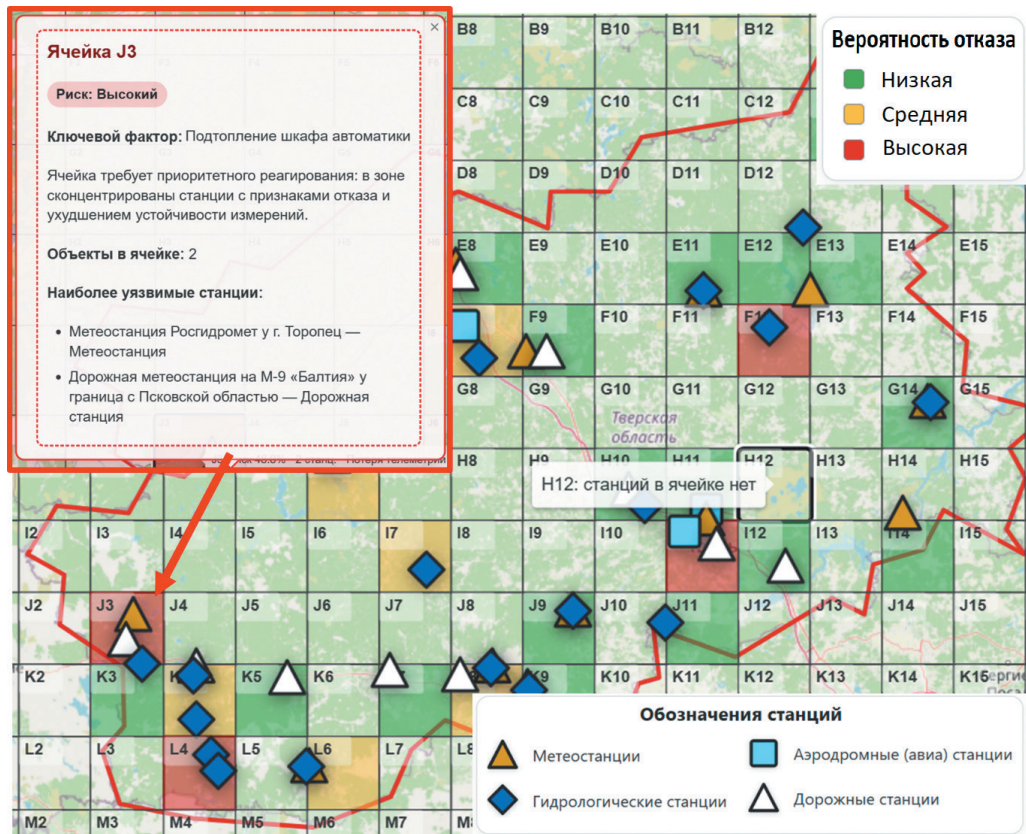


Рис. 7. Пример размещения станций AMC/AMK и сетки территориального анализа.

Fig. 7. Example of AMS/AMC placement and territorial analysis grid.

Для наглядного представления исходной задачи приведена экранная форма, полученная с помощью разработанного программного комплекса. На рис. 7 показано размещение станций AMC/AMK на обслуживаемой территории и сформированная сетка территориального покрытия, используемая для пространственной привязки событий эксплуатации и контроля качества, расчёта геофакторов и последующей агрегации прогнозных оценок с окрашиванием в зависимости от состояния AMC/AMK.

Точечные символы разной формы соответствуют станциям AMC/AMK, на геоизображение нанесена полигональная сетка для разбиения на ячейки, которые использованы для агрегации объектных оценок и перехода к территориально интерпретируемой схеме планирования работ по ТОиР.

Установлено, что учет геофакторов территории и пространственной локализации объектов повышает качество прогноза состояния по сравнению с традиционными предиктивными методами без учета геосреды. Сравнение осуществлялось

по интегральному показателю качества выявления объектов с неблагоприятным прогнозируемым состоянием. При расчете учитываются как пропуски реальных неблагоприятных состояний, так и ложные срабатывания прогноза. На горизонте прогнозирования 7 сут. применение геоинформационной методики позволило увеличить значение указанного показателя с 73% до 86%. Дополнительный эффект методики заключается в переходе от объектного ранжирования к пространственно привязанному выделению зон первоочередного контроля и ТО.

Заключение

1. Региональная сеть АМС/АМК характеризуется большим территориальным охватом и сложным содержательным функционированием, ее географически разнесенные сенсоры и другое техническое оборудование испытывают различные воздействия окружающей среды, что требует применения специальных геоинформационных методов пространственного анализа обстановки во всем регионе.

