

ISSN 2410-8758



Фундаментальная и прикладная климатология

Fundamental and
Applied Climatology

Том 10 № 2

2024

Фундаментальная и прикладная климатология том 10 № 2 / 2024 г.

Federal Service
for Hydrometeorology
and Environmental
Monitoring (Roshydromet)

ISSN 2410-8758

FUNDAMENTAL AND APPLIED
CLIMATOLOGY

Volume 10 № 2

Moscow 2024

**ФУНДАМЕНТАЛЬНАЯ И ПРИКЛАДНАЯ
КЛИМАТОЛОГИЯ**

Том 10 № 2 2024 год

Научный редактор: М.Ю. Бардин

Выпускающий редактор: В.А. Гинзбург

Технические редакторы:

Л.В. Кудрявцева, И.М. Брускина

Корректор: Л.В.Цибизова

Верстка: Л.А. Прохорова

Формат: 160 x 260

Печать цифровая

Бумага офсетная

Печатных листов:

Тираж 150 экз.

Заказ №

Свидетельство о регистрации СМИ:

ПИ № ФС77-74294 Подписано в печать

Отпечатано в типографии

Федеральная служба
по гидрометеорологии и мониторингу
окружающей среды
(Росгидромет)

ISSN 2410-8758

**ФУНДАМЕНТАЛЬНАЯ И ПРИКЛАДНАЯ
КЛИМАТОЛОГИЯ**

Том 10 № 2

Москва 2024

ФУНДАМЕНТАЛЬНАЯ И ПРИКЛАДНАЯ КЛИМАТОЛОГИЯ

Научный журнал (4 выпуска в год), публикующий оригинальные и обзорные статьи о процессах и явлениях регионального и глобального масштабов по следующей тематике: формирование климата Земли, естественные и антропогенные факторы изменения климатической системы, выявление и атрибуция трендов ее состояния и соответствующих рисков для природных и социально-экономических систем, вопросы митигации и адаптации. Публикуются также статьи о результатах мониторинга климатической системы и о значительных событиях в научном мире. Издается по решению Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды.

Статьи представляются и публикуются на русском или английском языках. Возможна также публикация переводов статей, опубликованных ранее или же в текущем номере.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ: С.М. Семенов (главный редактор), М.Ю. Бардин (заместитель главного редактора), К.Н. Анахаев, А.С. Астахов, Р.В. Бекряев, Е.М. Володин, В.А. Гинзбург, В.Б. Геннадинник, А.В. Елисеев, А.Н. Золотокрылин, А.Л. Иванов, А.В. Кислов, А.В. Клепиков, А.Г. Костяной, В.Н. Крупчатников, С.А. Лавров, Е.С. Нестеров, Л.А. Прохорова (ответственный секретарь), Э.Я. Ранькова, В.А. Семенов, Ю.Б. Скачков, А.М. Стерин, Е.И. Хлебникова.

Адрес для первичного представления материалов для публикации: РФ, 107258, г. Москва, ул. Глебовская, д. 20Б, ИГКЭ, Семенову С.М.; semenov@igce.ru.

Международный стандартный номер сериального периодического издания ISSN 2410-8758.

Подписной индекс по каталогу Роспечати – 58364.

Свидетельство о регистрации журнала в форме печатного СМИ:

ПИ № ФС77-74294 от 9 ноября 2018 г.

веб-страница: <https://fa-climatology.ru>.

FUNDAMENTAL AND APPLIED CLIMATOLOGY

-A quarterly scientific journal publishing original and review papers on events and processes of regional and global scales on the following topics: Earth's climate forming processes, natural and anthropogenic factors of changes in the climate system, detection and attribution of its trends and associated risks for natural and socio-economic systems, mitigation and adaptation issues. Articles presenting the results of climate system monitoring and significant events in the scientific world are also invited. The journal is published according to the decision of the Federal Service for Hydrometeorology and Environmental Monitoring.

Articles are submitted and published in Russian or English. The publication of translations of articles published in the previous or current issues is also possible.

EDITORIAL BOARD: S.M. Semenov (Editor-in-Chief), M.Yu. Bardin (Deputy Editor-in-Chief), K.N. Anakhaev, A.S. Astakhov, R.V. Bekryaev, E.M. Volodin, V.A. Ginzburg, V.B. Gennadinnik, A.V. Eliseev, A.N. Zolotokrylin, A.L. Ivanov, A.V. Kislov, A.V. Klepikov, A.G. Kostianoy, V.N. Krupchatnikov, S.A. Lavrov, E.S. Nesterov, L.A. Prokhorova (Executive Secretary), E.Ya. Rankova, V.A. Semenov, Yu.B. Skachkov, A.M. Sterin, E.I. Khlebnikova.

Primary submission of manuscripts: Semenov S.M., IGCE, Glebovskaya str, 20B, 107258, Moscow, Russian Federation; e-mail: semenov@igce.ru

International standard serial number of the periodical ISSN 2410-8758.

Subscription index in the Rospechat catalogue – 58364.

Certificate of registration of the journal in the form of printed media:

ПИ № ФС77-74294 of 09.11.2018.

web-page: <https://fa-climatology.ru>.

СОДЕРЖАНИЕ

СОБЫТИЯ И ПАМЯТНЫЕ ДАТЫ

**Борзенкова И.И., Алексеев Г.В., Бардин М.Ю., Зайцева Н.А.,
Клепиков А.В., Русина Е.Н., Стерин А.М., Хан В.М.**

Развитие и становление современной климатологии
в трудах ученых гидрометеорологической службы России.....135

ИССЛЕДОВАНИЯ И ОБЗОРЫ

Кислов А.В., Ломакин И.Р., Мысленков С.А.

Экстремальные скорости ветра в Атлантическом
секторе Арктики: статистика и циркуляционные модели.....199

Лавров А.С., Стерин А.М.

Детализация климатических трендов температуры
и осадков на территории России с использованием
квантильной регрессии и кластеризации.....219

**Липка О.Н., Богданович А.Ю., Андреева А.П., Караваева А.С.,
Крыленко С.В., Стерин А.М., Коршунова Н.Н.**

Наблюдаемые изменения климата в бассейнах Байкала и Ангары.....244

Сидорова О.Р., Богородский П.В., Меркулов В.А., Ризе Д.Д.

Влияние снежного покрова на рост припая
у побережья о. Большевик (Северная Земля).....272

МОНИТОРИНГ КЛИМАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Ранькова Э.Я., Самохина О.Ф., Антипина У.И., Смирнов В.Д.

Особенности температурного режима у поверхности
Земного шара в 2023 году.....288

CONTENTS

EVENTS AND COMMEMORATIVE DATES

**Borzenkova I.I., Alekseev G.V., Bardin M.Yu., Zaytseva N.A.,
Klepikov A.V., Rusina E.N., Sterin A.M., Khan V.M.**

The development and formation of the present-day climatology
in works of scientists of the Russian hydrometeorological service135

STUDIES AND REVIEWS

Kislov A.V., Lomakin I.R., Myslenkov S.A.

Extreme wind speeds in the Atlantic sector
of the Arctic: statistics and circulation models.....199

Lavrov A.S., Sterin A.M.

Detailing of climatic trends of temperature and precipitation
in the territory of the Russian Federation using quantile regression
and clustering.....219

**Lipka O.N., Bogdanovich A.Yu., Andreeva A.P.,
Karavaeva A.S., Krylenko S.V., Sterin A.M., Korshunova N.N.**

Observed climate changes in the Baikal and Angara basins.....244

Sidorova O.R., Bogorodskiy P.V., Merkulov V.A., Rize D.D.

The impact of snow on fast ice formation in the area
of the Bolshevik Island (Severnaya Zemlya Archipelago).....272

CLIMATE SYSTEM MONITORING

Rankova E.Ya., Samokhina O.F., Antipina U.I., Smirnov V.D.

Features of the surface temperature regime over the Globe in 2023.....288

Развитие и становление современной климатологии в трудах ученых гидрометеорологической службы России

И.И. Борзенкова^{1)}, Г.В. Алексеев²⁾, М.Ю. Бардин³⁾, Н.А. Зайцева⁴⁾,
А.В. Клепиков²⁾, Е.Н. Русина⁵⁾, А.М. Стерин⁶⁾, В.М. Хан⁷⁾*

¹⁾Государственный гидрологический институт,
Россия, 199053, Санкт-Петербург, 2-я линия В.О., д. 23

²⁾Арктический и Антарктический научно-исследовательский институт,
Россия, 199397, Санкт-Петербург, ул. Беринга, д. 38

³⁾Институт глобального климата и экологии имени академика Ю.А. Израэля,
Россия, 107258, Москва, ул. Глебовская, д. 20

⁴⁾Центральная аэрологическая обсерватория
Россия, 141700, Московская обл., Долгопрудный, ул. Первомайская, д. 3

⁵⁾Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова,
Россия, 199053, Санкт-Петербург, ул. Карбышева, д. 7

⁶⁾Всероссийский научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации –
Мировой центр данных,
Россия, 249035, Калужская обл., г. Обнинск, ул. Королева, д. 6

⁷⁾Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации,
Россия, 123376, Москва, Большой Предтеченский пер., 13, строение 1

Адрес для переписки: *irena_borzen@mail.ru

Реферат. Климатология в течение почти 200 лет прошла сложный путь от описательной науки до науки, изучающей процессы формирования климата Земли, состояние климатической системы и тенденции ее изменения, реакцию на антропогенное воздействие, возникающие риски и возможности их уменьшения в ходе реализации различных программ действий. В данной статье кратко описывается вклад специалистов отечественной Гидрометеорологической службы в развитие климатологии и основные достижения в области фундаментальных исследований, мониторинга климатической системы и прикладных разработок. Статья подготовлена к 190-летию Гидрометеорологической службы страны.

Ключевые слова. Гидрометеорологическая служба, климатология, фундаментальные исследования, мониторинг климата, прикладные исследования.

The development and formation of the present-day climatology in works of scientists of the Russian hydrometeorological service

I.I. Borzenkova^{1)}, G.V. Alekseev²⁾, M.Yu. Bardin³⁾, N.A. Zaytseva⁴⁾,
A.V. Klepikov²⁾, E.N. Rusina⁵⁾, A.M. Sterin⁶⁾, V.M. Khan⁷⁾,*

¹⁾State Hydrological Institute,
23, Second Line, Vasil Island, St. Petersburg, Russian Federation

²⁾Arctic and Antarctic Research Institute,
38, Bering Str., 199397, St. Petersburg, Russian Federation

³⁾Yu.A. Izrael Institute of Global Climate and Ecology,
20B, Glebovskaya Str., 107258, Moscow, Russian Federation

⁴⁾Central Aerological Observatory,
3, Pervomayskaya str., Dolgoprudny, Moscow Region, 141700, Russian Federation

⁵⁾A.I. Voeikov Main Geophysical Observatory,
7, Karbycheva Str., 194021, St. Petersburg, Russian Federation

⁶⁾All-Russian Research Institute of Hydrometeorological Information – World Data Center
6, Korolyov Str., 249035, Kaluga region, Obninsk, Russian Federation

⁷⁾Hydrometeorological Research Center of the Russian Federation,
13, build. 1, Bolschoi Predtechensky lane, 123376, Moscow, Russian Federation

Correspondence address: *irena_borzen@mail.ru

Abstract. The way of climatology over past 200 years was rather complex. It has evolved from a descriptive science to the up-to-date one studying the processes of the Earth's climate formation, the state of the climate system and its trends, responses to anthropogenic impacts, emerging risks and possibilities to reduce them through the implementation of various measures/practices. This article briefly describes the contribution of specialists from the Russian Hydrometeorological Service to the development of climatology and the main achievements in the field of fundamental research, monitoring of the climate system and applied developments. The article is prepared in connection with the 190th anniversary of the Russian Hydrometeorological Service.

Keywords. Hydrometeorological service, climatology, fundamental studies, climate monitoring, applied studies.

Введение

Отечественная климатология начала развиваться еще в XIX веке. Ее фактической основой всегда были данные наблюдений, осуществляемых Гидрометеорологической службой страны. Это ведомство многократно меняло свое официальное название. Сейчас это – Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет). В

систему Росгидромета входят наблюдательные сети метеорологических, аэрологических и актинометрических станций, на которых ведутся регулярные наблюдения, а также научно-исследовательские учреждения, в которых работают коллективы ученых, в том числе – климатологи.

Климатологи всегда занимались систематизацией данных гидрометеорологических наблюдений, их анализом и обобщением. Прежде всего, это касалось температуры воздуха в приповерхностном слое, суммы осадков, направления и скорости ветра, атмосферного давления. В результате была подготовлена серия Справочников по климату СССР, а также карты распределения температуры, осадков и других показателей (Климатический справочник..., 1932; Климатический атлас..., 1958, 1960, 1962).

По мере накопления данных гидрометеорологических наблюдений, расширения номенклатуры измеряемых переменных и постепенного образования обширной сети гидрометеорологических станций в стране возникли предпосылки для анализа и обобщения данных с помощью современных аналитических методов. Это, прежде всего, статистический анализ временных рядов и полей гидрометеорологических величин/характеристик, концепции типов погоды и атмосферной циркуляции, понимание земных сфер как элементов единой климатической системы Земли и климатообразующей роли солнечной радиации. В отношении оценки радиационных потоков в климатической системе Земли существенную роль сыграли данные отечественной сети актинометрических станций Росгидромета.

На протяжении значительной части XX века, условно – в его первую половину, климатология изучала земной климат как нечто неизменное, во всяком случае, со времени начала регулярных гидрометеорологических наблюдений. Исследовалась ненаправленная изменчивость полей аномалий гидрометеорологических переменных, их статистические свойства и связь с синоптическими процессами и атмосферной циркуляцией. Но когда данные наблюдений второй половины XX века стали указывать на то, что климат меняется, и были выявлены долговременные тренды, возникли важные вопросы:

– Каковы причины наблюдаемых изменений климата – естественные или антропогенные?

– Каковы долговременные тренды и насколько они устойчивы?

Ответы на эти вопросы потребовали разработки инновационных методологических подходов, кооперации научных коллективов страны и международного научного сотрудничества. Научные учреждения Гидрометеорологической службы страны всегда работали в тесном творческом контакте с институтами Российской академии наук (ранее – Академии наук СССР), с научными коллективами высших учебных заведений и с зарубежными коллегами.

Всемирно известный советский/российский ученый академик РАН Михаил Иванович Будыко работал в Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова и в Государственном гидрологическом институте. Развивая модельные исследования своего американского коллеги профессора Сюкуро

Манабэ (США), он выполнил анализ влияния углекислого газа на среднюю температуру воздуха в приповерхностном слое и первым высказал идею повышения глобальной температуры воздуха вследствие влияния CO₂. Его прогноз впоследствии полностью оправдался.

М.И. Будыко совместно с доктором географических наук Ирэнной Ивановной Борзенковой была изучена роль вулканических выбросов в изменениях климата Земли за счет повышения содержания сульфатных аэрозолей в стратосфере. Это стало основой современных концепций SRM – Solar Radiation Management, «управления» солнечной радиацией.

Ученые из Арктического и Антарктического научно-исследовательского института (ААНИИ Росгидромета), кандидаты географических наук Владимир Яковлевич Липенков, Нарцисс Иринархович Барков и Владимир Николаевич Петров совместно с академиком РАН Владимиром Михайловичем Котляковым в составе международного коллектива ученых исследовали ледовый керн со станции «Восток» в Антарктиде, что позволило восстановить температуру и содержание углекислого газа и метана в атмосфере за последние 420 000 лет и тем самым получить экспериментальное подтверждение орбитальной теории М. Миланковича о долгопериодных изменениях климата земного шара.

Академик РАН Юрий Антониевич Израэль, долгие годы возглавлявший Гидрометеорологическую службу страны, заложил концептуальные основы мониторинга состояния окружающей среды, включая мониторинг климата. Научное обоснование и внедрение системы мониторинга климата проведено под руководством профессора Георгия Вадимовича Груза (Институт глобального климата и экологии Росгидромета и РАН (сейчас – Институт глобального климата и экологии имени академика Ю.А. Израэля). Данные этой системы позволили выявить долговременные тренды многих гидрометеорологических величин и наиболее яркие их аномалии. Эта информация представляется в ежегодных «Докладах об особенностях климата на территории Российской Федерации» (<http://www.igce.ru/performance/publishing/reports/>) и других информационных продуктах.

С целью оперативного сбора, контроля и последующей обработки данных наблюдательной сети в 1971 году в системе Гидрометеорологической службы был создан Всесоюзный (ныне – Всероссийский) научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации – Мировой центр данных (ВНИИГМИ-МЦД). У этого учреждения было несколько предшественников, организацию которых поддерживал академик АН СССР Евгений Константинович Федоров, в те годы – руководитель Гидрометеорологической службы страны. Используя современные научные достижения и компьютерные технологии, ВНИИГМИ-МЦД аккумулирует данные гидрометеорологических наблюдений, осуществляет обмен данными с другими центрами Всемирной метеорологической организации (ВМО), создает специализированные базы данных, которые используются, в том числе и в климатических исследованиях. Профессор Георгий Вадимович Груза, который в то время работал во ВНИИГМИ-МЦД, сформулировал и обосновал основы «компью-

терной инфраструктуры» для метеорологических и климатических исследований, а также впервые выполнил ряд исследований структуры и изменчивости климата. Сейчас это направление во ВНИИГМИ-МЦД возглавляет доктор физико-математических наук Александр Маркович Стерин.

Таким образом, в ответах на сформулированные выше два вопроса решающую роль сыграли ученые, работавшие в научно-исследовательских институтах Гидрометеорологической службы страны. Однако возникали и последующие вопросы:

– Как будет меняться климат Земли при различных путях развития мировой экономики, что определит дальнейшие глобальные антропогенные выбросы парниковых газов (углекислого газа, метана, закиси азота) и других климатически активных веществ, и их концентрации в атмосфере, и, в значительной мере, будущий климат?

– Какие существуют научно обоснованные меры митигации, т.е. смягчения этих изменений?

– Каковы возможности адаптации, т.е. внедрения таких мер, которые, не влияя на причины, ослабляют негативные последствия изменения глобального климата и усиливают позитивные?

Ответы на эти вопросы уже невозможно было получать на основе традиционных климатологических подходов. Настало время разработки и внедрения в климатологию математических моделей земной системы. Это системы разностных уравнений, описывающие потоки массы и энергии в климатической системе Земли, в том числе учитывающие естественные и антропогенные потоки парниковых газов. Три таких модели, созданные в России и реализованные в виде компьютерных программ, сейчас широко используются: полная глобальная модель (Институт вычислительной математики РАН им. Г.И. Марчука), модель промежуточной сложности (Институт физики атмосферы РАН им. А.М. Обухова) и региональная климатическая модель (Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова). Коллективы ученых, разработавшие эти модели и их поддерживающие, работают в тесном творческом взаимодействии. Осуществляется и соответствующее международное сотрудничество. Именно эти модели применяются для расчетов будущих изменений глобального и регионального климата при различных сценариях антропогенного воздействия.

Эта информация весьма востребована, в том числе в связи с актуальными вопросами разработки климатической внешней политики нашей страны. Россия является одной из сторон основных международных климатических соглашений – Рамочной конвенции ООН об изменении климата (1992 г.), Киотского протокола и Парижского соглашения (Киотский протокол, 1997; Парижское соглашение, 2015). Росгидромет по поручению Правительства Российской Федерации выполняет важные функции в связи с участием страны в этих соглашениях.

Эксперты из научно-исследовательских институтов Росгидромета – Института глобального климата и экологии имени академика Ю.А. Израэля (ИГКЭ) и Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова (ГГО) –

осуществляют научную поддержку участия российских делегаций в международном переговорном процессе по климату.

ИГКЭ (директор – член-корреспондент РАН Анна Анатольевна Романовская) подготавливает проекты основных отчетных документов, которые представляются Россией в органы РКИК ООН. Это «Национальное сообщение Российской Федерации», представляемое в соответствии со статьями 4 и 12 Рамочной Конвенции Организации Объединенных Наций об изменении климата и статьей 7 Киотского протокола», «Двухгодичный доклад Российской Федерации, представленный в соответствии с решением 1/CP.16 Конференции Сторон Рамочной Конвенции Организации Объединенных Наций об изменении климата» и «Национальный доклад о кадастре антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов, не регулируемых Монреальским протоколом». Эти отчетные документы весьма важны для анализа и планирования процесса митигации.

В связи с участием России в Парижском соглашении в стране были активизированы разработки стратегии и мер адаптации. Директор ГГО, доктор физико-математических наук Владимир Михайлович Катцов является членом Комитета по адаптации РКИК ООН. Эти вопросы весьма связаны с задачами прикладной климатологии, а именно с оценкой последствий изменения климата для природных и хозяйственных систем, для здоровья населения. Оценки воздействий на эти системы, их подверженность и уязвимость, т.е. компоненты риска, были достаточно детально рассмотрены в трех «Оценочных докладах об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации». Эти доклады были подготовлены экспертами из институтов Росгидромета и РАН, а также ведущих ВУЗов страны под руководством ГГО и ИГКЭ (Первый и Второй доклады (Росгидромет, 2008, 2014)) и ГГО (Третий доклад (Росгидромет, 2022)).

Росгидромет сыграл центральную роль в подготовке основополагающего концептуального документа – «Климатической доктрины Российской Федерации» (Климатическая доктрина..., 2009). В нем четко изложено отношение нашей страны к проблеме современного изменения глобального климата и представлены основные напоявления ответных стратегий. Основной вклад в разработку проектов Климатической доктрины – ее исходного и актуализированного текстов (2009 г. и 2023 г. соответственно) внес директор ГГО, доктор физико-математических наук Владимир Михайлович Катцов.

В системе Росгидромета действуют два климатических центра: Климатический центр Росгидромета (директор – доктор физико-математических наук В.М. Катцов) и Северо-Евразийский климатический центр ВМО (директор – доктор географических наук Валентина Моисеевна Хан).

Завершая введение, авторы хотели бы призвать читателя не ожидать найти в этой журнальной статье описание всех аспектов вклада ученых отечественной Гидрометеорологической службы в развитие и становление климатологии. Это может быть предметом отдельной монографии. Здесь же мы в трех разделах – «Фундаментальные исследования», «Мониторинг климатической системы» и «Прикладные исследования и информационные продукты» –

коснемся лишь некоторых тематических граней этого вопроса, а также предложим краткое заключение. Настоящая рукопись выражает взгляды авторов на вклады ученых, работавших и работающих в научно-исследовательских учреждениях Гидрометеорологической службы страны, в становление и развитие климатологии.

Фундаментальные исследования

Полуэмпирическая модель климатической системы Земли

В послевоенные годы группой исследователей (М.И. Будыко, К.Я. Кондратьев, Т.Г. Берлянд, М.И. Юдин и др.) была сформулирована новая парадигма климатологии как науки, опирающейся на физические законы, определяющие процессы переноса массы и энергии в атмосфере, включая перенос солнечной радиации. Это оказало существенное влияние на последующие достижения ученых из Гидрометеорологической службы в области исследования радиационных процессов и их роли в формировании климата (Берлянд, 1961; Русин, 1961; Кондратьев, 1965; Кондратьев и др., 1973; Ефимова, 1977; Пивоварова, 1977; Кароль, Пивоварова, 1978; Пивоварова, Стадник, 1988).

Примерно в это же время под руководством М.И. Будыко с использованием архивов климатических данных были начаты исследования радиационного и теплового баланса земной поверхности. В результате был создан Атлас теплового баланса земной поверхности (Атлас теплового баланса..., 1955, 1963). Эта работа позволила впервые установить ряд уникальных закономерностей глобальной климатической системы. В том числе было установлено, что перенос тепла воздушными потоками в атмосфере практически вдвое превышает перенос тепла морскими течениями.

Серия глобальных карт по радиационному и тепловому балансу земной поверхности стала основой для созданной М.И. Будыко полуэмпирической модели климатической системы Земли. На ее основе в 1972 году М.И. Будыко дал прогноз изменения глобальной температуры на 2000 год (Будыко, 1972, 1974), т.е. практически на 30-летний период. Этот прогноз в целом оправдался.

Позднее результаты по тепловому балансу были положены в основу фундаментальных исследований по водному балансу земного шара. Они сыграли решающую роль в создании теории влагооборота (Будыко, Дроздов, 1953; Дроздов, Григорьева, 1963, 1971; Мировой водный баланс..., 1974).

Полуэмпирическая модель климата, созданная М.И. Будыко, позволила впервые оценить чувствительность глобальной климатической системы к относительно небольшим (около 1% и менее) изменениям солнечной радиации, поступающей на верхнюю границу атмосферы. Оказалось, что такие воздействия способны вызывать вполне значимые изменения температуры воздуха у земной поверхности (Будыко, 1974).

Извержения вулканов и климат

На основе полуэмпирической модели климата впервые удалось количественно оценить изменение температуры воздуха у земной поверхности в разных широтных зонах в результате уменьшения приходящей солнечной радиации при вулканических извержениях различной интенсивности (Борзенкова, 1974, 1992). Данные измерений прямой солнечной радиации, выполненные еще в начале XX столетия (Савинов, 1913; Калитин, 1920), полностью подтвердили факт понижения температуры воздуха у земной поверхности после крупных вулканических извержений в 1902 году (Мон-Пеле, Суффриер, Санта-Мария) и в 1912 году (Катмай, Аляска) (Будыко, 1985).

Последующие исследования роли вулканических извержений в изменении современного климата послужили основой для разработки теории аэрозольных катастроф в истории Земли (Будыко и др., 1985). Впервые была установлена связь между катастрофическими извержениями вулканов и импактными событиями в прошлом и критическими эпохами в геологической истории Земли, во время которых происходили массовые вымирания живых организмов на континентах и в океане (Будыко и др., 1985; Вулканы..., 1986). В результате этих исследований был сделан важный вывод о том, что если когда-либо будет спровоцирован глобальный ядерный конфликт, то последствием этого конфликта может стать резкое увеличение концентрации аэрозольных частиц в верхних слоях атмосферы и, как следствие, понижение приземной температуры воздуха практически на всем земном шаре. Позднее в климатологической литературе этот сценарий получил название сценария «ядерной зимы» (Будыко и др., 1985).

Опираясь на результаты исследований роли вулканов в формировании земного климата, академик РАН Юрий Антониевич Израэль с группой сотрудников ИГКЭ, Научно-производственного объединения «Тайфун» Росгидромета, Центральной аэрологической обсерватории Росгидромета, Государственного гидрологического института (ГГИ), а также АО «Корпорация «Росхимзащита» и АО «Корпорация «Сплав» им. А.Н. Ганичева, исследовал методологические и технологические возможности сдерживания глобального потепления с помощью инъекции некоторых классов аэрозолей и их предшественников в верхнюю тропосферу и нижнюю стратосферу. Этому был посвящен ряд публикаций (Израэль, 2005; Израэль и др., 1989, 2001, 2007, 2009а,б, 2011). Итоги этих исследований были опубликованы в статьях (Израэль, Рябошапко, 2011, 2012) и в монографии (Теоретические и экспериментальные..., 2019), которая была подготовлена под руководством Ю.А. Израэля.

Неустойчивость полярного оледенения

С помощью полуэмпирической модели климата М.И. Будыко удалось обнаружить существование обратной положительной связи между площадью оледенения в высоких широтах и термическим режимом. Причина – различия в величинах альбедо морской водной поверхности и льда.

Позднее факт такого «полярного усиления» был подтвержден данными наблюдений. Для этих целей был использован атлас аномалий температуры воздуха Северного полушария за период с 1875 по 1975 гг. (Будыко, Винников, 1976). На основе этой концепции был впервые сформулирован вывод о неустойчивости морского полярного оледенения, которое может быть разрушено при сравнительно небольшом увеличении приходящей солнечной радиации в высоких широтах или в результате потепления, например вследствие увеличения концентрации парниковых газов в атмосфере (Будыко, 1974). Анализ современных данных об изменении площади арктического оледенения за последние 20 лет, полученный по спутниковым данным (Борзенкова, 2016; Борзенкова и др., 2021; Borzenkova et al., 2023), полностью согласуется с выводами, сформулированными еще в середине 60-х годов прошлого столетия (Зубенок, 1963).

Многочисленные расчеты, выполненные с помощью полуэмпирической модели М.И. Будыко, показали, что современный климат не является единственно возможным при существующих внешних климатообразующих факторах. Возможны и иные состояния, включая состояние «белой Земли». Изучение климатов прошлого и реконструкции климатов прошлых теплых эпох (например, в меловое время) показали реальность существования таких ситуаций в прошлом (Борзенкова, 1992; Zubakov, Borzenkova, 1990).

Палеоклиматические исследования

Исследование «отпечатков» прошлых климатических изменений на различных материальных носителях – мощный инструмент климатологических исследований. Прирост ледников, донных отложений, древесины деревьев возможно «считать» за (многие) тысячи лет и использовать для восстановления информации о прошлых состояниях климатической системы (Борзенкова, 2003; Зубаков, Борзенкова, 1983).

Наиболее яркий пример в этом ряду – исследование ледниковых кернов, прежде всего в высоких широтах, для восстановления прошлых значений температуры воздуха и концентраций парниковых газов – углекислого газа (CO_2) и метана (CH_4). Это позволяет получить информацию о концентрации этих газов за последние сотни тысяч лет. Такие исследования были выполнены в районе оз. Восток (ст. «Восток», Центральная Антарктида) совместно сотрудниками ААНИИ, Института географии РАН и иностранными коллегами (Jouzel et al., 1987, 1993, 1996; Барков и др., 2002; Липенков, Паррена, 2020; Верес и др., 2020; Екайкин и др., 2020). Получен важный вывод о том, что температура и концентрации парниковых газов (CO_2 и CH_4) на временных шкалах в десятки тысяч лет изменяются практически синхронно.

Наряду с анализом климатических колебаний в высоких широтах за последние сотни тысяч лет, в ААНИИ многие годы ведутся исследования изменений климата в высоких широтах Арктики за последние 10-12 тысяч лет (голоцен). Многолетние палеоклиматические исследования на островах и архипелагах Северного ледовитого океана (СЛО), лимнологические данные, полученные в результате бурения арктических озер на Таймыре, Ямале, на

побережье СЛО, позволили получить уникальный эмпирический материал, который имеет большую научную ценность для изучения причин и механизмов климатических колебаний в высоких широтах как в прошлом, так и в современную эпоху (Палеоклимат полярных..., 2019).

Антропогенное потепление климата

В докладе М.И. Будыко на Международном симпозиуме по динамической и физической климатологии (Ленинград, 1971 г.) было впервые высказано предположение о том, что в ближайшем будущем наблюдаемый в то время отрицательный тренд глобальной температуры может изменить знак на положительный, причем основной причиной изменений будут не естественные факторы, а антропогенное воздействие – сжигание ископаемого топлива (Будыко, 1974).

Это утверждение сначала не получило поддержки у научного сообщества климатологов. Однако весьма скоро завершившаяся в ГГО фундаментальная работа над атласом аномалий температуры воздуха для Северного полушария за период с 1881 по 1975 гг. подтвердила гипотезу М.И. Будыко. В результате анализа данных было обнаружено, что, начиная с конца 1960-х годов, тренд температуры воздуха во всех широтных зонах изменил знак на положительный, причем потепление в высоких широтах (севернее 60°C) примерно вдвое превосходило повышение температуры в низких и умеренных широтах (Будыко, Винников, 1976, 1983). Это стимулировало интенсивные исследования антропогенного глобального потепления, вызванного обогащением атмосферы парниковыми газами в ходе хозяйственной деятельности.

Для оценки антропогенного сигнала, связанного с ростом концентрации углекислого газа, была разработана нестационарная эмпирическая модель современных изменений климата (Винников, Гройсман, 1979, 1982). В этой модели учитывались термическая инерция, изменения альбедо, связанные с колебаниями прозрачности, увеличение концентрации углекислого газа и обратная связь между альбедо и температурой. С помощью этой модели удалось оценить изменения температуры, обусловленные ростом концентрации CO₂. В дальнейшем эта модель использовалась и для прогностических оценок климата.

В ГГО под руководством профессора Игоря Леонидовича Кароля был проведен обширный комплекс исследований, одним из результатов которого было построение радиационно-фотохимической модели атмосферы (Кароль, 1986). При ее построении использовались спектроскопические данные, имевшиеся к тому времени. Модель описывала процессы прохождения света через атмосферу, его поглощения и рассеяния, процессы переноса инфракрасного излучения в атмосфере, формирование термического режима.

Исследования антропогенного изменения климата получили новый импульс с начала XXI века в связи с широким признанием в мире самого этого явления. В 2004 году вышла монография члена-корреспондента РАН Сергея Михайловича Семенова «Парниковые газы и современный климат Земли» (Семенов, 2004). В ней была кратко суммирована современная на тот

момент информация по проблеме, а также представлена модель климатической системы минимальной сложности, которая оценивала вклад повышения концентраций CO_2 , CH_4 и N_2O в повышение доиндустриального уровня температуры. Оценка антропогенного сигнала изменения глобальной температуры была получена с помощью трехмерной модели климата в работе (Спорышев и др., 2008).

В ИГКЭ в работе (Семенов, Попов, 2011) представлена спектральная глобальная горизонтально-однородная математическая модель атмосферы, использовавшая современные спектроскопические данные, а также приведен алгоритм расчета реакции радиационно-равновесной температуры на изменение содержания парниковых газов в атмосфере. Выполненные с ее помощью оценки показали, что дальнейшее заданное увеличение концентраций парниковых газов – CO_2 , CH_4 и N_2O – вызывает все меньший отклик температуры приповерхностного слоя. Показано также, что приоритетность этих газов, оцененная по отклику температуры в приповерхностном слое на заданное возмущение их содержания в атмосфере (в объемном отношении смеси), различна для малых и больших возмущений. В работах (Семенов, 2015, 2022) была уточнена современная концепция парникового эффекта и его антропогенного усиления, используемая Межправительственной группой экспертов по изменению климата (МГЭИК) (IPCC, 2021).

Еще в конце 1930-х годов блестящим достижением отечественной школы динамической метеорологии стала разработанная профессором Екатериной Никитичной Блиновой полная теоретическая модель общей циркуляции атмосферы, учитывающая влияние климатических центров действия атмосферы в Северном полушарии (Блинова, 1943). С тех пор математическое моделирование в метеорологии и климатологии существенно развилось. Мощный импульс этому процессу придало внедрение и широкое использование вычислительной техники. Ярким достижением ученых Гидрометеорологической службы является создание коллективом ученых ГГО – доктор физико-математических наук Валентин Петрович Мелешко, кандидат физико-математических наук Игорь Маркович Школьник, кандидат физико-математических наук Петр Владимирович Спорышев и другие – динамической региональной климатической модели ГГО (Катцов, Мелешко, 2004; Спорышев и др., 2008; Катцов и др., 2017а). С ее помощью выполняются расчеты изменений климата и их последствий для различных регионов России. Результаты моделирования широко используются в НИУ Росгидромета и вообще в отечественном научном сообществе, в том числе при климатическом обслуживании отраслей экономики и регионов страны (Катцов и др., 2017а,б; Хлебникова и др., 2014, 2022).

Арктическая климатология

Россия обладает значительными пространствами в Арктике и Субарктике – на континенте и в Северном Ледовитом океане (СЛО). Исследованиям этого региона, в том числе его климата, всегда уделялось большое внимание. Знаменательной точкой активизации этих исследований стал первый Между-

народный Полярный год (1882-1883 гг.), во время которого были открыты первые метеорологические станции в Арктике. Массовая организация сети метеорологических станций в российской Арктике происходила в 1932-1934 годах и во время Второго Международного Полярного года. Со временем число станций значительно увеличилось и к 1951 году составляло уже 81 станцию. С тех пор обширные материалы гидрометеорологических наблюдений начали поступать с сети береговых и островных арктических станций. Во время проведения Международного Геофизического года (1957-1958 гг.) исследования распространились и на центральную область СЛО.

Анализ метеорологических и радиационных данных в Арктике представлен в ряде фундаментальных монографий, вышедших в середине 70-х и в начале 80-х годов прошлого столетия. Метеорологический режим Арктики представлен в монографии З.М. Прик (Прик, 1965), а радиационный режим проанализирован в монографиях М.С. Маршуновой и Н.Т. Черниговского (Черниговский, Маршунова, 1965; Marshunova, Chernigovskii, 1978). Эти работы выдвинули авторов в лидеры полярной климатологии, книги были переведены и использовались многими зарубежными исследователями. Анализ многолетней изменчивости солнечной радиации в Северном полярном регионе выполнялся многие годы сотрудниками ААНИИ под руководством В.Ф. Радионова (Русина, Радионов, 2002; Радионов и др., 2007, 2017).

Поток гидрометеорологических данных с арктических станций стал значительным как по пространственному охвату, так и по видам наблюдений (поступали, в том числе, и актинометрические данные). Эта информация в совокупности с развитой системой концептуальных представлений позволила изучить процессы переноса тепла в Арктический бассейн и внутри него. Этим направлением в ААНИИ руководит профессор Генрих Васильевич Алексеев (Алексеев и др., 2000, 2015, 2024).

Систематические гидрометеорологические наблюдения в Арктике и в дальнейшем вносили существенный вклад в понимание механизмов формирования климата Земли. Так, проанализированные К.И. Чуканиным (Чуканин, 1969) материалы аэрологических наблюдений на дрейфующих станциях «СП 6-8» подтвердили сделанный ранее Б.Л. Дзердзеевским (Дзердзеевский, 1943, 1945) вывод о том, что атмосферные процессы, определяющие погоду в центральной Арктике, взаимодействуют с циркуляцией атмосферы на всем земном шаре.

Изменчивость и изменение климата

В начале 1970-х годов под руководством Л.С. Гандина и Р.Л. Кагана был разработан комплекс методов объективного анализа, оптимального дифференцирования и осреднения метеорологических полей (Гандин, Каган, 1976). Эти исследования получили свое развитие в работах Р.Л. Кагана и Е.И. Хлебниковой (Хлебникова, Салль, 1989), и это было весьма востребовано впоследствии в задачах климатологического анализа и обобщения данных гидрометеорологических наблюдений. Со временем эти данные с обширных сетей

гидрометеорологических наблюдений все более указывали на то, что климат не является стационарным, что он меняется.

В 1976 году Всемирная метеорологическая организация (ВМО) выпустила первое заявление об угрозе глобальному климату. В 1979 году была организована первая Всемирная конференция по климату, где обсуждался этот вопрос. Климатология оказалась перед серьезным вызовом. Возникла необходимость пересмотреть базовые понятия климатологии, начиная с самого понятия «климат», и его свойств – «изменчивости» и «изменений».

Одна из первых публикаций этого направления – монография (Груза, Ранькова, 1980), в которой профессор Георгий Вадимович Груза и доктор физико-математических наук Эсфирь Яковлевна Ранькова, опираясь на работы члена-корреспондента АН СССР и академика РАН Андрея Сергеевича Монина (Монин, 1969), сформулировали уточненные определения основных понятий современной климатологии – «климат», «изменчивость» и «изменения» –, пригодные для использования в условиях меняющегося климата.

«Климат» понимается как набор состояний погоды в заданной области географического пространства и в заданный интервал времени. Для характеристики климата используется статистическое описание в терминах средних значений, экстремумов, показателей изменчивости соответствующих величин и частот явлений в выбранной области пространства и в выбранный интервал времени. Такие статистики называются «климатическими переменными».

Введенное определение климата позволяет использовать в качестве климатических переменных любые статистические характеристики любых параметров состояния климатической системы. При этом колебания с характерными временами от 3 недель до нескольких десятилетий принимаются за «климатическую изменчивость», а с характерными временами больше нескольких десятилетий – за «изменения климата».

В той же работе (Груза, Ранькова, 1980) проанализированы проблемы, связанные с оцениванием, идентификацией и анализом структуры реального наблюдаемого климата и климатической изменчивости. Приведены новые эмпирические данные о важнейших характеристиках температурного режима Северного полушария, их географическом распределении, годовом ходе и вековых изменениях.

Обновленная климатическая характеристика территории России, полученная по новейшим на момент публикации данным станционных наблюдений (1901-2010 гг.), с использованием усовершенствованной методологии, представлена в монографии (Груза, Ранькова, 2012). В ней обобщены результаты исследований авторов по проблеме современных изменений и изменчивости климата, описана методика и анализируется климат России (приземная температура). Предложены и научно обоснованы новые понятия – «динамическая норма» и «динамическая аномалия», показана их эффективность в анализе данных мониторинга климата. Получены принципиально новые количественные данные о факторах климатической изменчивости основных климатических переменных (атмосферное давление, температура воздуха и осадки) и связях между ними.

Разработан физико-статистический метод прогноза ожидаемых изменений климата на ближайшие десятилетия с использованием следующих факторов: концентрация CO_2 и квази-60-летнее колебание. Полученные оценки показали, что через 30 лет, а именно от 1981-2010 к 2011-2040 гг., можно ожидать повышения глобальной температуры на $\sim 0.58 \pm 0.17 \text{ }^\circ\text{C}$. При этом повышение $\sim 0.72 \pm 0.11 \text{ }^\circ\text{C}$ произойдет за счет роста концентрации CO_2 , а снижение на $\sim 0.14 \pm 0.06 \text{ }^\circ\text{C}$ – за счет обнаруженного 60-летнего колебания. По отношению к доиндустриальному 30-летию 1871-1900 гг. это потепление составит в среднем $\sim 1.14 \pm 0.17 \text{ }^\circ\text{C}$. Эти оценки совершенно созвучны тем, что приведены во вкладе Рабочей группы I в Шестой оценочный доклад МГЭИК (IPCC, 2021).

Развитие климатологии как прогностической науки

Исторически для прогнозирования климата использовались разные методы: синоптические (основанные на типизации погоды), статистические и численные, использующие динамические модели атмосферы, а впоследствии – модели климатической системы. Так, успешно развивались прогностические методы долгосрочных и сверхдолгосрочных прогнозов, основанные на подходах статистической климатологии. Например, широко использовался метод разложения полей метеорологических элементов на естественные составляющие (Мещерская, Яковлева, 1965).

Со временем становилось ясно, что основной метод получения информации о будущем климате – численные динамические модели климатической системы и земной системы в целом.

Уже в 1960-1970-е годы работы по развитию численных методов прогнозирования климата проводились в ГГО. Они были направлены не только на углубление физического содержания расчетных схем. Одновременно велись исследования по расширению класса прогнозируемых метеорологических элементов. В настоящее время в ГГО создана, успешно эксплуатируется и развивается региональная климатическая модель (Спорышев и др., 2008). Результаты моделирования широко используются и в теоретических, и в прикладных работах.

В последнее время инновационные подходы к методологии климатических прогнозов предложены в Гидрометеорологическом научно-исследовательском центре Российской Федерации (ГМЦ), а именно в действующем при нем Северо-Евразийском климатическом центре (ГМЦ/СЕАКЦ) Всемирной метеорологической организации (ВМО).

Так, например, новая версия модели ПЛАВ072L96 (Толстых и др., 2015; Фадеев и др., 2021), предназначенная для выпуска сезонных метеорологических прогнозов, характеризуется повышенным разрешением: 0.9×0.72 градуса по долготе и широте соответственно, 96 уровней по вертикали (с верхним уровнем около 0.04 гПа). В нее добавлено описание сопротивления неорографических гравитационных волн и динамики стратосферы. Модификации также касаются улучшения параметризации конвекции, пограничного слоя, осадков, облачности, многослойной почвы, а также блоков, связанных с процессами на поверхности и в растительности.

В результате сотрудничества ГМЦ и ГГО в прогностическую продукцию ГМЦ/СЕАКЦ входят результаты спектральной модели атмосферы T63L25 ГГО и их комплекс (Мирвис, Мелешко, 2008).

Новое направление связано с внедрением климатической модели INM-CM5 ИВМ РАН (Володин и др., 2017; Volodin, Gritsun, 2020), включающей блоки динамики атмосферы, океана, морского льда и аэрозолей в практическую деятельность ГМЦ/СЕАКЦ, для улучшения качества сезонных прогнозов и расширения временного диапазона прогнозирования до внутридекадного и межгодового уровней. Важным направлением прогресса стала разработка и улучшение климатических моделей, которые адекватным образом стали отражать взаимодействие атмосферы с океаном, сушей и криосферой, учитывая важные климатические процессы и обратные связи.

В рамках реализации задач важнейшего проекта государственного значения «Единая национальная система мониторинга климатически активных веществ» на базе Гидрометцентра России и ИВМ РАН разработан метод прогнозирования состояния климатической системы с горизонтом до пяти лет на основе климатической модели ИВМ РАН INM-CM5 и системы подготовки данных Гидрометцентра России (Хан и др., 2023).

Мониторинг климатической системы

Система мониторинга климата

В начале 1970-х годов руководителем Гидрометеорологической службы Ю.А. Израэлем была сформулирована идея создания в стране системы мониторинга состояния природной среды и климата. Академик РАН Ю.А. Израэль неоднократно обращался к вопросам научного обоснования и организации мониторинга в рамках комплексного глобального подхода (Израэль 1974, 1984, 1990; Израэль и др., 1978). По мнению Ю.А. Израэля, климатический блок мониторинга должен включать изучение климатообразующих факторов, наблюдение за значениями гидрометеорологических переменных и слежение за состоянием климатической системы в целом. В статье «Философия мониторинга», написанной в связи с созданием Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК), Ю.А. Израэль обращает особое внимание на роль антропогенной составляющей изменений (Израэль, 1990). Он впоследствии подчеркивал, что мониторинг климата нужно понимать как «систему наблюдений, позволяющую выделить изменения состояния биосферы под влиянием человеческой деятельности».

Научное обоснование системы мониторинга климата в СССР, ее проектирование и развитие было поручено профессору Г.В. Груза и его исследовательской группе. Его сотрудники работали в различных научно-исследовательских учреждениях – во ВНИИГМИ-МЦД (г. Обнинск) и его Московском отделении, в Гидрометеорологическом центре Российской Федерации (группа доктора физико-математических наук Эсфири Яковлевны Раньковой), в Лаборатории мониторинга природной среды и климата Госком-

гидромета и АН СССР (ЛИАМ), на основе которой впоследствии был образован Институт глобального климата и экологии Росгидромета и РАН (сейчас – Институт глобального климата и экологии имени академика Ю.А. Израэля (ИГКЭ)). Принципы мониторинга климата сформулированы в работах Ю.А. Израэля и Г.В. Груза с соавторами (Израэль, 1974, 1984, 1990, 2005; Израэль др., 1978, 1989, 2001; Израэль, Сиротенко, 2003; Груза, Ранькова, 1989; Груза и др., 2017, 2021).

В настоящее время мониторинг климата в России осуществляется как распределенная система, в которой участвуют различные научно-исследовательские учреждения Росгидромета (ИГКЭ и Гидрометцентр России в Москве, ГГО, ААНИИ и ГТИ в Санкт-Петербурге, ВНИИГМИ-МЦД, ВНИИ-ИСХМ, НПО «Тайфун» в Обнинске, ВГИ в Нальчике и ЦАО в Долгопрудном). Систематизация, анализ и обобщение данных мониторинга в этих учреждениях Гидрометеорологической службы проводятся по официально утвержденным методикам. Этими учреждениями выпускаются бюллетени и обзоры данных мониторинга в рамках их компетенции.

Реализация идей Ю.А. Израэля и Г.В. Груза осуществлялась в различных научно-исследовательских учреждениях Росгидромета. Так, в ИГКЭ в основном формировалась и поддерживается система мониторинга приземного климата, в ГГО – радиационных факторов и парниковых газов, во ВНИИГМИ-МЦД – климата свободной атмосферы, в ААНИИ – климата полярных зон.

В настоящее время система мониторинга климата охватывает широкий спектр переменных состояния окружающей среды. Это и собственно метеорологические величины, и климатозависимые переменные, характеризующие состояние природных и хозяйственных систем, включая наземные экосистемы, океан и криосферу, содержание в атмосфере и межсредовые потоки парниковых газов и иных климатически активных веществ.

Приземный климат и климат свободной атмосферы

Одной из важнейших задач мониторинга климата является получение надежных оценок изменений, происходящих в климатической системе. Первоначальная версия мониторинга, основанная на массиве оцифрованных субъективных анализов метеорологических полей, не могла дать таких надежных оценок, поскольку используемые исторические временные ряды были изначально неоднородны.

В ИГКЭ Г.В. Груза была поставлена и решена задача развития новой системы, основанной на данных станционных наблюдений. Совместными усилиями сотрудников ИГКЭ и ВНИИГМИ-МЦД была создана база данных средней месячной температуры воздуха и месячных сумм атмосферных осадков на 1383 станциях земного шара. Эта база, поддерживаемая и развиваемая в последующие годы, стала основой для дальнейшего развития мониторинга климата и подготовки многочисленных информационно-аналитических продуктов (Бардин и др., 2015, 2020).

В конце 1990-х годов во ВНИИГМИ-МЦД А.М. Стериним с сотрудниками были начаты работы по анализу структуры и изменчивости климатиче-

ских полей температуры в свободной атмосфере. С использованием различных статистических методов, в том числе квантильной регрессии (аппарат дает развернутую картину трендов по всему диапазону квантилей), были получены оценки климатических трендов температуры. Было выполнено их сопоставление с независимыми данными других научных центров, полученными с использованием радиозондовых и спутниковых наблюдений (Стерин, 1999, 2004а, 2004б; Лавров, Стерин, 2017; Стерин, Лавров, 2022).

В настоящее время на основе регулярно пополняемых рядов наблюдений, во ВНИИГМИ-МЦД осуществляется климатический мониторинг свободной атмосферы, результаты которого ежегодно включаются в публикуемый Росгидрометом «Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации» (<http://www.igce.ru/climatechange/reports>) в качестве двух отдельных разделов: мониторинг температуры свободной атмосферы и мониторинг ветра над территорией Российской Федерации.

Данные системы мониторинга климата предназначены для использования в научных исследованиях, при оценке климатообусловленных рисков для природных и хозяйственных систем, для здоровья населения и при разработке климатической политики – программы действий – в направлении митигации и адаптации. Поэтому эти данные должны быть доступны пользователям, в том числе в виде обычных или электронных публикаций. Это предусмотрено разработчиками системы мониторинга климата.

Первым продуктом анализа созданного архива стал бюллетень «Обзор состояния и тенденций изменения климата России», выходявший вначале один раз в год (1-й выпуск – в 2005 году), а впоследствии в виде 4-х сезонных бюллетеней и одного годового обобщающего выпуска. Бюллетень содержит сведения о текущей изменчивости приземного климата (температура воздуха, атмосферные осадки).

С 2009 года начал выходить бюллетень Северо-Евразийского климатического центра (СЕАКЦ), основной задачей которого стал обзор состояния и изменения климата на территории Содружества Независимых Государств (СНГ). Оба бюллетеня готовятся сотрудниками ИГКЭ по единой методике (Методика, 2012).

Позднее был запущен выпуск бюллетеня под названием «Бюллетень мониторинга изменений климата Земного шара. Приземная температура» (Груза и др., 2017), базирующийся на анализе данных наблюдений 3288 наземных станций глобальной сети ВМО.

Ежегодно (с 2005 года) результаты мониторинга обобщаются в издании «Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации». В 2015 году он был утвержден как официальное издание Росгидромета и с тех пор выходит как в электронном, так и в бумажном виде, и доступен на сайте ИГКЭ <http://www.igce.ru/climatechange/reports>.

Доклад содержит данные о наблюдаемых на территории России аномалиях (отклонениях от среднего климатического значения) основных гидрометеорологических переменных (температуры воздуха, осадков) и тенденциях изменения (трендах, ед./10 лет) комплекса климатических пара-

метров. Их перечень постоянно расширяется. В последнем выпуске за 2023 год представлено 19 разделов, характеризующих температурный (в том числе для тропосферы и нижней стратосферы) и гидрологический режимы, режим ветра у поверхности и в свободной атмосфере, состояние криосферы, снежный покров, даты замерзания и вскрытия рек, гололедно-изморозевые отложения, концентрацию парниковых газов и атмосферных аэрозолей, содержание озона в тропосфере, повторяемость опасных природных явлений, агроклиматические условия, солнечную радиацию и продолжительность солнечного сияния.

Регулярный анализ текущих климатических аномалий и изменений климата различных пространственно-временных масштабов стал основой ряда важных работ по исследованию климатической изменчивости и межкомпонентных связей в климатической системе, в том числе во всех трех оценочных докладах Росгидромета (Росгидромет 2008, 2014, 2022).

В настоящее время ВМО рассматривает мониторинг климата как элемент климатического обслуживания. В развиваемой Глобальной рамочной основе климатического обслуживания (ГРОКО) он составляет базовый уровень.

Актинометрические наблюдения

В XX веке Россия долгое время была ведущей страной в мире по организации актинометрических наблюдений. Вначале это касалось солнечной радиации, а позднее и других составляющих радиационного баланса.

На всей обширной территории Советского Союза наблюдения проводились с использованием единых приборов и в единые сроки. Первые актинометрические наблюдения были организованы в дореволюционной России на территории Павловской магнитно-метеорологической обсерватории (под Санкт-Петербургом) еще в 1892 году.

После Великой Отечественной войны (ВОВ) актинометрические наблюдения были продолжены на экспериментальной базе ГГО в поселке Воейково (Ленинградская область). Модификация актинометрических приборов и поверка приборов обеспечивались группой сотрудников под руководством Ю.Д. Янишевского (Янишевский, 1957). Для измерения рассеянной и суммарной радиации большое значение имело внедрение в практику наблюдений пиранометра, разработанного Ю.Д. Янишевским еще в довоенное время в 1934 году.

К середине 1960-х годов актинометрическая сеть Гидрометеорологической службы состояла уже из 158 станций. Первая карта распределения годовых величин суммарной солнечной радиации на европейской части Советского Союза была построена Н.Н. Калитиным еще в 1920-х годах прошлого столетия (Калитин, 1920). В дальнейшем результаты картирования составляющих радиационного баланса представлялись в работах Т.Г. Берлянд с сотрудниками (Берлянд, 1961; Пивоварова, 1977).

В середине 1970-х годов в ГГО под руководством Т.Г. Берлянд была организована группа по сбору и анализу актинометрических данных и обмену акти-

нометрической информацией с зарубежными странами. Позднее (1984 год) эта группа была преобразована в Центр радиационных исследований, который работает в ГГО и в настоящее время под руководством А.В. Цветкова.

Аэрологические наблюдения

Первые работы по зондированию свободной атмосферы с целью получения вертикальных профилей метеорологических элементов (прежде всего, температуры воздуха и ветра) были начаты в 1896 году на территории Павловской магнитно-метеорологической обсерватории (под Санкт-Петербургом). Измерения проводились с помощью приборов, которые поднимали на воздушных змеях и привязных аэростатах. Первый в мире радиозонд, созданный П.А. Молчановым, был запущен 30 января 1930 года из аэрологической обсерватории ГГО. В январе 1931 года один из зондов Молчанова в поселке Полярное (под Мурманском) достиг высоты 10.5 км, зафиксировав высоту тропопаузы на уровне 9.7 км. Так зонд впервые проник в стратосферу. В 1934 году появились первые станции радиозондирования, а к 1940 году их число достигло 40.

В 1941 году работы по зондированию атмосферы были переведены в Москву, где была создана Центральная аэрологическая обсерватория (ЦАО) на базе Аэрологической обсерватории в Павловске и Центрального института прогнозов (ЦИПа) в Москве. Первым директором созданного подразделения был назначен Г.И. Голышев. В послевоенные годы сеть стационарных аэрологических станций значительно увеличилась.

В 1948/49 гг. были организованы первые аэрологические наблюдения на дрейфующем льду в Арктике, а начиная с 1950-х годов, постоянные наблюдения проводились на дрейфующих научно-исследовательских станциях «Северный Полюс» (СП). За более чем 40-летний период наблюдений на советских дрейфующих станциях СП были выполнены не менее 38 000 радиозондирований атмосферы.

Большой массив аэрологических данных был собран в 332 полетах «Летающей метеорологической обсерватории» (ЛМО) в 1948-1960 гг. Бортовая аппаратура ЛМО была разработана и изготовлена в Арктическом институте под руководством М.И. Гольцмана. Исследования на ЛМО на начальном этапе возглавлял И.М. Долгин, а впоследствии – А.И. Воскресенский.

Данные регулярных аэрологических наблюдений на стационарных и дрейфующих станциях за весь период наблюдений до 1960 года, дополненные данными наблюдений на американских дрейфующих станциях (1957-1959 гг.), были обобщены в монографии И.М. Долгина «Климат свободной атмосферы Советской Арктики» (Долгин, 1968). Через несколько лет была издана коллективная монография «Климат свободной атмосферы зарубежной Арктики». Информация, представленная в этих фундаментальных публикациях, не утратила своего значения и в настоящее время.

Современная аэрологическая сеть Российской Федерации состоит из 135 станций зондирования атмосферы. Именно эти данные создали основу для исследования климата свободной атмосферы и позволили оценить измен-

чивость метеорологических элементов на разных уровнях, их статистические характеристики и тренды.

Позднее для зондирования атмосферы широко применялись метеорологические ракеты. Накопленный материал как радиозондовых, так и ракетных данных, позволил ЦАО внести весомый вклад в создание Стандартной атмосферы, которая является важным достижением в области статистических характеристик климата свободной атмосферы.

Климат Северной полярной области

Развитие мониторинга климата высоких широт началось с 1980-х годов, когда метеорологические исследования в полярных районах были в значительной степени переориентированы на мониторинг климата и состояния природной среды в этих районах. Особое внимание уделялось анализу климатической информации с целью выявления изменчивости климатических параметров различных временных масштабов, оценке влияния различных климатообразующих факторов. В частности, выполнялся анализ результатов наблюдений составляющих радиационного режима атмосферы применительно к задачам мониторинга климата, проводились натурные измерения уровней содержания аэрозоля и климатически активных малых газовых составляющих атмосферы в полярных районах и над акваторией Мирового океана. Эти работы проводились и продолжают в ААНИИ в сотрудничестве с Институтом физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, ГГО, ЦАО, ИГКЭ, Институтом экспериментальной метеорологии (ИЭМ) и рядом других научно-исследовательских учреждений.

В 1977 году впервые в мире были выполнены измерения микрофизических характеристик аэрозоля и спектрального аэрозольного ослабления солнечной радиации в Арктическом бассейне на дрейфующей станции СП-22 (Сакунов и др., 1981). Затем работы были продолжены в 1987 г. на станции СП-28.

В 1979-1986 гг. наблюдения за аэрозольной составляющей атмосферы регулярно проводились на архипелаге Северная Земля (Купол Вавилова). Совместный анализ результатов этих наблюдений и данных метеорологических и аэрологических измерений на сети арктических станций позволил оценить внутригодовую и многолетнюю изменчивость уровней аэрозольного загрязнения арктической атмосферы, а также вклад антропогенной составляющей в общее оптическое замутнение атмосферы при «арктической дымке» (повышенном уровне аэрозольного загрязнения атмосферы в зимне-весенний период (Русина, Радионов, 2002)).

Климатический мониторинг в Северной полярной области (СПО), проводимый с начала 2000-х годов, показал, что за период с 1936 года по настоящее время на территории СПО наблюдается статистически значимый (на 5%-м уровне) тренд потепления и на его фоне – рост годовых сумм твердых осадков, уменьшение жидких осадков и сокращение сроков залегания устойчивого снежного покрова (12 дней), особенно заметные на территории севернее 70-й параллели.

Первые советские экспедиционные исследования в этом районе были начаты еще в 1930-е годы и продолжались вплоть до 1939 года включительно. Цель этих исследований заключалась в оценке влияния водообмена между Северной Атлантикой и Арктическим бассейном на состояние арктического льда и на климатические условия вдоль трассы Северного морского пути (Тимофеев, 1944; Океанография и морской лед, 2011).

В 1976 году в СПО был проведен крупный натурный эксперимент. В результате были получены обширные данные о состоянии атмосферы и океана. Оценки переносов тепла в океане и атмосфере подтвердили определяющую роль притока тепла в этот район для формирования климатических и погодных условий в Арктике и на европейской части СССР.

В «Атласе морфометрических характеристик льда и снега в Арктическом бассейне», подготовленном И.П. Романовым (Романов, 1993), обобщены данные измерений толщины льда и снега на льду, выполненных во время посадок на дрейфующий лед во время высокоширотных маршрутов атомных ледоколов. Возможность использования этих данных для мониторинга толщины морских льдов показана в работе (Фролов и др., 2009).

Данные, собранные за десятилетия наблюдений, позволили проследить развитие процесса потепления в Арктике и в морской ее части после 1990-х годов и установить аналогию современного потепления в высоких широтах с потеплением в 1930-1940 гг. Глобальное потепление, начавшееся в конце 1970-х годов в Арктике, проявилось уже в середине 1990-х годов, достигнув максимального развития в десятилетие 2011-2020 гг. (Алексеев и др., 2024). Основной причиной современного потепления в Арктике явилось увеличение притока тепла из низких широт (Alekseev et al., 2019, 2021), на возможность чего указывал еще В.Ю. Визе, обсуждая причины потепления 1930-1940-х годов (Визе, 1937).

Ключевыми объектами современного мониторинга арктической климатической системы являются многолетняя мерзлота, морские льды и атмосфера. Для выполнения этих исследований Росгидромет модернизирует сеть климатического мониторинга и включает в систему наблюдений на метеорологических станциях наблюдения за состоянием криолитозоны. Для осуществления круглогодичного мониторинга СЛО в наименее доступной из-за льдов его центральной части построена и работает с 2022 года ледостойкая самодвижущаяся платформа «Северный полюс» (ЛСП «Северный Полюс»), оснащенная комплексом приборов для инструментальных исследований океана, морских льдов, атмосферы и арктической биоты.

Развивается и система климатического обслуживания в Арктике. При содействии ВМО Росгидрометом организована сеть из трех арктических региональных климатических центров (АркРКЦ): в АНИИ с участием ГГО, в Гидрометцентре России и во ВНИИГМИ-МЦД. Задачами АркРКЦ является создание и пополнение портала данных, сезонное прогнозирование состояния морского льда, выпуск панарктического климатического бюллетеня, координация работ с программой ВМО «Глобальная служба криосферы».

Климат Южной полярной области

Систематическое изучение Южной полярной области (ЮПО) началось только в середине 1950-х годов. Комплексная антарктическая экспедиция (КАЭ) Академии наук СССР была организована во время проведения Международного геофизического года (МГГ) в 1957-1958 гг.

Во время советских антарктических экспедиций (САЭ) были организованы наблюдения на станциях Пионерская, Оазис, Мирный, Комсомольская, Восток, Советская, Полюс Недоступности, Лазарев, Новолазаревская, Беллинсгаузен. В 1970-1990-х годах были созданы новые станции: Ленинградская (1971 г.), Русская (1980 г.) и Прогресс (1988 г.). Важным результатом этого этапа исследований стала публикация монографии Н.П. Русина «Метеорологический и радиационный режим Антарктиды» в 1961 году и в 1966-1969 гг. двухтомного атласа Антарктики, удостоенного Государственной премии СССР.

При исследованиях современного климата Антарктики получены оценки пространственно-временной изменчивости термического режима атмосферы в приземном слое и в свободной атмосфере (включая нижнюю стратосферу) за весь период инструментальных наблюдений. Анализ данных о среднегодовой температуре приземного воздуха показал, что на большинстве станций тренды положительны. Из 15 длиннорядных станций только на четырех тренд температуры – отрицательный, притом большая часть этих трендов не является статистически значимой (Клепиков и др., 2015). Показано, что за последние десятилетия наиболее значимое потепление отмечается в районе Антарктического полуострова как в приземном слое, так и в тропосфере. В этом районе также наблюдается уменьшение амплитуды годового хода температуры воздуха (в основном за счет роста минимальных значений) и увеличение амплитуды суточного хода.

Этот феномен регионального потепления, являющегося крупнейшим в Южном полушарии, проявляется не только в повышении приземной температуры воздуха, но и в увеличении мощности и числа облачных слоев, уменьшении высоты нижней границы облачности и увеличении водности облаков. В районе Антарктического полуострова отмечается также таяние ледников, деградация многолетней мерзлоты и сокращение морского оледенения, наиболее заметное к западу от полуострова.

Процесс потепления уже оказал влияние на морские и наземные экосистемы, в которых начали появляться более теплолюбивые виды (Клепиков и др., 2015; Лагун и др., 2017; Данилов, Клепиков, 2020; Клепиков, Данилов, 2021; Клепиков, 2023).

Мониторинг свободной атмосферы показал, что над Антарктидой в тропосфере зафиксировано наибольшее на планете региональное потепление, а в нижней стратосфере – хорошо выраженное похолодание.

Актинометрические измерения показали, что радиационный климат Антарктиды устойчив, по крайней мере в течение последних 50 лет. Интегральная прозрачность атмосферы существенно уменьшалась лишь после сильных вулканических извержений, причем длительность периодов с повы-

шенными уровнями замутнения атмосферы составляла от 1.5 до 2 лет. При этом, даже после таких достаточно мощных извержений, как Агунг в 1963 г., Эль-Чичон в 1983 г. и Пинатубо и Хадсон в 1991 г., не отмечалось значительных изменений суммарной радиации. При отсутствии вулканических извержений, за весь период наблюдений в Антарктиде (обсерватория Мирный) прослеживается лишь слабая тенденция снижения как интегральной, так и спектральной аэрозольной оптической толщины атмосферы, несколько более выраженная для последней. Это свидетельствует о том, что Антарктида до сих пор остается практически не подверженной влиянию антропогенного аэрозольного загрязнения (Радионов и др., 2020).

Во время антарктических рейсов определено положение и некоторые характеристики фронтов и границ Антарктического циркумполярного течения (АЦТ) и примыкающих циркуляционных систем (субполярного круговорота Уэдделла и течения Агульяс). Получены оценки временной изменчивости положения основных фронтов и границ АЦТ. Установлено, что более устойчиво положение Полярного фронта и Южного фронта АЦТ, а менее устойчиво – субтропического и субантарктического.

В исследованиях климата последнего тысячелетия наиболее важный результат связан с построением сводной региональной климатической кривой для района станции Восток (Центральная Антарктида) на основе анализа современных изменений температуры воздуха и скорости накопления снега, полученных инструментальным путем, и их сопоставления с палеоклиматическими реконструкциями за последние 250 лет.

С 1992 по 2017 гг. Российской антарктической экспедицией (РАЭ) руководил Валерий Владимирович Лукин, с 2017 по 2023 г. – кандидат физико-математических наук Александр Вячеславович Клепиков. В настоящее время РАЭ возглавляет Павел Иванович Лунев. Работы осуществляются на пяти антарктических станциях (Восток, Беллинсгаузен, Новолазаревская, Мирный, Прогресс) и пяти сезонных полевых базах (Дружная-4, Молодежная, Ленинградская, Оазис Бангера, Русская).

Тропическая климатология. Эксперименты (ТРОПЭКС-72, ТРОПЭКС-74 (АТЭП), ПГЭП)

Знания о климате тропических широт долгое время оставались относительно ограниченными. У метеорологов и климатологов представления о том, что происходит с климатом в тропических широтах, были основаны в значительной степени на материалах монографии Г. Рия (1963), переведенной на русский язык в начале 1960-х годов. В конце 1950-х годов профессор Сергей Петрович Хромов во время плавания в Антарктиду (Советская Антарктическая экспедиция 1956-1957 гг.), дважды пересекая экватор, даже не имея специального оборудования для аэрологического зондирования, сумел четко выделить и охарактеризовать область пассатов и внутритропическую зону конвергенции (Хромов, 1959).

Осознавая недостаток информации в области тропической метеорологии и климатологии, Объединенный организационный комитет ВМО и меж-

дународного Геодезического и геофизического союза (Joint Organizing Committee), руководивший Программой исследования глобальных атмосферных процессов (ПИГАП (GARP)), принял решение о необходимости проведения Атлантического тропического эксперимента ПИГАП (АТЭП); англоязычная аббревиатура – GATE (GARP Atlantic Tropical Experiment). Основной целью было совершенствование прогнозирования погоды. Помимо этого, результаты этих экспериментов дали важнейший материал для понимания общих климатических закономерностей тропической зоны.

В осуществлении АТЭП участвовали более 20 стран (СССР, США, Великобритания, Япония, Франция, Канада и др.). Главную роль сыграла специальная сеть измерений, созданная научно-исследовательскими судами, которые заняли постоянные позиции в экваториальной зоне Атлантического океана, образовав вложенные друг в друга шестиугольники. Эти исследовательские суда находились на позициях во время трех последовательных фаз АТЭП, каждая из которых продолжалась около 20 суток. Аэрологическое и океанологическое зондирования, осуществляемые на каждом судне, позволили создать 4D-картину термодинамики и циркуляции тропической атмосферы и океана. Специфическое расположение судов дало возможность рассчитать пространственные переносы энергии, получить надежные представления об энергетическом балансе атмосферы и океана, о взаимодействии атмосферы и океана.

Российский сегмент АТЭП также обозначался как ТРОПЭКС-74. В СССР эти работы проводились под общим руководством Главного управления Гидрометеорологической службы при Совете Министров СССР с участием Академии наук СССР. Руководителем эксперимента был профессор Михаил Арамаисович Петросянц – в то время директор Гидрометеорологического научно-исследовательского центра СССР. В результате выполнения проекта АТЭП была собрана огромная (по тем временам) информация, обобщенная в ряде научных работ, первые из которых представлены в издании (ТРОПЭКС-74, 1976). Эти исследования позволили получить фундаментальные представления о структуре тропической зоны. В рамках этих экспериментов были исследованы субтропические антициклоны, пассатная инверсия, внутритропическая зона конвергенции, «восточные» волны, являющиеся предтечей штормов и ураганов Карибского бассейна. Это легло в основу понимания многих процессов, происходящих в низких широтах.

В качестве подготовительного мероприятия к АТЭП состоялся советский Тропический эксперимент (ТРОПЭКС-72), в ходе которого 6 научно-исследовательских судов отрабатывали методику наблюдений и изучали крупномасштабные атмосферные процессы в тропической зоне Атлантики.

Следующим важнейшим мероприятием ПИГАП стал Первый глобальный эксперимент (ПГЭП), проведенный в 1977 г., во время которого удалось собрать первую рабочую базу данных по всей атмосфере, которая долгое время была единственным источником информации такого рода.

Глобальное антропогенное воздействие на климатическую систему

Во второй половине XX века все более проявлялось антропогенное воздействие глобального масштаба на климатическую систему. Его механизм – обогащение атмосферы парниковыми газами и иными климатически активными веществами и изменение альбедо земной поверхности в ходе хозяйственной деятельности. Международные соглашения – РКИК ООН (1992 г.), Киотский протокол (1997 г.) и Парижское соглашение (2015 г.) – направлены, в том числе, на то, чтобы ограничить глобальные суммарные антропогенные нетто-выбросы парниковых газов в атмосферу и, тем самым, уменьшить антропогенное усиление парникового эффекта (митигация) (Киотский протокол, 1997; Парижское соглашение, 2015).

Для корректного анализа текущих объемов выбросов и поглощений парниковых газов в Секретариат РКИК ООН странами-участницами ежегодно представляется соответствующая информация национального уровня. Россия с 1995 г. также представляет такой документ – «Национальный доклад о кадастре антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов, не регулируемых Монреальским протоколом». Информационной основой этого документа является расчетный мониторинг эмиссий и стоков, ведущийся в России. На основе официальных статистических данных об объеме деятельности (добыче полезных ископаемых, сжигании топлива, показателях лесного и сельского хозяйства и т.д.) в ИГКЭ оцениваются объемы антропогенных выбросов и поглощений парниковых газов в России. Эти оценки выполняются с использованием специальных методик, приведенных в соответствующем методологическом докладе Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК), см. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2019/12/19R_V0_01_Overview.pdf.

При этом, предложенные в докладе МГЭИК методологии «настраиваются» с учетом национальных условий, что является серьезной и ответственной научно-исследовательской задачей. Этой работой руководит директор ИГКЭ, член-корреспондент РАН Анна Анатольевна Романовская. В работе принимают участие ведущие ученые ИГКЭ – кандидат географических наук Вероника Александровна Гинзбург, кандидат физико-математических наук Александр Ильич Нахутин, кандидат биологических наук Владимир Николаевич Коротков и ряд других. Проект кадастра направляется далее на одобрение ведомств и на утверждение Правительства Российской Федерации. Доклады о кадастре можно найти на сайте: <http://www.igce.ru/performance/publishing/reports/>.

Прикладные исследования и информационные продукты

Прикладная климатология: истоки и современное развитие

Еще в конце 1950-х – начале 1960-х годов в стране были начаты разработки в области прикладной климатологии. Первоначально они были посвя-

щены, в основном, влиянию климатических факторов на хозяйственные объекты. Под руководством Л.Е. Анапольской и Л.С. Гандина была создана физико-математическая модель воздействия климатических условий на тепловой режим зданий (Анапольская, 1961; Анапольская, Гандин, 1973).

В монографии М.В. Завариной (Заварина, 1976) были представлены научные подходы строительной климатологии. В частности, рассмотрены климатические нагрузки на здания и сооружения: ветровые, снеговые, гололедные, гололедно-ветровые. На основе работ М.В. Завариной, в связи со строительством БАМа, а также для планирования развития производительных сил Восточной Сибири и Дальнего Востока, была подготовлена монография «Климатические параметры Байкало-Амурской магистрали» (Климатические ..., 1977).

К классическим работам по прикладной климатологии относится подготовленная под редакцией Ц.А. Швер серия монографий «Климаты больших городов» (Климат города, 1979-1991), состоящая из 85 книг, в которых анализируется влияние города на климат и содержатся рекомендации по типам городской застройки.

В конце XX века – начале XXI века лидером отечественной прикладной климатологии была профессор Нина Владимировна Кобышева (ГГО). Она также уделяла много сил и времени преподаванию, подготовке кадров климатологов.

В 1990-2000-е годы в ГГО был подготовлен «Справочник по опасным природным явлениям в республиках, краях и областях Российской Федерации» под руководством К.Ш. Хайруллина и Н.В. Кобышевой (Климат России, 2001; Кобышева и др., 2015). Примерно в это же время под научным руководством Н.В. Кобышевой были изданы монографии «Климат России» и «Климат и железнодорожный транспорт» (Хайруллин, 1969; Климат России, 2001; Энциклопедия ..., 2005), «Климатические риски и адаптация к изменениям и изменчивость климата в технической сфере» (Кобышева и др., 2015).

К настоящему времени тематика исследований в прикладной климатологии существенно расширилась. Выполнены и продолжают развиваться, посвященные влиянию изменений климата на производственные процессы, на состояние жилых зданий и технических сооружений, построенных на многолетней мерзлоте, на водные ресурсы, на лесное и сельское хозяйство, на здоровье населения, на биоразнообразие.

Одним из важных направлений прикладных исследований является ветро- и гелиоэнергетика. В ГГО было проведено районирование территории СССР и Российской Федерации по условиям обеспеченности гелио- и ветроэнергетическими ресурсами для различных физико-географических условий (Пивоварова, Стадник, 1988; Атлас ветрового и..., 1997; Климатические факторы..., 2010).

В Государственном гидрологическом институте (ГГИ) Росгидромета проводились масштабные исследования влияния меняющегося климата на сток рек и водные ресурсы, а также на континентальную многолетнюю мерзлоту. Под руководством профессора Игоря Алексеевича Шикломанова и

доктора географических наук Владимира Юрьевича Георгиевского в конце XX века – начале XXI века был проведен масштабный комплекс гидрологических исследований. Одна из целей – определить тенденции изменения стока рек России в условиях меняющегося климата. В том числе было установлено, что увеличился сток крупнейших российских рек в Северный Ледовитый Океан (Шикломанов, Георгиевский, 2002; Шикломанов, Шикломанов, 2003; Peterson et al., 2002).

Повышение температуры воздуха и почвы во многих случаях приводит к деградации многолетней мерзлоты, развитию различных термокарстовых явлений, уменьшению несущей способности многолетнемерзлых грунтов. Это негативно влияет на промышленную инфраструктуру, на здания и технические сооружения, транспорт, на добычу нефти и газа. Работы по моделированию изменений многолетней мерзлоты в условиях потепления климата и оценке геоэкологических рисков ведутся во многих институтах: в ГГО, ГГИ, ААНИИ и ВНИИГМИ-МЦД (Малевский-Малевич и др., 2001; Анисимов, Лавров, 2004; Павлова и др., 2007; Шерстюков, 2012; Алексеев и др., 2015; Анисимов и др., 2015; Анисимов, Стрелецкий, 2015; Шерстюков, Шерстюков, 2015; Пикалева и др., 2016).

Во Всероссийском научно-исследовательском институте сельскохозяйственной метеорологии (ВНИИСХМ) были развернуты исследования влияния изменений климата на продовольственную безопасность. Профессор Олег Дмитриевич Сиротенко руководил работами по математическому моделированию влияния изменения климата на урожай сельскохозяйственных растений. Была создана имитационная модель системы «почва-растение-атмосфера», позволяющая решать задачи оптимизации гидрологического режима сред обитания растений (Сиротенко, 1981). Доктор географических наук Вера Николаевна Павлова исследовала влияние изменений климата на агроклиматические ресурсы и продуктивность сельскохозяйственных культур, а также влияние экстремальных погодных явлений на состояние посевов (Павлова, Караченкова, 2023). Профессору Александру Дмитриевичу Клещенко принадлежат работы по дистанционным методам оценки состояния посевов (Клещенко и др., 2019). Он также работал над внедрением климатического страхования как меры адаптации сельского хозяйства в условиях меняющегося климата.

Во ВНИИГМИ-МЦД доктор географических наук Борис Георгиевич Шерстюков разработал оригинальную методологию оценки пожароопасности в лесных насаждениях и выполнил ряд оценок для территории России (Шерстюков, 2021). Оценка выполняется, исходя из данных мониторинга и моделирования климата, на основе индекса Нестерова.

Исследования в области последствий изменения климата для экосистем и здоровья населения начались в Лаборатории мониторинга природной среды и климата Госкомгидромета СССР и АН СССР в 1980-х годах и далее продолжались в ИГКЭ – см., например, (Семенов и др., 1998, 2002, 2004). Под руководством члена-корреспондента РАН Сергея Михайловича Семенова была подготовлена и вышла в 2006 г. монография «Выявление климатогенных

изменений» (Семенов и др., 2006). В ней были разработаны концепция климатического ареала биологического вида и научные основы вычисления географических границ климатических ареалов и их картографического отображения, исходя из данных мониторинга и моделирования климата. Впоследствии соответствующая методология была усовершенствована и представлена в серии публикаций (Семенов и др., 2020; Добролюбов и др., 2023) – созданы соответствующие алгоритмы и разработана компьютерная система RANGES для построения климатических ареалов видов с использованием их климатических предикторов. Разработанная методология и технологии нашли широкое применение при создании современных информационных продуктов Гидрометеорологической службы страны.

Под руководством члена-корреспондента РАН Анны Анатольевны Романовской в ИГКЭ проводятся исследования естественных и антропогенных потоков парниковых газов в экосистемах. Это весьма важные в прикладном плане работы, поскольку экосистемы России являются нетто-поглотителями парниковых газов, и объективные научные данные о потоках, в том числе об эмиссии и поглощении, способствуют улучшению показателей нашей страны в отчетности по РКИК ООН. Последние результаты в этой области обобщены в монографии (Романовская (ред.), 2023).

Как видно из приведенных выше данных – далеко неполных – ученые институтов Гидрометеорологической службы работают в области прикладной климатологии широким фронтом и в междисциплинарном стиле. Это полностью соответствует современным мировым тенденциям. Ведь главной задачей прикладной климатологии в эпоху значительных глобальных антропогенных воздействий на климат Земли и его быстрых изменений стало предоставление климатической информации, способствующей разработке и внедрению мер, снижающих климатообусловленные риски. Необходимость таких мер возникает в отношении объектов самой разной природы – хозяйственных, социальных, экологических. Снижение климатообусловленных рисков путем митигации и адаптации – задача масштабная, требующая заметных затрат. Поэтому возрастает роль экономического и политического анализа. Эти аспекты рассмотрены в монографиях (Порфирьев и др., 2011; Катцов, Порфирьев, 2017; Катцов и др., 2017а,б).

Информационные продукты

Данные мониторинга климата лишь тогда достигают своей целевой аудитории, когда обрабатываются, систематизируются и хранятся на информационных носителях, доступных пользователям. Вначале такими носителями были специализированные публикации, содержащие результаты обобщения данных мониторинга климата в определенных форматах.

Уже в 1926 г. в ГГО началась систематическая подготовка монографий серии «Климаты Союза Советских Социалистических Республик». Авторами были Е.С. Рубинштейн, А.А. Каминский, В.Н. Короткевич, О.А. Дроздов, Е.Я. Щербакова. Для климатического обслуживания народного хозяйства в 1931–1932 гг. под редакцией А.А. Каминского и Е.С. Рубинштейн был опубликован

«Климатический справочник СССР» (Климатический..., 1932). Во время Великой отечественной войны климатологи готовили материалы для фронта: климатические описания авиатрасс и районов боевых действий, климатических условий прохождения дорог и т.д.

Выпускались климатические справочники и атласы. Так, в начале 1950-х годов были начаты выпуски справочников по отдельным элементам климата как для всей территории СССР, так и для отдельных территорий – зон ответственности управлений Гидрометслужбы СССР. Руководителями этих работ были известные советские климатологи Е.С. Рубинштейн, А.Н. Лебедев, О.А. Дроздов, М.В. Заварина, Т.В. Покровская, Л.П. Спирина и другие.