2. Анализ и прогнозирование состояния технических средств АМС/АМК традиционно осуществляется с помощью аппарата предиктивной аналитики, который анализирует только статистические данные отказов оборудования в отдельной локации и не позволяет учитывать деструктивное воздействие факторов геосреды на оборудование региональной сети АМС/АМК в целом.

3. Разработанная геоинформационная методика территориально-предиктивной оценки технического состояния сети АМС/АМК общего и специального назначения ориентирована на сети автоматических метеорологических станций, автоматизированных метеорологических комплексов и иных пространственно распределённых средств наблюдения, функционирующих в условиях неоднородности природных, техногенных и эксплуатационных факторов.

4. Методика объединяет аппарат геоинформатики с методами и процедурами предиктивной аналитики, что позволяет оперативно диагностировать и прогнозировать состояние технических средств и строить пространственно-локализованные рекомендации по ТОиР.

5. Использование в методике аппарата непрерывных цепей Маркова с введенным состоянием скрытого отказа позволило учитывать стохастический характер динамики изменения состояний технических средств АМС/АМК.

6. Применение адаптивного механизма расчета геозависимых интенсивностей отказов в цепях Маркова, а также использование аппарата искусственных нейронных сетей позволяет учитывать значительные объемы динамических пространственных и содержательных данных обстановки при моделировании обобщенной технической готовности региональной сети АМС/АМК.

7. Апробация и верификация на территориальной схеме сети метеорологических станций демонстрируют, что методика обеспечивает объединение объектного и территориального уровней анализа: от оценивания риска по отдельным станциям до выделения приоритетных зон эксплуатационного контроля. Полученные результаты могут быть использованы при модернизации наземных наблюдательных сетей, планировании работ по техническому обслуживанию и ремонту.

Список литературы

1. Биненко В. И., Ткаченко А. А. Влияние техногенно-экологических происшествий на загрязнение атмосферного воздуха и здоровье людей // Гидрометеорология и экология. 2020. № 58. С. 83—93. doi: 10.33933/2074-2762-2020-58-83-93.
2. Минашкина А. В., Кондратенко С. В., Воробьева Е. А. Разработка программы мониторинга водных объектов вблизи рекультивированного полигона ТКО в пос. им. А. Космодемьянского Калининградской области // Гидрометеорология и экология. 2021. № 62. С. 96—112. doi: 10.33933/2074-2762-2021-62-96-112.
3. Красногорская Н. Н., Белозерова Е. А. Разработка геоинформационной системы поддержки принятия решений при управлении водными ресурсами // Гидрометеорология и экология. 2021. № 65. С. 702—726. doi: 10.33933/2713-3001-2021-65-702-725.
4. Грызунов В. В., Нестерова А. О. Структура живучей сети метеокомплексов транспортно-логистических систем «Индустрии 4.0» // Гидрометеорология и экология. 2020. № 59. С. 111—123. doi: 10.33933/2074-2762-2020-59-111-123.
5. Гаврилова С. Ю., Иванова Т. А., Луцко Л. В., Ерохина А. Е. О состоянии и функционировании автоматизированных наблюдательных сетей Росгидромета // Труды Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова. 2018. Вып. 588. С. 86—109.
6. Метеорологические измерения на аэродромах. СПб.: Гидрометеоиздат, 2008. 427 с.
7. Восканян К. Л., Кузнецов А. Д., Сероухова О. С. Автоматические метеорологические станции. Часть 1. Тактико-технические характеристики. СПб.: РГГМУ, 2016. 170 с.
8. Экстремальные погодно-климатические явления. Веб-ГИС для визуализации и анализа погодно-климатических явлений в России. [Электронный ресурс] Режим доступа: <http://extremeclimate.ru/monitoring/meteo/> (дата обращения: 18.02.2026).
9. Состав аэрологической сети Российской Федерации. Отдел оперативного мониторинга НТЦР ЦАО. [Электронный ресурс] Режим доступа: <http://cao-ntcr.mipt.ru/monitor/2026/1/net2026-1.htm> (дата обращения: 18.02.2026).
10. Наблюдательная метеорологическая сеть станций Вологодской области. [Электронный ресурс] Режим доступа: <https://vcgms.ru/nasha-zhizn/> (дата обращения: 18.02.2026).
11. Сеть метеорологических станций и постов. Башкирское управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды. [Электронный ресурс] Режим доступа: <https://www.meteorb.ru/meteorology/network-of-meteorological-stations> (дата обращения: 18.02.2026).
12. Ouyang H., Qin Z., Xu X. et al. Autonomous Quality Control of High Spatiotemporal Resolution Automatic Weather Station Precipitation Data // Remote Sensing. 2025. Vol. 17, No. 3. Art. 404. doi: 10.3390/rs17030404.
13. Hadjidemetriou G. M., Herrera M., Parlikad A. K. Condition and criticality-based predictive maintenance prioritization for networks of bridges // Structure and Infrastructure Engineering. 2022. Vol. 18, No. 8. P. 1207—1221. doi: 10.1080/15732479.2021.1897146.
14. Идрисов И. В., Наумов А. В., Ковчин И. С. Опыт создания и применения автоматических метеорологических станций в полярных регионах // Российская Арктика. 2023. Т. 5, № 2. С. 44—53. doi: 10.24412/2658-4255-2023-2-44-53.
15. Викторова В. С., Степанянц А. С. Модели и методы расчета надежности технических систем. 2-е изд., испр. М.: URSS: ЛЕНАНД, 2016. 256 с.
16. Parra L. Remote Sensing and GIS in Environmental Monitoring // Applied Sciences. 2022. Vol. 12, No. 16. Art. 8045. doi: 10.3390/app12168045.
17. Ao S.-I., Gelman L., Karimi H. R., Tiboni M. Advances in Machine Learning for Sensing and Condition Monitoring // Applied Sciences. 2022. Vol. 12, No. 23. Art. 12392. doi: 10.3390/app122312392.
18. Аликулов А. Б., Эшмурадов Д. Э. Анализ мониторинга состояния природной среды с применением ГИС-технологий // Теория и практика современной науки. 2023. № 1 (91). С. 240—247. doi: 10.46566/2412-9682_2022_91_240.
19. Zarei M., Bagheri M., Dehghanian P. Markov-chain-driven Optimization of Inspection-Based Maintenance, Part I: Models and Methods // Electric Power Systems Research. 2024. Vol. 228. Art. 110049. doi: 10.1016/j.epsr.2023.110049.