Серия климатических справочников «Климат СССР» состояла из семи выпусков, характеризующих климаты европейской части СССР (Лебедев, 1958), Дальнего Востока (Занина, 1958), Кавказа (Занина, 1961), Восточной Сибири (Щербакова, 1961), Западной Сибири (Орлова, 1962), Средней Азии (Челпанова, 1963) и свободной атмосферы (Накоренко, Токарь, 1959). Издание «Справочник по климату СССР» состояло из пяти частей и содержало сведения по всем основным метеорологическим элементам, включая данные по солнечной радиации и радиационному балансу (Климат СССР, 1958-1963).

В 1960-1962 гг. был подготовлен и опубликован «Климатический атлас СССР», содержащий сотни карт, освещающих особенности пространственно-временного распределения метеорологических величин по территории нашей страны (Климатический атлас, 1958, 1960, 1962).

Была издана серия монографий, содержащих описание основных климатообразующих факторов, определяющих особенности климатического режима обширных территорий России (Климат СССР, 1958-1963).

В 1960-х годах в ГГО был подготовлен 170-томный Справочник по климату СССР – фундаментальная работа, послужившая основой для создания в последующем многих специализированных справочных пособий (Справочник..., 1965-1970). К этому справочнику под руководством О.А. Дроздова были подготовлены три тома с материалами по устойчивости и точности климатических характеристик: солнечное сияние, температура воздуха и почвы (т. 1), влажность воздуха, атмосферные осадки и снежный покров (т. 2), облачность и атмосферные явления (т. 3).

В 1970-х годах, совместно с ГГО и Гидрометцентром СССР, был создан «Климатический справочник для синоптиков», на базе которого подготовлена серия пособий, активно использовавшихся прогностическими подразделениями Гидрометеорологической службы. Под руководством И.Г. Гутермана был разработан и создан Аэроклиматический справочник СССР нового типа в 14 томах, который содержал основные статистики, характеристики изменчивости метеорологических элементов и их вертикальные градиенты. Была разработана и внедрена технология подготовки и выпуска на регулярной основе Национального климатического бюллетеня России (Булыгина и др., 2014, 2020; Шерстюков, 2012; Шерстюков, Шерстюков, 2015).

В 1988-1997 гг. под руководством Н.В. Кобышевой был создан «Научно-прикладной справочник по климату СССР», обобщающий данные наблюде-

ний по 1980 год и содержащий параметры и специализированные климатические характеристики для строительства (Научно-прикладной..., 1997).

К началу XXI столетия стало ясно, что традиционные носители климатической информации – книги, брошюры – необходимо дополнять их электронными аналогами. Это более соответствует резко возросшему потоку данных мониторинга, дает возможность оперативного пополнения массивов и обеспечивает пользователям доступ к данным средствами обмена файлами. Уже в начале XXI века специалистами ВНИИГМИ-МЦД под руководством В.Н. Разуваева и О.Н. Булыгиной при участии ГГО (раздел «Солнечная радиация») был подготовлен научно-прикладной справочник «Климат России» в электронной форме. Технология его ведения предусматривает возможность регулярного обновления его базы (Булыгина и др., 2014).

Со временем на сайте ВНИИГМИ-МЦД <https://meteo.ru>, на сайте Гидрометцентра РФ/СЕККИЦ <https://seakc.meteoinfo.ru/ru/> и на сайте Климатического центра Росгидромета <https://cc.voeikovmgo.ru/ru/> стали доступны обширные массивы фактической и прогнозной гидрометеорологической информации различного уровня обобщения – от собственно данных наблюдений и модельных расчетов до интерактивных карт. Эта информация широко используется самыми различными категориями пользователей.

В электронном виде подготавливаются в ИГКЭ и представляются Россией в Секретариат РКИК ООН ответные документы по этому соглашению: «Национальное сообщение Российской Федерации, представленное в соответствии со статьями 4 и 12 Рамочной Конвенции Организации Объединенных Наций об изменении климата и статьей 7 Киотского протокола» (раз в 4 года), «Двухгодичный доклад Российской Федерации, представленный в соответствии с решением 1/СР.16 Конференции Сторон «Рамочной Конвенции Организации Объединенных Наций об изменении климата», и «Национальный доклад о кадастре антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов не регулируемых Монреальским протоколом» (ежегодно). Они доступны на сайте ИГКЭ <http://www.igce.ru/performance/publishing/reports/>.

Однако книжная форма представления информационных продуктов и сейчас не утратила своего значения. Это относится, в том числе, к таким монументальным сводкам о состоянии научных знаний в климатологии и сопряженных разделах других наук, как Первый, Второй и Третий оценочные доклады Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации (Росгидромет, 2008, 2014, 2022). Эти издания ориентированы не только на интересы научного сообщества, но и на потребности экспертов государственных органов, разрабатывающих климатическую политику страны. Так, первый из этих докладов фактически стал научной основой Климатической доктрины Российской Федерации (Климатическая..., 2009). Ее обновленная версия подписана президентом Российской Федерации в октябре 2023 г. Материалы второго доклада широко использовались при определении позиции страны на переговорах, предшествовавших принятию Парижского соглашения (2015 г.). Третий доклад ориентирован на подготовку

и реализацию национального плана адаптации. Национальный план второго этапа адаптации к изменениям климата на период до 2025 г. утвержден Правительством Российской Федерации 1 марта 2023 г. (постановление N 559). Полные тексты всех трех оценочных докладов доступны на упомянутом выше сайте ИГКЭ, а также на сайте Климатического центра Росгидромета <https://cc.voeikovmgo.ru/ru/>.

К основным видам климатической продукции Росгидромета относятся также подготовленные в ГГО методические указания по расчету специализированных климатических характеристик (Методические рекомендации, 2017, 2022).

В последние годы в ГГО и в ходе сотрудничества ГГО с Институтом народнохозяйственного прогнозирования РАН подготовлен ряд концептуальных публикаций, в которых разрабатываются важные вопросы современной климатической политики России (Катцов и др., 2007; Катцов, Порфирьев, 2017; Доклад о научно-методических..., 2020).

Заключение

Несмотря на усилия, предпринимаемые мировым сообществом в области смягчения современного изменения климата, этот процесс взять под контроль полностью не удастся. Это не проблема климатологии, а недостаток политического согласия в мире в отношении направлений социально-экономического развития.

При этом наука о климате и климатические данные становятся все более актуальными, поскольку процесс разработки эффективной климатической политики нуждается в объективной и постоянно актуализируемой информации о свойствах, состоянии и тенденциях изменения климатической системы Земли, о ее реакции на антропогенное воздействие.

Такая информация предоставляется, пополняется и обновляется усилиями ученых и других специалистов системы Гидрометеорологической службы страны, Российской академии наук и профильных высших учебных заведений России. Именно их совместная работа способствует и будет обеспечивать успешное решение Россией проблем, связанных с изменением климата. Конечно, эти организации, работая в области климатологии и сопряженных разделов других наук, имеют и специфические зоны ответственности. Российская академия наук выполняет, прежде всего, фундаментальные исследования. Высшие учебные заведения готовят кадры специалистов. Гидрометеорологическая служба работает во множестве направлений, специфика которых – систематическая долговременная работа по выполнению наблюдений, оценок и прогнозов состояния климатической системы Земли. Охарактеризуем кратко некоторые из этих направлений.

Одна из важных составляющих мониторинга климатической системы – систематические наблюдения за содержанием парниковых газов и иных климатически активных веществ в атмосфере, за их межсредовыми потоками и антропогенными эмиссиями и поглощениями. Эта информация необходима

для разработки мер митигации, смягчения антропогенного воздействия на климат. В настоящее время эту информацию получают в основном с помощью станционных измерений или расчетным путем с использованием косвенных данных. Этот вид мониторинга находится в сфере деятельности ИГКЭ в связи с выполнением обязательств России по РКИК ООН. Методологические ограничения не позволяют получать эту информацию для всей страны со все большей детализацией по пространству и времени. Для этого необходимо широко использовать спутниковые методы.

Работы в области спутниковой климатологии многие годы ведутся в НИЦ «Планета», а также в ААНИИ, ИКИ РАН, ИОА СО РАН, Санкт-Петербургском государственном университете, других учреждениях (Успенский (ред.), 2021; Асмус, 2022). Широкое внедрение космических методов и технологий, конечно, требует их систематической настройки с использованием данных традиционных станционных наблюдений.

Еще одно направление климатологии, в котором станционные данные играют и будут играть важную роль – моделирование климата. Математические модели климатической системы нуждаются в систематической настройке параметров, в верификации результатов. Поддержание, расширение (по возможности) российской сети гидрометеорологических наблюдений, расширение программы наблюдений за счет иных переменных состояния климатической системы, рост профессиональной квалификации работников гидрометеорологических станций – необходимые условия для получения объективной климатической информации мирового уровня.

Следует особо отметить станционные и экспедиционные работы, проводимые Гидрометеорологической службой России в полярных зонах, в Арктике и Антарктике. Традиции организации полярных работ, высокая научная квалификация специалистов и опыт работы в полярных условиях позволяют не только получать объективную информацию о состоянии полярной криосферы – важнейшего элемента климатической системы Земли, – но и выполнять научные обобщения мирового уровня.

Климатическое обслуживание отраслей и регионов, прежде всего, связано с оценкой климатообусловленных рисков. Современная концепция определяет три источника климатообусловленного риска для какого-либо объекта – природного или социально-экономического. Первый – воздействие климатических факторов (изменчивости и изменения климата), которое характеризуется его интенсивностью (величиной, пространственным масштабом и продолжительностью) и вероятностью. Второй – подверженность объекта этому воздействию. Третий – уязвимость объекта. Главная задача Гидрометеорологической службы в связи с оценкой климатообусловленных рисков – оценка локализации воздействий, их интенсивности и вероятности. Эти параметры определяются глобальными факторами воздействия на климат. Они могут меняться только при изменении глобального воздействия на климатическую систему (митигации). Оценка остальных двух составляющих и разработка мер адаптации, уменьшающих эти составляющие – задача отраслей и

регионов. Они могут ее решать при поддержке Гидрометеорологической службы при необходимости.

При планировании мер адаптации отраслей и регионов к изменениям климата весьма существенна роль математического моделирования климатической системы и земной системы в целом. Только с помощью математических моделей можно проводить априорную и апостериорную оценки эффективности мер адаптации, направленных на уменьшение негативного воздействия меняющегося климата на природные и социально-экономические системы, в том числе – оценивать экономическую целесообразность этих мер. При этом весьма востребованной является региональная климатическая модель, которая разработана и поддерживается в Климатическом центре Росгидромета (<https://cc.voeikovmgo.ru/ru/>).

Наконец, институты Гидрометеорологической службы страны постоянно участвуют в научном сопровождении разработки внутренней и внешней климатической политики России, в работе профильных международных организаций.

Эксперты из ГГО принимали деятельное участие в подготовке исходной (2009 г.) и обновленной (2023 г.) версий Климатической доктрины Российской Федерации. Разработка национального адаптационного плана (обязательство страны по Парижскому соглашению 2015 г.) проходила с участием специалистов из ИГКЭ и ГГО.

Ученые из ИГКЭ и ГГО участвуют в научном сопровождении работы делегации Российской Федерации в органах Рамочной конвенции ООН об изменении климата.

Эксперты из научно-исследовательских учреждений Гидрометеорологической службы страны, наряду с учеными РАН и профильных ВУЗов, работают в качестве авторов и редакторов-рецензентов над подготовкой научных докладов Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК). Это наиболее авторитетная международная неполитическая организация, на выводы и заключения которой опирается международный переговорный процесс по проблемам климата. В 1988-2023 гг. представитель России входил в Бюро этой организации. Эксперты из Гидрометеорологической службы страны участвуют в работе и других профильных международных организаций, в том числе Всемирной метеорологической организации (ВМО).

Гидрометеорологическая служба страны – Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды – встретила свое 190-летие значительными достижениями. И научным сообществом, и руководством страны признается важность ее роли в научных исследованиях климатической системы Земли, в обеспечении экономики страны климатической информацией, в экспертном сопровождении разработки внутренней и внешней климатической политики. Климатологи Гидрометеорологической службы готовы к дальнейшей работе на благо страны.

Список литературы

Алексеев, Г.В., Захаров, В.Ф., Радионов, В.Ф. (2000) Динамика климата Арктики в XX столетии, *Проблемы гидрометеорологии окружающей среды на пороге XXI века, Труды Международной теоретической конференции 1999*, СПб., Гидрометеоиздат, с. 141-146.

Алексеев, Г.В., Большаинов, Д.Ю., Радионов, В.Ф., Фролов, С.В. (2015) 95 лет исследований климата и криосферы Арктики в ААНИИ, *Лед и снег*, т. 55, № 4, с. 127-140.

Алексеев, Г.В., Харланенкова, Н.Е., Иванов, Н.Е., Глок, Н.И. (2024) Мониторинг изменений климата в морской Арктике, *Проблемы Арктики и Антарктики*, т. 70, № 1, с. 33-45.

Анапольская, Л.Е. (1961) *Режим ветра на территории СССР*, Л., Гидрометеоиздат.

Анапольская, Л.Е., Гандин, Л.С. (1973) *Метеорологические факторы теплового режима зданий*, Л., Гидрометеоиздат, 285 с.

Анисимов, О.А., Лавров, С.А. (2004) Глобальное потепление и таяние вечной мерзлоты: риски для производственных объектов ТЭК, *Технологии ТЭК*, № 3, с.78-83.

Анисимов, О.А., Жирков, А.Ф., Шерстюков, А.Б. (2015) Современные изменения криосферы и природной среды в Арктике, *Арктика. XXI век. Естественные науки*, под ред. О.А. Анисимова, 2 (3), с. 24-47.

Анисимов, О.А., Стрелецкий, Д.А. (2015) Геокриологические риски при таянии многолетнемерзлых грунтов, *Арктика. XXI век. Естественные науки*, под ред. О.А. Анисимова, 2 (3), с. 60-74.

Антропогенные изменения климата (1987) Под ред. М.И. Будыко, Ю.А. Израэля, Л., Гидрометеоиздат, 406 с.

Асмус, В.В. (2022) *Применение спутниковой информации для решения задач гидрометеорологии и мониторинга окружающей среды*, Москва, 89 с.

Атлас теплового баланса земного шара (1955) Под ред. М.И. Будыко, Л., ГГО, 41 с.

Атлас теплового баланса земного шара (1963) Под ред. М.И. Будыко, М., МГК, 69 с.

Атласы ветрового и солнечного климата России (1997) Под ред. М.М. Борисенко, В.В. Стадник, СПб.

Бардин, М.Ю., Платова, Т.В., Самохина, О.Ф. (2015) Особенности наблюдаемых изменений климата на территории Северной Евразии по данным регулярного мониторинга и возможные их факторы, *Труды ГМЦ России*, № 358, с. 13-35.

Бардин, М.Ю., Ранькова, Э.Ю., Платова, Т.В., Самохина, О.Ф., Корнева, И.А. (2020) Современные изменения приземного климата по результатам регулярного мониторинга, *Метеорология и гидрология*, № 5, с. 29-45.

Барков, Н.И., Вострецов, Р.Н., Липенков, В.Я., Саламатин, А.Н. (2002) Колебания температуры воздуха и осадков на станции Восток на протяжении четырех климатических циклов за последние 420 тысяч лет, *Арктика и Антарктида*, вып. 1(35), с. 82-97.

Берлянд, Т.Г. (1961) *Распределение солнечной радиации на континентах*, Л., Гидрометеиздат.

Блинова, Е.Н. (1943) Гидродинамическая теория волн давления, температурных волн и центров действия атмосферы, *ДАН СССР*, вып. 39, № 3.

Борзенкова, И.И. (1974) К вопросу о возможных влияниях вулканических извержений на радиационный и термический режим, *Труды ГГО*, вып. 307, с. 36-42.

Борзенкова, И.И. (1992) *Изменение климата в кайнозое*, СПб., Гидрометеиздат, 246 с.

Борзенкова, И.И. (2003) Определение чувствительности глобального климата к газовому составу атмосферы по палеоклиматическим данным, *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*, т. 39, № 2, с. 222-228.

Борзенкова, И.И. (2016) История оледенения Арктического бассейна: взгляд из прошлого для оценки возможных изменений в будущем, *Лёд и снег*, т. 56, № 2, с. 221-234.

Борзенкова, И.И., Ершова, А.А., Жильцова, Е.Л., Шаповалова, К.О. (2021) Морской лёд Арктического бассейна в свете современных и прошлых климатических изменений, *Лёд и снег*, т. 61, № 4, с. 533-546.

Будыко, М.И. (1972) *Влияние человека на климат*, Л., Гидрометеиздат, 47 с.

Будыко, М.И. (1974) *Изменения климата*, Л., Гидрометеиздат, 280 с.

Будыко, М.И. (1985) Аэрозольные климатические катастрофы, *Природа*, № 6, с. 30-38.

Будыко, М.И., Винников, К.Я. (1976) Глобальное потепление, *Метеорология и гидрология*, № 7, с. 16-26.

Будыко, М.И., Винников, К.Я. (1983) Проблема обнаружения антропогенного изменения глобального климата, *Метеорология и гидрология*, № 9, с. 14-26.

Будыко, М.И., Голицын, Г.С., Израэль, Ю.А. (1985) *Глобальные климатические катастрофы*, Л., Гидрометеиздат, 158 с.

Будыко, М.И., Дроздов, О.А. (1953) Закономерности влагооборота в атмосфере, *Изв. АН СССР, сер. геогр.*, № 3, с. 3-11.

Булыгина, О.Н., Разуваев, В.Н., Александрова, Т.М. (2014) Описание массива данных «Характеристики снежного покрова на метеорологических станциях России и бывшего СССР», *Свидетельство государственной регистрации базы данных № 2014621201*, URL: <http://meteo.ru/data/165-snow-cover#описаниемассива-данных>.

Булыгина, О.Н., Дементьева, Т.В., Коршунова, Н.Н. (2020) Методика мониторинга климата на территории России: режим приземного ветра, в кн.: *Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов: Информационный сборник*, № 47, с. 22-32.

Верес, А.Н., Екайкин, А.А., Липенков, В.Я., Большиянов, А.В., Заровчатский, В.Н., Козачек, А.В., Тебенкова, Н.А., Туркеев, А.В. (2020) Предварительные результаты изучения климата центральной Антарктиды (станция Восток) за 2000 лет по данным снежно-фирновых кернов, в кн.: *Комплексные исследования природной среды Арктики и Антарктики*, Тезисы докладов международной научной конференции, с. 176-177.

Визе, В.Ю. (1937) *Причины потепления Арктики, Советская Арктика*, т. 1, с. 1-7.

Винников, К.Я., Гройсман, П.Я. (1979) Эмпирическая модель современных изменений климата, *Метеорология и гидрология*, № 3, с. 25-36.

Винников, К.Я., Гройсман, П.Я. (1982) Эмпирические исследования чувствительности климата, *Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана*, т. 18, № 11, с. 1159-1169.

Володин, Е.М., Мортиков, Е.В., Кострыкин, С.В. и др. (2017) Воспроизведение современного климата в новой версии модели климатической системы ИВМ РАН, *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана*, т. 53, № 2, с. 164-178.

Вулканы, стратосферный аэрозоль и климат Земли (1986) Под ред. С.С. Хмелевцова, Л., Гидрометеиздат, 254 с.

Гандин, Л.С., Каган, Р.Л. (1976) *Статистические методы интерпретации метеорологических данных*, Л., Гидрометеоиздат, 359 с.

Груза, Г.В., Ранькова, Э.Я. (1980) *Структура и изменчивость наблюдаемого климата. Температура воздуха Северного полушария*, Л., Гидрометеиздат, 172 с.

Груза, Г.В., Ранькова, Э.Я. (1989) Мониторинг и вероятностный прогноз короткопериодных колебаний климата, в кн.: *«60 лет Центру гидрометеорологических прогнозов»*, Л., Гидрометеиздат, с. 9-39.

Груза, Г.В., Ранькова, Э.Я. (2012) *Наблюдаемые и ожидаемые изменения климата России: температура воздуха*, Обнинск, ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД», 194 с., ISBN 978-5-901579-35-0.

Груза, Г.В., Ранькова, Э.Я., Рочева, Э.В. (2017) Методика «Мониторинг изменений климата земного шара: приземная температура» и результаты ее испытания, *Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов*, № 44, с. 3-11.

Груза, Г.В., Ранькова, Э.Я., Самохина, О.Ф. (2021) Особенности температурного режима у поверхности земного шара в 2020 году, *Фундаментальная и прикладная климатология*, № 2, с. 28-58.

Данилов, А.И., Клепиков, А.В. (2020) Состояние и перспективы российских исследований окружающей среды Антарктики, *Метеорология и гидрология*, № 2, с. 14-19.

Дзердзеевский, Б.Л. (1943) К вопросу потепления в Арктике, *Изв. АН СССР. Географо-геофизическая серия*, т. 2, с. 60-69.

Дзердзеевский, Б.Л. (1945) *Циркуляционные схемы в тропосфере Центральной Арктики*, М.-Л., Изд-во АН СССР, с. 21-58.

Добролюбов, Н.Ю., Семенов, С.М., Володин, Е.М., Богданович, А.Ю. (2023) Алгебраический алгоритм статистической оценки параметра биномиального распределения и пример его применения в одной глобальной геоинформационной задаче прикладной климатологии, *Метеорология и гидрология*, № 10, с. 16-24, doi:10.52002/0130-2906-2023-10-16-24.

Доклад о научно-методических основах для разработки стратегии адаптации к изменениям климата в Российской Федерации (2020) СПб., 120 с.

Долгин, И.М. (1968) *Климат свободной атмосферы Советской Арктики*, Л., Гидрометеиздат, 398 с.

Дроздов, О.А., Григорьева, А.С. (1963) *Влагооборот в атмосфере*, Л., Гидрометеиздат, 314 с.

Дроздов, О.А., Григорьева, А.С. (1971) *Многолетние циклические колебания атмосферных осадков над территорией СССР*, Л., Гидрометеиздат, 153 с.

Екайкин, А.А., Антипов, Н.Н., Большианов, Д.Ю., Веркулич, С.Р., Иванов, Б.В., Клепиков, А.В., Липенков, В.Я., Макаров, А.С., Радионов, В.Ф., Федорова, И.В., Фролов, И.Е. (2020) Основные результаты исследований Арктического и антарктического НИИ Росгидромета в Антарктике, *Вестник РФФИ*, № 3-4 (107-108), с. 99-114.

Ефимова, Н.А. (1977) *Радиационные факторы продуктивности растительного покрова*, Л., Гидрометеиздат, 216 с.

Заварина, М.В. (1976) *Строительная климатология*, Л., Гидрометеиздат, 312 с.

Зубаков, В.А., Борзенкова, И.И. (1983) *Палеоклиматы позднего кайнозоя*, Л., Гидрометеиздат, 214 с.

Зубенок, Л.И. (1963) Влияние аномалий температуры на ледяной покров Арктики, *Метеорология и гидрология*, № 6, с. 25-30.

Израэль Ю.А. (1974) Глобальная система наблюдений. Прогноз и оценка изменений состояния окружающей природной среды. Основы мониторинга, *Метеорология и гидрология*, № 7, с. 3-8.

Израэль, Ю.А. (1984) *Экология и контроль природной среды*, Л., Гидрометеиздат, 560 с.

Израэль, Ю.А. (1990) Философия мониторинга, *Метеорология и гидрология*, № 6, с. 5-10.

Израэль, Ю.А. (2005) Эффективный путь сохранения климата на современном уровне – основная цель решения климатической проблемы, *Метеорология и гидрология*, № 10, с. 5-9.

Израэль, Ю.А., Филиппова, Л.М., Ровинский, Ф.Я. и др. (1978) О программе комплексного фонового мониторинга состояния окружающей природной среды, *Метеорология и гидрология*, № 9, с. 5-11.

Израэль, Ю.А., Кунина, И.М., Семенов, С.М. (1989) Сравнительные оценки влияния озона, двуокиси серы и двуокиси азота на продуктивность высших растений, *Доклады Академии наук СССР*, т. 308, № 1, с. 247-250.

Израэль, Ю.А., Груза, Г.В., Катцов, В.М., Мелешко, В.П. (2001) Изменение глобального климата. Роль антропогенных воздействий, *Метеорология и гидрология*, № 5, с. 5-21.

Израэль, Ю.А., Сиротенко, О.Д. (2003) Моделирование влияния изменений климата на продуктивность сельского хозяйства, *Метеорология и гидрология*, № 6, с. 5-17.

Израэль, Ю.А., Борзенкова, И.И., Северов, Д.А. (2007) Роль стратосферных аэрозолей в сохранении современного климата, *Метеорология и гидрология*, № 1, с. 5-14.

Израэль, Ю.А., Захаров, В.М., Петров, Н.Н., Рябошапко, А.Г., Иванов, В.Н., Савченко, А.В., Андреев, Ю.В., Пузов, Ю.А., Данелян, Б.Г., Куляпин, В.П. (2009а) Натурный эксперимент по исследованию прохождения солнечного излучения через аэрозольные слои, *Метеорология и гидрология*, № 5, с. 5-15.

Израэль, Ю.А., Захаров, В.М., Петров, Н.Н., Рябошапко, А.Г., Иванов, В.Н., Савченко, А.В., Андреев, Ю.В., Ераньков, В.Г., Пузов, Ю.А., Данелян, Б.Г., Куляпин, В.П., Гулевский, В.А. (2009б) Натурные исследования геоинженерного метода сохранения современного климата с использованием аэрозольных частиц, *Метеорология и гидрология*, № 10, с. 5-10.

Израэль, Ю.А., Захаров, В.М., Иванов, В.Н., Петров, Н.Н., Андреев, Ю.В., Гулевский, В.А., Данелян, Б.Г., Ераньков, В.Г., Кирил, Д.В., Куляпин, В.П., Русаков, Ю.С., Савченко, А.В., Свиркунов, П.Н., Северов, Д.А., Фоломеев, В.В. (2011) Натурный эксперимент по моделированию влияния аэрозольных слоев на изменчивость солнечной инсоляции и метеорологических характеристик приземного слоя, *Метеорология и гидрология*, № 11, с. 5-14.

Израэль, Ю.А., Рябошапко, А.Г. (2011) Геоинженерия климата: возможности реализации, *Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем*, т. XXIV, ИГКЭ Росгидромета и РАН, Москва, с. 11-24.

Израэль, Ю.А., Рябошапко, А.Г. (2012) *Исследование возможностей стабилизации климата с помощью новых технологий*, М., Росгидромет, 178 с.

Калитин, Н.Н. (1920) К вопросу о времени наступления оптической аномалии в 1912 году, *Известия ГФО*, № 1, с. 11-17.

Кароль, И.Л. (1986) *Радиационно-фотохимические модели атмосферы*, Андронова, Н.Г., Бабанова, В.В., Кароль, И.Л., Киселев, А.А., Кудрявцев, А.П., Морозова, И.А., Розанов, Е.В., Фролькис, В.А., Л., Гидрометеиздат, 192 с.

Кароль, И.Л., Пивоварова, З.И. (1978) Связь изменений содержания стратосферных аэрозолей с колебаниями солнечной радиации, *Метеорология и гидрология*, № 9, с. 35-42.

Катцов, В.М., Мелешко, В.П. (2004) Сравнительный анализ моделей общей циркуляции атмосферы и океана, предназначенные для оценки будущих изменений климата, *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана*, т. 40, № 6, с. 647-658.

Катцов, В.М., Мелешко, В.П., Чичерин, С.С. (2007) Изменение климата и национальная безопасность Российской Федерации, *Право и безопасность*, № 1-2, с. 29-37.

Катцов, В.М., Порфирьев, Б.Н. (2017) Адаптация России к изменению климата: концепция национального плана, *Труды ГГО*, вып. 586, с. 7-20.

Катцов, В.М., Школьник, И.М., Ефимов, С.В. (2017а) Перспективные оценки изменений климата в российских регионах: детализация в физическом и вероятностном пространствах, *Метеорология и гидрология*, № 7, с. 68-80.

Катцов, В.М., Киселев, А.А., Мелешко, В.П., Павлова, Т.В. (2017 б) Глобальные изменения климата и основные сценарии и особенности изменений климата в Арктике: модели, оценки, прогнозы, в кн.: *«Социально-экономическое развитие Российской Арктики в контексте глобальных изменений климата»*, под ред. акад. Б.Н. Порфирьева, М., Научный консультант, с. 17-52.

Киотский протокол к рамочной Конвенции ООН об изменении климата (1997) Организация Объединенных Наций, 26 с., URL: <https://unfccc.int/resource/docs/convkp/kprus.pdf>.

Клепиков А.В. (2023) Российские исследования в области полярной метеорологии в 2019-2022 гг., *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*, т. 59, № 7, с. 915-929.

Клепиков, А.В., Данилов, А.И., Липенков, В.Я., Лейченков, Г.Л., Неелов, А.В. (2015) Основные результаты научных работ по подпрограмме "Изучение и исследование Антарктики" ФЦП "Мировой океана", *Проблемы Арктики и Антарктики*, т. 1(103), с. 19-31.

Клепиков, А.В., Данилов, А.И. (2021) Полярная метеорология (результаты российских исследований в 2015-2018 гг.), *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана*, т. 57, № 3, с. 261-277.

Клещенко, А.Д., Асмус, В.В., Страшная, А.И, Кровотынцев, В.А., Вирченко, О.В., Савицкая, О.В., Береза, О.В., Василенко, Е.В., Сухарева, В.В., Моргунов, Ю.А., Косякин, С.А. (2019) Мониторинг засух на основе наземной и спутниковой информации, *Метеорология и гидрология*, № 11, с. 95-108.

Климат городов (1979-1991) Под ред. Ц.А. Швер, Л., Гидрометеиздат.

Климат России (2001) Под ред. Н.В. Кобышевой и др., СПб., Гидрометеиздат, 655 с.

Климат СССР (1958-1963) Под. ред. А.Н. Лебедева, вып. 1-6, Л., Гидрометеиздат.

Климатическая доктрина Российской Федерации (2009) Утверждена распоряжением Президента Российской Федерации от 17 декабря 2009 г. № 861-рп, обновленная версия Климатической доктрины РФ подписана Президентом РФ 26.10.2023, 20 с.

Климатические параметры Байкало-Амурской магистрали (1977) Под ред. Анапольской, Л.Е., Копанева, И.Д., Л., Гидрометеиздат, 132 с.

Климатический атлас СССР (1958, 1960, 1962) Под ред. Ф.Ф. Давитая, т. 1, 2, М., ГУГМС.

Климатический справочник по СССР (1932) Под ред. А.А. Каминского, Е.С. Рубинштейн, Л., ГГО, 261 с.

Кобышева, Н.В., Акентьева, Е.М., Галюк, Л.П. (2015) *Климатические риски и адаптация к изменениям и изменчивости климата в технической сфере*, СПб., «Издательство Кирилица», 213 с.

Кондратьев, К.Я. (1965) *Актинометрия*, Л., Гидрометеиздат, 692 с.

Кондратьев, К.Я. и др. (1973) *Влияние аэрозоля на перенос излучения и возможные климатические последствия*, Л., Из-во ЛГУ, 266 с.

Лавров, А.С., Стерин, А.М. (2017) Результаты сопоставления рядов температуры свободной атмосферы по данным радиозондовых и спутниковых наблюдений, *Метеорология и гидрология*, № 2, с. 30-44.

Лагун, В.Е., Клепиков, А.В., Данилов, А.И. (2017) Полярная метеорология (результаты российских исследований в 2011-2014 гг.), *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*, т. 53, № 5, с. 641-657.

Липенков, В.Я., Паррена, Ф. (2020) Основные результаты работы российско-французской международной ассоциированной лаборатории «Ледниковые архивы данных о климате и окружающей среде», «Комплексные исследования природной среды Арктики и Антарктики», тезисы докладов международной научной конференции, с. 87-89.

Малеvский-Малеvич, С.П., Молькентин, Е.К., Надежина, Е.Д. и др. (2001) Моделирование современных и прогностических распределений температуры грунтов в зоне вечной мерзлоты на территории России, *Материалы второй конф. геокриологов России*, М., Из-во МГУ, т. 2, с. 189-196.

Методика (2012) *Методика мониторинга климата на территории Российской Федерации: температура приземного воздуха, атмосферные осадки*, Решение Центральной методической комиссии по гидрометеорологическим и гелиогеофизическим прогнозам от 13 декабря 2012 г., ФГБУ «ИГКЭ Росгидромета и РАН», коллектив авторов под руководством Груза, Г.В., URL: <https://method.meteorf.ru/>.

Методические рекомендации по расчету специализированных климатических характеристик для обслуживания различных отраслей экономики. Строительство. Транспорт (2017) СПб., ООО «Амирит», 162 с.

Методические рекомендации по расчету специализированных климатических характеристик для обслуживания различных отраслей экономики. Энергетика (2022) СПб., ООО «Амирит».

Мещерская, А.В., Яковлева, Н.И. (1965) Уточнение естественных функций полей геопотенциала (давления) атлантико-европейского сектора, *Труды ГГО*, вып. 168.

Мирвис, В.М., Мелешко, В.П. (2008) Современное состояние и перспективы развития метеорологических прогнозов на месяц и сезон, *Труды ГГО*, вып. 558, с. 3-40.

Мировой водный баланс и водные ресурсы Земли (1974) Л., Гидрометеоздат, 638 с.

Монин, А.С. (1969) *Прогноз погоды как задача физики*, М., Наука, 184 с.

Научно-прикладной справочник по климату России (Арктический регион) (1997) Солнечная радиация, СПб., Гидрометеоздат, 230 с.

Океанография и морской лед (2011) Сер. «Вклад России в Международный полярный год 2007/2008, под ред. И.Е. Фролова, Москва-СПб., Изд. ООО «Паульсен», 431 с.

Павлова, В.Н., Карачёнокa, А.А. (2023) Изменение агроклиматических ресурсов зернопроизводящих регионов России и продуктивности зерновых культур в новом климатическом периоде 1991-2020 гг., *Метеорология и гидрология*, № 9, с. 29-42, ISSN 0130-2906, doi: 10.52002/0130-2906-2023-9-29-42.

Павлова, Т.В., Катцов, В.М., Надёжина, Е.Д., Спорышев, П.В., Говоркова, В.А. (2007) Расчет эволюции криосферы в XX и XXI веках с использованием глобальных климатических моделей нового поколения, *Криосфера Земли*, т. 11, № 2, с. 3-13.

Палеоклимат полярных областей Земли в голоцене (2019) Под ред. Д.Ю. Большаянова, С.Р. Веркулича, СПб., ААНИИ, 204 с.

Парижское соглашение (2015) *Рамочная конвенция Организации Объединенных наций об изменении климата*, Организация Объединенных Наций, 30 с., URL: https://unfccc.int/files/essential_background/convention/application/pdf/russian_paris_agreement.pdf.

Пивоварова, З.И. (1977) *Радиационные характеристики климата СССР*, Л., Гидрометеиздат, 366 с.

Пивоварова, З.И., Стадник, В.В. (1988) *Климатические характеристики солнечной радиации как источника энергии на территории СССР*, Л., Гидрометеиздат.

Пикалева, А.А., Надежина, Е.Д., Стернзат, А.В., Борисенко, В.А., Школьник, И.М. (2016) Исследование эволюции вечной мерзлоты на территории России с помощью моделей пограничного слоя атмосферы и теплопередачи в грунтах, *Труды ГГО*, вып. 581, с. 24-40.

Порфирьев, Б.Н., Катцов, В.М., Рогинко, С.А. (2011) *Изменение климата и международная безопасность*, под ред. А.И. Бедрицкого, В.В. Ивантера, Москва, 290 с.

Прик, З.М. (1965) *Климат Советской Арктики (метеорологический режим)*, Л., Гидрометеиздат, 279 с.

Радионон, В.Ф., Русина, Е.Н., Сибир, Е.Е. (2007) Специфика многолетней изменчивости суммарной солнечной радиации и характеристик прозрачности атмосферы в полярных областях, *Проблемы Арктики и Антарктики*, № 76, с. 131.

Радионон, В.Ф., Русина, Е.Н., Сибир, Е.Е. (2017) Многолетняя изменчивость годовых сумм суммарной и поглощенной радиации в Арктике, *Проблемы Арктики и Антарктики*, № 3, с. 38-50.

Радионон, В.Ф., Русина, Е.Н., Сибир, Е.Е. (2020) Многолетние изменения интегральной и спектральной прозрачности атмосферы по данным наблюдений в обсерватории Мирный (Антарктида), *Проблемы Арктики и Антарктики*, № 2, с. 35-44.

Риль, Г. (1963) *Тропическая метеорология*, пер. с англ., М., Изд-во иностр. лит., 366 с.

Романов, И.П. (1993) *Атлас морфометрических характеристик льда и снега в Арктическом бассейне*, Санкт-Петербург, 152 с.

Романовская, А.А. (2023) *Оценка потоков парниковых газов в экосистемах регионов Российской Федерации*, Москва, ИГКЭ, ООО «Принт», 346 с.

Росгидромет (2008) *Оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации*, под ред. А.И. Бедрицкого и др., М., Росгидромет, т. 1 (230 с.), т. 2 (291 с.).

Росгидромет (2014) *Второй оценочный доклад Росгидромета об изме-*

нениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации, под ред. В.М. Катцова, С.М. Семенова, М., Росгидромет, 1008 с.

Росгидромет (2022) *Третий оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации*, под ред. В.М. Катцова, М., Росгидромет, 676 с.

Русин, Н.П. (1961) *Метеорологический и радиационный режим Антарктиды*, Л., Гидрометеиздат, 446 с.

Русина, Е.Н., Радионов, В.Ф. (2002) Оценка «доиндустриальной» оптической толщины атмосферы при полярной дымке в Арктике и современного вклада антропогенных выбросов, *Метеорология и гидрология*, № 5, с. 35-39.

Савинов, С.И. (1913) Наибольшие величины напряжения солнечной радиации по наблюдениям в Павловске с 1892, *Изв. АН СССР. Сер. 6*, т. 7, № 12, с. 707-720.

Сакунов, Г.Г., Бартенева, О.Д., Радионов, В.Ф., Тимерев, А.А., Воскресенский, А.И., Аднашкин, В.Н. (1981) *Оптические свойства атмосферы Арктического бассейна, Первый глобальный эксперимент ПИГАП, Полярный аэрозоль, протяжённая облачность и радиация*, т. 2, Л., Гидрометеиздат, с. 73-88.

Семенов, С.М. (2004) *Парниковые газы и современный климат Земли*, Издательский центр «Метеорология и гидрология», Москва, 175 с.

Семенов, С.М. (2015) Парниковый эффект: открытие, развитие концепции, роль в формировании глобального климата и его антропогенных изменений, *Фундаментальная и прикладная климатология*, № 2, с. 103-126.

Семенов С.М. (2022) Парниковый эффект и современный климат, *Метеорология и гидрология*, № 10, с. 5-17.

Семенов, С.М., Кунина, И.М., Кухта, Б.А. (1998) Сравнение антропогенных изменений приземных концентраций O_3 , SO_2 и CO_2 в Европе по экологическому критерию, *Доклады Академии наук*, т. 361, № 2, с. 275-279.

Семенов, С.М., Гельвер, Е.С., Ясюкевич, В.В. (2002) Температурные условия для развития двух видов возбудителей малярии в организме переносчика на территории России в XX веке, *Доклады Академии наук. Общая биология*, т. 387, № 1, с. 131-136.

Семенов, С.М., Гельвер, Е.С., Кухта, Б.А. (2004) О нелинейности климатогенных изменений сроков фенологических явлений у древесных растений, *Доклады Академии наук. Общая биология*, т. 396, № 3, с. 427-429.

Семенов, С.М., Ясюкевич, В.В., Гельвер, Е.С. (2006) *Выявление климатогенных изменений*, Издательский центр «Метеорология и гидрология», Москва, 324 с.

Семенов, С.М., Попов, И.О. (2011) Сравнительные оценки влияния изменения концентраций диоксида углерода, метана, закиси азота и водяного

пара на радиационно-равновесную температуру земной поверхности, *Метеорология и гидрология*, № 8, с. 34-43.

Семенов, С.М., Попов, И.О., Ясюкевич, В.В. (2020) Статистическая модель для оценки формирования климатических угроз по данным мониторинга климата, *Метеорология и гидрология*, № 5, с. 59-65.

Сиротенко, О.Д. (1981) *Математическое моделирование водно-теплого режима и продуктивности агроэкосистем*, Л., Гидрометеиздат, 167 с.

Спорышев, П.В., Мирвис, В.М., Катцов, В.М., Мелешко, В.П., Ранькова, Э.Я. (2008) *Антропогенный вклад в изменение климата, Оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации*, под ред. А.И. Бедрицкого и др., т. I, Изменения климата, Росгидромет, с. 152-173.

Справочник по климату СССР (1965-1970) Т. 1-170, Л., Гидрометеиздат.

Стерин, А.М. (1999) Анализ линейных трендов в рядах температуры свободной атмосферы за 1958-1997 гг., *Метеорология и гидрология*, № 5, с. 52-68.

Стерин, А.М. (2004а) О чувствительности оценок трендов температуры тропосферы и нижней стратосферы по данным радиозондирования. 1: Выбор массива данных, периода рядов и техники их анализа, *Метеорология и гидрология*, № 5, с. 21-36.

Стерин, А.М. (2004б) О чувствительности оценок трендов температуры тропосферы и нижней стратосферы по данным радиозондирования. 2: Обнаружение неоднородностей в рядах месячного разрешения, *Метеорология и гидрология*, № 6, с. 5-22.

Стерин, А.М., Лавров, А.С. (2022) Использование квантильной регрессии для оценки пространственных особенностей характеристик трендов приземной температуры на территории России, *Фундаментальная и прикладная климатология*, т. 8, № 2, с. 92-111.

Теоретические и экспериментальные основы стабилизации современного климата путем создания аэрозольных образований в нижней стратосфере (2019) Под ред. Ю.А. Израэля, М., 285 с.

Тимофеев, В.Т. (1944) Водные массы Норвежского и Гренландского морей и их динамика, *Труды Арктического научно-исследовательского института Главного управления Северного Морского пути при СНК СССР*, т. 183, с. 264.

Толстых, М.А., Желен, Ж.Ф., Володин, Е.М. и др. (2015) Разработка многомасштабной версии глобальной модели атмосферы ПЛАВ, *Метеорология и гидрология*, № 6, с. 25-35.

ТРОПЭКС-74 (1976) *Труды Межведомственной экспедиции по программе международного Атлантического тропического эксперимента. Ат-*

мосфера, т. 1, под ред. М.А. Петросянца, Гидрометеиздат, 736 с.

Успенский, А.Б. (2021) 60 лет спутниковой метеорологии, *Метеорология и гидрология*, № 12, с. 144.

Фадеев, Р.Ю., Шашкин, В.В., Толстых, М.А., Травова, С.В., Мизяк, В.Г., Рогутов, В.С., Алипова К.А. (2021) Развитие системы долгосрочного прогноза Гидрометцентра России в 2020 году, *Гидрометеорологические исследования и прогнозы*, № 1(379), с. 58-72.

Фролов, С.В., Федяков, В.Е., Третьяков, В.Ю., Клейн, А.Э., Алексеев, Г.В. (2009) Новые данные об изменении толщины льда в арктическом бассейне, *Доклады Академии наук. География*, т. 425, № 1, с. 104-108.

Хайруллин, К.Ш. (1969) *Оттепели на территории СССР*, Л., Гидрометеиздат, 88 с.

Хан, В.М., Вильфанд, Р.М., Тищенко, В.А., Емелина, С.В., Грицун, А.С., Володин, Е.М., Воробьева, В.В., Тарасевич, М.А. (2023) Оценка изменений температурного режима по Северной Евразии на предстоящее пятилетие по прогнозам модели Земной системы ИВМ РАН и их возможных последствий для сельского хозяйства, *Метеорология и гидрология*, № 9, с. 14-28.

Хлебникова, Е.И., Салль, И.А. (1989) Об оценке характеристик выбросов гауссовских метеорологических полей и их чувствительности, *Труды ГГО*, вып. 525, с. 44-51.

Хлебникова, Е.И., Дацюк, Т.А., Салль, И.А. (2014) Воздействие изменений климата на строительство, наземный транспорт, топливно-энергетический комплекс, *Труды ГГО*, вып. 574, с.125-178.

Хлебникова, Е.И., Школьник, И.М., Рудакова, Ю.Л. (2022) Статистическая интерпретация климатических данных для обеспечения потребностей экономики РФ, *Фундаментальная и прикладная климатология*, т. 8, № 1, с. 33.

Хромов, С.П. (1959) Атмосферная циркуляция и погода на пути «Оби» в плавании 1956-1957 гг., *Труды Советской антарктической экспедиции (САЭ)*, том 5, с. 27-83.

Черниговский, Н.Т., Маршунова, М.С. (1965) *Климат Советской Арктики (радиационный режим)*, Л., Гидрометеиздат, 198 с.

Чуканин, К.И. (1969) Влияние теплового состояния полярных районов на вихревую деятельность в атмосфере, *Проблемы Арктики и Антарктики*, вып. 30, с. 66-72.

Шерстюков, А.Б. (2012) Массив суточных данных о температуре почвогрунтов на глубинах до 320 см по метеорологическим станциям Российской Федерации, *Труды ВНИИГМИ-МЦД*, вып. 176, с. 233-256.

Шерстюков, А.Б., Шерстюков, Б.Г. (2015) Пространственные особенности и новые тенденции в изменениях термического состояния почвогрунтов

и глубины их сезонного протаивания в зоне многолетней мерзлоты, *Метеорология и гидрология*, № 2, с. 5-12.

Шерстюков, Б.Г. (2021) Лесные пожары России в условиях изменяющегося климата, *Труды ВНИИГМИ-МЦД*, вып. 188. с. 30-48

Шикломанов, И.А., Георгиевский В.Ю. (2002) Влияние антропогенных изменений климата на гидрологический режим и водные ресурсы, в кн.: *Изменения климата и их последствия*, СПб., Наука, с. 152-164.

Шикломанов, И.А., Шикломанов, А.И. (2003) Изменение климата и динамика притока речных вод в Северный Ледовитый океан, *Водные ресурсы*, т. 30, № 6, с. 645-654.

Шифрин, К.С. (1951) *Рассеяние света в мутной среде*, Москва, 288 с.

Энциклопедия климатических ресурсов (2005) Под ред. Н.В. Кобышева, К.Ш. Хайруллин, СПб., Гидрометеиздат, 320 с.

Янишевский, Ю.Д. (1957) *Актинометрические приборы и методы наблюдений*, Л., Гидрометеиздат.

Alekseev, G., Kuzmina, S., Bobylev, L., Urazgildeeva, A., Gnatiuk, N. (2019) Impact of atmospheric heat and moisture transport on the Arctic warming, *Int. J. Climatol.*, vol. 39, no. 8, pp. 1-11.

Alekseev, G.V., Glok, N.I., Vyazilova, A.E. et al. (2021) Influence of SST in low latitudes on the Arctic warming and sea ice, *J. Mar. Sci. Eng.*, vol. 9, no. 1145.

Borzenkova, I.I., Ershova, A.A., Zhiltsova, E.L. Shapovalova, K.O. (2023) Arctic sea ice in the light of current and past climate changes, *Isvestiya RAN, Seria atmospheric and ocean physics*, vol. 59, Suppl. 1, pp. S35-S46.

IPCC (2021) *Summary for Policymakers. In: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Pèan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.), Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 3–32, doi:10.1017/9781009157896.001, URL: https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WG1_SPM.pdf.

Jouzel, J., Lorius, C., Petit, J.R., Genthon, C., Barkov, N.I., Kotlyakov, V.M., Petrov, V.M. (1987) Vostok ice core: a continuous isotope temperature record over the last climatic cycle (160,000 years), *Nature*, vol. 329, pp. 403-408.

Jouzel, J., Barkov, N.I., Barnola, J.M., Bender, M., Chappellaz, J., Genthon, C., Kotlyakov, V.M., Lipenkov, V., Lorius, C., Petit, J.R., Raynaud, D., Raisbeck, G., Ritz, C., Sowers, T., Stievenard, M., Yiou, F., Yiou, P. (1993) Extending the Vostok ice-core record of palaeoclimate to the penultimate glacial period, *Nature*, vol. 364, pp. 407-412.

Jouzel, J., Waelbroeck, C., Malaize, B., Bender, M., Petit, J.R., Stievenard, M., Barkov, N.I., Barnola, J.M., King, T., Kotlyakov, V.M., Lipenkov, V., Lorius, C., Raynaud, D., Ritz, C., Sowers, T. (1996) Climatic interpretation of the recently extended Vostok ice records, *Climate Dynamics*, vol. 12, pp. 513-521.

Marshunova, M.S., Chernigovskii, N.T. (1978) *Radiation Regime of the Foreign Arctic*, Indian National Scientific Documentation Centre, New Delhi, 189 p.

Peterson, B.J., Holmes, R.M., McClelland, J.W., Vorosmarty, C.J., Lammers, R.B., Shiklomanov, A.I., Shiklomanov, I.A., Rahmstorf, S. (2002) Increasing river discharge to the Arctic Ocean, *Science*, vol. 298, pp. 2171-2173.

Volodin, E.M., Gritsun, A.S. (2020) Simulation of possible future climate changes in the 21st century in the INM-CM5 climate model, *Izvestiya, Atmospheric and Ocean Physics*, vol. 56, no. 3, pp. 218-228.

Zubakov, V.A., Borzenkova, I.I. (1990) *Global Palaeoclimate of the Late Cenozoic. Ser. Developments in Palaeontology and Stratigraphy*, 12, Elsevier Sci. Publ., 472 p.

References

Alekseev, G.V., Zakharov, V.F., Radionov, V.F. (2000) Dinamika klimata Arktiki v XX stoletii. Problemy gidrometeorologii okruzhaushchei sredy na poroge XXI veka [Arctic climate changes during 100 years. Problems of the Hydrometeorology of the environment at the beginning of the XXI century], *V Trudy Mezhdunarodnoi teoreticheskoi konferentsii 1999* [Proceedings of the International Theoretic conference 1999], St. Petersburg, Russia, pp. 141-146.

Alekseev, G.V., Bol'shiyanov, D.Yu., Radionov, V.F., Frolov, S.V. (2015) 95 let issledovaniy klimata i kriosfery Arktiki v AANII [95 years of Arctic climate and cryosphere research at AARI], *Led i sneg*, vol. 55, no. 4, pp. 127-140, doi:10.15356/2076-6734-2015-4-127-140.

Alekseev, G.V., Harlanenkova, N.E., Ivanov, N.E., Glok, N.I. (2024) Monitoring izmenenij klimata v morskoy Arktike [Monitoring climate change in the marine Arctic], *Problemy Arktiki i Antarktiki*, vol. 70, no. 1, pp. 33-45, doi:10.30758/0555-2648-2024-70-1-33-45.

Anapol'skaya, L.E. (1961) *Rezhim vetra na territorii SSSR* [The wind regime on the USSR territory], Leningrad, Russia.

Anapolskaya, L.E., Gandin, L.S. (1973) *Meteorologicheskie faktory teplovogo rezhima zdaniy* [Meteorology factors of the warm regime of the buildings], Leningrad, Russia, 285 p.

Anisimov, O.A., Lavrov, S.A. (2004) Global'noe poteplenie i tayanie vечноy merzloty: riski dlya proizvodstvennykh ob'ektov TEK [Global warming and permafrost melting: risks for industrial objects TEK], *Tekhnologii TEK*, no. 3, pp. 78-83.

Anisimov, O.A., Zhirkov, A.F., Sherstukov, A.B. (2015) Sovremennyye izmeneniya kriosfery i prirodnoi sredy v Arktike [Current changes in cryosphere and environment in Arctic], *Arktika. XXI vek* [Arctic. XXI century], no. 2 (3), pp. 24-47.

Anisimov, O.A., Streletskii, D.A. (2015) Geokriologicheskie riski pri tayanii mnogoletnemerzlykh gruntov [Geocryologic risks during the permafrost melting], *Arktika. XXI vek* [Arctic. XXI century], no. 2 (3), pp. 60-74.

Antropogennyye izmeneniya klimata [Man's impact on climate changes] (1987) In M.I. Budyko, Yu.A. Izrael' (eds.), Leningrad, Russia, 406 p.

Asmus, V.V. (2022) *Primenenie sputnikovoi informatsii dlya resheniya zadach gidrometeorologii i monitoring okruzhayushchei sredy* [Using satellite data for the decision of the problem of the hydrometeorological and environmental], Moscow, Russia, 89 p.

Atlas teplovogo balansa [Atlas of the heat balance] (1955) In M.I. Budyko (ed.), Leningrad, 41 p.

Atlas teplovogo balansa Zemnogo shara [Atlas of the heat balance of the Earth] (1963) In M.I. Budyko (ed.), Moscow, Russia, 69 p.

Atlasy vetrovogo i solnechnogo klimata of Russian [Wind and solar climate atlases of the Russian territory] (1997) In M.M. Borisenko, V.V. Stadnik (eds.), St. Petersburg, Russia.

Bardin, M.Yu., Platova, T.V., Samokhina, O.F. (2015) Osobennosti nabludaemykh izmenenii klimata na territorii Severnoi Evrasii po dannym regul'yarnogo monitoring i vozmozhnye ikh faktory [Peculiarity of the climate changes on the Northern part of the Euroasian by using regulate monitoring and possible factors], *V Trudy GMTs* [Proceedings of the GMTs], no. 358, pp. 13-35.

Bardin, M.Yu., Ran'kova, E.Yu., Platova, T.V., Samokhina, O.F., Korneva, I.A. (2020) Sovremennyye izmeneniya prizemnogo klimata po rezul'tatam regul'yarnogo monitoring [The present surface climate changes by using regulate monitoring], *Meteorologiya i gidrologiya*, no. 5, pp. 29-45.

Barkov, N.I., Vostretsov, R.N., Lipenkov, V.Ya., Salamatin, A.N. (2002) Kolebaniya temperatury vozdukh i osadkov nastantsii Vostok na protyazhenii chetyrekh klimaticheskikh tsiklov za posledniy 420 tysyach let [Fluctuations of the air temperature and rainfall during four climatic cycles for the last 420,000 years at the Vostok station], *Arktika i Antarktika*, issue 1(35), pp. 82-97.

Berlyand, T.G. (1961) *Raspredelenie solnechnoi radiatsii na kontinentakh* [Distribution of the solar radiation on the continents], Leningrad, Russia, 255 p.

Blinova, E.N. (1943) Gidrodinamicheskaya teoriya voln davleniya, temperaturnykh voln i tsentrov deistviya atmosfery [Hydrodynamics theory of the pressure wave, temperature wave and the active center of the atmosphere], *DAN USSR*, issue 39, no. 3.

Borzenkova, I.I. (1974) K voprosy o vozmozhnykh vliyaniyakh vulkanicheskoi pyli na radiatsionnyi i termicheskii rezhim [About influence of the volcanic ash on the radiation and temperature regime], *Trudy GGO*, vol. 307, pp. 36-42.

Borzenkova, I.I. (1992) *Izmenenie klimata v kainozoe* [The climate changes in the Cenozoic], St. Petersburg, Russia, 246 p.

Borzenkova, I.I. (2003) Opreделение chuvstvitel'nosti global'nogo klimata k gazovomu sostavu atmosfery po paleoklimaticheskim dannym [Determination of the global climate sensitivity to the gas composition of the atmosphere by using of the paleoclimatic data], *Izvestiya RAN. Fizika atmosfery i okeana*, vol. 39, no. 2, pp. 222-228.

Borzenkova, I.I. (2016) Istoriya oledeneniya Arkticheskogo basseina: vzglyad iz proshlogo dlya otsenki vozmozhnykh izmenenii v budushchem [History of the sea-ice in the Arctic basin: Lesson from the past for future], *Led i Sneg*, vol. 56, no. 2, pp. 221-234.

Borzenkova, I.I., Ershova, A.A., Zhiltsova, E.L., Shipovalova, K.O. (2021) Morskoi led Arkticheskogo basseina v svete sovremennykh i proshlykh klimaticheskikh izmenenii [Arctic sea ice in the light of current and past climate changes], *Led i Sneg*, vol. 61, no. 4, pp. 533-546.

Budyko, M.I. (1972) *Vliyanie cheloveka na klimat* [Man's influence on climate], Gidrometeoizdat, Leningrad, Russia, 47 p.

Budyko, M.I. (1974) *Izmenenie klimata* [Climate change], Leningrad, Russia, 280 p.

Budyko, M.I. (1985) Aerol'nye klimaticheskie katastrofy [Aerosol climatic catastrophes], *Priroda*, no. 6, pp. 30-38.

Budyko, M.I., Vinnikov, K.Ya. (1976) Global'noe poteplenie [Global warming], *Meteorologiya i gidrologiya*, no. 10, pp. 3-7.

Budyko, M.I., Vinnikov, K.Ya. (1983) Problema obnaruzheniya antropogennogo izmeneniya klimata [Problem of detection of the anthropogenic global climate change], *Meteorologiya i gidrologiya*, no. 9, pp. 14-26.

Budyko, M.I., Golitsyn, G.S., Izrael', Yu.A. (1985) *Global'nye klimaticheskie katastrofy* [Global climatic catastrophes], Leningrad, Russia, 158 p.

Budyko, M.I., Drosdov, O.A. (1953) Zakonomernosti vlagooborota v atmosfere [Characteristics of the moisture circulation in the atmosphere], *Izvestiya AN SSSR, geografical ser.*, no. 3, pp. 3-11.

Bulygina, O.N., Rasuvaev, V.N., Aleksandrova, T.M. (2014) Opisanie massiva dannykh "Kharakteristiki snezhnogo pokrova na meteorologicheskikh stantsiyakh Rossii i byvshego SSSR" [Data massiv description "Snow cover on the meteorological stations on the Russian territory and territory of the former of the USSR"], *Svidetel'stvo o gosudarstvennoi registratsii basy dannykh № 2014621201* [Licence about state registration data bank № 2014621201], URL: <http://meteo.ru/data/165-snow-cover#описаниемассива-данных>.

Bulygina, O.N., Dement'eva, T.V., Korshunova, N.N. (2020) Metodika monitoring klimata na territorii Rossii: rezhim prizemnogo vetra [Climate monitoring on the Russian territory: wind near surface], *Rezultaty ispytatiya novykh i usovershenstvovannykh tekhnologii, modeli i metodov gidrometeorologicheskikh prognozov: Informazionnyi sbornik* [Results of the test of the new and improvement technology, models and methods hydrometeorological forecasts], no. 47, pp. 22-32.

Veres, A.N., Ekaikin, A.A., Lipenkov, V.Ya., Bol'shiyanov, A.V., Zarovchatskii, V.N., Kozachek, A.V., Teben'kova, N.A., Turkeev, A.V. (2020) Predvaritel'nye rezultaty izucheniya klimata zentral'noi Antarktidi (stanzhiya Vostok) za 2000 let po dannym snezhno-firnovykh kernov [Preliminary results about climate changes in the central Antarctic (station Vostok) during the last 2000 years by using snow-fern cores], *Kompleksnye issledovaniya prirodnoi sredy Arktiki i Antarktiki* [Complex investigations Arctic and Antarctic nature], Thesis of the international conference, pp. 176-177.

Vize, V.Yu. (1937) Prichiny potepleniya Arktiki [Causes of Arctic warming], *Sovetskaya Arktika*, vol. 1, pp. 1-7.

Vinnikov, K.T., Groisman, P.Ya. (1979) Empiricheskaya model' sovremennykh izmenenii klimata [Empirical model of the current climate changes], *Meteorologiya i gidrologiya*, no. 3, pp. 25-36.

Vinnikov, K.T., Groisman, P.Ya. (1982) Empiricheskie issledovaniya chuvstvitel'nosti klimata [Empirical investigations of the sensitivity of the climate], *Izvestiya AN SSSR, fizika atmosfery i okeana*, vol. 18, no. 11, pp. 1159-1169.

Vozmozhnosti predotvashcheniya izmeneniya klimata i ego negativnykh posledstviy. Problema Kiotskogo protokola [Possibilities prevention climate changes and negative consequence. Problems of the Kyota protocol] (2006) In Yu.A. Izrael (ed.), Nauka, Moscow, Russia, 408 p.

Volodin, E.M., Mortikov, E.V., Kostykin, S.V. et al. (2017) Vosproizvedenie sovremennogo klimata v novoi versii modeli klimaticheskoi sistemy IBM RAN [Reproduction of the present climate by using new version of the climate model IBM RAN], *Izvestiya RAN, fizika atmosfery i okeana*, vol. 53, no. 2, pp. 164-178.

Vulkany, stratosfernyi aerol' i klimat Zemli [Volcanos, stratospheric aerosol and the Earth's climate] (1986) In S.S. Khmelevtsova (ed.), Leningrad, Russia, 254 p.

Gandin, L.S., Kagan, R.L. (1976) *Statisticheskie metody interpretatsii meteorologicheskikh dannykh* [Statistical methods of the meteorological data interpretation], Leningrad, Russia, 359 p.

Gruza, G.V., Ran'kova, E.Ya. (1980) *Struktura i izmen'chivost' nablyudaemogo klimata. Temperatura vozdukha Severnogo polushariya* [The structure and variability of the modern climate. The air temperature], Leningrad, Russia, 172 p.

Gruza, G.V., Ran'kova, E.Ya. (1989) Monitoring i veroyatnostnoi prognoz korotkoperiodnykh kolebaniy klimata [The monitoring and a likely forecast of the short-term climatic oscillations], *60 let Tsentru gidrometeorologicheskikh prognozov* [60 years of the Center of the Hydrometeorological forecast], Leningrad, Russia, pp. 148-170.

Gruza, G.V., Ran'kova, E.Ya. (2012) *Nablyudaemye i ozhidaemye izmeneniya klimata Rossii: temperatura vozdukh* [Present and forthcoming climate changing on the Russian territory: air temperature], Obninsk, Russia, 194 p.

Gruza, G.V., Ran'kova, E.Ya., Rocheva, E.V. (2017) Metodika "Monitoring izmenenii klimata zemnogo shara: prizemnaya temperatura" i rezul'taty ye ispytaniya [Methodika "Monitoring of the Earth's climate changes: air temperature of the near surface and results of their changes], *Rezultaty ispytaniya novykh i usovershenstvovannykh tekhnologii, modeli i metodov gidrometeorologicheskikh prognozov* [Results of the test of the new and improved technology, models and methods of the hydrometeorological forecasts], no. 44, pp. 3-11.

Gruza, G.V., Ran'kova, E.Ya., Samokhina, O.F. (2021) Osobennosti temperaturnogo rezhimau povekhnosti zemnogo shara v 2020 godu [Peculiarities of the temperature regime near surface of the Earth in 2020 year], *Fundamental'naya i prikladnaya klimatologiya*, no. 2, pp. 28-58.

Danilov, A.I., Klepikov, A.V. (2020) Sostoyanie I perspektivy rossijskikh issledovaniy okruzhayushchej sredy Antarktiki [State and prospects of Russian environmental research in Antarctica], *Meteorologiya i gidrologiya*, no. 2, pp. 14-19.

Dzerdzeevskij, B.L. (1943) K voprosu potepleniya v Arktike [On the issue of warming in the Arctic], *Izvestiya Akademii nauk SSSR. Geografo-geofizicheskaya seriya*, vol. 2, pp. 60-69.

Dzerdzeevskii, B.L. (1945) *Zirkulyatsionnye skhemy v troposphere Zentral'noi Arktiki* [Atmospheric circulation in the troposphere of the Central Arctic], Moscow-Leningrad, Russia, pp. 21-58.

Dobrolubov, N.Yu., Semenov, S.M., Volodin, E.M., Bogdanovich, A.Yu. (2023) Algebraicheskiy algoritm statisticheskoi otsenki parametra binomial'nogo raspredeleniya i primer ego primeneniya v odnoi global'noi geoinformatsionnoi zadache prikladnoi klimatologii [Algebraical algorithm of the statistical estimation of the parameter binomialic systematization and example thear using in one of the global geoinformational problem of the applied climatology], *Meteorologiya i gidrologiya*, no. 10, pp. 16-24.

Doklad o nauchno-metodicheskikh osnovakh dlya rasrabotki strategii adaptatzii k izmeneniyam klimata v Rossiskoi Federatzii [Report about scientific-methodical foundation for the elaboration to the adaptation of the climate changes] (2020) St. Petersburg, Russia, 120 p.

Dolgin, I.M. (1968) *Klimat svobodnoj atmosfery Sovetskoj Arktiki* [Climate of the free atmosphere of the Soviet Arctic], Leningrad, Russia, 398 p.

Drozdov, O.A., Grigor'eva, A.S. (1963) *Vlagooborot v atmosfere* [The water cycle in the atmosphere], Leningrad, Russia, 314 p.

Drozdov, O.A., Grigor'eva, A.S. (1971) *Mnogoletnii tsiklicheskie kolebaniya atmosferykh osadkov na territorii* [Long-term cycle fluctuation in the atmospheric precipitation over the USSR territory], Leningrad, Russia, 153 p.

Ekajkin, A.A., Antipov, N.N., Bol'shiyanov, D.Yu., Verkulich, S.R., Ivanov, B.V., Klepikov, A.V., Lipenkov, V.Ya., Makarov, A.S., Radionov, V.F., Fedorova, I.V., Frolov, I.E. (2020) Osnovnye rezul'taty issledovaniy Arkticheskogo i antarkticheskogo NII Rosgidrometa v Antarktike [Main results of research by the Arctic and Antarctic Research Institute of Roshydromet in Antarctica], *Vestnik RFFI*, № 3-4(107-108), pp. 99-114, doi: 10.22204/2410-4639-2020-106-107-3-4-99-118.

Efimova, N.A. (1977) *Radiatsionnye faktory produktivnosti rastitel'nogo pokrova* [Radiations factors of the vegetation cover], Leningrad, Russia, 216 p.

Zavarina, M.V. (1976) *Stroitel'naya klimatologiya* [The building climatology], Leningrad, Russia, 312 p.

Zubakov, V.A., Borzenkova, I.I. (1983) *Paleoklimaty pozdnego kainozoya* [Paleoclimates of the Upper Cenozoic], Leningrad, Russia, 214 p.

Zubenok, L.I. (1963) Vliyanie anomalii temperatury na ledyanoi pokrov Arktiki [Influence of the air temperature anomalies on the Arctic ice cover], *Meteorologiya i gidrologiya*, no. 10, pp. 16-24.

Izrael', Yu.A. (1974) Global'nyaya sistema nablyudenii. Prognoz i otsenka izmenenii sostoyaniya okruzhayushchei sredy. Osnovy monitoring [Global system of the observation. Forecast and estimation of environmental state. Monitoring basis], *Meteorologiya i gidrologiya*, no. 7, pp. 3-8.

Izrael', Yu.A. (1984) *Ekologiya i kontrol' prirodnoi sredy* [Ecology and environmental control], Leningrad, Russia, 560 p.

Izrael', Yu.A. (1990) Filosofiya monitoring [Philosophy of the environmental monitoring], *Meteorologiya i gidrologiya*, no. 6, pp. 5-10.

Izrael', Yu.A. (2005) Effektivnyi put'sokhraneniya klimata na sovremennom urovne – osnovnaya tsel' resheniya klimaticheskoi problem [Powerful way to regulate global climate – a main goal of the climatic problem solution], *Meteorologiya i gidrologiya*, no. 10, pp. 5-9.

Izrael', Yu.A., Filippova, L.M., Rovinskii, F.Ya. et al. (1978) O programme kompleksnogo fonovogo monitoring sostoyaniya okruzhayushchei prirodnoi sredy [About the programme of the complex background monitoring of the state of the environmental], *Meteorologiya i gidrologiya*, no. 9, pp. 5-11.

Izrael', Yu.A., Kunina, I.M., Semenov, S.M. (1989) Sravnitel'nye otsenki vliyaniya ozona, dvuokisi sery i dvuokisi azota na produktivnost' vyshikh rastenii [Comparative estimations of influence ozone, dioxide sulphur, dioxide nitrous upon the productivity of the climax plants], *Doklady Akademii Nauk*, vol. 308, no. 1, pp. 247-250.

Izrael', Yu.A., Gruza, G.V., Kattsov, V.M., Meleshko, V.P. (2001) *Izmenenie global'nogo klimata. Rol' antropogennykh vozdествii* [Global climate changes. Role anthropogenic influence], *Meteorologiya i gidrologiya*, no. 5, pp. 5-21.

Izrael', Yu.A., Sirotenko, O.D. (2003) *Modelirovanie vliyaniya izmenenii klimata na produktivnosn' sel'skogo khozyaistva* [Modelling of the influence of the climate changing on the agricultural production], *Meteorologiya i gidrologiya*, no. 6, pp. 5-17.

Izrael', Yu.A., Borzenkova, I.I., Severov, D.A. (2007) *Rol' stratosfernnykh aerosolei v sokhranenie sovremennogo klimata* [Role of stratospheric aerosols in the maintenance of present-day climate], *Meteorologiya i gidrologiya*, no. 1, pp. 5-14.

Izrael', Yu.A., Zakharov, V.M., Petrov, N.N., Ryaboshapko, A.G., Ivanov, V.N., Savchenko, A.V., Andreev, Yu.V., Puzov, Yu.A., Danilyan, B.G., Kulyapin, V.P. (2009a) *Naturnyi eksperiment po issledovaniyu proizkhozhdeniya solnechnogo izlucheniya cherez aerazol'nye sloi* [The full-natural experiment about sunlight passing through the aerosol layers], *Meteorologiya i gidrologiya*, no. 5, pp. 5-15.

Izrael', Yu.A., Zakharov, V.M., Petrov, N.N., Ryaboshapko, A.G., Ivanov, V.N., Savchenko, A.V., Andreev Yu.V., Eran'kov V.G., Puzov Yu.A., Danilyan B.G., Kulyapin V.P., Gulevskii, V.A. (2009b) *Naturnye issledovaniya geoinzhenernogo metoda sokhraneniya sovremennogo klimata s ispol'zovaniem aerazol'nykh chastits* [The full-natural investigations geoingeneering method for safety of present climate by using aerosol particles], *Meteorologiya i gidrologiya*, no. 10, pp. 5-10.

Izrael', Yu.A., Zakharov, V.M., Ivanov, V.N., Petrov, N.N., Andreev, Yu.V., Gulevskii, V.A., Danilyan, B.G., Eran'kov, V.G., Kirin, D.V., Kulyapin, V.P., Rusakov, Yu.S., Savchenko, A.V., Svirkunov, P.N., Severov, D.A., Folomeev, V.V. (2011) *Naturnyi ekseperiment po modelirovaniyu vliyaniya aerosol'nykh sloev na izmen'chivost' solnechnoi insolyatsii i meteorologicheskikh kharakteristik prizemnogo sloya* [The full-natural experiment by the modeling influence aerosol layers on the variability of the sun radiation and meteorological condition of surface layer], *Meteorologiya i gidrologiya*, no. 11, pp. 5-14.

Izrael', Yu.A., Ryaboshapko, A.G. (2011) *Geoinzheneriya klimata: vozmozhnosti realizatsii* [Geoengineering of the climate: the possibility of the reality] *Problemy ekologicheskogo monitoring I modelirovanie ekosistem* [Problems of the ecological monitoring and modeling of the ecosystem], vol. XXIV, Moscow, Russia, pp. 11-24.

Izrael', Yu.A., Ryaboshapko, A.G. (2012) *Issledovanie vozmozhnostei stabilizatsii klimata s pomoshch'yu novykh tekhnologii* [Investigation of the possibilities of the climate stability by using new technologies], Moscow, Russia, 178 p.

Izrael', Yu.A., Filippova, L.M., Rovinskii, F.Ya. et al. (1978) *O programme kompleksnogo fonovogo monitoringa sostoyaniya okruzhayushchei prirodnoi sredy* [About of the program of the complex basis monitoring of the environment state], *Meteorologiya i gidrologiya*, no. 9, pp. 5-11.

Kalitin, N.N. (1920) K voprosu o vremeni nastupleniya opticheskoi anomalii v 1912 godu [On the time of the onset of the optical anomaly in 1912], *Izvestiya GFO*, no. 1, pp. 11-17.

Karol', I.L. (1986) *Radiatzionno-fotohimicheskie modeli atmosfery* [Radiation-photochemical models of the atmosphere], in Andronova, N.G., Babanova, V.V., Karol', I.L., Kisilev, A.A., Kudryavtsev, A.P., Morozova, I.A., Rozanov, E.V., Frol'kis, V.A. (eds.), Leningrad, Russia, 192 p.

Karol', I.L., Pivovarova, Z.I. (1978) Svyaz' izmenenii sodержaniya stratosfernykh aeroleiy s kolebaniyami solnechnoi radiatsii [Relation between amount of the stratospheric aerosols and sun radiation changing], *Meteorologiya i gidrologiya*, no. 9, pp. 35-42.

Kattsov, V.M., Meleshko, V.P. (2004) Sravnitel'nyi analiz modelei obshchei tsirkulyatsii atmosfery i okeana, prednaznachennykh dlya otsenki budushchikh izmenenii klimata [The comparative analysis of the models of the common circulation of the atmosphere and ocean are reserved for the assessment of the future climatic changes], *Izvestiya RAN. Fizika atmosfery I okeana*, vol. 40, no. 6, pp. 647-658.

Kattsov, V.M., Meleshko, V.P., Chicherin, S.S. (2007) Izmenenie klimata i natsional'naya bezopasnost' Rossiiskoi Federatsii [Climate changing and national security of the Russian Federation], *Pravo i Bezopasnost'*, no. 1-2, pp. 29-37.

Kattsov, V.M., Shkol'nik, I.M., Efimov, S.V. (2017a) Perspektivnye otsenki izmeneniy klimata v rossiskikh regionakh: detalizatsiya v fisicheskom i veroyatnosnom prostranstvakh [Perspective estimates of the climate changes in the Russian regions: detailed elaboration in the physical and probability space], *Meteorologiya i gidrologiya*, no. 7, pp. 68-80.

Kattsov, V.M., Kiselev, A.A., Meleshko, V.P., Pavlova, T.V. (2017b) Global'nye izmeneniya klimata i osnovnye stsenarii i osobennosti izmenenii klimata v Arktike: models, otsenki, prognozy [Global climate changing and fundamental projections and peculiarity climate changing in the Arctic regions: models, estimations, forecasts], *Sotsial-ekonomik development of the Russyskoi Arktiki v kontekste global'nykh izmenenii klimata* [Social-economic system development of the Russian Arctic in frame of global climatic changes], in B.N. Porfir'ev (ed.), Moscow, Russia, pp. 17-52.

Kattsov V.M., Porfir'ev B.N. (2017c) Adaptatsiya Rossii k izmeneniyu klimata: kontseptsiya natsional'nogo plana [Adaptation of the Russia to the climate changing: conception of the national plane], *Trudy GGO*, issue 586, pp. 7-20.

Kiotskiy protocol k ramochnoi Koventsyi OON ob izmeneniyi klimata [Kyoto protocol to the United Nations framework convention on climate change] (1997) 26 p.

Klepikov, A.V. (2023) Rossijskie issledovaniya v oblasti polyarnoj meteorologii v 2019-2022 [Russian research in the field of polar meteorology in 2019-2022], *Izvestiya RAN. Fizika atmosfery I okeana*, vol. 59, no. 7, pp. 915-929.

Klepikov, A.V., Danilov, A.I., Lipenkov, V.Ya., Leychenkov, G.L., Neelov, A.V. (2015) Osnovnye rezul'taty nauchnykh rabot po podprogramme "Izuchenie i issledovanie Antarktiki" "Mirovoj okeana" [The main results of scientific work under the subprogram "Study and Research of the Antarctic" of the Federal Target Program "World Ocean"], *Problemy Arktiki i Antarktiki*, vol. 1, no. 103, pp. 19-31.

Klepikov, A.V., Danilov, A.I. (2021) Polyarnaya meteorologiya (rezul'taty rossijskikh issledovaniy v 2015-2018 [Polar meteorology (results of Russian research in 2015-2018)], *Izvestiya RAN. Fizika atmosfery i okeana*, vol. 57, no. 3, pp. 261-277.

Kleshchenko, A.D., Asmus, V.V., Strashnaya, A.I., Krovotyntsev, V.A., Virchenko O.V. et al. (2019) Monitoring zasukh na osnove nazemnoi i sputnikovoi informatsyi [Monitoring of the droughts by using surface and sputnik information], *Meteorologiya i gidrologiya*, no. 11, pp. 95-108.

Klimat gorodov [Climate of the cities] (1979-1991) In Ts.A. Shver (eds.), Leningrad, Russia.

Klimat Rossii [The climate of the Russia] (2001) In N.V. Kobysheva (eds.), St. Petersburg, Russia, 655 p.

Klimat USSR [Climate of the USSR] (1958-1963) In A.N. Lebedev (eds.), Issue 1-6, Russia.

Klimaticheskaya doktrina Rossiskoi Federatsyi [Doctrine of the climate of the Russian Federation] (2009), Russia, 20 p.

Klimaticheskie parametry Baikalo-Amurskoi magistrali [Climate parameters of the Baikal-Amur main line] (1977) In L.E. Anapol'skaya, I.D. Kopanov (eds.), Leningrad, Russia, 132 p.

Klimaticheskiy atlas SSSR [Climatic atlas of the USSR] (1958, 1960, 1962) In F.F. Davitaya (ed.), vol. 1, 2, Moscow, Russia.

Klimaticheskiy spravochnik po SSSR [Climate guide on the USSR territory] (1932) In A.A. Kaminsky, E.S. Rubinstein (eds.), Leningrad, Russia, 261 p.

Kobysheva, N.V., Akent'eva, E.M., Galuk, L.P. (2015) *Klimaticheskiye riski i adaptatsiya k izmeneniyam i izmenchivosti klimata v tekhnicheskoy sfere* [Climate risks and adaptation to the changing climate and climatic variability in the technical field], St. Petersburg, Russia, 213 p.

Kondrat'ev, K.Ya. (1965) *Aktinometriya* [Actinometric], Leningrad, Russia, 692 p.

Kondrat'ev, K.Ya. et al. (1973) *Vliyaniye aerosolya na perenos izlucheniya i vosmozhnye klimaticheskie posledstviya* [The influence of the aerosol on the incoming solar radiation and possible climatic consequence], Leningrad, Russia, 266 p.

Lavrov, A.S., Sterin, A.M. (2017) Rezultaty sopostavleniya ryadov temperatury svobodnoy atmosfery po dannym radiozondovykh i sputnikovykh nabluydeniy [Results of the comparison of the sets of the air temperature by using satellite and radiozondal data], *Meteorologiya i gidrologiya*, no. 2, pp. 30-44.

Lagun, V.E., Klepikov, A.V., Danilov, A.I. (2017) Polyarnaya meteorologiya (rezul't atyrossijskih issledovanij v 2011-2014) [Polar meteorology (results of Russian research in 2011-2014)], *Izvestiya RAN. Fizika atmosfery i okeana*, vol. 53, no. 5, pp. 641-657.

Lipenkov, V.Ya., Parrena, F. (2020) Osnovnye rezul'taty raboty rossiisko-frantsuzskoi mezhdunarodnoi assotsiirovannoi laboratorii Lednikovye arhivy dannykh o klimate i okruzhauyshehei sredy [The main results of the work of the Russian-French international associated laboratory "Glacial archives of climate and environmental data"], *Kompleksnye issledovaniye prirodnoi sredy Arktiki i Antarktiki* [Complex investigations of the Arctic and Antarctic environment], Abstract reports of the International scientific conference, pp. 87-89.

Malevskii-Malevich, S.P., Mol'kentin, E.K., Nadezhina, E.D. et al. (2001) Modelirovanie sovremennykh i prognosticheskikh raspredelenii nemperatury gruntov v zone vечноi merzloty na territorii Rossii [Modeling of modern and predicted distributions of soil temperature in the permafrost zone in Russia], *Materialy vtoroi konferentsii geokriologov Rossii* [Materials of the second cryogenic conference of the Russia], vol. 2, Moscow, Russia, pp. 189-196.

Metodika (2012) *Metodika monitoring klimata na territorii Rossiiskoi Federatsii: temperature prisemnogo vozdukh, atmosferynye osadki* [Methodology for climate monitoring in the territory of the Russian Federation: surface air temperature, atmospheric precipitation] Reshenie Tsentralnoi metodicheskoi komissii po gidrometeorologicheskim i geliogeofizicheskim prognozam ot 13 dekabrya 2012 goda [Decision of the Central Methodological Commission for Hydrometeorological and Heliogeophysical Forecasts of December 13, 2012], Federal State Budgetary Institution "IGKE Roshydromet and RAS", a team of authors led by G.V. Gruza, URL: <https://method.meteorf.ru/>.

Metodicheskie rekomendatsii po raschety spetsialisirovannykh klimaticheskikh kharakteristik dlya obsluzhivaniya razlichnykh otraslei ekonomiki. Stroitel'stvo i transport [Methodical recommendations to the calculation of the special climatic characteristics for the service of the different branches of the economic. The construction and transport] (2017) ООО "AMIRIT", St. Petersburg, Russia, 162 p.

Metodicheskiye rekomendatsii po raschetu spetsializirovannykh klimaticheskikh kharakteristik dlya obsluzhivaniya razlichnykh otrasley ekonomiki. Energetika [Methodical recommendations to the calculation of the special climatic characteristics for the service of the different branches of the economic. The energy] (2022) ООО "AMIRIT", St. Petersburg, Russia.

Meshcherskaya, A.V., Yakovleva, N.I. (1965) Utochnenie estestvennykh funktsii polei geopotentsiala (davleniya) atlantiko-evropeiskogo sektora [The accuracy of the natural functions of the fields of the geopotential (pressure) in the Atlantiko-European sector], *Trudy GGO*, issue 168.