20. Tamaloussi N., Bouzaouit A. Study of Reliability in a Repairable System by Markov Chains // *Acta Universitatis Sapientiae, Electrical and Mechanical Engineering*. 2020. Vol. 12. P. 66—76. doi: 10.2478/auseme-2020-0005.
21. Carvalho T. P., Soares F. A., Vita R. et al. A systematic literature review of machine learning methods applied to predictive maintenance // *Computers & Industrial Engineering*. 2019. Vol. 137. Art. 106024. doi: 10.1016/j.cie.2019.106024.
22. Zhang D., Ma Y., Zhang H., Zhang Y. Marine Equipment Siting Using Machine-Learning-Based Ocean Remote Sensing Data: Current Status and Future Prospects // *Sustainability*. 2024. Vol. 16, No. 20. Art. 8889. doi: 10.3390/su16208889.

References

1. Binenko V. I., Tkachenko A. A. The impact of technogenic-ecological incidents on atmospheric air pollution and human health. *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydrometeorology and Ecology*. 2020; (58):(83—93). doi: 10.33933/2074-2762-2020-58-83-93. (In Russ.).
2. Minashkina A. V., Kondratenko S. V., Vorobyova E. A. Development of a monitoring program for water bodies near the reclaimed municipal solid waste landfill in A. Kosmodemyansky settlement, Kaliningrad region. *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydrometeorology and Ecology*. 2021; (62):(96—112). doi: 10.33933/2074-2762-2021-62-96-112. (In Russ.).
3. Krasnogorskaya N. N., Belozeroва E. A. Development of a geographic information system for decision making in water resources management. *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydrometeorology and Ecology*. 2021; (65):(702—726). doi: 10.33933/2713-3001-2021-65-702-725. (In Russ.).
4. Gryzunov V. V., Nesterova A. O. Structure of a resilient network of meteorological complexes for transport and logistics systems of Industry 4.0. *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydrometeorology and Ecology*. 2020; (59):(111—123). doi: 10.33933/2074-2762-2020-59-111-123. (In Russ.).
5. Gavrilova S. Yu., Ivanova T. A., Lutsko L. V., Erokhina A. E. On the state and functioning of Roshydromet automated observation networks. *Trudy Glavnoy geofizicheskoy observatorii im. A. I. Voeykova = Proceedings of the Voeikov Main Geophysical Observatory*. 2018; (588):(86—109). (In Russ.).
6. *Meteorologicheskie izmereniya na aerodromakh = Meteorological measurements at aerodromes*. Saint Petersburg: Gidrometeoizdat; 2008. 427 p. (In Russ.).
7. Voskanyan K. L., Kuznetsov A. D., Seroukhova O. S. *Avtomaticheskie meteorologicheskie stantsii. Chast' I. Taktiko-tekhnicheskie kharakteristiki = Automatic weather stations. Part I. Tactical and technical characteristics*. Saint Petersburg: RSHU; 2016. 170 p. (In Russ.).
8. *Ekstremal'nye pogodno-klimaticheskie yavleniya. Web-GIS dlya vizualizatsii i analiza pogodno-klimaticheskikh yavlenii v Rossii = Extreme weather and climate events. Web GIS for visualization and analysis of weather and climate events in Russia*. Available at: <http://extremeclimate.ru/monitoring/meteo/> (accessed: 18.02.2026). (In Russ.).
9. *Sostav aerologicheskoi seti Rossiiskoi Federatsii. Otdel operativnogo monitoring NTTsR TsAO = Composition of the upper-air network of the Russian Federation. Operational Monitoring Department, Scientific and Technical Center, Central Aerological Observatory*. Available at: <http://cao-ntcr.mipt.ru/monitor/2026/1/net2026-1.htm> (accessed: 18.02.2026). (In Russ.).
10. *Nablyudatel'naya meteorologicheskaya set' stantsii Vologodskoy oblasti. = Observation network of meteorological stations of the Vologda oblast*. Available at: <https://vcgms.ru/nasha-zhizn/> (accessed: 18.02.2026). (In Russ.).
11. *Set' meteorologicheskikh stantsii i postov. Bashkirskoe upravlenie po gidrometeorologii i monitoring okruzhayushchei sredy = Network of meteorological stations and posts. Bashkir Directorate for Hydrometeorology and Environmental Monitoring*. Available at: <https://www.meteorb.ru/meteorology/network-of-meteorological-stations> (accessed: 18.02.2026). (In Russ.).
12. Ouyang H., Qin Z., Xu X. et al. Autonomous quality control of high spatiotemporal resolution automatic weather station precipitation data. *Remote Sensing*. 2025; 17(3):404. doi: 10.3390/rs17030404.
13. Hadjidemetriou G. M., Herrera M., Parlikad A. K. Condition and criticality-based predictive maintenance prioritisation for networks of bridges. *Structure and Infrastructure Engineering*. 2022; 18(8):(1207—1221). doi: 10.1080/15732479.2021.1897146.

14. Idrisov I. V., Naumov A. V., Kovchin I. S. Experience in creating and using automatic weather stations in polar regions. *Rossiyskaya Arktika = Russian Arctic*. 2023; 5(2):(44—53). doi: 10.24412/2658-4255-2023-2-44-53. (In Russ.).
15. Viktorova V. S., Stepanyants A. S. *Modeli i metody rascheta nadezhnosti tekhnicheskikh sistem = Models and methods for reliability analysis of technical systems*. 2nd ed. Moscow: URSS, LENAND; 2016. 256 p. (In Russ.).
16. Parra L. Remote Sensing and GIS in Environmental Monitoring. *Applied Sciences*. 2022; 12(16):8045. doi: 10.3390/app12168045.
17. Ao S.-I., Gelman L., Karimi H. R., Tiboni M. Advances in Machine Learning for Sensing and Condition Monitoring. *Applied Sciences*. 2022; 12(23):12392. doi: 10.3390/app122312392.
18. Alikulov A. B., Eshmuradov D. E. Analysis of environmental state monitoring using GIS technologies. *Teoriya i praktika sovremennoi nauki = Theory and Practice of Modern Science*. 2023; (1):(240—247). doi: 10.46566/2412-9682_2022_91_240. (In Russ.).
19. Zarei M., Bagheri M., Dehghanian P. Markov-chain-driven Optimization of Inspection-Based Maintenance, Part I: Models and Methods. *Electric Power Systems Research*. 2024; 228:110049. doi: 10.1016/j.epsr.2023.110049.
20. Tamaloussi N., Bouzaouit A. Study of Reliability in a Repairable System by Markov Chains. *Acta Universitatis Sapientiae, Electrical and Mechanical Engineering*. 2020; 12:66—76. doi: 10.2478/aus-eme-2020-0005.
21. Carvalho T. P., Soares F. A., Vita R., Francisco R. P., Basto J. P., Alcalá S. G. S. A systematic literature review of machine learning methods applied to predictive maintenance. *Computers & Industrial Engineering*. 2019; 137:106024. doi: 10.1016/j.cie.2019.106024.
22. Zhang D., Ma Y., Zhang H., Zhang Y. Marine Equipment Siting Using Machine-Learning-Based Ocean Remote Sensing Data: Current Status and Future Prospects. *Sustainability*. 2024; 16(20):8889. doi: 10.3390/su16208889.

Информация об авторах

Беляев Александр Константинович, начальник отдела АО НПО «Импульс», alexbel3101@gmail.com.

Биденко Сергей Иванович, доктор технических наук, профессор АО «НПО «Импульс», главный эксперт, sibidenko@mail.ru.