Mirvis, V.M., Meleshko, V.P. (2008) Sovremennoe sostoyanie i perspektivy razvitiya meteorologicheskikh prognozov na mesyats i sezon [The present

condition and perspective of the development of the meteorological forecasts for the month and the season], *Trudy GGO*, issue 558, pp. 3-40.

Mirovoi vodnyi balans i vodnye resursy Zemli [World water balance and water resources of the Earth] (1974), Leningrad, Russia, 638 p.

Monin, A.S. (1969) *Prognoz pogody kak zadacha fiziki* [The forecast of the weather as a physic problem], Moscow, Russia, 184 p.

Nauchno-prikladnoi sprachnik po klimatu Rossii (Arkticheskii region) Solnechnaya radiatsiya [The scientific-applied guide of the Russian climate (Arctic region)] (1997) Solar radiation, St. Petersburg, Russia, 230 p.

Okeanografiya i morskoi lyed. Seriya. Vklad Rossii v Mezhdunarodnyi polyarnyi god 2007/2008 [The oceanography and marine ice. Ser. Contribution of the Russia to the International Polar Year 2007/2008] (2011) In Frolov I.E. (ed.), Moscow-St. Petersburg, Russia, 431 p.

Pavlova, V.N., Karachenkova, A.A. (2023) *Izmenenie agroklimaticheskikh resursov zernoproizvodyashchikh regionov Rossii i productivnosti zernovykh kul'tur v novom klimaticheskom periode 1991-2020* [The changing of the agroklimatic resources of the grain regions of the Russia and productivity of the cereals in the new climatic period 1991-2020], *Meteorologiya i gidrologiya*, no. 9, pp. 29-42.

Pavlova, T.V., Kattsov, V.M., Nadezhina, E.D., Sporyshev, P.V., Govorkova, V.A. (2007) *Raschet evolutsii kriosfery v XX i XXI vekakh s ispolzovaniem globalnykh klimaticheskikh modelei novogo pokoleniya* [The estimation of the evolution of the cryosphere in XX and XXI centuries by using the new climatic models], *Kriosfera Zemli*, vol. 11, no. 2, pp. 3-13.

Paleoklimat polyarnykh oblastei Zemli v golotsene [Paleoclimat of the polar regions of the Earth in the Holocene] (2019) St. Petersburg, Russia, 204 p.

Parizhskoe soglasenie Ramochnaya konventsia Organizatsii Obedinennykh Natsii ob izmenenii klimata [The Paris agreement. The frame of convention of the OON about climate changing] (2015) 30 p.

Pivovarova, Z.I. (1977) *Radiatsionnye kharakteristiki klimata SSSR* [The radiation climate of the USSR], Leningrad, Russia, 366 p.

Pivovarova, Z.I., Stadnik, V.V. (1988) *Klimaticheskie kharakteristiki solnechnoi radiatsii kak istochnika energii na territorii SSSR* [The climatic characteristics of the sun radiation as a source of the energy on the USSR territory], Leningrad, Russia.

Pikaleva, A.A., Nadezhina, E.D., Sternzat, A.V., Borisenko, M.M., Shkolnik, I.M. (2016) *Issledovanie evolutsii vечноi merzloty na territorii Rossii s pomoshchyu modelei pogranichnogo sloya atmosfery i teploperedachi v gruntakh* [The investigation of the evolution of the permafrost on the Russian territory by using the models of surface layer of the atmosphere and with heat removal into ground], *Trudy GGO*, issue 581, pp. 24-40.

Porfir'ev, B.N., Kattsov, V.M., Roginko, S.A. (2011) *Izmenenie klimata i mezhdunarodnaya bezopasnost'* [The climate changing and international security], in A.I. Bedritskii, V.V. Ivanter (eds.), Moscow, Russia, 290 p.

Predstoyashchie izmeneniya klimata [Forthcoming climate changes] (1991) In M.I. Budyko, M. Mackrakena (eds.), Leningrad, Russia, 272 p.

Prik, Z.M. (1965) *Klimat Sovetskoi Arktiki (meteorologicheskii rezhim)* [The climate of the Soviet Arctic (meteorological regime)], Leningrad, Russia, 279 p.

Radionov, V.F., Rusina, E.N., Sibir, E.E. (2007) Spetsifika mnogoletnei izmenchivosti summarnoy solnechnoy radiatsii i kharakteristik prozrachnosti atmosfery v polayrnykh oblastaykh [The specifics of the long-term variability of total solar radiation and atmospheric transparency characteristics in the Polar regions], *Problemy Arktiki i Antarktiki*, no. 76, pp. 131-136.

Radionov, V.F., Rusina, E.N., Sibir, E.E. (2017) Mnogoletnaya izmenchivost' godovykh sum summarnoy i pogloschennoy radiatsii v Arktike [Long-term variability of annual sums of total and absorbed radiation in the Arctic], *Problemy Arktiki i Antarktiki*, no. 3, pp. 38-50.

Radionov, V.F., Rusina, E.N., Sibir, E.E. (2020) Mnogoletnie izmeneniya integral'noi i spektral'noi prozrachnosti atmosfery po dannym nablyudenii v observatorii Mirnyi (Antarktida) [Long-term changes in the integral and spectral transparency of the atmosphere according to observations at the Mirny Observatory (Antarctica)], *Problemy Arktiki i Antarktiki*, no. 2, pp. 35-44.

Ril', G. (1963) *Tropicheskaya meteorologiya* [Tropical meteorology], Moscow, Russia, 366 p.

Romanov, I.P. (1993) *Atlas morfometricheskikh kharakteristik l'da i snega v Arkticheskom basseine* [Atlas of the morphological characteristic of the ice and snow in the Arctic basin], St. Petersburg, Russia, 152 p.

Romanovskaya, A.A. (2023) *Otsenka potokov parnikovykh gazov v ekosistemakh regionov Rossiskoi Federatsii* [Assessment of the streams of the greenhouse gases in the ecosystem in the regions of the Russian Federation], Moscow, Russia, 346 p.

Roshydromet (2008) *Ocenochnyj doklad ob izmeneniyah klimata i ih posledstviyah na territorii Rossiskoi Federatsii. Izmeneniya klimata* [Assessment report on climate change and its consequences on the territory of the Russian Federation], in A.A. Bedritskii (ed.), vol. I, Moscow, Russia, 227 p., vol. 2, Moscow, Russia, 291 p.

Roshydromet (2014) *Vtoroi ocenochnyj doklad ob izmeneniyah klimata i ih posledstviyah na territorii Rossiskoi Federatsii* [Second assessment report on climate change and its consequences on the territory of the Russian Federation], in V.M. Kattsov, S.M. Semenov (eds.), Moscow, Russia, 1008 p.

Roshydromet (2022) *Tretii ocenochnyj doklad ob izmeneniyah klimata i ih posledstviyah na territorii Rossiskoi Federatsii* [Third Second assessment report on

climate change and its consequences on the territory of the Russian Federation], in V.M. Kattsov (ed.), Moscow, Russia, 676 p.

Rusin, N.P. (1961) *Meteorologicheskii i radiatsionnyi rezhim Antarktidy* [Meteorological and radiation regime of the Antarctic], Leningrad, Russia, 446 p.

Rusina, E.N., Radionov, V.F. (2002) Otsenka “doindustrialnoy” opticheskoy tolschiny atmosfery pri polyarnoy dymke v Arktike i sovremennogo vклада antropogennykh vybrosov [Assessment of the “pre-industrial” optical depth of the atmosphere during polar haze in the Arctic and the modern contribution of anthropogenic emissions], *Meteorologiya i gidrologiya*, no. 5, pp. 35-39.

Savinov, S.I. (1913) Naibol'shii velichiny napryazheniya solnechnoi radiatsii po nabluydeniyam v Pavlovske s 1892 [The largest value of the solar radiation beginning with 1892 in Pavlovsk by the observations], *Izvestiya AN SSSR. Seriya 6*, vol. 7, no. 12, pp. 707-720.

Sakunov, G.G., Barteneva, O.D., Radionov, V.F., Timerev, A.A., Voskresenskij, A.I., Adnashkin, V.N. (1981) *Opticheskie svoystva atmosfery Arkticheskogo bassejna, Pervyj global'nyj eksperiment PIGAP, T. 2, Polyarnyj aerol', protyazhyonnaya oblachnost' i radiatsiya* [Optical properties of the atmosphere of the Arctic basin, First global experiment PIGAP, vol. 2, Polar aerosol, extended clouds and radiation], Leningrad, Russia, pp. 73-88.

Semenov, S.M. (2004) *Parnikovyie gazy i sovremennyy klimat Zemli* [Greenhouse gases and the modern climate of the Earth], Moscow, Russia, 175 p.

Semenov, S.M. (2015) Parnikovyie effect: otkrytie, rasvitiye, rol' v formirovaniy global'nogo klimata i ego antropogennykh izmenenii [Greenhouse effect: discovery, development of the conception, role in the formation of the global climate and its anthropogenic changes], *Fundamental i prikladnaya klimatologiya*, no. 2, pp. 103-126.

Semenov, S.M. (2022) Parnikovyie effect i sovremennyy klimat [Greenhouse effect and modern climate], *Meteorologiya i gidrologiya*, no. 10, pp. 5-17.

Semenov, S.M., Kunina, I.M., Kuhta, B.A. (1998) Sravnenie antropogennykh izmenenii prizemnykh kontsentratsii O₃, SO₂ i CO₂ v Evrope po ekologicheskomu kriteriyum [The comparison of the anthropogenic changes of the surface concentrations of O₃, SO₂, and CO₂ in Europe by using ecological criteria], *Doklady Akademii Nauk*, vol. 361, no. 2, pp. 275-279.

Semenov, S.M., Gelfer, E.S., Yasyukevich, V.V. (2002) Temperaturnye usloviya dlya razvitiya dvukh vidov vozbuditelei malyarii v organizme perenoschika na territorii Rossii v XX veke [Temperature of the evolution of the two malaria species in the organism of the carrier on the Russian territory in XX century], *Doklady AN SSSR, Obshchaya biologiya*, vol. 387, no. 1, pp. 131-136.

Semenov, S.M., Gelfer, E.S., Kuhta, B.A. (2004) O nelineinosti klimatogennykh izmenenii srokov fenologicheskikh yavlenii u drevesnykh rastenii [About nonlinear of relation between the climatogenic changes and phenotypy of

the woody plants], *Doklady Akademii Nauk, obshchaya biologiya*, vol. 396, no. 1, pp. 427-429.

Semenov, S.M., Yasyukevich, V.V., Gelfer, E.S. (2006) *Vyyavlenie klimatogennykh izmenenij* [Identification of climatogenic changes], Moscow, Russia, 324 p.

Semenov, S.M., Popov, I.O. (2011) Sravnitel'nye otsenki vliyaniya izmeneniya kontsentratsii dioksida ugleroda, metana, zakisi azota i vodyanogo para na radiacionno-ravnovesnuyu temperaturu zemnoi poverhnosti [Comparative assessments of the influence of changes in the concentrations of carbon dioxide, methane, nitrous oxide and water vapor on the radiation-equilibrium temperature of the Earth's surface], *Meteorologiya i gidrologiya*, no. 8, pp. 34-43.

Semenov, S.M., Popov, I.O., Yasyukevich, V.V. (2020) Statisticheskaya model' dlya otsenki formirovaniya klimaticeskikh ugroz po dannym monitoringa klimata [Statistical model for assessing the formation of climate hazards based on climate monitoring data], *Meteorologiya i gidrologiya*, no. 5, pp. 59-65.

Sirotenko, O.D. (1981) *Matematikal modeling vodno-teplovogo rezhima i produktivnosti agroekosistem* [The mathematical modeling of the water-thermal regime and productivity of the agroecological systems], Leningrad, Russia, 167 p.

Sporyshev, P.V., Mirvis, V.M., Kattsov, V.M., Meleshko, V.P., Ran'kova, E.Ya. (2008) Antropogennyi vklad v izmeneniye klimata, Otsenochnyy doklad ob izmeneniyakh klimata i ikh posledstviyakh na territorii Rossiyskoy Federatsii [Anthropogenic contribution into the climate changes, Assessment report on climate change and its consequences on the territory of the Russian Federation], in A.I. Bedritskii (ed.), vol. 1, *Climate changes*, pp. 152-173.

Spravochnik po klimatu SSSR [Guide on the climate of the USSR] (1965-1970) Leningrad, Russia.

Sterin, A.M. (1999) Analiz lineinykh trendov v ryadakh temperatury svobodnoi atmosfery [Analysis of the linear trends in the series of the temperature of the free atmosphere for 1958-1997], *Meteorologiya i gidrologiya*, no. 5, pp. 52-68.

Sterin, A.M. (2004a) O chuvstvitel'nosti otsenok trendov temperatury troposfery i nizhnei stratosfery po dannym radiozondirovaniya. 1: Vybormassiva dannykh, perioda ryadov i tekhniki ih analiza [On the sensitivity of estimates of the troposphere and the lower stratosphere temperature trends from radiosonde data. 1: Selection of a data series, period of series and technique of their analysis], *Meteorologiya i gidrologiya*, no. 5, pp. 21-36.

Sterin, A.M. (2004b) O chuvstvitel'nosti otsenok trendov temperatury troposfery i nizhnei stratosfery po dannym radiozondirovaniya. 2: Obnaruzhenie neodnorodnostei v ryadah mesyachnogo razresheniya [On the sensitivity of estimates of the tropospheric and the lower stratosphere temperature trends from radiosond data. 2: Detection of irregularity in the monthly resolution series], *Meteorologiya i gidrologiya*, no. 6, pp. 5-22.

Sterin, A.M., Lavrov, A.S. (2022) Ispolovanie kvantil'noi regressii dlya otsenki prostranstvennykh osobennostei kharakteristik trendov prizemnoi temperatury na territorii Rossii [Using of the kvantil'noi regression technik for assessment of the space peculiarity of the characteristic trends of the surface air temperature on the Russian territory], *Fundamental i prikladnaya klimatologiya*, vol. 8, no. 2, pp. 92-111.

Theoretical i eksperimental osnovy stabilizatsii sovremennogo klimata putem sozdaniya aeroliznykh obrazovaniy v nizhnei stratosfere [Theoretical and experimental basis for the stabilization of the present climate by the creation of the aerosol clouds in the low stratosphere] (2019) In Yu.A. Izrael (ed.), Moscow, Russia, 285 p.

Timofeev, V.T. (1944) Vodnye massy Norvezhskogo i Grenlandskogo morei i ikh dinamika [Water masses of the Norwegian and the Greenland seas and their dynamic], *Trudy Arkticheskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta glavnogo upravleniya Severnogo morskogo puti pri SNK SSSR* [Proc. of the Arctic institute of the Main Administration of the Northern marine line at the SNK USSR], vol. 183, 264 p.

Tolstykh, M.A., Zhelen, Zh.F., Volodin, E.M. et al. (2015) Rasrabotka mnogomasshtabnoi versii globalnoi modeli atmosfery PLAV [The development of the complex version of the global model of the atmosphere PLAV], *Meteorologiya i gidrologiya*, no. 6, pp. 25-35.

TROPEKS-74 (1976) *Trudy Mezhdunarodnoi ekspeditsii po programme mezhdunarodnogo Atlanticheskogo tropicheskogo eksperimenta. Atmosfera* [The works of the Interdepartment expedition on the programme on the International Atlantic tropical experiment. Atmosphere], in M.A. Petrosyants (ed.), vol. 1, Leningrad, Russia, 736 p.

Uspenskii, A.B. (2021) 60 let sputnikovoi meteorologii [60 years of the sputnik meteorology], *Meteorologiya i gidrologiya*, no. 12, 144 p.

Fadeev, P.Yu., Shishkin, V.V., Tolstykh, M.A., Travova, S.V., Mizyak, V.G., Rogunov, V.S., Alipova, K.A. (2021) Razvitie sistemy dolgosrochnogo prognoza Gidromettsentra Rossii in 2020 godu [Evaluation of the system of the long-term forecast of the Hydrometeorological center of the Russia in 2020], *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy*, no. 1(379), pp. 58-72.

Khairullin, K.Sh. (1969) *Ottepeli na territorii SSSR* [The thaws on the USSR territory], Leningrad, Russia, 88 p.

Khan, V.M., Vilfand, R.M., Tishchenko, V.A., Emelina, S.V., Gritsun, A.S., Volodin, E.M., Vorobeva, V.V., Tarasevich, M.A. (2023) Otsenka izmenenii temperaturnogo rezhima po Severnoi Evpasii na predstoyashchee pyatiletie po prognozam modeli Zemnoi sistemy IVM RAN i ikh vozmozhnykh posledstviy dlya selskogo khozyastva [Estimation of the changing in the temperature regime on the Northern Eurasia for the future by using model of the Earth system IVMRAN and their consequence for the farmer], *Meteorologiya i gidrologiya*, no. 9, pp. 14-28.

Khlebnikova, E.I., Sall', I.A. (1989) Ob otsenki kharakteristik vybrossov gaussovskikh meteorologicheskikh polei i ikh chuvstvitelnosti [About assessment of the characteristic of gauss exhaust of the meteorological fields and their sensibility], *Trudy GGO*, issue 525, pp. 44-51.

Khlebnikova, E.I., Datsuk, T.A., Sall', I.A. (2014) Vosdeistvie itsmenenii klimata na stroitel'stvo, nazemnyi transport, toplivno-energeticheskii kompleks [The influence of the climate changes on the construction, land transport, heat – energy complex], *Trudy GGO*, issue 574, pp. 125-178.

Khlebnikova, E.I., Shkol'nik, I.M., Rudakova, Yu.L. (2022) Statistical interpretation klimaticheskikh dannyykh dlya obespecheniya potrebnosti ekonomiki RF [The statistic interpretation of the climatic data for maintenance of the economic of the RF], *Fundamental i prikladnaya klimatologiya*, vol. 8, no. 1, p. 33.

Khromov, S.P. (1959) Atmosfernaya tsirkulyatsiya i pogoda na puti “Obi” v plavanii 1956-1957 [Atmospheric circulation and weather in the way of the “Ob'” “during the voyage 1956-1957], *Trudy Sovetskoi antarkticheskoi ekspeditsii (SAE)*, vol. 5, pp. 27-83.

Chernigovsky, N.T., Marshunova, M.S. (1965) *Klimat Sovetskoy Arktiki (Radiatsionnyy rezhim)* [Climate of the Soviet Arctic (Radiation regime)], Leningrad, Russia, 198 p.

Chukalin, K.I. (1969) Vliyanie teplovogo sostoyaniya polyarnykh raionov na vikhrevuyu deyatelnost' v atmosfere [The influence of the heat state of the Polar regions on the whirlwind activity in the atmosphere], *Problemy Arktiki i Antarktiki*, issue 30, pp. 66-72.

Sherstyukov, A.B. (2012) Massiv sutochnykh dannyykh o temperature pochvogruntov na glubinakh do 320 sm po meteorologicheskim statsiyam Rossiiskoi Federatsii [The massve of the daily data about temperature of the soilground to the depth till 320sm by the data of the meteorological stations on the Russian territory], *Trudy VNIIGMI-MTSD*, issue 176, pp. 233-256.

Sherstyukov, A.B., Sherstyukov, B.G. (2015) Prostranstvennye osobennosti i novye tendentsii v izmeneniyakh termicheskogo sostoyaniya pochvogruntov i glubiny ikh sezonnogo protaivaniya v zone mnogoletnei merzloty [The space peculiarity and new trends of the changes of the thermal condition of the soilground and the depth of the seasonal melting in the zone of the permafrost], *Meteorologiya i gidrologiya*, no. 2, pp. 5-12.

Sherstyukov, B.G. (2021) Lesnye pozhary Rossii v usloviyakh izmenyayushchegosya klimata [The forest fires in the time of the changing climate], *Trudy VNIIGMI-MTSD*, issue 188, pp. 30-48.

Shiklomanov, I.A., Georfievskii, V.Yu. (2002) Vliyanie antropogennykh izmenenii klimata na gidrologicheskii rezhim i vodnye resursy [The influence of the anthropogenic changing on the hydrological regime and water resources], *Izmenenie klimata i ikh posledstviya* [Climate changing and their consequence], St. Petersburg, Russia, pp. 152-164.

Shiklomanov, I.A., Shiklomanov, A.I. (2003) *Izmenenie klimata i dinamika pritoka rechnykh vod v Severnyi Ledovityi okean* [The climate changing and dynamic of the discharge of the river water into the Arctic seas], *Vodnye resursy*, vol. 30, no. 6, pp. 645-654.

Shifrin, K.S. (1951) *Rasseyanie sveta v mutnoi srede* [The scattering of the sun light in the muddy environment], Moscow, Russia, 288 p.

Entsiklopediya klimaticheskikh resursov [Encyclopedia of the climatic resources] (2005) In N.V. Kobysheva, K.Sh. Khairullin (eds.), St. Petersburg, Russia, 320 p.

Yanishevskii, Yu.D. (1957) *Aktinometricheskie pribory i metody nablyudenii* [The akninometric instruments and the methods of the observation], Leningrad, Russia.

Alekseev, G., Kuzmina, S., Bobylev, L., Urazgildeeva, A., Gnatiuk, N. (2019) Impact of atmospheric heat and moisture transport on the Arctic warming, *Int. J. Climatol.*, vol. 39, no. 8, pp. 1-11.

Alekseev, G.V., Glok, N.I., Vyazilova, A.E. et al. (2021) Influence of SST in low latitudes on the Arctic warming and sea ice, *J. Mar. Sci. Eng.*, vol. 9, no. 1145.

Bozhenkova, I.I., Ershova, A.A., Zhiltsova, E.L. Shapovalova, K.O. (2023) Arctic sea ice in the light of current and past climate changes, *Isvestiya RAN, Seria atmospheric and ocean physics*, vol. 59, Suppl. 1, pp. S35-S46.

IPCC (2021) Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Pèan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.), Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 3–32, doi:10.1017/9781009157896.001, URL: https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WG1_SPM.pdf.

Jouzel, J., Lorius, C., Petit, J.R., Genthon, C., Barkov, N.I., Kotlyakov, V.M., Petrov, V.M. (1987) Vostok ice core: a continuous isotope temperature record over the last climatic cycle (160,000 years), *Nature*, vol. 329, pp. 403-408.

Jouzel, J., Barkov, N.I., Barnola, J.M., Bender, M., Chappellaz, J., Genthon, C., Kotlyakov, V.M., Lipenkov, V., Lorius, C., Petit, J.R., Raynaud, D., Raisbeck, G., Ritz, C., Sowers, T., Stievenard, M., Yiou, F., Yiou, P. (1993) Extending the Vostok ice-core record of palaeoclimate to the penultimate glacial period, *Nature*, vol. 364, pp. 407-412.

Jouzel, J., Waelbroeck, C., Malaize, B., Bender, M., Petit, J.R., Stievenard, M., Barkov, N.I., Barnola, J.M., King, T., Kotlyakov, V.M., Lipenkov, V., Lorius, C., Raynaud, D., Ritz, C., Sowers, T. (1996) Climatic interpretation of the recently extended Vostok ice records, *Climate Dynamics*, vol. 12, pp. 513-521.

Marshunova, M.S., Chernigovskii, N.T. (1978) *Radiation Regime of the Foreign Arctic*, Indian National Scientific Documentation Centre, New Delhi, 189 p.

Peterson, B.J., Holmes, R.M., McClelland, J.W., Vorosmarty, C.J., Lammers, R.B., Shiklomanov, A.I., Shiklomanov, I.A., Rahmstorf, S. (2002) Increasing river discharge to the Arctic Ocean, *Science*, vol. 298, pp. 2171-2173.

Volodin, E.M., Gritsun, A.S. (2020) Simulation of possible future climate changes in the 21st century in the INM-CM5 climate model, *Izvestiya, Atmospheric and Ocean Physics*, vol. 56, no. 3, pp. 218-228.

Zubakov, V.A., Borzenkova, I.I. (1990) *Global Palaeoclimate of the Late Cenozoic. Ser. Developments in Palaeontology and Stratigraphy*, 12, Elsevier Sci. Publ., 472 p.

Статья поступила в редакцию (Received): 26.04.2024.

Статья доработана после рецензирования (Revised): 15.05.2024.

Принята к публикации (Accepted): 20.05.2024.

Для цитирования / For citation:

Борзенкова, И.И., Алексеев, Г.В., Бардин, М.Ю., Зайцева, Н.А., Клепиков, А.В., Русина, Е.Н., Стерин, А.М., Хан, В.М. (2024) Развитие и становление современной климатологии в трудах ученых гидрометеорологической службы России, *Фундаментальная и прикладная климатология*, т. 10, № 2, с. 135-198, doi:10.21513/2410-8758-2024-2-135-198.

Borzenkova, I.I., Alekseev, G.V., Bardin, M.Yu., Zaitseva, N.A., Klepikov, A.V., Rusina, E.N., Sterin, A.M., Khan, V.M. (2024) The development and formation of the present-day climatology in works of scientists of the Russian hydrometeorological service, *Fundamental and Applied Climatology*, vol. 10, no. 2, pp. 135-198, doi:10.21513/2410-8758-2024-2-135-198.

Экстремальные скорости ветра в Атлантическом секторе Арктики: статистика и циркуляционные модели

А.В. Кислов^{}, И.Р. Ломакин, С.А. Мысленков*

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,
Россия, 119234, г. Москва, Ленинские Горы, д. 1

^{*}Адрес для переписки: avkislov@mail.ru

Реферат. Экстремальные скорости ветра над Гренландским, Норвежским и Баренцевым морями, а также прилегающей сушей, исследованы с помощью базы данных ERA5. Показано, что функция распределения вероятностей описывается распределением Вейбулла. Однако, самые большие и самые редкие значения сильно отклоняются от этого закона (по этому признаку их образно называют «драконами»): отличия могут превышать 10 м/с. «Драконы» связаны с циклонами, развивающимися в холодное время года на арктическом фронте. Но с такого же рода циклонами связаны менее мощные экстремумы, подчиняющиеся распределению Вейбулла (называемые «черные лебеди»). Оказалось, что на основе фронтального анализа эти ситуации разделить нельзя. В незначительной части случаев в тех регионах, где наблюдались самые мощные экстремальные ветра, обнаружены полярные мезоциклоны.

Ключевые слова. Экстремумы ветра, распределение Вейбулла, циклоны, полярные мезоциклоны, «драконы», «черные лебеди».

Extreme wind speeds in the Atlantic sector of the Arctic: statistics and circulation models

A.V. Kislov^{}, I.R. Lomakin, S.A. Myslenkov*

M.V. Lomonosov Moscow State University,
1, Leninskie Gory, 119234, Moscow, Russian Federation

^{*}Correspondence address: avkislov@mail.ru

Abstract. Extreme wind speeds over the Greenland, Norwegian and Barents seas, as well as over adjacent land, were studied using the ERA5 database. It is shown that the probability distribution function is described by the Weibull distribution. However, the largest and rarest values deviate greatly from this law (for this reason they are figuratively called “dragons”): the differences can exceed 10 m/s. “Dragons” are associated with cyclones that develop during the cold season

on the Arctic front. Less powerful extremes that obey the Weibull distribution (called “black swans”) are associated with the same kind of cyclones. It turned out that these situations cannot be separated based on frontal analysis. In a few cases, the polar laws were detected in those regions where the most powerful extreme winds were observed.

Keywords. Wind extremes, Weibull distribution, cyclones, polar mesocyclones, “dragons”, “black swans”.

Введение

Определение функции распределения вероятностей (ФРВ) экстремальных значений составляет основу классической статистической теории экстремумов. В ней исследуются статистические свойства максимума выборки независимых случайных величин, имеющих одну и ту же функцию распределения (принцип iid = independent and identical distribution). Показано, что при стремлении объема выборки к бесконечности, ФРВ экстремумов описывается функциями Фреше, Вейбулла или Гумбеля (или их так называемым обобщенным распределением) (Coles, 2001). Истоки определения максимума такого рода асимптотической выборки можно проследить в работах (Fisher and Tippett, 1928; Gnedenko, 1943). В данной работе исследуются максимальные скорости ветра. Для описания их вероятностных свойств успешно применяется ФРВ Вейбулла (Kislov, Matveeva, 2016; Kislov, Platonov, 2019; Palutikof et al, 1999),

$$F(u) = 1 - \exp(-Au^k), \quad (1)$$

где A и k – параметры, определяемые по выборке.

Наглядна запись данного выражения в форме

$$\ln[-\ln(1-F(u))] = k \ln(u) + \ln(A), \quad (2)$$

поскольку при использовании левой части данного выражения и логарифма скорости в виде специальных координат, данная зависимость выражает уравнение прямой. Если нанесенные на такой график значения эмпирической ФРВ укладываются на прямую (с допустимым разбросом), то это свидетельствует о том, что Вейбулловское распределение служит ее теоретической моделью.

Для конкретного примера, ФРВ и она же, спрямленная в координатах Вейбулловского распределения, представлена на рис. 1 (а, б). Теоретически подобранная ФРВ описывает весь набор эмпирических данных с высокой точностью (коэффициент детерминации равен 0.99), однако в области хвоста распределения эта аппроксимация не подходит, причем это визуально проявляется настолько отчетливо, что специальные статистические тесты (Janczura and Weron, 2012; Sornette and Ouillon, 2012) для выявления такого поведения даже не требуются. Аналогичная ситуация, когда теоретическая статистиче-

ская модель описывает всю выборку за исключением самых больших значений, выявлена и при рассмотрении других гидрометеорологических величин, например, высоты морских волн (Myslenkov et al, 2021), осадков (Kislov et al, 2022), а также многих экстремумов иной природы: распределений городов по народонаселению, магнитуды землетрясений, интенсивности природных пожаров, биржевых показателей и др. (Sornette, 2009). То есть эмпирическая ФРВ характеризуется некоторым «базовым распределением», отклонения от которого становятся заметны при попытках описать этой закономерностью вероятность самых больших значений. По нашему предположению, это происходит из-за того, что нарушается принцип iid, а именно требование принадлежности элементов выборки к одному и тому же распределению вероятностей (Kislov, Platonov, 2019), что, в свою очередь, может свидетельствовать о том, что в выборку «замешаны» события разной физической природы (Голицын, 2013). Универсальность этого свойства вызвала к жизни попытки физического и философского осмысления данной ситуации, что привело к появлению своеобразной терминологии: самые большие экстремумы, относящиеся к базовому распределению, стали называть «черные лебеди» (Taleb, 2010), в то время как еще более мощные события, находящиеся вне базового закона, получили название «королей» или «драконов», чем подчеркивается их специфичность (Sornette, 2009).

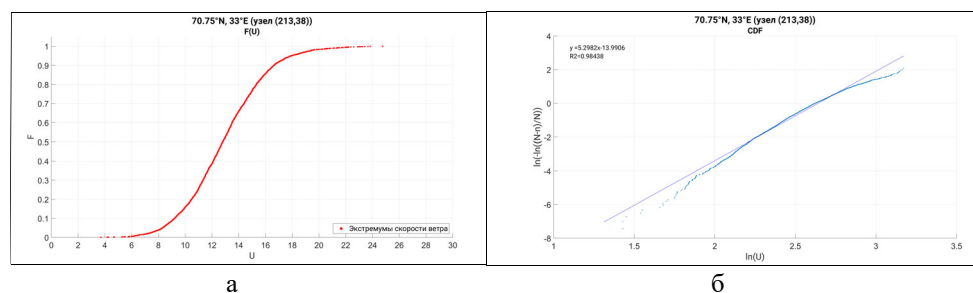


Рисунок 1. Функция распределения повторяемостей экстремумов модуля скорости ветра, выделенных по выборке ERA5 путем выбора максимального значения из последовательных величин за 48 часов (см. Методы) (а) и ее сопоставление (б) с моделью Вейбулловского распределения (в специальных координатах)

Коэффициент детерминации, характеризующий точность аппроксимации эмпирических данных Вейбулловским распределением, составил 0.99 потому, что подавляющее множество значений оказалось близко к теоретической функции, а отклонения в начале и конце выборки не играют здесь принципиального значения, потому что их удельный вес в выборке очень мал. (По данным реанализа ERA5, для 70.75° с.ш., 33° в.д.).

Figure 1. The probability distribution function of the extremes of the wind velocity, based on the ERA5 samples by selecting the maximum value from successive values over 48 hours (see Methods) (a) and its comparison (b) with the Weibull distribution model (in special coordinates) *The coefficient of determination characterizing the accuracy of approximation of empirical data by the Weibull distribution was 0.99, because the overwhelming majority of values turned out to be close to the theoretical function, and deviations at the beginning and end of the sample do not play an important role here because their specific weight in the sample is very small. (According to ERA5 reanalysis, for 70.75° N, 33° E).*

Для того чтобы подобрать ФРВ для описания всей выборки, в различных приложениях предпринимаются попытки использования трех и более

параметрических зависимостей для описания ФРВ, вплоть до смеси нескольких ФРВ. Таким путем удастся аппроксимировать все особенности поведения функции, однако такой подход не всегда оправдан из-за того, что многопараметрические выражения неустойчивы к малым изменениям выборки, и, кроме того, подобный эмпирический путь лишает теорию экстремумов той привлекающей математической законченности, которая отмечена выше.

В данной статье рассматривается вопрос о применимости базового распределения, параметры которого определены по всей совокупности выборки, к самым крупным экстремальным величинам. Практически, ставится вопрос о том, насколько квантильные значения базового распределения, соответствующие, в том числе широко применяемым на практике значениям с вероятностями 0.99, 0.95 и др., пригодны для адекватной характеристики экстремумов в области хвоста распределения. Как следует из рис. 1, можно визуально определить (как отмечено выше), на каком значении вероятностей базовая ФРВ уже недопустима для эмпирических значений. Однако, такой визуальный анализ, возможный при рассмотрении нескольких рядов данных, становится непродуктивен, если исследуются тысячи и десятки тысяч рядов, что реально при анализе детализированных архивов данных моделирования. При этом, обычно соответствие теоретической ФРВ эмпирическим вероятностям автоматически проверяется критериями (поскольку подбор происходит на основе принципа максимального правдоподобия, то это может быть и коэффициент детерминации R^2 , который, по сути, родственен статистическому критерию), на величину которых различия на хвостах распределения оказывают небольшое влияние, потому что там мало значений. Однако квантильные величины, соответствующие подобранной ФРВ, не будут соответствовать эмпирическим значениям, так как различия базового и эмпирического распределений становятся велики именно в области больших величин. Поэтому возникает необходимость оценить погрешность, возникающую при таком типичном подходе к анализу данных.

Второй вопрос связан с выявлением того, какие атмосферные явления ответственны за возникновение «сверхбольших» аномалий. Логика заключается в том, чтобы попытаться определить специфичность физики такого рода явлений, отличающую их от всей массы других событий. Таким образом, предлагается искать физические факторы, ответственные за появление «необычайных» событий, то есть тех, статистическим свойствам которых не находится места в рамках базовой ФРВ. Речь идёт о попытке, используя упомянутую идеологию, выявить различия атмосферных процессов, приводящих или к «драконам», или к «чёрным лебедям». При анализе экстремумов скорости ветра единственным достижением на этом пути стало установление того, что реалистичность ФРВ (проявляющаяся в появлении в выборке «драконов») увеличивается при моделировании атмосферных процессов с высоким пространственным разрешением (Kislov, Platonov, 2019), что свидетельствует о том, что это связано с корректным воспроизведением мезомасштабных комплексов, в том числе и конвективных явлений. В этом плане для Арктики одна из гипотез, которые могут быть проверены, это попытка

определить, всегда ли необычайные с точки зрения статистических свойств экстремумы скорости ветра связаны с полярными мезоциклонами (Rasmussen, Turner, 2003).

Данные

Регион исследования (67-80° с.ш., 20° з.д.-60° в.д.) включает Баренцево море, близлежащие акватории соседних морей – Карского, Норвежского и Гренландского, а также прибрежные внутриматериковые районы. Поскольку арктический регион характеризуется редкой сетью, а наблюдения над морями нерегулярны во времени и пространстве, для решения поставленных задач были использованы еже часовые данные реанализа ERA5 (Hersbach et al., 2020) по вышеуказанному региону (321x53=17013 узлов) для зональной и меридиональной компонент скорости ветра с шагом сетки 0.25°×0.25° за период 1979-2023 гг. Анализ экстремальных значений целесообразно проводить раздельно для холодного и тёплого сезонов, поскольку они формируются в условиях различных не только температур, но и фоновых режимов циркуляции атмосферы. Особенно сильные ветры в Арктике развиваются в холодный период года (Кислов, Матвеева, 2016), поэтому в настоящей работе использованы данные для периода ноябрь-март.

Для соблюдения условия независимости данных, т.е. чтобы каждый экстремум относился к разным событиям (различным штормам), набор экстремумов для каждого из узлов сетки получен путём отбора максимального значения модулей скорости ветра, по данным ERA5, за каждые 48 часов. Такой критерий получен на основе автокорреляционного анализа, продемонстрировавшего, что в подавляющем большинстве случаев связность в ряду оказывается статистически незначимой за пределами двух суток. Таким образом, для каждого узла сетки был получен ряд из 3630 значений. Дополнительно из ряда были исключены «искусственные» интервалы, где максимум отбирался за 31 марта и 1 ноября.

Для дальнейшего анализа ряд был проранжирован по убыванию и для каждого узла отобраны максимальные значения скорости ветра с соответствующими датами, в которые они зафиксированы. Для каждого двухсуточного интервала календарь содержит информацию о количестве узлов, в которых зафиксирован максимум, их координатах, а также о значении скорости ветра в каждом из этих узлов. Так, если использовать только три значения, получается календарь из 324 уникальных двухсуточных интервалов, в каждом из которых, по крайней мере в 1 узле области, наблюдался максимум скорости ветра, попадающий в первую тройку за исследуемый период.

Дальнейшая обработка заключалась в исключении тех дат, максимальная скорость ветра в которые была ниже порогового значения, априорно выбранного 12 м/с – такие сравнительно небольшие скорости часто являются экстремальными для узлов, находящихся на суше. В то же время над морем неоднократно зафиксированы значительно более высокие скорости ветра (более 20 м/с), которые не всегда попадали в первую тройку.

Для ответа на второй вопрос – анализа атмосферных циркуляционных систем, во время которых наблюдались «драконы» – для интересующих дат из календаря экстремумов были проанализированы архивные синоптические карты с фронтальным анализом Немецкой службы погоды (DWD) (https://www1.wetter3.de/archiv_dwd_dt.html). А также за тот же период, по данным ERA5, построены дополнительно поля атмосферного давления на уровне моря с шагом в 3 часа, что позволило на основе высокодетальных данных отследить динамику циркуляционных систем, ответственных за формирование экстремального ветра.

В этом аспекте отдельной задачей предстояло выяснить, наблюдались ли в этих случаях полярные мезомасштабные циклоны (далее – ПМЦ) – сравнительно небольшие, но очень интенсивные морские циклоны, которые формируются к северу от положения главной бароклинной зоны арктического фронта (Rasmussen, Turner, 2003). Горизонтальные размеры ПМЦ обычно в диапазоне 200-1000 км. В Северном полушарии ПМЦ возникают наиболее часто в Норвежском, Баренцевом и Гренландском морях (Stoll et al., 2018), причем максимум случаев приходится на Норвежское и Баренцево моря (Rojo, 2015). Именно здесь ПМЦ могут влиять на работу судоходства, авиации и нефтегазовых месторождений (Revokatova et al., 2021). По данным наблюдений установлено, что максимальные скорости ветра, связанные с ПМЦ, могут достигать от 25 до 35 м/с (Shapiro et al., 1987; Smirnova, Golubkin, 2017).

Для проверки наличия ПМЦ во время дней, взятых из календаря экстремумов, использованы данные глобальной климатологии ПМЦ (Stoll et al., 2022), также построенной на основе ERA5, что дало возможность на основе одного источника данных более точно идентифицировать связь конкретных случаев экстремумов с ПМЦ. Климатология сформирована на основе алгоритма трекинга ПМЦ, предложенного в (Watanabe et al., 2016), и адаптированного алгоритма, описанного в (Stoll et al., 2018). Алгоритм основан на идентификации локального максимума в сглаженном поле относительной завихренности на уровне 850 гПа, превышающего $1.5 \times 10^{-4} \text{ с}^{-1}$ (величину параметра Кориолиса в высоких широтах). На каждом последующем временном шаге алгоритм трекинга объединяет самые большие максимумы завихренности в пределах 150 и 200 км для уровней 700 и 1000 гПа, а затем, на основе ряда эмпирических критериев – признаков атмосферного фронта, характеристик статической устойчивости, интенсивности, размера (диаметр ПМЦ не превышает 430 км) выполнено выделение ПМЦ из совокупности иных циркуляционных систем. Трек определяется как трек ПМЦ, если он удовлетворяет всем четырём критериям.