Information about authors

Belyaev Alexander K., Joint Stock Company «Scientific and Production Association «Impulse», Head of Department.

Bidenko Sergey I., Doctor of Technical Sciences, Professor Joint Stock Company «Scientific and Production Association «Impulse», Lead Expert.

Конфликт интересов: конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила 11.04.2026

Принята в печать 26.05.2026

The article was received on 11.04.2026

The article was accepted on 26.05.2026

УДК 551.575:551.508.7:629.73-519

doi: 10.33933/2713-3001-2026-83-358-365

**Измерительный комплекс
для мониторинга параметров переохлажденных туманов
с использованием беспилотных авиационных систем**

***Степан Владимирович Антонов, Сергей Михайлович Двоеглазов,
Евгений Николаевич Николаев, Андрей Михайлович Петрунин,
Николай Александрович Платонов, Андрей Викторович Частухин,
Георгий Георгиевич Щукин***

АНО «Агентство атмосферных технологий», Москва, Россия, attech@mail.ru

Аннотация. В работе рассматривается применение измерительного комплекса для мониторинга параметров переохлажденных туманов с использованием беспилотных авиационных систем (БАС). Представлена структура измерительного комплекса, размещаемого на борту беспилотной авиационной системы. Рассмотрены характеристики используемых датчиков и результаты испытаний измерительного оборудования. Показано, что применение беспилотных авиационных систем позволяет оперативно получать данные о температуре, влажности, давлении, параметрах ветра в районе проведения работ.

Ключевые слова. Беспилотные авиационные системы, переохлажденные туманы, зондирование атмосферы.

**Measuring complex for monitoring the parameters
of supercooled fogs using unmanned aerial systems**

***Stepan V. Antonov, Sergei M. Dvoeglazov,
Evgeniy N. Nikolaev, Andrey M. Petrunin, Nikolai A. Platonov,
Andrey V. Chastukhin, Georgy G. Shchukin***

ANO “Agency of Atmospheric Technologies”, Moscow, Russia, attech@mail.ru

Summary. The paper considers the application of a measuring complex for monitoring the parameters of subcooled fogs using unmanned aerial systems (UAS). The structure of the measuring complex placed on board an unmanned aerial system is presented. The characteristics of the used sensors and the results of testing the measuring equipment are considered. It is shown that the use of unmanned aerial systems allows for the prompt acquisition of data on temperature, humidity, pressure, and wind parameters in the area of work.

Keywords. Unmanned aerial systems, subcooled fogs, atmospheric sensing.

Введение

Эффективность мероприятий по рассеянию переохлажденных туманов во многом определяется наличием оперативной информации о состоянии атмосферной среды. К числу основных параметров, обеспечивающих обоснованность и точность принятия решений при проведении работ по воздействию на туман, относятся температура воздуха, относительная влажность, атмосферное давление, скорость и направление ветра.

Традиционным методом получения вертикальных профилей метеорологических параметров является радиозондирование атмосферы. Однако ограниченное количество станций радиозондирования и невысокая периодичность запусков радиозондов затрудняют использование данного метода для оперативного мониторинга атмосферных условий.

Для оперативного получения вертикальных профилей температуры, направления и скорости ветра могут быть использованы современные отечественные средства дистанционного зондирования такие как Волна-3, Волна-4, ЛАТАН-3, ПЛВ-300, ПЛВ-5000, ПЛВ-10000, МТП-5 и другие [1]. Однако стоимость таких комплексов достаточно высока, что практически исключает их применение в оперативных работах. Одним из перспективных направлений решения данной задачи является применение беспилотных авиационных систем, оснащенных компактными измерительными комплексами, позволяющими получать оперативные данные непосредственно в зоне проведения работ, в том числе в условиях повышенной влажности, тумана и облачности.

Перспектива применения беспилотных авиационных систем в туманах и облаках позволит получать достоверную информацию о текущем состоянии атмосферы в пограничном слое в локальных точках, представляющих интерес с точки зрения необходимой оперативной информации для принятия решения о начале работ по активному воздействию на туманы. Беспилотная авиация имеет огромный потенциал. Для реализации этого потенциала необходимо максимально использовать технические возможности беспилотных комплексов. Ниже рассматривается измерительный комплекс для мониторинга параметров тумана.

Измерительный комплекс параметров тумана

Измерительный комплекс состоит из бортового блока сбора и передачи параметров и наземного блока приема и обработки данных. Бортовой блок включает датчики температуры, влажности и давления, датчик количества взвешенных частиц в воздухе (PM — Particulate Matter) на единицу объема, датчик рассеянного отражения, GPS модуль, контроллер обработки данных и радиомодуль передачи информации.