Соответствие квантильных значений базового распределения Вейбулла квантильным значениям скоростей ветра эмпирического распределения повторяемости

Подбор параметров Вейбулловского распределения был осуществлен для каждого узла рассматриваемой области, покрытой сеткой ERA5. Оказа-

лось, что аппроксимация эмпирической ФРВ данной моделью очень высокая: коэффициент детерминации лишь один раз опустился до 0.8, а обычно находился около 0.95-0.98 (см. рис. 1). На рис. 2 показано соотношение параметров Вейбулловского распределения для множества узлов, относящихся к акваториям 5 морей, а также к суше, попадающих в область исследования. Здесь вместо параметра A по оси ординат отложен параметр V , определённый как $V \equiv A^{-1/k}$ представляющий собой величину скорости, близкую к медианному значению выборки.

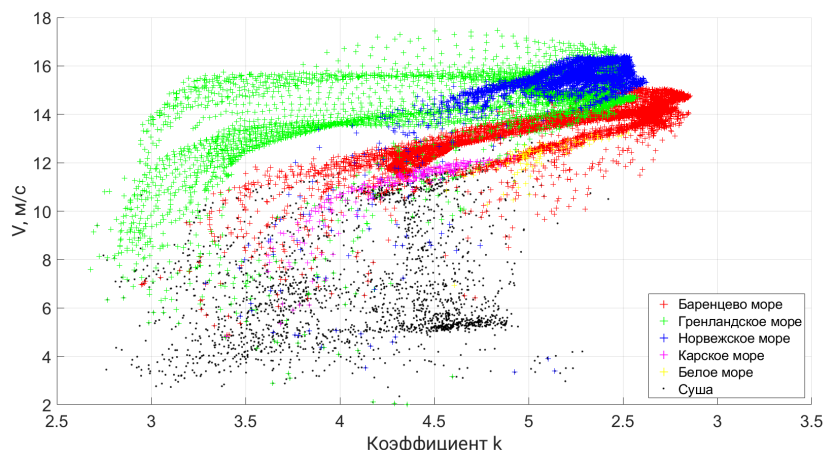


Рисунок 2. Параметры распределения Вейбулла k и V , рассчитанные в узлах сетки ERA5

Figure 2. Weibull distribution parameters k and V calculated at the ERA5 grid points

Из рис. 2 видно, что параметры k и V различны для разных регионов. Значения V лежат главным образом в пределах 12-14 м/с для Баренцева, 8-18 м/с для Гренландского, 14-16 м/с для Норвежского, 10-12 м/с для Карского и около 12 м/с – для части узлов в Белом море, попадающих в область исследования. Для суши значения заметно меньше, не более 12 м/с, причём заметны разные скопления точек на уровне 5-6 и около 11 м/с, соответствующие разным участкам суши – материковой части и островов. Хорошо заметно также, что при возрастании параметра k растут и значения V , причём для Гренландского и Баренцева морей параметры объединены в две параллельные ветви. Для морей с наибольшими средними скоростями (и, соответственно, значениями V) – Норвежского и Баренцева – характерны самые высокие k .

Для стационарных данных, расположенных на побережье Баренцева, Карского, Лаптевых, Восточно-Сибирского и Чукотского морей характерны значения V в диапазоне 4-14 (редко до 18 м/с) и $1 \leq k < 5.5$ (Kislov, Matveeva, 2016; Kislov, Platonov, 2019). Таким образом, данные ERA5 для суши (рис. 2) показывают достаточно близкие к стационарным значениям этих параметров.

Как уже отмечено, различия «драконов» и «черных лебедей» (см. рис. 1) начинают появляться при больших скоростях. Переходя на язык квантильных значений, можно сказать, что они становятся обычными для вероятностей, превышающих $p \sim 0.95$, а при дальнейшем переходе к большим величинам p

различия увеличиваются. Сравнение эмпирических квантильных значений скорости и значений, соответствующих базовому распределению Вейбулла $u(p) = \left(\frac{1}{A} \ln \frac{1}{1-p}\right)^{1/(k)}$, показывает, что преобладающее большинство различий лежит в диапазоне 0-2 м/с (рис. 3а), что соответствует ~10% отклонениям (рис. 3б). Это фактически типичная, обобщенная по всей выборке величина различий между «драконами» и «черными лебедями». Отметим, что с метеорологической точки зрения эти различия сравнительно невелики, тем более что идет речь о редких событиях, для которых измеренные значения недостаточно достоверны. Однако удовлетвориться этим выводом было бы неправильно, поскольку крупные («сверхбольшие») аномалии реально существуют.

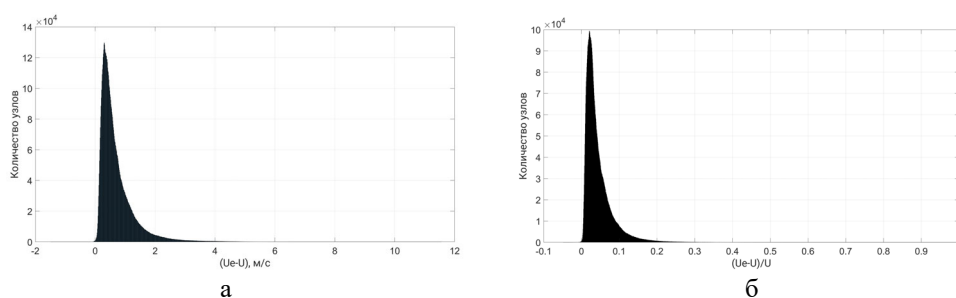


Рисунок 3. Повторяемость (количество случаев для совокупности проанализированных узлов сетки ERA5) различий между эмпирическими значениями модуля скорости ветра и значениями, соответствующими базовому распределению
а – абсолютные различия (м/с) и б – относительные отклонения

Figure 3. The repeatability (number of cases for the ERA5 grid points) of differences between the empirical values of the wind velocity modulus and the values corresponding to the basic distribution

a – absolute differences (m/s) and b – relative deviations

На рис. 4 представлены графики, демонстрирующие соотношение эмпирических квантильных значений и аналогичных значений, соответствующих базовому распределению. На примере конкретного узла (рис. 4а) можно видеть типичную картину: большинство значений лежит практически на биссектрисе, и лишь для $p > 0.90$ заметно некоторое отклонение, где эмпирические значения несколько больше соответствующих им по базовому распределению. Для квантильных значений, соответствующих 0.95, эти различия могут достигать 3 м/с, для 0.99 уже 4.5 м/с, для 0.999 – до 7 м/с. При рассмотрении массы узлов (рис. 4(б-д)) эта картина несколько «размывается», поскольку квантильные значения скоростей на осях соответствуют разным вероятностям: например, для узлов сетки, расположенных на морях, $U(0.95)$, это около 20 или 25 м/с (рис. 4(б-в)), а для континентальных (рис. 4г) – гораздо меньше, например, 15 м/с, из-за этого область графика выше биссектрисы заполняется точками практически вдоль всей длины. Особенно это заметно в области небольших u и для рис. 3д (где собрана информация по всему региону): видно множество полос, крайние правые части которых всё более заметно отклоняются от биссектрисы – это отдельные узлы на суше, для которых характерны

в целом более низкие значения скорости ветра, в том числе экстремумов. Тем не менее, отдельно для Баренцева моря (рис. 4б) для наибольших p расхождение значений остаётся отчетливо выраженным.

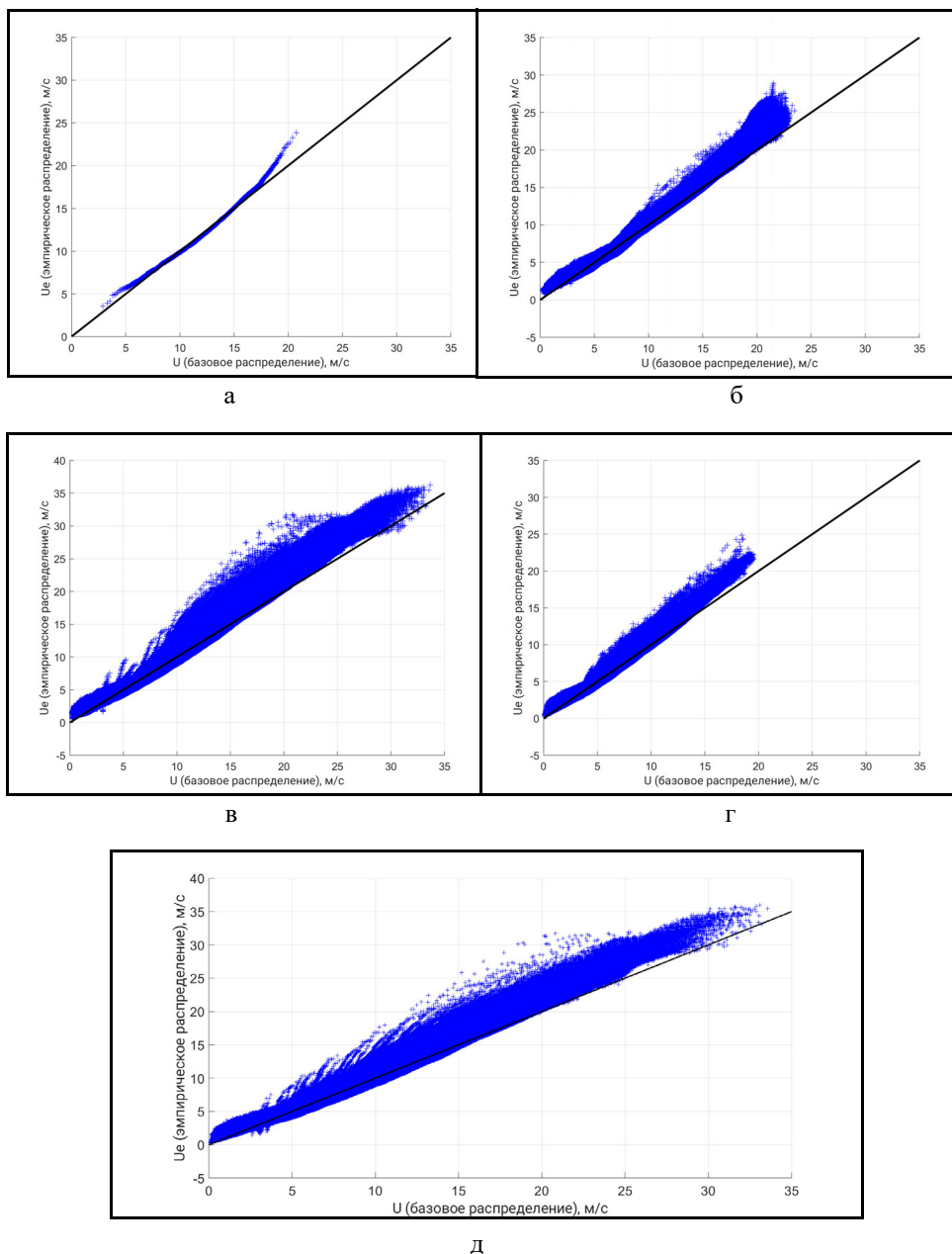


Рисунок 4. Квантиль-квантильный график эмпирических значений скорости ветра (u_e) и значений (u), соответствующих базовому распределению
а) для узла сетки с координатами 70° с.ш., 40° в.д., б) отдельно по Баренцеву морю, в) по Гренландскому морю, г) по материковой части суши, д) по всему исследуемому региону

Figure 4. Quantile-quantile graph of empirical values of wind speed (u_e) and values (u) corresponding to the basic distribution
а) for a grid point with coordinates 70° N, 40° E, б) separately in the Barents Sea, в) in the Greenland Sea, г) on the mainland, е) throughout the studied region

Циркуляционные системы, соответствующие экстремальным скоростям ветра

Соотнесение информации о времени наступления экстремума в том или ином регионе, определенное в соответствии с календарем событий экстремального ветра, с циркуляционными атмосферными системами, выполнено на основе анализа карт давления, построенных по данным ERA5 с шагом 3 ч и архивных синоптических карт DWD с шагом 6 ч (доступных с декабря 2003 г.). Оказалось, что в подавляющем большинстве событий (за исключением случаев новоземельской боры) наиболее значительные экстремумы скорости ветра наблюдались в циклонах синоптического масштаба. Этот вывод близок к результатам, полученным, например, в работе (Суркова, Крылов, 2016) отдельно для акватории Баренцева моря, где на основе кластерного анализа показано, что экстремумы сопровождают циклонические системы с суммарной частотой ~70% за период 1981-2010 гг. При этой общей характерной черте – наличии циклона – сами события довольно разнообразны, это были как небольшие быстро смещающиеся циклоны – члены циклонических серий, – так и крупные долгоживущие циклоны. Как правило, наиболее сильный ветер в циклонах, по данным реанализа, наблюдался к западу, юго-западу, северо-западу от центра и у линий фронта с максимальным значением непосредственно у центра циклона или у линий фронта. Так, для 134 случаев с декабря 2003 по март 2023 гг. мы оценивали местоположение максимумов скорости ветра, по данным ERA5, относительно линий атмосферных фронтов, проведенных на картах DWD. В 86 из 134 случаев экстремальный ветер наблюдался за фронтом в тылу циклона. В 46 случаях экстремумы связаны с фронтом окклюзии (29 раз максимум отмечался непосредственно на фронте окклюзии). В двух случаях значительные скорости ветра отмечались на периферии антициклона с центром над севером европейской территории России и циклона с центром у Северного полюса (03.01.2008, 15.03.2015). Поскольку экстремальный ветер мог наблюдаться в разных частях циклонов одновременно, что не было редкостью, особенно в «старых» циклонах, а также из-за того, что в течение двухсуточного интервала барическое поле было столь изменчиво, что успевало пройти два и более циклонов, то отдельный случай мог попасть сразу в несколько категорий. Пространственный масштаб области сильных ветров слабо зависит от глубины, размера и стадии циклона: в одних случаях область максимума занимала его малую часть, в других сильный ветер наблюдался на обширной области по периферии циклонов, при этом максимальное значение чаще всего отмечалось вблизи центра.

Рассмотрим один из наиболее характерных примеров (относящихся к классу «драконов») – 19-21 февраля 2013 г. Максимальная скорость ветра в восточной части Баренцева моря у берегов о. Новая Земля достигла 27 м/с, для обширной территории (более 1000 узлов в сетке ERA5). Это событие может рассматриваться как одно из самых экстремальных (за последние 43 года наблюдалось еще два близких по мощности события). Максимум скоро-

стей ветра связан с циклоническим вихрем, который вечером 19 января был у берегов Гренландии, и в последующие 4 суток он смещался на восток и углублялся. Большие скорости ветра отмечались уже вечером 20 января (когда циклон достиг Баренцева моря) в двух областях: к северу от центра (рис. 5а) и, судя по синоптической карте, в тёплом секторе у побережья Скандинавии (рис. 5б). Максимальные же значения – более 25 м/с – наблюдались ночью и утром на обширной области в тыловой части уже значительно углубившегося циклона (рис. 5 в,г). После прохождения холодного фронта через архипелаг Новая Земля утром 21 февраля на метеостанции Малые Кармакулы в 9:00 ВСВ зафиксированы наибольшие за 3 суток средняя и максимальная скорости ветра – 24 и 33 м/с соответственно. Температурный фон над акваторией моря после прохождения циклона значительно изменился в связи с интенсивной адвекцией холодного воздуха в тылу. В последующие сутки циклон продолжил смещаться далее на восток за пределы исследуемого региона в акваторию Карского моря, с ним же смещалась и зона максимума ветров.

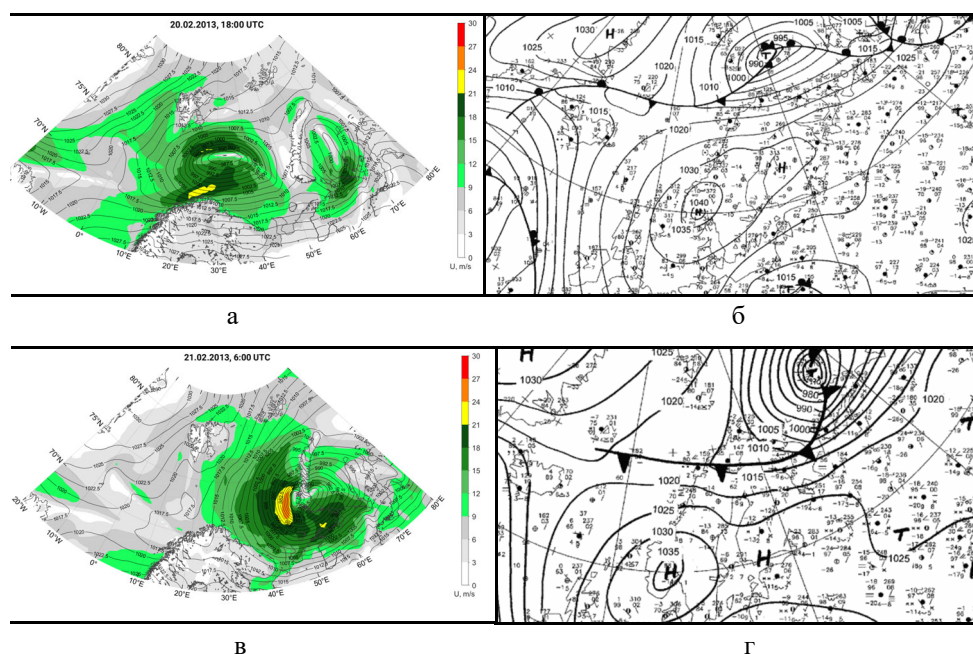


Рисунок 5. Поле давления и анализ погоды 18 ч ВСВ 20 февраля (верхний ряд) и 6 ч ВСВ 21 февраля 2013 г. (нижний ряд), по данным ERA5 (а, в) (цветом показана скорость ветра, м/с, изолиниями показано атмосферное давление на уровне моря, гПа) и данным DWD (б, г)

Figure 5. Pressure field and weather analysis 18h on February 20 (top row) and 6h on February 21, 2013 (bottom row) according to ERA5 (а, в) (color shows wind speed, m/s, isolines show atmospheric pressure at sea level, hPa) and DWD data (б, г)

Таким образом, экстремальный ветер наблюдался в области адвекции холодного арктического воздуха на относительно тёплую свободную ото льда поверхность Баренцева моря. Как известно, значительная часть (около

2/3) ПМЦ образуется в период такого рода холодных вторжений. На основе архивов мы изучили, были ли зафиксированы ПМЦ в пределах этой обширной области максимальных скоростей ветра. Оказалось, что в рассматриваемое время здесь ни по одному из архивов полярных циклонов обнаружено не было.

Интересно также сравнить данную ситуацию, отразившуюся, с точки зрения статистических свойств, в появлении «драконов», с случаем экстремума, принадлежащего крайним значениям базового распределения (то есть с «чёрным лебедем»). Один из таких случаев наблюдался в Норвежском и Баренцевом морях 18-19 марта 2009 г. и был связан с крупным долгоживущим циклоном. Сильный ветер в циклоне также был зафиксирован на обширной области, максимальная скорость составила 19 м/с. Для акваторий двух морей это событие лежит в верхних 10% ряда, но не входит в первую сотню событий ни в одном из узлов, – таким образом, в соответствии с нашими представлениями это действительно классический «чёрный лебедь».

Циклон зародился в Норвежском море 16 марта и медленно смещался на восток. В разные часы сильный ветер до 15-18 м/с отмечался в разных его частях, однако максимум был зафиксирован 18 марта к западу от центра (рис. 6а). На рис. 6б мы видим систему фронтов и две области высоких скоростей перед тёплым и за холодным фронтом (рис. 6а). Спустя 12 часов (рис. 6 (в,г)) максимальный ветер 18-19 м/с наблюдается у о. Шпицберген в тылу циклона за фронтом окклюзии. Как и в множестве других случаев, через эту область проходила граница морского льда. Анализ архивов ПМЦ показал, что и в этом случае на рассматриваемой территории они не зафиксированы.

По внешним признакам в случае, представленном на рис. 6, циклон менее глубокий, чем на рис. 5, однако, как уже было отмечено выше, глубина циклонов не коррелирует с экстремальностью ветров. В то же время в обоих случаях наблюдается сходная картина усиления скорости ветра за холодным фронтом. Однако статистические свойства экстремумов ветра получились совершенно разными: одно из событий соответствует базовому распределению, а другое – нет. Приходится сделать вывод, что по крайней мере в рамках классического фронтального анализа не удастся идентифицировать ситуации, в которых появляются «драконы».

Рассмотрим пример, когда экстремальный ветер наблюдался с участием ПМЦ. 26 декабря 2006 г. в Баренцевом и Норвежском морях одновременно наблюдалось сразу 3 мезомасштабных вихря, 2 из которых являлись ПМЦ и ещё один не попадал в категорию ПМЦ по критериям интенсивности и статической устойчивости (Stoll et al., 2022). Координаты одного из них непосредственно совпадают с областью сильных ветров – максимальная скорость ветра, по данным ERA5, достигла 24 м/с. (Отметим, что, по данным реанализа CARRA (Yang et al., 2020), скорость ветра была еще выше – до 32 м/с). Это событие попало в календарь как третье за 43 года для трех узлов ERA5 у побережья Норвегии, в первую пятерку оно попадает уже для 31 узла сетки, в

первую десятку – в 138 узлах. На картах (рис. 7а) видны два полярных вихря в области окклюдированного циклона (рис. 7б) над акваториями Баренцева и Норвежского морей. Они были обнаружены и по спутниковым снимкам (Rojo et al., 2019a,b). Через 6 часов (рис. 7в) один из вихрей приблизился к побережью, причем скорость ветра увеличилась. На синоптической карте через эту зону проведён вторичный холодный фронт (рис. 7г). В это же время, 18-20 ч, ветер достигает максимальных значений – на карте в зоне ПМЦ заметно несколько характерных «пятен». Подобный случай усиления ветра в этой части акватории связывается с барьерным эффектом гор северной части Скандинавского полуострова высотой 1-2 км и, как следствие, дополнительным усилением опускания к земной поверхности частиц воздуха с более высокой скоростью. Таким образом, формирование этого «дракона» связано с совместным действием нескольких факторов: благоприятной для формирования больших скоростей ветра синоптической ситуации, явлений мезометеорологического масштаба и орографии на суше.

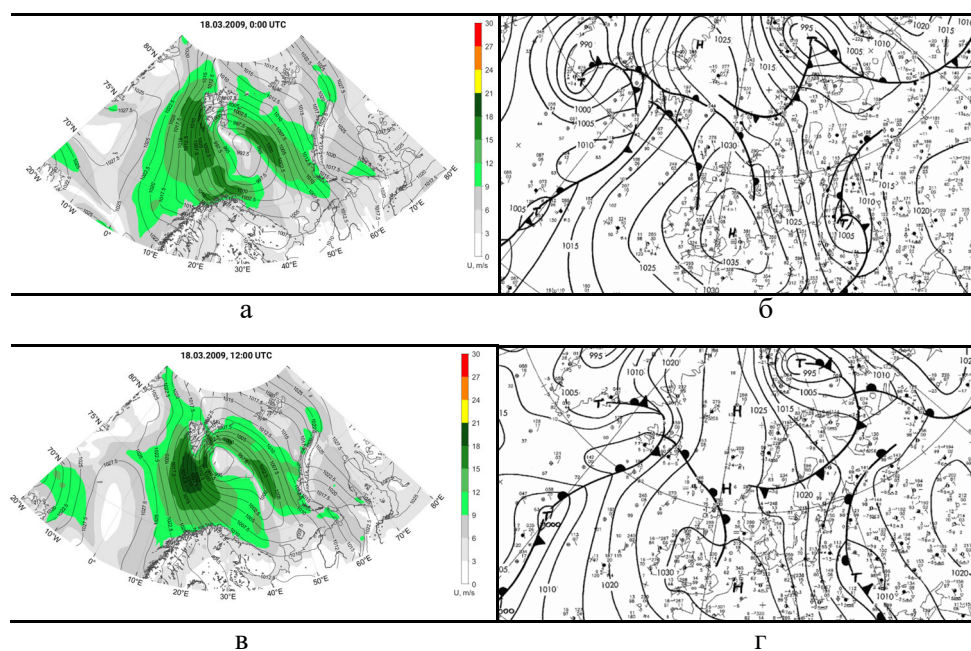


Рисунок 6. Поле давления и анализ погоды 18 марта 2009 г. (0 ч (верхний ряд) и 12 ч (нижний ряд) ВСВ), по данным ERA5 (а, в) (цветом показана скорость ветра, м/с, изолиниями показано атмосферное давление на уровне моря, гПа) и DWD (б, г)

Figure 6. Pressure field and weather analysis on March 18, 2009 (0 h (upper row) and 12 h (lower row) according to ERA5 (a, c) (color shows wind speed, m/s, isolines show atmospheric pressure at sea level, hPa) and DWD (b, d) data

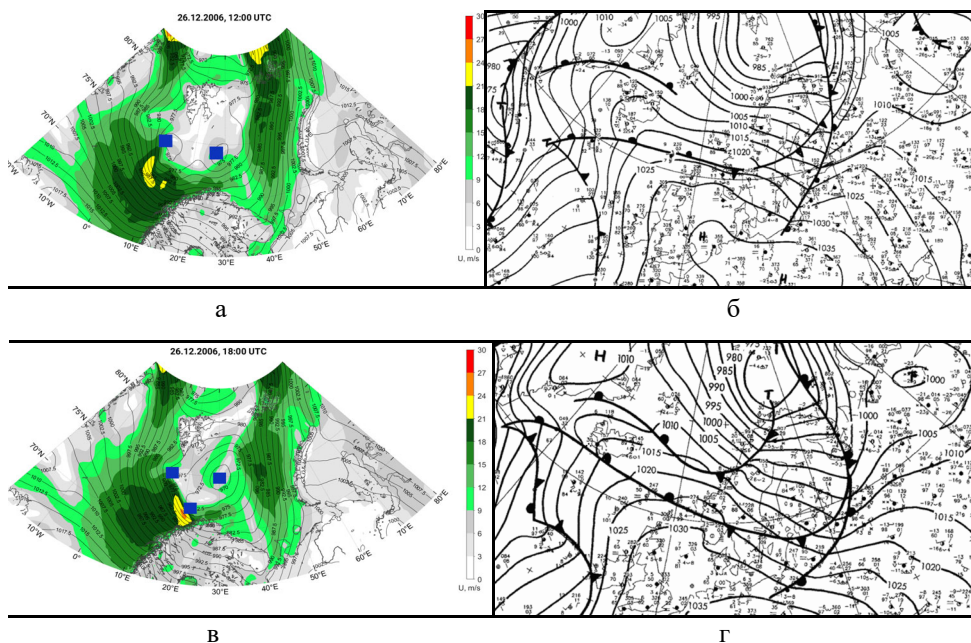


Рисунок 7. Поле давления и анализ погоды 26 декабря 2006 г. (12 ч (верхний ряд) и 18 ч (нижний ряд) ВСВ), по данным ERA5 (а, в) (цветом показана скорость ветра, м/с, изолиниями показано атмосферное давление на уровне моря, гПа) и DWD (б, г). Синими квадратами показано положение полярных мезоциклонов

Figure 7. Pressure field and weather analysis on December 26, 2006 12 h (upper row) and 18 h (lower row) according to ERA5 (a, c) (color shows wind speed, m/s, isolines show atmospheric pressure at sea level, hPa) and DWD (b, d) data. Blue squares show the position of polar lows

Выводы

Для скоростей ветра атлантического сектора Арктики допустимо применение квантильных значений, рассчитанных по распределению Вейбулла, для вероятностей, не превышающих ~ 0.90 . При $p > 0.90$ начинают возрастать погрешности, и для наиболее экстремальных событий, наблюдавшихся 1-3 раза за исследуемый период в 43 года, базовые квантильные значения могут быть заметно ниже наблюдавшихся (воспроизведенных в ERA5). Таким образом, для оценки вероятности «сверхбольших» экстремумов, базовое распределение не подходит.

Рассмотрев более 300 событий из календаря экстремумов, мы пришли к выводу, что практически всегда случаи наиболее сильных ветров, соответствующие «драконам», связаны с циклонами на арктическом фронте, и наблюдаются чаще всего в их тыловой части и за фронтом окклюзии или непосредственно на нём. В незначительной части случаев в области, где наблюдался максимум ветра, были обнаружены ПМЦ. Почти всегда они были «вмонтированные» в циклоны. Масса подобных ситуаций обнаружена и

для «чёрных лебедей». Чем отличаются случаи «драконов» от «чёрных лебедей», обнаружить на основе классического фронтального анализа не представляется возможным, однако, по крайней мере можно сделать вывод, что не ПМЦ обеспечивают эти различия.

В то же время надежность вывода о роли ПМЦ в формировании экстремального ветра ограничивается, возможно, существующими недостатками в методах их идентификации. Так, мы обнаружили значительное число расхождений, когда в климатологии (Stoll et al., 2022), построенной на основе алгоритма автоматической обработки путей перемещения мезомасштабных циклонов, ПМЦ был отмечен, однако он не был зафиксирован в других архивах, полученных вручну в основном по спутниковым данным. Степень совпадения ПМЦ между этими архивами варьирует в пределах 60-80%. Вместе с тем, наблюдались также и обратные примеры, когда ПМЦ, идентифицированные на спутниковых снимках и подробно описанные в ряде работ, например, (Føre et al., 2012; Kolstad et al., 2016; Wu, 2021), не зафиксированы в архивах автоматизированной обработки. Это, например, случай ПМЦ, зафиксированный над Баренцевым морем 18-21 декабря 2002 г. Максимальная скорость ветра 24 м/с наблюдалась рядом с его центром, в ряде узлов восточной части Баренцева моря это событие попало в первую тройку по скорости ветра и, следовательно, отражено в нашем календаре экстремумов. Тем не менее, этот случай не представлен ни в одном из доступных архивов ПМЦ. По всей видимости, дело в размытых критериях ПМЦ, несоответствие которым не позволило отнести его к ПМЦ.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке гранта 23-III-07-33 «Экстремальные природные явления в Арктике в условиях современного потепления климата», выполняющегося в интересах Междисциплинарных научно-образовательных школ Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова.

А также в рамках госзаказа № 121051400081-7 «Погодные и климатические процессы различных пространственно-временных масштабов в условиях антропогенного воздействия».

Список литературы

- Голицын, Г.С. (2013) *Статистика и динамика природных процессов и явлений*, М., КРАСАНД, 400 с.
- Кислов, А.В., Матвеева, Т.А. (2016) Экстремумы скорости ветра в европейском секторе Арктики, *Метеорология и гидрология*, № 7, с. 5-14.
- Суркова, Г.В., Крылов, А.А. (2016) Синоптические ситуации, способствующие формированию экстремальных значений скорости ветра в Баренцевом море, *Вестник Московского университета, серия География*, № 6, с. 8-25.

Coles, S. (2001) *An Introduction to Statistical Modeling of Extreme Values. Springer Series in Statistics*. Springer Verlag, available at: <http://dx.doi.org/10.1007/978-1-4471-3675-0>.

Fisher, R.A., Tippett, L.H.C. (1928) Limiting Forms of the Frequency Distribution of the Largest or Smallest Members of a Sample, *Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*, no. 24, pp. 180-190, available at: <http://dx.doi.org/10.1017/S0305004100015681>.

Føre, I. et al. (2012) A 'hurricane-like' polar low fuelled by sensible heat flux: high-resolution numerical simulations, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, vol. 138, no. 666, pp. 1308-1324, available at: <http://dx.doi.org/10.1002/qj.1876>.

Gnedenko, B. (1943) Sur la distribution limite du terme maximum d'une série aléatoire, *Annals of Mathematics*, no. 44, pp. 423-453, (In French), available at: <http://dx.doi.org/10.2307/1968974>.

Hersbach, H. (2020) The ERA5 global reanalysis, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, vol. 146, no. 730, pp. 1999-2049.

Janczura, J., Weron, R. (2012) Black Swans or Dragon-Kings? A Simple Test for Deviations from the Power Law, *The European Physical Journal Special Topics*, no. 205, pp. 79-93, available at: <https://doi.org/10.1140/epjst/e2012-01563-9>.

Kislov, A., Matveeva, T. (2016) An Extreme Value Analysis of Wind Speed over the European and Siberian Parts of Arctic Region, *Atmospheric and Climate Sciences*, no. 6, pp. 205-223, available at: <http://dx.doi.org/10.4236/acs.2016.62018>.

Kislov, A., Platonov, V. (2019) Analysis of Observed and Modelled Near-Surface Wind Extremes over the Sub-Arctic Northeast Pacific, *Atmospheric and Climate Sciences*, no. 9, pp. 146-158, available at: <https://doi.org/10.4236/acs.2019.91010>.

Kislov, A., Matveeva, T., Antipina, U. (2022) Precipitation Extremes and Their Synoptic Models in the Northwest European Sector of the Arctic during the Cold Season, *Atmosphere*, no. 13, p. 1116, available at: <https://doi.org/10.3390/atmos13071116>.

Kolstad, E.W., Bracegirdle, T.J., Zahn, M. (2016) Re-examining the roles of surface heat flux and latent heat release in a "hurricane-like" polar low over the Barents Sea, *Journal of Geophysical Research. Atmospheres*, vol. 121, no. 13, pp. 7853-7867, available at: <http://dx.doi.org/10.21046/2070-7401-2017-14-3-297-304>.

Myslenkov, S., Platonov, V., Kislov, A., Silvestrova, K., Medvedev, I. (2021) Thirty-Nine-Year Wave Hindcast, Storm Activity, and Probability Analysis of Storm Waves in the Kara Sea, Russia, *Water*, no. 13, pp. 648, available at: <https://doi.org/10.3390/w13050648>.

Palutikof, J.P., Brabson, B.B., Lister, D.H., Adcock, S.T. (1999) A Review of Methods to Calculate Extreme Wind Speeds. *Meteorological Applications*, no. 6, pp. 119-132, available at: <http://dx.doi.org/10.1017/S1350482799001103>.

Rasmussen, E.A., Turner, J. (2003) *Polar lows: Mesoscale weather systems in the polar region*, Cambridge, Cambridge University Press, 612 p.

Revokatova, A. et al. (2021) High-resolution simulation of polar lows over Norwegian and Barents seas using the COSMO-CLM and ICON models for the 2019-2020 cold season, *Atmosphere*, no. 12, p. 137, available at: <https://doi.org/10.3390/atmos12020137>.

Rojo, M. et al. (2015) Polar low tracks over the Nordic Seas: A 14-winter climatic analysis, *Tellus A. Dynamic Meteorology and Oceanography*, no. 67, p. 24660, available at: <https://doi.org/10.3402/tellusa.v67.24660>.

Rojo, M., Claud, C., Noer, G., Carleton, A.M. (2019a) In situ measurements of surface winds, waves, and sea state in polar lows over the North Atlantic, *Journal of Geophysical Research. Atmospheres*, no. 124, pp. 700-718, available at: <https://doi.org/10.1029/2017JD028079>.

Rojo, M., Noer, G., Claud, C. (2019b) *Polar Low tracks in the Norwegian Sea and the Barents Sea from 1999 until 2019*, PANGAEA, available at: <https://doi.org/10.1594/PANGAEA.903058>, supplement to: Rojo et al. 2019.

Shapiro, M.A., Fedor, L.S., Hampel, T. (1987) Research aircraft measurements of a polar low over the Norwegian Sea, *Tellus A. Dynamic Meteorology and Oceanography*, no. 39, pp. 272-306, available at: <https://doi.org/10.3402/tellusa.v39i4.11761>.

Smirnova, J.E., Golubkin, P.A. (2017) Comparing polar lows in atmospheric reanalyses: Arctic System Reanalysis versus ERA-Interim, *Monthly Weather Review*, vol. 145, pp. 2375-2383, doi: 10.1175/MWR-D-16-0333.1.

Sornette, D. (2009) Dragon-Kings, Black Swans and the Prediction of Crises, *International Journal of Terraspace Science and Engineering*, no. 2, pp. 1-18, available at: <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.1596032>.

Sornette, D., Ouillon, G. (2012) Dragon-Kings: Mechanisms, Statistical Methods and Empirical Evidence, *The European Physical Journal Special Topics*, vol. 205, pp. 1-26, available at: <https://doi.org/10.1140/epjst/e2012-01559-5>.

Stoll, P.J. et al. (2018) An objective global climatology of polar lows based on reanalysis data, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, vol. 144, pp. 2099-2117, available at: <http://dx.doi.org/10.1002/qj.3309>.

Stoll, P.J. (2022) A global climatology of polar lows investigated for local differences and wind-shear environments, *Weather and Climate Dynamics*, vol. 3, no. 2, pp. 483-504, available at: <https://doi.org/10.5194/wcd-3-483-2022>.

Taleb, N.N. (2010) *The Black Swan. The Impact of the Highly Improbable*. 2nd Edition, Penguin, New York.

Watanabe, S.-i.I., Niino, H., Yanase, W. (2016) Climatology of polar mesocyclones over the Sea of Japan using a new objective tracking method, *Monthly Weather Review*, vol. 144, pp. 2503-2515, available at: <https://doi.org/10.1175/MWR-D-15-0349.1>.

Wu, L. (2021) Effect of atmosphere-wave-ocean/ice interactions on a polar low simulation over the Barents Sea, *Atmospheric Research*, vol. 248, pp. 105-183, available at: <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2020.105183>.

Yang, X. et al. (2020) C3S Arctic regional reanalysis-full system documentation, available at: <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-carra-single-levels?tab=docon>.

References

Golitsyn, G.S. (2013) *Statistika i dinamika prirodnikh protsessov i yavleniy* [Statistics and dynamics of natural processes and phenomena], KRASAND, Moscow, Russia, 400 p.

Kislov, A.V., Matveyeva, T.A. (2016) Ekstremumy skorosti vetra v yevropeyskom sektore Arktiki [Wind speed extremes in the European sector of the Arctic], *Meteorologiya i gidrologiya*, no. 7, pp. 5-14.

Surkova, G.V., Krylov, A.A. (2016) Sinopticheskiye situatsii, sposobstvuyushchiye formirovaniyu ekstremal'nykh znacheniy skorosti vetra v Barentsevom more [Synoptic situations contributing to the formation of extreme wind speeds in the Barents Sea], *Vestnik Moskovskogo universiteta, seriya Geografiya*, no. 6, pp. 18-25.

Coles, S. (2001) *An Introduction to Statistical Modeling of Extreme Values. Springer Series in Statistics*. Springer Verlag, available at: <http://dx.doi.org/10.1007/978-1-4471-3675-0>.

Fisher, R.A., Tippett, L.H.C. (1928) Limiting Forms of the Frequency Distribution of the Largest or Smallest Members of a Sample, *Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*, no. 24, pp. 180-190, available at: <http://dx.doi.org/10.1017/S0305004100015681>.

Føre, I. et al. (2012) A 'hurricane-like' polar low fuelled by sensible heat flux: high-resolution numerical simulations, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, vol. 138, no. 666, pp. 1308-1324, available at: <http://dx.doi.org/10.1002/qj.1876>.

Gnedenko, B. (1943) Sur la distribution limite du terme maximum d'une série aléatoire, *Annals of Mathematics*, no. 44, pp. 423-453, (In French), available at: <http://dx.doi.org/10.2307/1968974>.

Hersbach, H. (2020) The ERA5 global reanalysis, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, vol. 146, no. 730, pp. 1999-2049.

Janczura, J., Weron, R. (2012) Black Swans or Dragon-Kings? A Simple Test for Deviations from the Power Law, *The European Physical Journal Special Topics*, no. 205, pp. 79-93, available at: <https://doi.org/10.1140/epjst/e2012-01563-9>.

Kislov, A., Matveeva, T. (2016) An Extreme Value Analysis of Wind Speed over the European and Siberian Parts of Arctic Region, *Atmospheric and Climate Sciences*, no. 6, pp. 205-223, available at: <http://dx.doi.org/10.4236/acs.2016.62018>.

Kislov, A., Platonov, V. (2019) Analysis of Observed and Modelled Near-Surface Wind Extremes over the Sub-Arctic Northeast Pacific, *Atmospheric and Climate Sciences*, no. 9, pp. 146-158, available at: <https://doi.org/10.4236/acs.2019.91010>.

Kislov, A., Matveeva, T., Antipina, U. (2022) Precipitation Extremes and Their Synoptic Models in the Northwest European Sector of the Arctic during the Cold Season, *Atmosphere*, no. 13, p. 1116, available at: <https://doi.org/10.3390/atmos13071116>.

Kolstad, E.W., Bracegirdle, T.J., Zahn, M. (2016) Re-examining the roles of surface heat flux and latent heat release in a “hurricane-like” polar low over the Barents Sea, *Journal of Geophysical Research. Atmospheres*, vol. 121, no. 13, pp. 7853-7867, available at: <http://dx.doi.org/10.21046/2070-7401-2017-14-3-297-304>.

Myslenkov, S., Platonov, V., Kislov, A., Silvestrova, K., Medvedev, I. (2021) Thirty-Nine-Year Wave Hindcast, Storm Activity, and Probability Analysis of Storm Waves in the Kara Sea, Russia, *Water*, no. 13, p. 648, available at: <https://doi.org/10.3390/w13050648>.

Palutikof, J.P., Brabson, B.B., Lister, D.H., Adcock, S.T. (1999) A Review of Methods to Calculate Extreme Wind Speeds, *Meteorological Applications*, no. 6, pp. 119-132, available at: <http://dx.doi.org/10.1017/S1350482799001103>.

Rasmussen, E.A., Turner, J. (2003) *Polar lows: Mesoscale weather systems in the polar region*. Cambridge, Cambridge University Press, 612 p.

Revokatova, A. et al. (2021) High-resolution simulation of polar lows over Norwegian and Barents seas using the COSMO-CLM and ICON models for the 2019-2020 cold season, *Atmosphere*, no. 12, p. 137. available at: <https://doi.org/10.3390/atmos12020137>.

Rojo, M. et al. (2015) Polar low tracks over the Nordic Seas: A 14-winter climatic analysis, *Tellus A. Dynamic Meteorology and Oceanography*, no. 67, p. 24660, available at: <https://doi.org/10.3402/tellusa.v67.24660>.

Rojo, M., Claud, C., Noer, G., Carleton, A.M. (2019a) In situ measurements of surface winds, waves, and sea state in polar lows over the North Atlantic, *Journal of Geophysical Research. Atmospheres*, no. 124, pp. 700-718, available at: <https://doi.org/10.1029/2017JD028079>.

Rojo, M., Noer, G., Claud, C. (2019b) Polar Low tracks in the Norwegian Sea and the Barents Sea from 1999 until 2019, *PANGAEA*, available at: <https://doi.org/10.1594/PANGAEA.903058>, supplement to: Rojo et al. 2019.

Shapiro, M.A., Fedor, L.S., Hampel, T. (1987) Research aircraft measurements of a polar low over the Norwegian Sea, *Tellus A. Dynamic Meteorology and Oceanography*, no. 39, pp. 272-306, available at: <https://doi.org/10.3402/tellusa.v39i4.11761>.

Smirnova, J.E., Golubkin, P.A. (2017) Comparing polar lows in atmospheric reanalyses: Arctic System Reanalysis versus ERA-Interim, *Monthly Weather Review*, vol. 145, pp. 2375-2383, doi: 10.1175/MWR-D-16-0333.1.

Sornette, D. (2009) Dragon-Kings, Black Swans and the Prediction of Crises, *International Journal of Terraspace Science and Engineering*, no. 2, pp. 1-18, available at: <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.1596032>.

Sornette, D., Ouillon, G. (2012) Dragon-Kings: Mechanisms, Statistical Methods and Empirical Evidence, *The European Physical Journal Special Topics*, vol. 205, pp. 1-26, available at: <https://doi.org/10.1140/epjst/e2012-01559-5>.

Stoll, P.J. et al. (2018) An objective global climatology of polar lows based on reanalysis data, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, vol. 144, pp. 2099-2117, available at: <http://dx.doi.org/10.1002/qj.3309>.

Stoll, P.J. (2022) A global climatology of polar lows investigated for local differences and wind-shear environments, *Weather and Climate Dynamics*, vol. 3, no. 2, pp. 483-504, available at: <https://doi.org/10.5194/wcd-3-483-2022>.

Taleb, N.N. (2010) *The Black Swan. The Impact of the Highly Improbable*. 2nd Edition, Penguin, New York.

Watanabe, S.-i.I., Niino, H., Yanase, W. (2016) Climatology of polar mesocyclones over the Sea of Japan using a new objective tracking method, *Monthly Weather Review*, vol. 144, pp. 2503-2515, available at: <https://doi.org/10.1175/MWR-D-15-0349.1>.

Wu, L. (2021) Effect of atmosphere-wave-ocean/ice interactions on a polar low simulation over the Barents Sea, *Atmospheric Research*, vol. 248, pp. 105-183, available at: <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2020.105183>.

Yang, X. et al. (2020) *C3S Arctic regional reanalysis – full system documentation*, available at: <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-carra-single-levels?tab=docon>.

Статья поступила в редакцию (Received): 28.03.2024.

Статья доработана после рецензирования (Revised): 10.04.2024.

Принята к публикации (Accepted): 16.04.2024.

Для цитирования / For citation:

Кислов, А.В., Ломакин, И.Р., Мысленков, С.А. (2024) Экстремальные скорости ветра в Атлантическом секторе Арктики: статистика и циркуляционные модели, *Фундаментальная и прикладная климатология*, т. 10, № 2, с. 199-218, doi:10.21513/0207-2564-2024-2-199-218.

Kislov, A.V., Lomakin, I.R., Myslenkov, S.A. (2024) Extreme wind speeds in the Atlantic sector of the Arctic: statistics and circulation models, *Fundamental and Applied Climatology*, vol. 10, no. 2, pp. 199-218, doi:10.21513/0207-2564-2024-2-199-218.

Детализация климатических трендов температуры и осадков на территории России с использованием квантильной регрессии и кластеризации

А.С. Лавров, А.М. Стерин*

ФГБУ «Всероссийский научно-исследовательский институт
гидрометеорологической информации – Мировой центр данных»,
Россия, 249035, г. Обнинск, ул. Королева, 6

*Адрес для переписки: *fliorcid@yandex.ru*

Реферат. С использованием метода квантильной регрессии (QR, quantile regression), дающего детальную картину климатических трендов для любого из квантилей значений метеовеличин в интервале от 0 до 1, выполнены расчеты климатических трендов максимальной суточной температуры и суточных сумм осадков для территории РФ. Для расчетов используются данные наблюдений по более чем 1450 метеорологическим станциям РФ за период с 1987 по 2021 годы включительно.

Проведена кластеризация рассчитанных климатических трендов и проанализированы пространственные особенности полученных кластеров метеорологических станций и их соответствие квазиоднородным климатическим регионам, используемым для обобщающих оценок состояния климата в «Докладах об особенностях климата на территории РФ», ежегодно выпускаемых Росгидрометом. Выделены 15 кластеров метеорологических станций на территории РФ, таких, что входящие в кластеры станции демонстрируют схожие особенности («паттерны») трендов максимальной суточной температуры и суточных сумм осадков. При этом в процессе кластеризации величины, определяющие географическое положение метеостанций, не участвовали.

Результаты работы могут быть использованы для уточнений климатического районирования территории РФ, учитывающего особенности тенденций долгопериодных изменений приземного климата.

Ключевые слова. Температура, сумма осадков, климатический тренд, квантиль, квантильная регрессия, кластер, метод К-средних.

Detailing of climatic trends of temperature and precipitation in the territory of the Russian Federation using quantile regression and clustering

*A.S. Lavrov *, A.M. Sterin*

All-Russian Research Institute of Hydrometeorological Information –
World Data Center,
6, Korolyov Str., Obninsk, 249035, Russian Federation

* Correspondence address: *fliorcid@yandex.ru*

Abstract. Using the method of quantile regression, which gives a detailed picture of climate trends for any of the quantiles in the range from 0 to 1, calculations of climate trends of maximum daily temperature and daily precipitation for the territory of the Russian Federation were made. For calculations, observational data from more than 1450 meteorological stations for the period from 1987 to 2021 inclusive are used.

The clustering of the calculated climate trends was carried out and the spatial features of the obtained clusters of meteorological stations and their correspondence to the quasi-homogeneous climatic regions used for assessments in the annual “Roshydromet’s Reports on the Peculiarities of the Climate on the Territory of the Russian Federation” were analyzed. 15 clusters of meteorological stations on the territory of the Russian Federation have been identified, such that the stations included in the clusters demonstrate similar features (“patterns”) of trends in maximum daily temperature and daily precipitation amounts. At the same time, the values that determine the geographical location of weather stations did not participate in the clustering process.

The results of the work can be used to refine the climatic zoning of the territory of the Russian Federation, taking into account the features of trends in long-term changes in surface climate.

Keywords. Temperature, total precipitation, climate trend, quantile, quantile regression, cluster, K-means method.

Введение

Квантили являются важной характеристикой распределений метеовеличин, дающей более полную картину по сравнению с традиционно исследуемыми в климатологии моментами первого и второго порядков. Интерес к квантилям в настоящее время возрастает в связи с необходимостью в условиях меняющегося климата анализировать свойства «хвостов» распределений метеовеличин, что в свою очередь важно для исследования свойств метеовеличин, близких к экстремальным и относимых к опасным и неблагоприятным метеорологическим явлениям.

Наряду с анализом распределений метеовеличин, в условиях меняющегося климата важна задача анализа эволюции во времени распределений метеовеличин. Решение такой задачи с рассмотрением независимой переменной X (предиктора), характеризующей положение значений метеовеличины Y (предиктанта) на временной оси, позволяет осуществлять оценку и анализ климатических трендов. Традиционно применяемые в климатологии оценки климатических трендов, основанные на методе наименьших квадратов (МНК), позволяют оценивать долгопериодные тенденции изменения лишь условного математического ожидания предиктанта $E(Y/X)$ в зависимости от предикторов X . Метод квантильной регрессии (Koenker, Bassett, 1978), (МКР) – робастный непараметрический инструментальный регрессионного анализа, дающий оценки значений коэффициента регрессии для произвольной в интервале от нуля до единицы величины квантиля τ ($0 < \tau < 1$) значений предиктанта Y .

Решение задачи построения линейной квантильной регрессии для произвольной величины квантиля τ ($0 < \tau < 1$) ведется путем оптимизации следующего выражения:

$$\hat{\beta} = \operatorname{argmin} \left[\sum_{i \in \{i: y_i \geq x'_i \beta\}} \tau |y_i - x'_i \beta| + \sum_{i \in \{i: y_i < x'_i \beta\}} (1 - \tau) |y_i - x'_i \beta| \right].$$

В случае задачи расчета климатических трендов, когда в роли предиктора рассматривается временной отсчет, МКР дает более детальное, по сравнению с методом наименьших квадратов, представление об изменении метеорологических характеристик с течением времени. В частности, он дает оценки трендов значений метеовеличин Y , близких к экстремально малым (для значений квантилей, близких к нулю – левый хвост распределения Y), и значений метеовеличин Y , близких к экстремально большим (для значений квантилей, близких к единице – правый хвост распределения Y), что весьма актуально в связи с увеличением частоты экстремальных явлений и отмечаемым ростом потерь от таких явлений.

В ходе анализа обычно строятся зависимости значений климатического тренда от величины квантиля из интервала от нуля до единицы, называемые процесс-диаграммами и представляющие детализированный по значениям квантиля тренд.

Результаты такого анализа опубликованы в ряде работ, причем первые появившиеся работы описывали результаты анализа трендов приземной температуры воздуха (Fan Lijun, 2014; Gao, Franzke, 2017; Sterin, Timofeev, 2016; Стерин, Тимофеев, 2016).

Наряду с анализом трендов температуры, метод квантильной регрессии находит широкое применение при анализе пространственных и временных особенностей режима осадков, в том числе трендов экстремально высоких значений осадков и вызываемых при этом соответствующих опасных явлениях (Sertac, 2021; Salam et al., 2019; Bhikhari, Nirajan, 2020; Zheng, 2016; Lausier, Shaleen, 2018; Haugen et al., 2019). В то же время достаточно широкое распространение получили работы по анализу с помощью метода квантильной регрессии режима засух (Willems, Vrac, 2011; Cannon et al., 2015; Zarch et al., 2015).

В ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД» с помощью метода квантильной регрессии проводится исследование детальной структуры климатических трендов как для температуры в свободной атмосфере (Стерин, Лавров, 2021) по радиозондовым данным, так и для приземной температуры (Стерин, Лавров, 2022а,б).

Так, в работе (Стерин, Лавров, 2022а) исследование климатических трендов приземной температуры проводится на данных более чем 1400 метеорологических станций на территории России. Для пространственного обобщения полученных квантильных оценок трендов была выполнена кластеризация в многомерном пространстве характеристик квантильных трендов при-

земной температуры. При формировании многомерного пространства учитывались сезонные характеристики процесс-диаграмм трендов аномалий для трех характеристик суточной температуры: минимальной, максимальной и средней суточной температур. В результате кластеризации было показано, что, несмотря на отсутствие среди переменных многомерного пространства характеристик географического положения пунктов наблюдений, полученные кластеры не только располагаются географически компактно, но и в основном соответствуют известным подходам к выделению на территории России квазиоднородных климатических регионов.

В качестве следующего шага анализа климатических трендов методом квантильной регрессии представляются целесообразными вычисление значений трендов с формированием многомерного пространства по характеристикам как температуры, так и осадков, и кластеризация станций по характеристикам трендов обеих этих метеовеличин. Отметим, что квантильная регрессия использовалась для совместного анализа детальной структуры трендов температуры и осадков, например, в работе (Onderka, Pecho, 2023), однако для конкретной локальной территории.

Результаты расчетов и их обсуждение

В данной работе климатические тренды приземной температуры исследуются совместно с климатическими трендами сумм осадков на территории всей РФ.

Как следует из результатов нашей предыдущей работы (Стерин, Лавров, 2022а), различия в результатах использования квантильной регрессии для анализа трендов трех суточных характеристик температуры: максимальной суточной, средней суточной и минимальной суточной температур – имеют место, но незначительны. Поэтому в данной работе используются расчеты температурных трендов на основе квантильной регрессии только для максимальной суточной температуры. Данные по средней суточной и минимальной суточной температуре в настоящих расчётах не использовались.

Для расчета климатических трендов использованы данные по примерно 1450 метеорологическим станциям РФ за период 1987-2021 гг. Оценки аномалий суточных значений максимальной температуры вычислялись по отношению к соответствующим суточным нормам за период 1987-2016 гг.

Для построения процесс-диаграмм и их последующего обобщения расчеты МКР трендов аномалий максимальной суточной приземной температуры T и сумм осадков R для каждой станции наблюдения и для каждого из четырех сезонов года осуществлялись для различных значений квантилей τ . Для каждого из четырех сезонов вводились общепринятые обозначения: DJF – декабрь-февраль, MAM – март-май, JJA – июнь-август и SON – сентябрь-ноябрь. По результатам расчетов, для аномалий максимальной суточной температуры для каждого из четырех сезонов сформированы переменные:

- разности между коэффициентами тренда β для разных значений квантилей: $T_{25}-T_5$ между квантилями $\tau = 0.25$ и 0.05 (характеристика «левого

хвоста распределения»);

- $T_{75}-T_{25}$ – разности между квантилями $\tau = 0.75$ и 0.25 (характеристика «срединной части распределения»);
- $T_{95}-T_{75}$ – разности между квантилями $\tau = 0.95$ и 0.75 (характеристика «правого хвоста распределения»);
- среднее значение тренда по всем рассчитанным квантилям для аномалий максимальной суточной температуры каждого из четырех сезонов.

Всего, таким образом, на основе расчетов трендов аномалий максимальной суточной температуры были сформированы 16 переменных.

При формировании переменных, описывающих квантильные тренды суточных сумм осадков, очевидно, что из-за присутствия в месячных и сезонных порциях данных значительной доли нулевых значений суточных осадков для малых величин квантилей (обычно, для τ менее 0.5-0.6) тренды принимают нулевые или незначимо малые по абсолютной величине значения. С учетом этого расчеты трендов суточных сумм осадков проводились для всего диапазона квантилей от 0.05 до 0.95, но для кластеризации формирование многомерных описаний трендов осадков ограничивалось диапазоном от $\tau = 0.65$ и заканчивая значением $\tau = 0.95$, а именно: на основании расчетов квантильных трендов для суточных сумм осадков R были сформированы для каждого из четырех сезонов переменные R_{65} , R_{75} , R_{85} и R_{95} – значения квантильных трендов для квантилей τ , равных 0.65, 0.75, 0.85 и 0.95 соответственно. Рассчитывалась также средняя сезонная сумма осадков.

Особенности процесс-диаграмм полного диапазона значений квантилей для суточных сумм осадков продемонстрированы на рис. 1. Интерпретация представленных на рис. 1 процесс-диаграмм состоит в следующем. Для станции Невельск большие значения сумм осадков в зимний сезон, соответствующие квантилям, превышающим 0.2, растут тем быстрее, чем больше значения квантилей. Аналогичная картина, но для весеннего сезона и для квантилей, превышающих 0.6, может быть отмечена для станции Свиягино. Противоположная тенденция, когда с ростом значений квантиля скорость роста значений суммы осадков становится отрицательной, наблюдается для летнего сезона в Астрахани и для осеннего сезона – по станции Тивяку (Хабаровский край). При этом для всех приводимых на рис. 1 случаев с ростом значений квантилей возрастает и неопределенность оценки квантильных трендов, независимо от знака трендов.

Кластеризация станций по значениям только трендов суточных сумм осадков (без трендов аномалий температуры) проводилась, но ее результаты и их обсуждение станут материалом отдельной публикации.

Общее число переменных по результатам расчетов с использованием МКР трендов аномалий максимальной суточной температуры и суточных сумм осадков составило 36. Каждая из 36 выбранных переменных перед использованием для кластеризации проходила процедуру стандартизации.

В пространстве сформированных 36 стандартизованных переменных методом k -средних (k -MEANS) была проведена кластеризация метеорологических станций, участвующих в расчетах. Процедура кластеризации для дан-

ной серии расчетов не имела принципиальных отличий от той, которая использовалась в аналогичных ранее проведенных расчетах для температуры без привлечения расчетов по суммам осадков, и более подробно описана в (Стерин, Лавров, 2022а). В результате кластеризации были выделены 15 групп объектов – станций, причем в каждую группу включены станции, наиболее схожие по проявлению квантильных трендов максимальной суточной температуры и суточных сумм осадков.

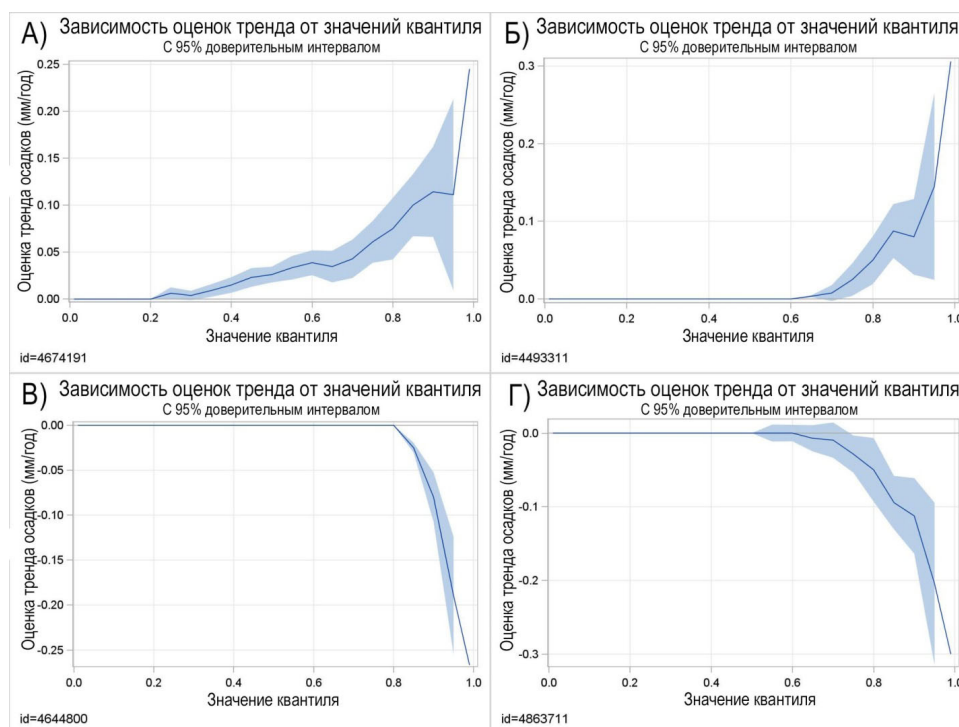


Рисунок 1. Примеры процесс-диаграмм полного диапазона значений квантилей для суточных сумм осадков

А) Невельск (Сахалин), зима; Б) Свиягино (Приморский край), весна; В) Астрахань, лето; Г) Тивяку (Хабаровский край), осень

Figure 1. Examples of quantile regression diagrams of the full range of quantile values for daily precipitation sums

А) Nevelsk (Sakhalin), winter; Б) Sviyagino (Primorsky Krai), spring; В) Astrakhan, summer; Г) Tivyaku (Khabarovsk Krai), fall

На рис. 2 представлены полученные результаты кластеризации методом k-средних – 15 кластеров объектов – метеорологических станций территории России.

Следует отметить, что, несмотря на отсутствие характеристик географического положения пунктов наблюдений среди рассматриваемых 36 переменных, в пределах каждого кластера станции располагаются географически достаточно компактно. Отметим также, что, как и в предыдущей работе, нумерация кластеров на рис. 1 носит чисто условный характер и какой-либо содержательной характеристикой кластера не является.

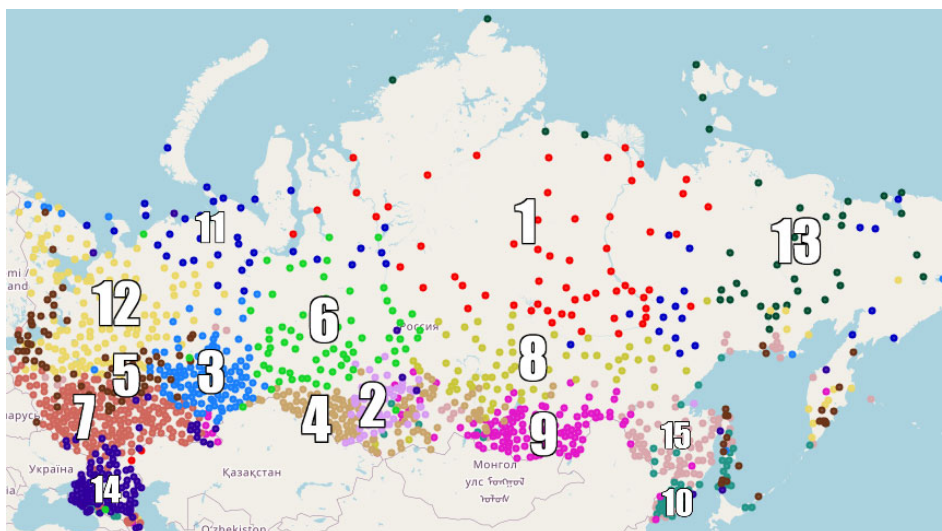


Рисунок 2. Пятнадцать кластеров метеорологических станций территории РФ, объединенных сходством проявления квантильных трендов максимальной суточной температуры и суммы осадков

Станции, вошедшие в каждый из кластеров, отображены определенным цветом

Figure 2. Fifteen clusters of meteorological stations on the territory of the Russian Federation, united by the similarity of quantile trends of maximum daily temperature and precipitation amount

Stations included in each of the clusters are shown in a specific color

Основные статистики кластеров и межцентроидные расстояния между кластерами, характеризующие структуру взаимного расположения «наиболее типичных представителей» каждого из кластеров в пространстве рассматриваемых переменных, представлены в табл. 1.

О вкладах некоторых из используемых в расчетах переменных в объяснение многомерной межкластерной дисперсии позволяет судить содержание табл. 2. Величина D представляет отношение межкластерной дисперсии RSQ к внутрикластерной дисперсии $(1-RSQ)$ для данной стандартизованной переменной. Отметим, что в число десяти переменных с наибольшими значениями D из рассматриваемых тридцати шести переменных входят три переменных, характеризующих квантильные тренды суточных сумм осадков летнего сезона.

Каждому кластеру для отнесенных в этот кластер метеорологических станций были поставлены в соответствие графики типа «ящик с усами» (Box-and-whisker plots), демонстрирующих зависимость разбросов квантильных трендов пунктов наблюдения (метеорологических станций) кластера от значений квантиля. Для каждого из 15 кластеров строились графики типа «ящик с усами» для квантильных трендов аномалий максимальной суточной температуры (4 графика, соответствующих четырем сезонам) и квантильных трендов суточных сумм осадков (4 графика, соответствующих четырем сезонам). Полученная группа 8 графиков составляет «образец» (паттерн) pattern) проявления в соответствующем кластере квантильных трендов температуры и

осадков для четырех различных сезонов года. В табл. 3 для каждого из выделенных 15 кластеров приведены особенности географического расположения основной массы отнесенных к этому кластеру станций и дается краткое описание соответствующего этому кластеру паттерна проявления квантильных трендов температуры и осадков.

Таблица 1. Статистики и межцентроидные расстояния для пятнадцати выделенных кластеров

Table 1. Statistics and intercentroidal distances for fifteen selected clusters

Кла-стер	N	STD	Ω	Расстояние до центроидов других кластеров														
				1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	61	0.82	8.86	.	7.62	6.46	6.08	7.74	7.11	6.03	4.78	6.35	9.33	4.83	6.06	5.30	6.58	6.88
2	65	0.69	7.41	7.62	.	5.75	3.31	6.72	4.59	6.64	4.91	5.25	6.19	6.27	6.10	7.80	7.43	5.30
3	123	0.67	8.34	6.46	5.75	.	4.91	5.29	4.17	4.08	4.44	4.97	5.44	5.04	4.51	6.26	5.58	3.92
4	123	0.62	5.56	6.08	3.31	4.91	.	6.66	4.54	6.04	3.39	4.05	6.28	5.60	5.64	6.58	6.66	4.12
5	91	0.81	12.79	7.74	6.72	5.29	6.66	.	5.85	4.95	5.92	6.89	6.02	6.29	3.78	7.11	7.92	5.15
6	71	0.73	10.28	7.11	4.59	4.17	4.54	5.85	.	6.41	4.75	6.66	5.21	5.00	5.49	6.81	7.58	4.52
7	211	0.68	7.66	6.03	6.64	4.08	6.04	4.95	6.41	.	5.20	4.90	6.48	5.91	5.12	6.45	4.30	5.21
8	66	0.68	5.92	4.78	4.91	4.44	3.39	5.92	4.75	5.20	.	3.93	6.70	5.16	4.89	6.29	6.51	4.39
9	128	0.69	14.00	6.35	5.25	4.97	4.05	6.89	6.66	4.90	3.93	.	7.26	6.47	5.60	6.99	5.61	4.94
10	63	0.96	13.93	9.33	6.19	5.44	6.28	6.02	5.21	6.48	6.70	7.26	.	7.76	6.76	9.34	7.91	3.81
11	55	0.85	8.01	4.83	6.27	5.04	5.60	6.29	5.00	5.91	5.16	6.47	7.76	.	4.14	4.62	6.45	5.60
12	144	0.66	6.61	6.06	6.10	4.51	5.64	3.78	5.49	5.12	4.89	5.60	6.76	4.14	.	5.43	6.69	4.46
13	41	0.97	11.34	5.30	7.80	6.26	6.58	7.11	6.81	6.45	6.29	6.99	9.34	4.62	5.43	.	7.09	6.89
14	134	1.08	20.96	6.58	7.43	5.58	6.66	7.92	7.58	4.30	6.51	5.61	7.91	6.45	6.69	7.09	.	6.44
15	101	0.74	7.20	6.88	5.30	3.92	4.12	5.15	4.52	5.21	4.39	4.94	3.81	5.60	4.46	6.89	6.44	.

Примечание. N – число станций в кластере, STD – внутрикластерная стандартная ошибка расстояний объектов кластера до центроида кластера, Ω – радиус кластера – максимальное по всевозможным парам объектов кластера расстояние между объектами кластера в евклидовой метрике.

Таблица 2. Десять переменных с наибольшими значениями D – отношения межкластерной дисперсии RSQ к внутрикластерной дисперсии (1- RSQ) для данной переменной

Table 2. Ten variables with the highest values of D, the ratio of inter-cluster variance RSQ to intra-cluster variance (1- RSQ) for a given variable

Переменная, условное название	Описание переменной	RSQ	D
ave_Max_son	Осредненный квантильный тренд аномалий максимальной суточной температуры для осеннего сезона (SON)	0.65	1.84
ave_Max_djf	Осредненный квантильный тренд аномалий максимальной суточной температуры для зимнего сезона (DJF)	0.63	1.72
ave_Max_jja	Осредненный квантильный тренд аномалий максимальной суточной температуры для летнего сезона (JJA)	0.61	1.56

Продолжение таблицы 2

Переменная, условное название	Описание переменной	RSQ	D
qvalue_75_25_Max_djf	Разность квантильных трендов аномалий максимальной суточной температуры для квантилей 0.75 и 0.25 для зимнего сезона (DJF)	0.55	1.21
ave_Max_mam	Осредненный квантильный тренд аномалий максимальной суточной температуры для весеннего сезона (MAM)	0.53	1.12
precip_85_JJA	Квантильный тренд суточных сумм осадков летнего сезона (JJA) для $\tau=0.85$	0.51	1.05
qvalue_75_25_Max_son	Разность квантильных трендов аномалий максимальной суточной температуры для квантилей 0.75 и 0.25 для осеннего сезона (SON)	0.50	1.01
precip_75_JJA	Квантильный тренд суточных сумм осадков летнего сезона (JJA) для $\tau=0.75$	0.50	1.00
precip_JJA	Средние сезонные суммы осадков для летнего сезона (JJA)	0.50	1.00
qvalue_25_5_Max_son	Разность квантильных трендов аномалий максимальной суточной температуры для квантилей 0.25 и 0.05 для осеннего сезона (SON)	0.49	0.98

Таблица 3. Сведения о географическом расположении метеостанций кластера и об особенностях проявления квантильных трендов температуры и осадков

Table 3. Information on the geographical location of meteorological stations in the cluster and on the specific features of quantile trends for temperature and precipitation

Кла-стер	Географическое расположение основной массы метеорологических станций, отнесенных к кластеру	Наиболее существенные особенности паттерна квантильных трендов температуры и осадков для кластера
1	Север Красноярского края и северо-запад Якутии. Протяженность кластера – порядка 2.42 тыс. км. Площадь кластера – порядка 2300 тыс. км ² .	Зимой положительные тренды температуры наблюдаются при малых значениях квантилей, при значениях квантилей больше 0.25 они близки к нулю. Весной практически во всем диапазоне квантилей средняя оценка тренда температуры равна 1°C/10 лет, но при квантилях больше 0.9 она уменьшается в два раза. Осенью оценка тренда температуры для станций кластера при малых значениях квантиля составляет в среднем около 2.0°C/10 лет, и уменьшается практически до нуля при стремлении квантилей к единице.

Продолжение таблицы 3

Кла-стер	Географическое расположение основной массы метеорологических станций, отнесенных к кластеру	Наиболее существенные особенности паттерна квантильных трендов температуры и осадков для кластера
2	Кемеровская область, восток Новосибирской области и Алтайского края, юго-восток Томской области и юг Красноярского края. Протяженность кластера – порядка 1.00 тыс. км. Площадь кластера – порядка 450 тыс. км².	Зимой тренды температуры растут с увеличением значений квантилей от -2°C/10 лет до 0. Весной во всем диапазоне квантилей средние оценки трендов положительны и превышают 0.5°C/10 лет. Летом средние оценки трендов температуры равны 0.75°C/10 лет при квантилях, близких к нулю, а в диапазоне квантилей 0.25-0.95 тренды равны 0.3°C/10 лет. Осенью при квантилях, близких к 0, оценки трендов температуры достигают 1°C/10 лет, а при значениях квантилей больше 0.15 – близки к 0. Зимой и весной наблюдаются положительные тренды сумм осадков при больших значениях квантилей, осенью – отрицательные. Графики для этого кластера представлены на рис. 3А.
3	Пермский край, Свердловская область, Челябинская область, Курганская область, Удмуртия, запад Ханты-Мансийского автономного округа, восток Кировской области, север Башкортостана. Протяженность кластера – порядка 1.12 тыс. км. Площадь кластера – порядка 790 тыс. км².	Зимой при значениях квантилей, близких к 0, тренды температуры превышают 0.5°C/10 лет, но при значениях квантилей больше 0.15 – близки к нулю. Летом тренды температуры близки к 0 для большей части диапазона квантилей, но при квантилях более 0.85 демонстрируют положительные значения и достигают 0.5°C/10 лет. Осенью в диапазоне 0.15-0.85 тренды близки к 0.5°C/10 лет, при малых значениях квантилей – близки к 1.5°C/10 лет, при больших значениях квантилей – близки к 0.
4	Юг Омской и Новосибирской областей, запад Алтайского края, юг Республики Алтай, Хакасия, юг Красноярского края, Республика Тыва и отдельные станции на юге Иркутской области. Протяженность кластера – порядка 1.60 тыс. км. Площадь кластера – порядка 500 тыс. км².	Паттерн квантильных трендов температуры близок к кластеру 2, но зимой и летом абсолютные оценки трендов ниже, чем в кластере 2, а осенью выше. Значимые тренды осадков не наблюдаются.
5	Юг Карелии, запад Ленинградской области, Владимирская, Костромская и Нижегородская области, Марий Эл, Кировская область, отдельные станции Новгородской,	Зимой тренды температуры уменьшаются при увеличении значений квантилей от значений, в среднем превышающих 1.5°C/10 лет при квантилях, близких к 0, до трендов, близких к 0, при квантилях, превышающих 0.5. Весной наибольшие тренды наблюдаются при малых и при больших квантилях.

Продолжение таблицы 3

Кла-стер	Географическое расположение основной массы метеорологических станций, отнесенных к кластеру	Наиболее существенные особенности паттерна квантильных трендов температуры и осадков для кластера
	Тверской областей, Пермского края и Удмуртии. Протяженность кластера – порядка 1.50 тыс. км. Площадь кластера – порядка 500 тыс. км ² .	В диапазоне 0.25-0.85 тренды близки к 0.4°C/10 лет. Летом при квантилях, близких к 0, тренды также близки к 0, но при росте значения квантилей тренды достигают 0.5°C/10 лет. Осенью тренды температуры положительны, но уменьшаются от 1.5°C/10 лет при квантилях, близких к 0, до 0.5 – при квантилях, близких к 1. Зимой для суточных сумм осадков наблюдаются положительные тренды при квантилях, близких к 1.
6	Юг Ямало-Ненецкого автономного округа, центр и восток Ханты-Мансийского автономного округа и Тюменской области, север Омской области, центр и восток Томской области, отдельный регион на юго-западе Красноярского края. Протяженность кластера – порядка 1.55 тыс. км. Площадь кластера – порядка 1350 тыс. км ² .	Летом при малых и больших значениях квантилей тренды превышают 0.5°C/10 лет, в диапазоне квантилей 0.15-0.75 тренды близки к 0. Весной и осенью тренды убывают от 1.5°C/10 лет при квантилях, близких к 0, до 0.25 при больших значениях квантилей – весной и при значениях квантилей больше 0.15 – осенью. Графики для этого кластера представлены на рис. 3Б.
7	Псковская область, центральная и южная часть Центрального и Приволжского федеральных округов. Протяженность кластера – порядка 2.03 тыс. км. Площадь кластера – порядка 1025 тыс. км ² .	Паттерн квантильных трендов температуры схож с кластером 5. Летом оценки трендов больше, чем в кластере 5, и превышают 0.5°C/10 лет при значениях квантилей больше 0.05. Весной оценки трендов превышают 0.5°C/10 лет во всем диапазоне квантилей. Зимой наблюдаются существенные тренды сумм осадков при значениях квантилей, близких к 1. Графики для этого кластера представлены на рис. 3В.
8	Иркутская область, север Бурятии, юг Якутии и отдельный регион юго-востока Красноярского края. Протяженность кластера – порядка 2.30 тыс. км. Площадь кластера – порядка 1275 тыс. км ² .	Зимой средние тренды температуры в диапазоне квантилей от 0.1 до 0.75 отрицательные, при других значениях квантилей – положительные. Весной при значениях квантилей меньше 0.85 средние тренды превышают 0.5°C/10 лет. Летом средние тренды во всем диапазоне квантилей превышают 0.5°C/10 лет. Осенью тренды температуры при квантилях, близких к 0, достигают 1.5°C/10 лет, при квантилях, близких к 1, они становятся отрицательными, а при остальных значениях квантилей – близки к 0. Весной наблюдаются

Кла-стер	Географическое расположение основной массы метеорологических станций, отнесенных к кластеру	Наиболее существенные особенности паттерна квантильных трендов температуры и осадков для кластера
		ся положительные тренды осадков при значениях квантиля, близких к 1.
9	Прибайкальский регион Иркутской области, Бурятия и Забайкальский край, запад Амурской области. Протяженность кластера – порядка 1.83 тыс. км. Площадь кластера – порядка 700 тыс. км ² .	Весной в диапазоне квантилей 0.25-0.99 тренды положительны и достигают 0.5°C/10 лет. Летом тренды во всем диапазоне квантилей для этого кластера в среднем близки к 0.5°C/10 лет.
10	Приморский край, юг Сахалина. Протяженность кластера – порядка 1.22 тыс. км. Площадь кластера – порядка 225 тыс. км ² .	Зимой и осенью во всем диапазоне квантилей средние тренды температуры близки к нулю. Весной тренды температуры положительны и их осредненные для кластера значения увеличиваются от 0.25 до 0.5°C/10 лет при увеличении значений квантилей. Летом наблюдается увеличение положительных трендов температур при росте значений квантилей от 0.1 до 0.4°C/10 лет. Весной и летом наблюдаются большие положительные тренды осадков при значениях квантилей близких к 1.
11	Ненецкий автономный округ, север Республики Коми, север Ямало-Ненецкого автономного округа, отдельный регион в Якутии. Протяженность кластера (без станций в Якутии) – порядка 2.05 тыс. км. Площадь кластера (без станций в Якутии) – порядка 700 тыс. км ² .	Тренды температуры положительны для всех сезонов, но убывают при увеличении значений квантилей. Весной, летом и осенью наблюдаются небольшие положительные тренды осадков при квантилях, близких к 1. Графики для этого кластера представлены на рис. 3Г.
12	Территории Северо-Западного федерального округа. Протяженность кластера – порядка 1.50 тыс. км. Площадь кластера – порядка 1025 тыс. км ² .	Паттерн квантильных трендов температуры и осадков схож с кластером 5. Летом оценки трендов температуры ниже, чем в кластере 5, а осенью выше. В летний сезон тренды осадков на всем диапазоне квантилей близки к нулю. Графики для этого кластера представлены на рис. 3Д.
13	Восток Якутии, Магаданская область, отдельные станции Арктического побережья и Чукотского автономного округа.	Большие средние тренды температуры, превышающие 1.0°C/10 лет во всем диапазоне квантилей, зимой, весной и осенью. Зимой максимальные тренды наблюдаются при квантилях, близких к 1, осенью – при кван-

Продолжение таблицы 3

Кла-стер	Географическое расположение основной массы метеорологических станций, отнесенных к кластеру	Наиболее существенные особенности паттерна квантильных трендов температуры и осадков для кластера
	Протяженность кластера – порядка 1.57 тыс. км. Площадь кластера – порядка 975 тыс. км ² .	тилях, близких к 0. Летом оценки трендов растут от 0 до 0.5°C/10 лет при увеличении значений квантилей. Графики для этого кластера представлены на рис. 3Е.
14	Южный федеральный округ, север Северо-Кавказского федерального округа. Протяженность кластера – порядка 1.05 тыс. км. Площадь кластера – порядка 475 тыс. км ² .	Зимой при малых значениях квантилей оценки трендов температуры близки к 0, а при значениях квантилей больше 0.15 – достигают 0.75°C/10 лет. Весной оценки трендов убывают от 1 до 0.5°C/10 лет при увеличении значений квантилей. Летом оценки трендов достигают 1°C/10 лет при квантилях, близких к 0.5, а при малых и больших значениях квантилей тренды уменьшаются до 0.6°C/10 лет. Осенью при значениях квантилей, близких к 0, оценки трендов достигают 1.5°C/10 лет, а в остальном диапазоне квантилей они равны 0.5°C/10 лет. Летом и осенью наблюдаются отрицательные тренды осадков. Графики для этого кластера представлены на рис. 3Ж.
15	Восток Амурской области, южная половина Хабаровского края, север Сахалина, станции на побережье Охотского моря. Для станций данного кластера следует отметить значительную географическую разреженность Протяженность кластера – порядка 1.23 тыс. км. Площадь кластера – порядка 725 тыс. км ² .	Паттерн квантильных трендов температуры и осадков схож с кластером 10. Весной оценки трендов во всем диапазоне квантилей равны 0.4-0.5°C/10 лет. Зимой, весной и летом оценки трендов осадков для близких к единице значениях квантилей принимают положительные значения.

Примечания: Протяженность кластера, в тыс. км, – географическое расстояние между самыми удаленными друг от друга станциями основной массы станций кластера. Площадь кластера, тыс. км², – площадь территории сосредоточения основной массы станций кластера. Результаты расчетов протяженности кластера и площади кластера – приблизительные, отдельные географически, отдаленные от основной массы станций кластера пункты наблюдения из расчетов исключены.

Совокупности графиков, определяющих паттерны, приводятся на рис. 3А-3Ж для некоторых из 15 выделенных кластеров.