Датчик количества взвешенных частиц применяется для оценки содержания аэрозольных частиц и микрокапель воды в исследуемой воздушной среде. Измерение концентрации взвешенных частиц позволяет определить верхнюю границу тумана. Датчик рассеянного отражения также предназначен для определения верхней границы тумана. Принцип его работы основан на регистрации интенсивности

излучения лазерного источника, рассеянного аэрозольными частицами и микро-каплями воды. При прохождении лазерного луча через объём воздуха происходит рассеяние излучения на каплях воды. Часть рассеянного излучения фиксируется фотоприёмником датчика, который преобразует оптический сигнал в электрический, что позволяет определить верхнюю границу тумана.

GPS модуль используется для определения пространственных координат беспилотной авиационной системы в процессе выполнения измерений. Получение точных географических координат (широты, долготы и высоты полёта) позволяет привязать измеряемые параметры атмосферы к конкретной точке в исследуемом объёме воздушной среды. Использование навигационных данных также позволяет синхронизировать измерения с траекторией полёта беспилотной авиационной системы и формировать вертикальные и горизонтальные профили параметров переохлаждённого тумана. Основные характеристики датчиков приведены в табл. 1.

Таблица 1

Основные характеристики датчиков
Main characteristics of the sensors

Характеристика	Значение/диапазон
Диапазон измерения температуры	–40...+85 °С
Диапазон измерения влажности	0—100 %
Диапазон измерения давления	300—1100 мм рт. ст.
Точность измерения температуры	±0,5 °С
Точность измерения влажности	±3 %
Точность измерения давления	±1 мм рт. ст.
Точность GPS-позиционирования	1—3 см
Диапазон размеров взвешенных частиц	0,3—10 Мкм
Погрешность измерения концентрации взвешенных частиц	±10 %

В составе измерительного комплекса используется сбрасываемый зонд для получения вертикального профиля направления и скорости ветра, созданный в Агентстве АТТЕХ. Сбрасываемый зонд представляет собой плату с модулем GPS, радиомодулем с антенной, отсеком для батарей питания, прикрепленную к свободно раскрываемой парашютной системе. Прием данных от зонда осуществляется с помощью наземной станции, включающей компьютер для последующей обработки информации [2].

Дополнительно определение верхней границы тумана осуществляется по результатам анализа информации с находящейся на БАС видеокамеры. Собранные данные передаются по радиоканалу на наземную станцию, где осуществляется их регистрация, обработка и анализ. На рис. 1—3 показаны блок—схема и вид бортового блока сбора и передачи параметров по радиоканалу и наземного блока приема и обработки данных.



Рис. 1. Блок—схема измерительного комплекса параметров тумана.

Fig. 1. Block diagram of the fog parameter measurement system.

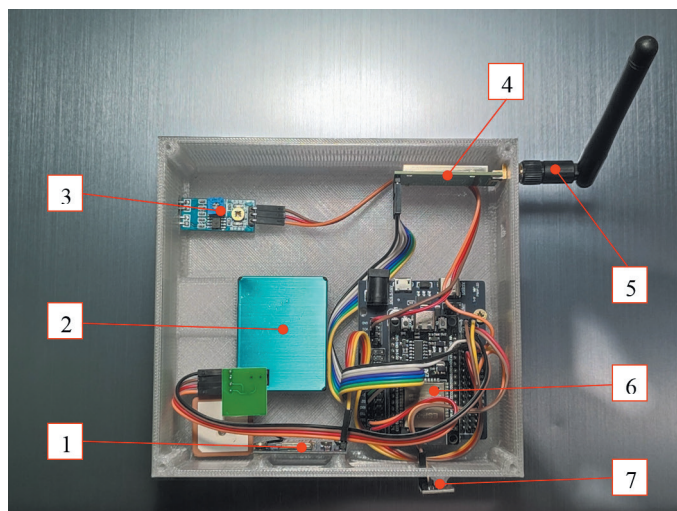


Рис. 2. Блок сбора и передачи параметров по радиоканалу:

1 — GPS модуль, 2 — датчик количества взвешенных частиц, 3 — датчик рассеянного отражения, 4 — радиомодуль, 5 — антенна, 6 — контроллер, 7 — датчик температуры, влажности, давления.

Fig. 2. Block of collection and transmission of parameters via radio channel:

1 — GPS module, 2 — sensor of the amount of suspended particles, 3 — sensor of scattered reflection, 4 — radio module, 5 — antenna, 6 — controller, 7 — sensor of temperature, humidity, pressure.

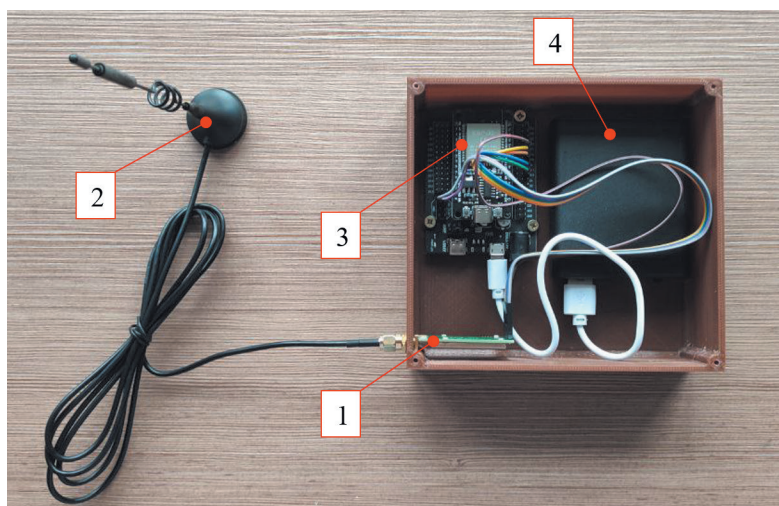


Рис. 3. Блок приема и обработки данных:

1 — радиомодуль, 2 — антенна, 3 — контроллер, 4 — источник питания.

Fig. 3. Data reception and processing unit:

1 — radio module, 2 — antenna, 3 — controller, 4 — power supply.

Испытания измерительного блока

Испытания измерительного блока проводились в лабораторных и натурных условиях. В лабораторных условиях моделирование тумана осуществлялось при помощи парогенератора. Поток водяного пара подавался в область размещения измерительного блока в течение одной минуты, что позволяло формировать аэрозольную среду, близкую по характеристикам к туману. До начала генерации пара концентрация взвешенных частиц в воздухе соответствовала фоновому уровню. После включения парогенератора наблюдалось резкое увеличение концентрации частиц в диапазонах: PM1 (0,3—1 мкм), PM2.5 (1—2,5 мкм), PM10 (2,5—10 мкм) табл. 2. После прекращения подачи пара концентрация частиц постепенно снижалась и возвращалась к значениям, близким к исходному уровню. Это подтвердило корректность работы датчиков.

Таблица 2

Показания датчиков

Sensor readings

Температура	Влажность	Давление	Туман	PM1.0	PM2.5	PM10
–19,4 °С	25,9 %	756,8 мм рт. ст.	Нет	3 Мкм/м³	6 Мкм/м³	7 Мкм/м³
–12,6 °С	73,2 %	756,7 мм рт. ст.	Есть	204 Мкм/м³	2654 Мкм/м³	4626 Мкм/м³

Наземные натурные испытания проводились 14 и 18 февраля 2026 г., район проведения испытаний — Московская область.

Испытания 14 февраля 2026 г. Погодные условия: температура воздуха: +1...+3 °С, относительная влажность: 92—100 %, атмосферное давление: 735 мм рт. ст., наличие тумана. Визуальная дальность видимости составляла приблизительно 100—150 м.

В ходе измерений датчик рассеянного отражения зафиксировал наличие тумана, а датчик взвешенных частиц зарегистрировал увеличение концентрации аэрозольных частиц по сравнению с фоновыми значениями (табл. 3).

Таблица 3

Результаты натурных испытаний датчиков

The results of field tests of sensors

Температура	Влажность	Давление	Туман	PM1.0	PM2.5	PM10
+ 5,6 °С	66,8 %	730,2 мм рт. ст.	Есть	18 Мкм/м³	30 Мкм/м³	38 Мкм/м³
– 16,1 °С	49,4 %	748,8 мм рт. ст.	Есть	99 Мкм/м³	169 Мкм/м³	230 Мкм/м³

Испытания 18 февраля 2026 г. Погодные условия: температура воздуха: –19...–20 °С, относительная влажность: 72—75 %, атмосферное давление: 753 мм рт. ст., наличие тумана. Визуальная дальность видимости составляла приблизительно 50—100 м. Результаты измерений показали аналогичную картину: датчик рассеянного отражения подтвердил наличие тумана, а концентрация взвешенных частиц в воздухе значительно превышала фоновый уровень (табл. 3).

Оценка дальности передачи данных выполнялась при наземном размещении передающего блока и при размещении его на борту самолета АН-2. В наземных

испытаниях блок передачи данных размещался на высоте 15 м. Блок приема данных находился в автомобиле, который удалялся от точки установки передатчика. Устойчивый прием телеметрии наблюдался на расстоянии до 14 км.

Летные испытания проводились на аэродроме Киржач. Блок передачи данных был установлен на борт самолета АН-2, а блок приема данных по радиоканалу размещался в мобильном пункте управления. Самолет АН-2 был поднят на высоту 200—250 м. Полет проходил в зоне аэродрома в радиусе набора высоты вокруг аэродрома 5—7 км. Анализ передаваемых пакетов данных подтвердил отсутствие потерь информации. Наземные и летные испытания радиоканала передачи данных показали устойчивый прием телеметрической информации.

Для оценки точности определения высоты измерительный блок размещался на различных высотах. Полученные результаты показали, что погрешность определения высоты по данным GPS составляет порядка 3—4 м, а по барометрическому датчику давления — около 1 м.

Заключение

Проведенные исследования подтвердили работоспособность разработанного измерительного комплекса. Используемые датчики обеспечивают измерение основных параметров атмосферной среды.

Применение беспилотных авиационных систем для мониторинга параметров тумана позволяет оперативно получать достоверную информацию о состоянии атмосферной среды и может быть использовано для обеспечения принятия обоснованных решений при проведении мероприятий по воздействию на переохлажденные туманы и контролю результата. Данное направление может стать основой для изучения процессов облакообразования и активного воздействия на них.

Список литературы

1. Бореjšо А. С., Коняев М. А., Ким А. А. Лидарные комплексы для исследования атмосферы. Изд-во «Лань». 2024. СПб., 243 с.
2. Антонов С. В., Бычков А. А., Сергеев Б. Н., Частухин А. В., Щукин Г. Г. Теоретическое обоснование применения беспилотных летательных аппаратов в работах по воздействию на переохлажденные туманы // Труды ВКА им. А.Ф. Можайского. СПб. 2018. № 662. С. 13—17.

References

1. Boreysho A. S., Konyaev M. A., Kim A. A. Lidar systems for atmospheric research. Izdatelstvo Lan = Lan Publishing House. 2024:243 p. (In Russ.).
2. Antonov S. V., Bychkov A. A., Sergeev B. N., Chastukhin A. V., Shchukin G. G. Theoretical justification for the use of unmanned aerial vehicles in works on the impact on supercooled fogs. Trudi Voenno-kosmicheskoi akademii imeni A. F. Mozhaiskogo = Proceedings of the A. F. Mozhaisky Military Space Academy. 2018;(662):(13—17). (In Russ.).

Информация об авторах

Антонов Степан Владимирович, ведущий инженер, АНО «Агентство АГТЕХ», klybok777@gmail.com.

Двоеглазов Сергей Михайлович, ведущий инженер, АНО «Агентство АТТЕХ», s.m.dvoeglazov@mail.ru.

Николаев Евгений Николаевич, ведущий инженер, АНО «Агентство АТТЕХ», jn81@yandex.ru.

Петрунин Андрей Михайлович, кандидат физико-математических наук, заместитель директора по оперативным проектам, АНО «Агентство АТТЕХ», a.m.petrinin@mail.ru.

Платонов Николай Александрович, ведущий инженер, АНО «Агентство АТТЕХ», n-a-platonov@mail.ru.

Частухин Андрей Викторович, кандидат физико-математических наук, заместитель директора по научной работе, АНО «Агентство АТТЕХ», a.chastuhin@mail.ru.

Щукин Георгий Георгиевич, доктор физико-математических наук, профессор, консультант, АНО «Агентство АТТЕХ», ggshchukin@mail.ru.

Information about authors

Antonov Stepan V., leading engineer, ANO «Atmospheric Technology Agency».

Dvoeglazov Sergey M., Lead Engineer, ANO «Atmospheric Technology Agency».

Nikolaev Evgeny N., Engineer, ANO «Atmospheric Technology Agency».

Petrinin Andrey M., PhD (Phys. and Math. Sci.), Deputy Director for Operational Projects, ANO «Atmospheric Technology Agency».

Platonov Nikolay A., Lead Engineer, ANO «Atmospheric Technology Agency»

Chastukhin Andrey V., PhD (Phys. and Math. Sci.), Deputy Director for Research, ANO «Atmospheric Technology Agency».

Shchukin Georgy G., Grand PhD (Phys. and Math. Sci.), Professor, Consultant, ANO «Atmospheric Technology Agency».

НАУЧНОЕ ИЗДАНИЕ

ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЯ И ЭКОЛОГИЯ

№ 83

НАУЧНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Литературный редактор Л. В. Кипнес, канд. пед. наук, доцент
Технический редактор М. В. Иванова

Выход в свет 10.07.2026. Формат 70×100 1/16. Гарнитура Times New Roman.
Электронно-сетевое издание. Усл. печ. л. 13,4875. Заказ № 1519.
Адрес издателя, редакции и типографии: РГГМУ, 192007, Санкт-Петербург, Воронежская ул., д. 79.

Учредитель: Российский государственный гидрометеорологический университет