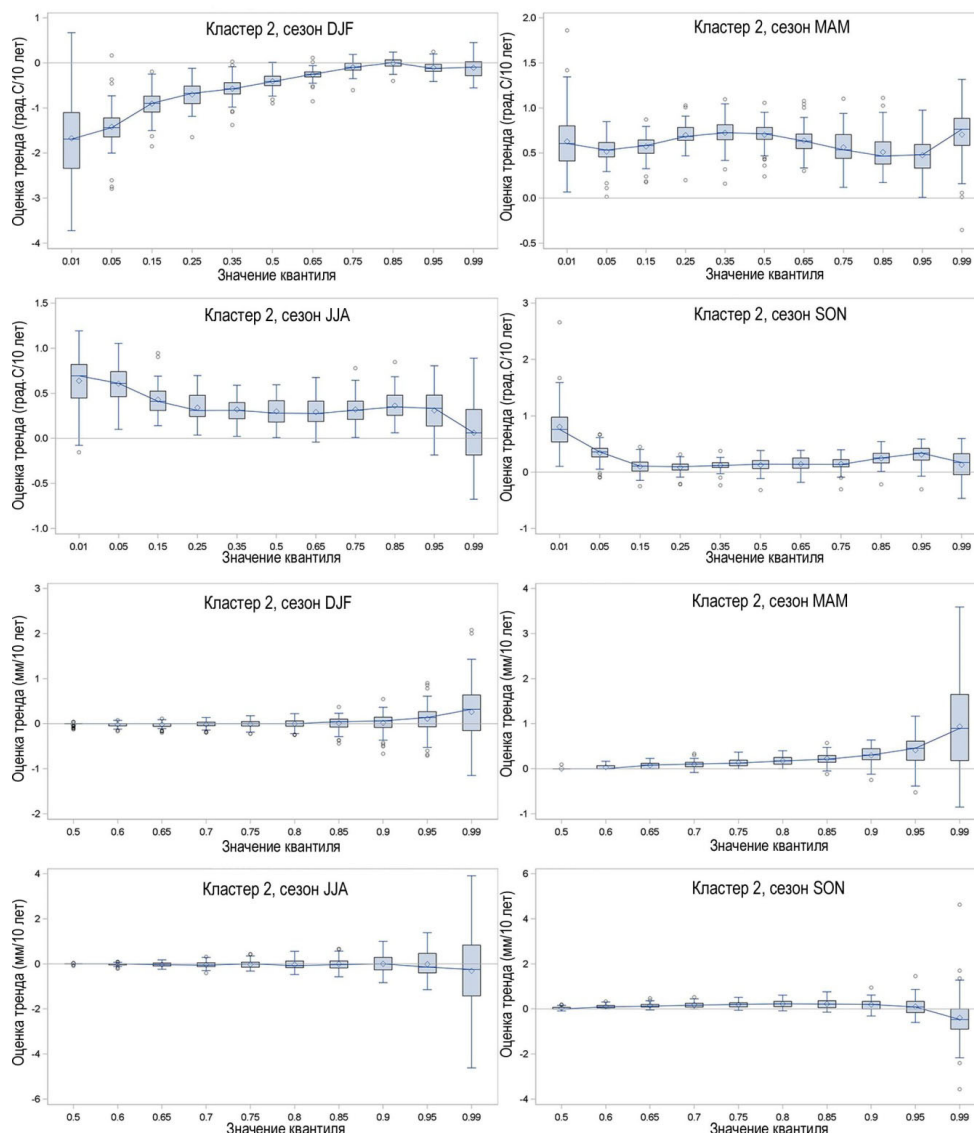


Рисунок 3А. Паттерны проявления квантильных трендов для аномалий максимальной суточной температуры и суточных сумм осадков по метеорологическим станциям, отнесенным к кластеру 2 (Кемеровская область, восток Новосибирской области и Алтайского края, юго-восток Томской области и юг Красноярского края)

Первый ряд – обобщения в виде «ящичков с усами» процесс-диаграмм квантильных трендов аномалий температуры для зимнего (левый столбец) и весеннего (правый столбец) сезонов, второй ряд – для летнего (левый столбец) и осеннего (правый столбец) сезонов. Третий и четвертый ряды – аналогичные первому и второму рядам, но для квантильных трендов суточных сумм осадков

Figure 3A. Patterns of quantile trends for anomalies of maximum daily temperature and daily precipitation sums for meteorological stations classified into cluster 2 (Kemerovo Oblast, east of Novosibirsk Oblast and Altai Krai, southeast of Tomsk Oblast and south of Krasnoyarsk Krai)
The first row – generalizations in the form of "boxes with whiskers" process-diagrams of quantile trends of temperature anomalies for winter (left column) and spring (right column) seasons, the second row – for summer (left column) and autumn (right column) seasons. The third and fourth rows are similar to the first and second rows, but for quantile trends of daily precipitation amounts

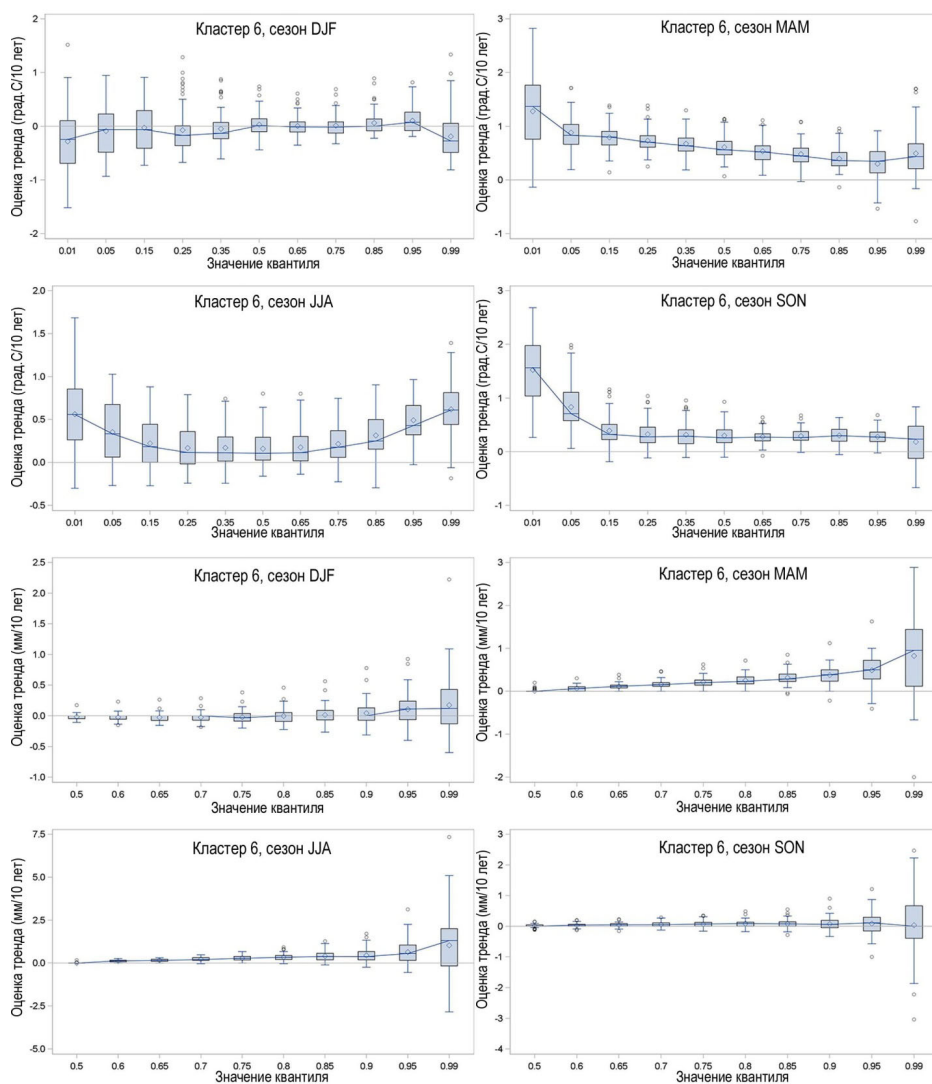


Рисунок 3Б. То же, что и на рис. 3А, но для станций, отнесенных к кластеру 6 (Юг Ямало-Ненецкого автономного округа, центр и восток Ханты-Мансийского автономного округа и Тюменской области, север Омской области, центр и восток Томской области, отдельный регион на юго-западе Красноярского края)

Figure 3B. Same as in Fig. 3A, but for stations assigned to cluster 6 (South of Yamalo-Nenets Autonomous District, center and east of Khanty-Mansiysk Autonomous District and Tyumen Region, north of Omsk Region, center and east of Tomsk Region, a separate region in the southwest of Krasnoyarsk Krai)

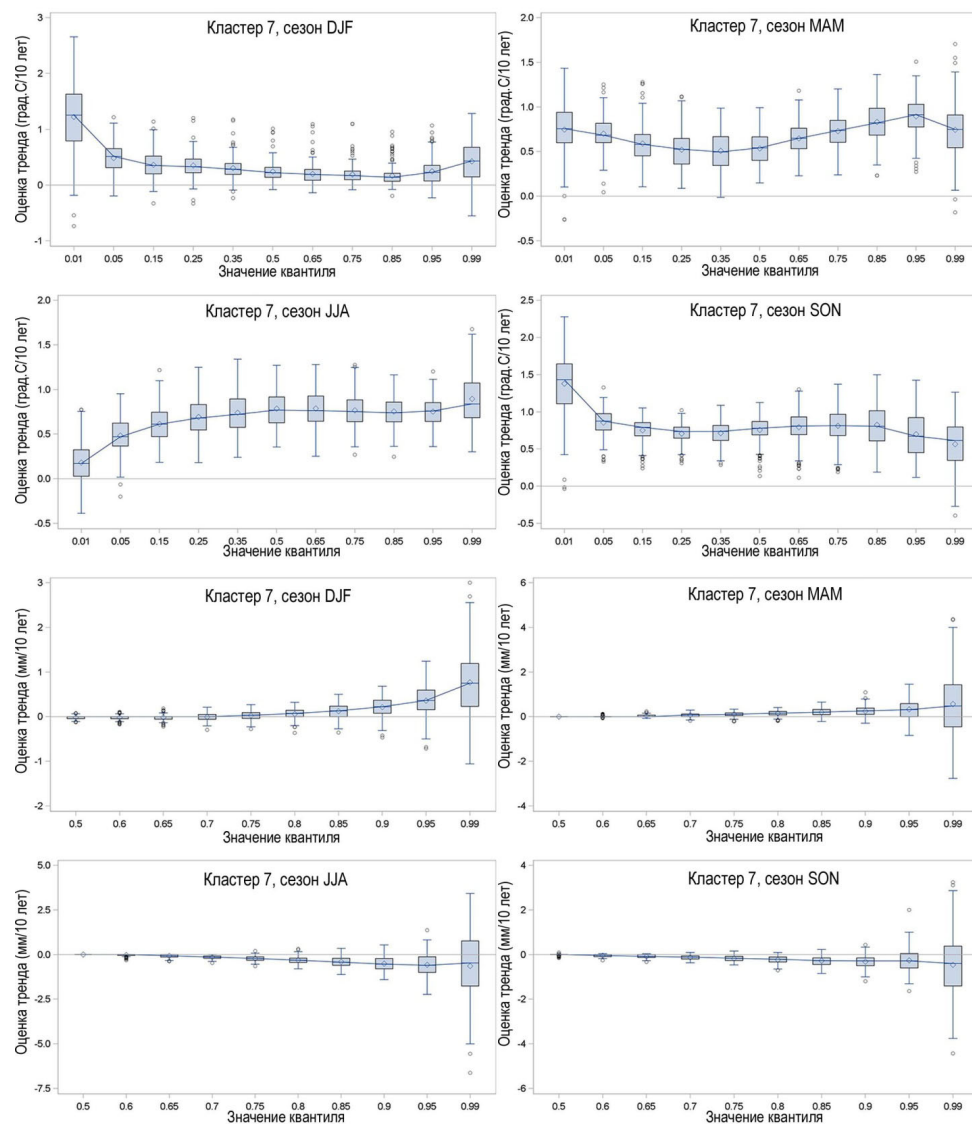


Рисунок 3В. То же, что и на рис. 3А, но для станций, отнесенных к кластеру 7 (Псковская область, центральная и южная часть Центрального и Приволжского федеральных округов)

Figure 3B. Same as in Fig. 3A, but for stations assigned to cluster 7 (Pskov Region, central and southern part of the Central and Volga Federal Districts)

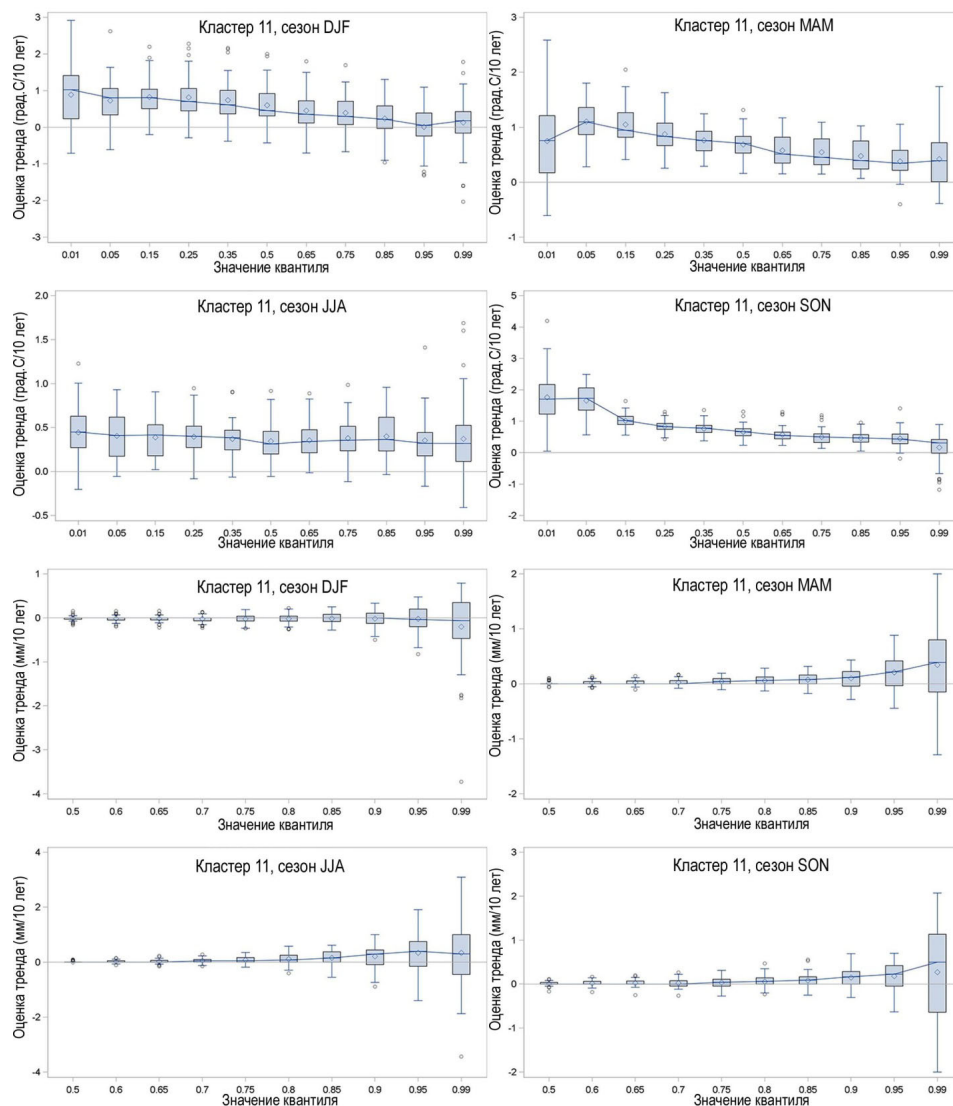


Рисунок 3Г. То же, что и на рис. 3А, но для станций, отнесенных к кластеру 11 (Ненецкий автономный округ, север Республики Коми, север Ямало-Ненецкого автономного округа, отдельный регион в Якутии)

Figure 3Г. Same as in Fig. 3А, but for stations assigned to cluster 11 (Nenets Autonomous Okrug, north of Komi Republic, north of Yamalo-Nenets Autonomous Okrug, separate region in Yakutia)

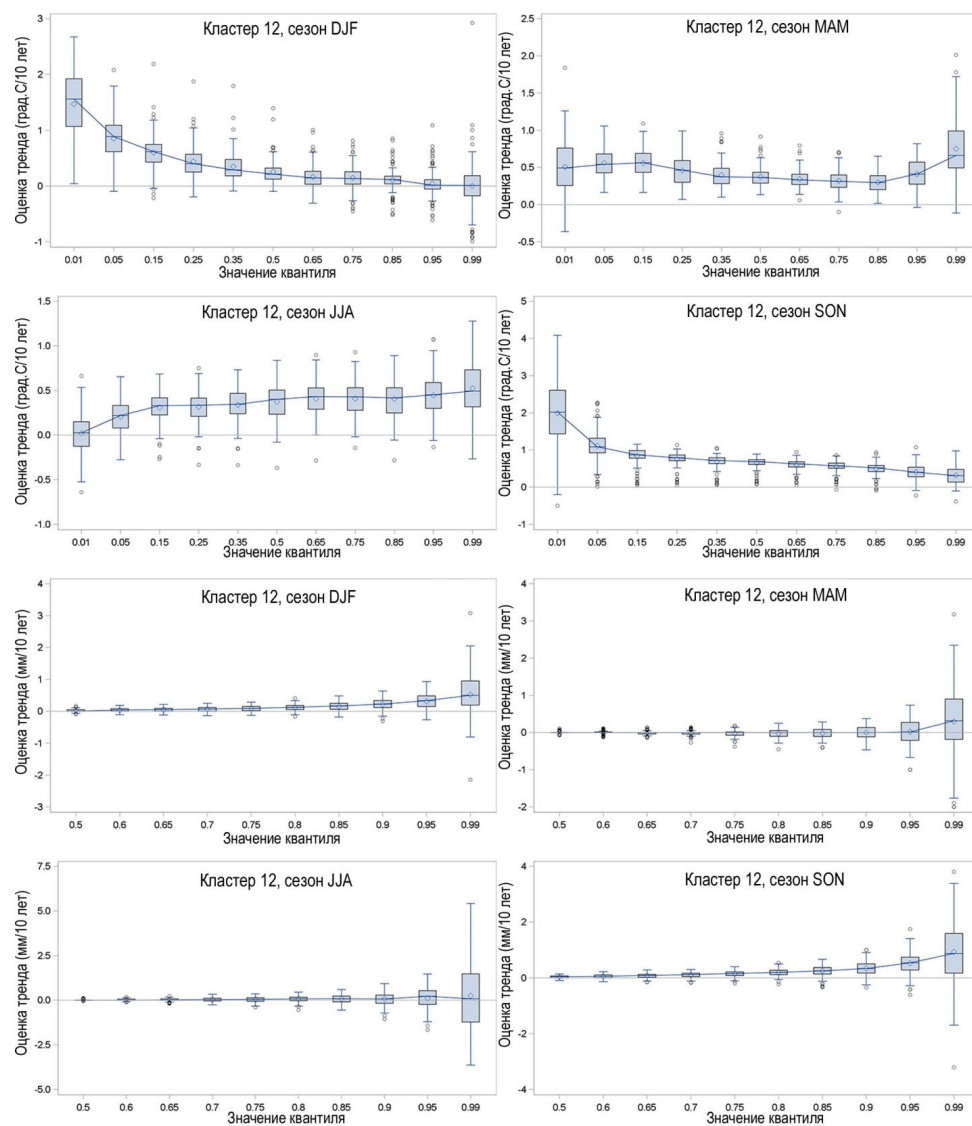


Рисунок 3Д. То же, что и на рис. 3А, но для станций, отнесенных к кластеру 12 (Территории Северо-Западного федерального округа)

Figure 3Д. Same as in Fig. 3А, but for stations assigned to cluster 12 (Territories of the North-West Federal District)

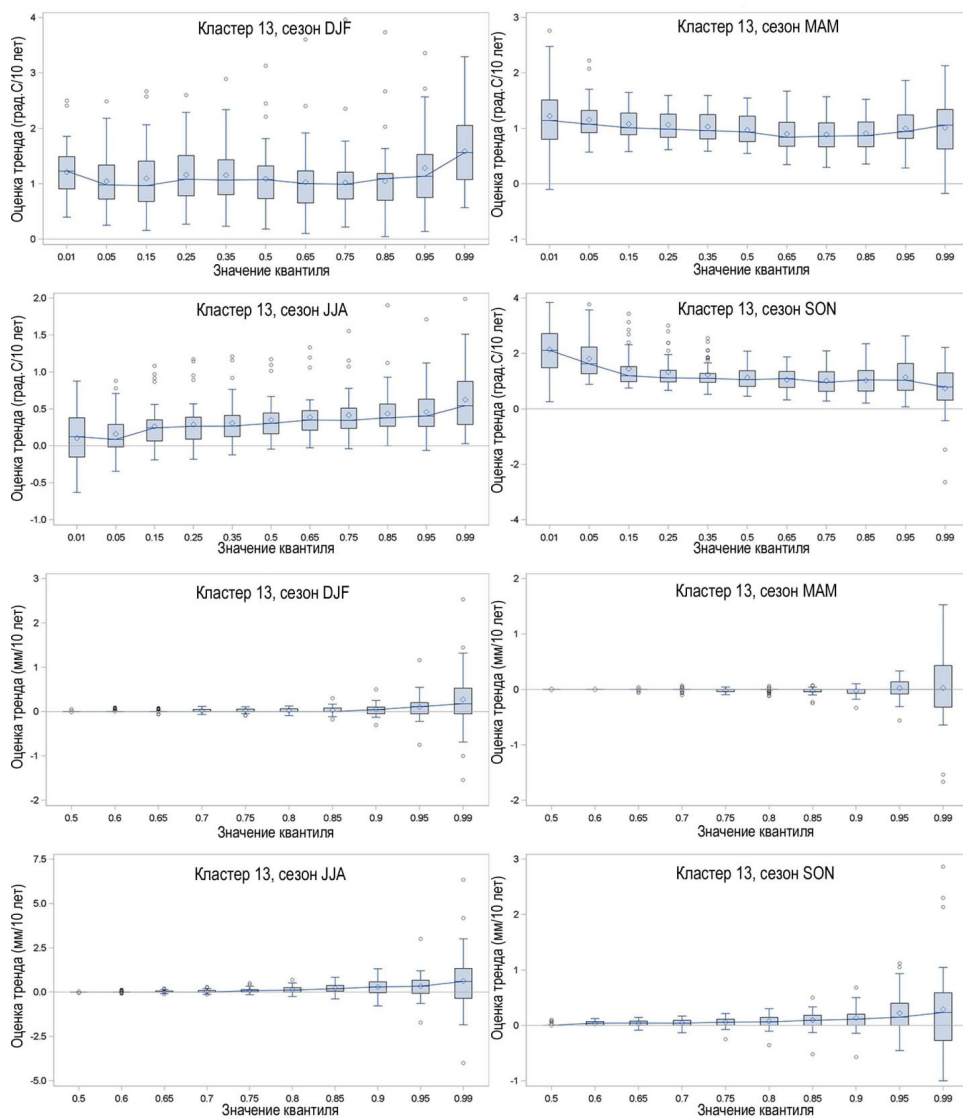


Рисунок 3Е. То же, что и на рис. 3А, но для станций, отнесенных к кластеру 13 (Восток Якутии, Магаданская область, отдельные станции Арктического побережья и Чукотского автономного округа)

Figure 3E. Same as in Fig. 3A, but for stations assigned to cluster 13 (East Yakutia, Magadan Oblast, selected stations of the Arctic coast and Chukotka Autonomous Okrug)

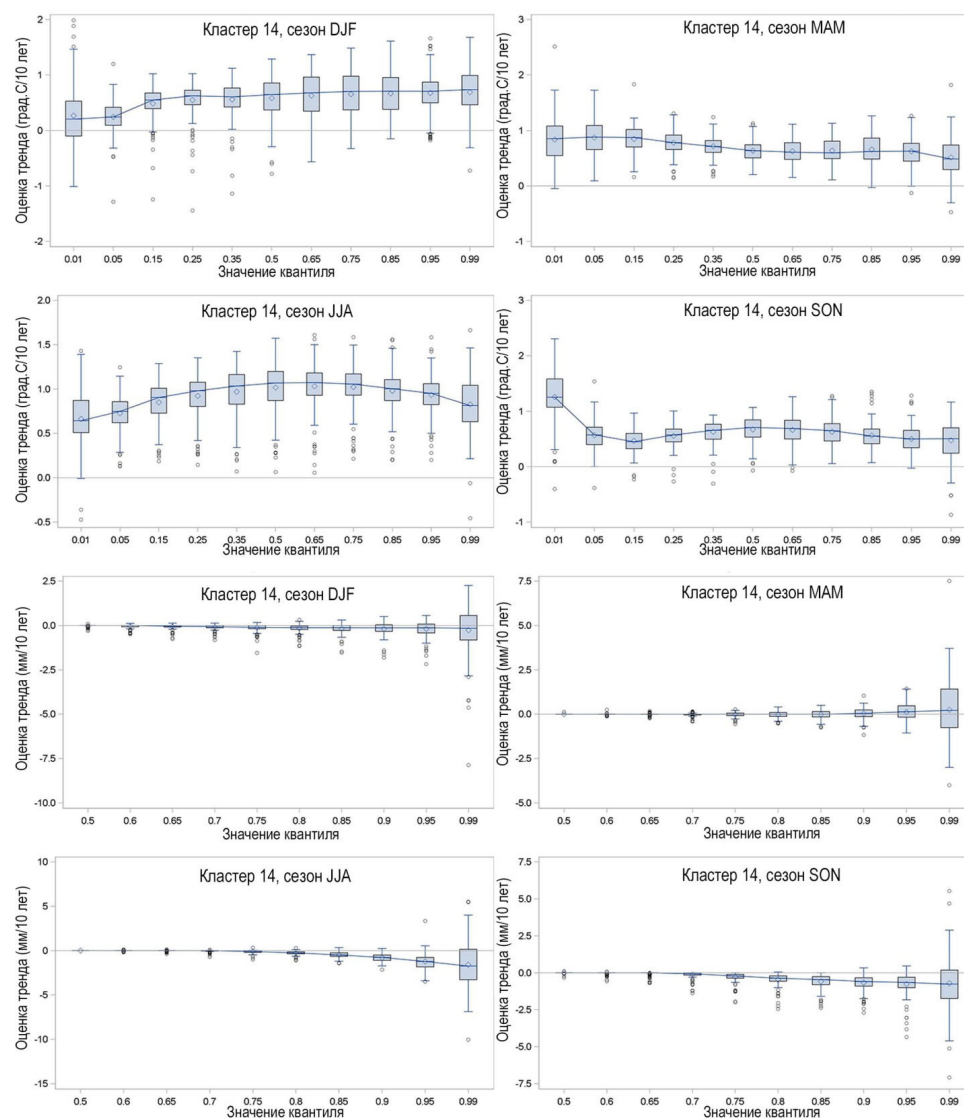


Рисунок 3Ж. То же, что и на рис. 3А, но для станций, отнесенных к кластеру 14 (Южный федеральный округ, север Северо-Кавказского федерального округа)

Figure 3Ж. Same as in Fig. 3A, but for stations assigned to cluster 14 (Southern Federal District, north of the North Caucasus Federal District)

Была проведена оценка вхождения станций различных кластеров в квазиоднородные климатические регионы России (Лавров, Стерин, 2023). В частности, в качестве квазиоднородных климатических регионов были выбраны 9 регионов России, уже в течение многих лет рассматриваемых в качестве основы климатического районирования территории Российской Федерации при подготовке Ежегодных докладов Росгидромета о состоянии и изменении климата на территории РФ.

Была построена таблица в виде матрицы размером 9 на 15, содержащая значения числа станций кластеров, входящих в каждый из 9 квазиоднородных климатических регионов. Результаты анализа таблицы позволяют судить о том, что практически каждому выделенному кластеру станций может быть поставлен в соответствие квазиоднородный географический регион, к которому относится большинство станций выделенного кластера. При многократном повторении расчетов со случайным выбором начальных станций – зародышей кластеров (1000 повторов) – результаты кластеризации и анализа таблиц соответствия вхождения станций кластеров в квазиоднородные климатические регионы демонстрируют стабильность.

В заключение следует отметить, что результаты настоящей работы могут оказаться полезными для уточнений климатического районирования территории РФ, когда при климатическом районировании следует учитывать характер проявления и скорость изменений климата. В частности, результаты работы позволяют осуществлять климатическое районирование на основе тенденций изменений значений двух важнейших из перечня существенных климатических переменных (температуры приземного воздуха и сумм осадков). При этом рассматриваются тенденции изменения в широком диапазоне их значений, в том числе тенденции изменений значений этих переменных, близких к экстремальным.

Список литературы

Лавров, А.С., Стерин, А.М. (2023) Сравнение результатов кластеризации квантильных трендов приземной температуры на территории Российской Федерации с квазиоднородными климатическими регионами России, *CITES-2023*, с. 78-79.

Стерин, А.М., Лавров, А.С. (2021) Тренды температуры в свободной атмосфере: расчеты с использованием метода квантильной регрессии, *Фундаментальная и прикладная климатология*, т. 7, № 2, с. 99-114.

Стерин, А.М., Лавров, А.С. (2022а) Использование квантильной регрессии для оценки пространственных особенностей характеристик трендов приземной температуры на территории России, *Фундаментальная и прикладная климатология*, т. 8, № 2, с. 92-111.

Стерин, А.М., Лавров, А.С. (2022б) Детализация климатических трендов, оцененных методом квантильной регрессии с использованием данных наблюдений, *ENVIROMIS 2022*, с. 389-391.

Стерин, А.М., Тимофеев, А.А. (2016) Об оценке трендов приземной температуры воздуха для территории России методом квантильной регрессии, *Метеорология и гидрология*, № 6, с. 17-30.

Bhikhari Tharu, Nirajan Dhakal (2020) On the use of Bayesian quantile regression method to explore the historical trends in extreme precipitation and their

connections with large-scale climate patterns over the contiguous USA, *Theoretical and Applied Climatology*, vol. 139, pp. 1277-1290.

Cannon, A.J., Sobie, S.R., Murdock, T.Q. (2015) Bias correction of GCM precipitation by quantile mapping: How well do methods preserve changes in quantiles and extremes? *Journal of Climate*, vol. 28, pp. 6938-6959.

Fan Lijun (2014) Quantile Trends in Temperature Extremes in China, *Atmospheric and Oceanic Science Letters*, vol. 7, no. 4, pp. 304-308.

Gao, M., Franzke, C. (2017) Quantile Regression-based Spatio-temporal Analysis of Extreme Temperature Change in China, *Journal of Climate*, vol. 30, pp. 9897-9914, doi:10.1175/JCLI-D-17-0356.1.

Haugen, M.A., Michael, L., Stein, M.L. et al. (2019) Future climate emulations using quantile regressions on large ensembles, *Advances in Statistical Climatology Meteorology and Oceanography*, vol. 5, pp. 37-55, URL: <https://doi.org/10.5194/ascmo-5-37-2019>.

Koenker, R., Bassett, G.Jr. (1978) Regression Quantiles, *Econometrica*, vol. 46, no. 1, pp. 33-50.

Lausier, A.M., Shaleen J. (2018) Diversity in global patterns of observed precipitation variability and change on river basin scales A conditional quantile approach, *Climatic Change*, vol. 149, pp. 261-275, URL: <https://doi.org/10.1007/s10584-018-2225-z>.

Onderka, M., Pecho, J. (2023) On how precipitation temperature coupling affects drought severity in the western Carpathians and the adjacent northern part of the Pannonian Plain, *Theoretical and Applied Climatology*, vol. 152, pp. 681-692.

Salam, A. Abbas, Yunqing Xuan, Xiaomeng Song (2019) Quantile Regression Based Methods for Investigating Rainfall Trends Associated with Flooding and Drought Conditions, *Water Resources Management*, vol. 33, pp. 4249-4264.

Sertac Oruc (2021) Quantile trends of subhourly extreme rainfall: Marmara Region Turkey, *Acta Geophysica*, vol. 69, pp. 2453-2473, URL: <https://doi.org/10.1007/s11600-021-00692-5>.

Sterin, A.M., Timofeev, A.A. (2016) Estimation of Surface Air Temperature Trends in Russia Using the Quantile Regression Method, *Russian Meteorology and Hydrology*, vol. 41, no. 6, pp. 388-397.

Willems, P., Vrac, M. (2011) Statistical precipitation downscaling for small-scale hydrological impact investigations of climate change, *Journal of Hydrology*, vol. 402, pp. 193-205.

Zarch, M.A.A., Sivakumar, B., Sharma, A. (2015) Droughts in a warming climate: A global assessment of Standardized Precipitation Index (SPI) and Reconnaissance Drought Index (RDI), *Journal of Hydrology*, vol. 526, pp. 183-195.

Zheng, Y., Ming Xue et al. (2016) Spatial Characteristics of Extreme Rainfall over China with Hourly through 24-Hour Accumulation Periods Based on National-Level Hourly Rain Gauge Data, *Advances in Atmospheric Sciences*, vol. 33, pp. 1218-1232.

References

Lavrov, A.S., Sterin, A.M. (2023) Sravnenie rezul'tatov klasterizacii kvantil'nyh trendov prizemnoj temperatury na territorii Rossijskoj Federacii s kvaziodnorodnymi klimaticheskimi regionami Rossii [Comparison of the results of clustering of quantile trends of surface temperature on the territory of the Russian Federation with quasiuniform climatic regions of Russia], *CITES-2023*, pp. 78-79.

Sterin, A.M., Lavrov, A.S. (2021) Trendy temperatury v svobodnoj atmosfere: raschety s ispol'zovaniem metoda kvantil'noj regressii [Upper-air temperature trends: calculations based on quantile regression methodology], *Fundamental'naya i prikladnaya klimatologiya*, vol. 7, no. 2, pp. 99-114.

Sterin, A.M., Lavrov, A.S. (2022a) Ispol'zovanie kvantil'noj regressii dlya ocenki prostranstvennyh osobennostej harakteristik trendov prizemnoj temperatury na territorii Rossii [Using quantile regression to estimate spatial patterns of surface temperature trends over the territory of Russia], *Fundamental'naya i prikladnaya klimatologiya*, vol. 8, no. 2, pp. 92-111.

Sterin, A.M., Lavrov, A.S. (2022b) Detalizaciya klimaticheskikh trendov, ocenennyh metodom kvantil'noj regressii s ispol'zovaniem dannyh nablyudenij [Detailing climate trends estimated by quantile regression using observational data], *ENVIROMIS 2022*, pp. 389-391.

Sterin, A.M., Timofeev, A.A. (2016) Ob ocenke trendov prizemnoj temperatury vozduha dlya territorii Rossii metodom kvantil'noj regressii [On estimation of surface air temperature trends for the territory of Russia by the quantile regression method], *Meteorologiya i gidrologiya*, no. 6, pp. 17-30.

Bhikhari Tharu, Nirajan Dhakal (2020) On the use of Bayesian quantile regression method to explore the historical trends in extreme precipitation and their connections with large-scale climate patterns over the contiguous USA, *Theoretical and Applied Climatology*, vol. 139, pp. 1277-1290.

Cannon, A.J., Sobie, S.R., Murdock, T.Q. (2015) Bias correction of GCM precipitation by quantile mapping: How well do methods preserve changes in quantiles and extremes? *Journal of Climate*, vol. 28, pp. 6938-6959.

Fan Lijun (2014) Quantile Trends in Temperature Extremes in China, *Atmospheric and Oceanic Science Letters*, vol. 7, no. 4, pp. 304-308.

Gao, M., Franzke, C. (2017) Quantile Regression-based Spatio-temporal Analysis of Extreme Temperature Change in China, *Journal of Climate*, vol. 30, pp. 9897-9914, doi:10.1175/JCLI-D-17-0356.1.

Haugen, M.A., Michael, L., Stein, M.L. et al. (2019) Future climate emulations using quantile regressions on large ensembles, *Advances in Statistical Climatology Meteorology and Oceanography*, vol. 5, pp. 37-55, URL: <https://doi.org/10.5194/asmo-5-37-2019>.

Koenker, R., Bassett, G.Jr. (1978) Regression Quantiles, *Econometrica*, vol. 46, no. 1, pp. 33-50.

Lausier, A.M., Shaleen J. (2018) Diversity in global patterns of observed precipitation variability and change on river basin scales A conditional quantile approach, *Climatic Change*, vol. 149, pp. 261-275, URL: <https://doi.org/10.1007/s10584-018-2225-z>.

Onderka, M., Pecho, J. (2023) On how precipitation temperature coupling affects drought severity in the western Carpathians and the adjacent northern part of the Pannonian Plain, *Theoretical and Applied Climatology*, vol. 152, pp. 681-692.

Salam, A. Abbas, Yunqing Xuan, Xiaomeng Song (2019) Quantile Regression Based Methods for Investigating Rainfall Trends Associated with Flooding and Drought Conditions, *Water Resources Management*, vol. 33, pp. 4249-4264.

Sertac Oruc (2021) Quantile trends of subhourly extreme rainfall: Marmara Region Turkey, *Acta Geophysica*, vol. 69, pp. 2453-2473, URL: <https://doi.org/10.1007/s11600-021-00692-5>.

Sterin, A.M., Timofeev, A.A. (2016) Estimation of Surface Air Temperature Trends in Russia Using the Quantile Regression Method, *Russian Meteorology and Hydrology*, vol. 41, no. 6, pp. 388-397.

Willems, P., Vrac, M. (2011) Statistical precipitation downscaling for small-scale hydrological impact investigations of climate change, *Journal of Hydrology*, vol. 402, pp. 193-205.

Zarch, M.A.A., Sivakumar, B., Sharma, A. (2015) Droughts in a warming climate: A global assessment of Standardized Precipitation Index (SPI) and Reconnaissance Drought Index (RDI), *Journal of Hydrology*, vol. 526, pp. 183-195.

Zheng, Y., Ming Xue et al. (2016) Spatial Characteristics of Extreme Rainfall over China with Hourly through 24-Hour Accumulation Periods Based on National-Level Hourly Rain Gauge Data, *Advances in Atmospheric Sciences*, vol. 33, pp. 1218-1232.

Статья поступила в редакцию (Received): 04.03.2024.

Статья доработана после рецензирования (Revised): 04.04.2024.

Принята к публикации (Accepted): 16.04.2024.

Для цитирования / For citation:

Лавров, А.С., Стерин, А.М. (2024) Детализация климатических трендов температуры и осадков на территории России с использованием квантильной

регрессии и кластеризации, *Фундаментальная прикладная климатология*, т. 10, № 2, с. 219-243, doi: 10.21513/0207-2564-2024-2-219-243.

Lavrov, A.S., Sterin, A.M. (2024) Detailing of climatic trends of temperature and precipitation in the territory of the Russian Federation using quantile regression and clustering, *Fundamental and Applied Climatology*, vol. 10, no. 2, pp. 219-243, doi: 10.21513/0207-2564-2024-2-219-243.

Наблюдаемые изменения климата в бассейнах Байкала и Ангары

О.Н. Липка^{1,2)}, А.Ю. Богданович¹⁾, А.П. Андреева¹⁾, А.С. Караваяева¹⁾,
С.В. Крыленко¹⁾, А.М. Стерин³⁾, Н.Н. Коршунова³⁾*

¹⁾ Институт глобального климата и экологии имени академика Ю.А. Израэля,
Россия, 107258, г. Москва, ул. Глебовская, 20Б

²⁾ Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»,
Россия, 109028, г. Москва, Покровский бульвар, д. 11

³⁾ Федеральное государственное бюджетное учреждение «Всероссийский научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации – Мировой центр данных»,
Россия, 249035, Калужская обл., г. Обнинск, ул. Королева, 6

*Адрес для переписки: *olipka@mail.ru*

Реферат. Изменения климата в бассейне оз. Байкал и р. Ангары приводят к обострению накопившихся нерешенных социальных и экологических проблем через увеличение частоты и амплитуды опасных и неблагоприятных гидрометеорологических явлений, а также в результате плавного направленного изменения абиотических компонентов окружающей среды. Целью исследования является анализ характеристик современных наблюдаемых изменений климата и климатообусловленных рисков для бассейна р. Ангары и оз. Байкал. В регионе четко проявляется рост среднегодовой и сезонной температуры с 70-х годов прошлого столетия. Увеличивается количество теплых и сокращается количество холодных дней. Изменение годового и сезонного количества осадков происходит неравномерно. На территории Иркутской области прослеживается тенденция к увеличению годового количества осадков, а на востоке (Бурятия и Забайкалье) и юге региона (Монголия) – к уменьшению. Зимой и весной осадки растут практически повсеместно, летом и осенью сокращаются на юге и востоке. Нарастающая экстремальность климата проявляется в неравномерности выпадения осадков (высокие суточные значения и продолжительные засухи) и росте пожароопасности. Кроме того, интенсивные осадки приводят к наводнениям и активизации склоновых процессов (сели и оползни), которые регулярно наносят ущербы экономике.

Ключевые слова. Изменения климата, климатообусловленные риски, опасные гидрометеорологические явления, бассейн Байкала, бассейн Ангары.

Observed climate changes in the Baikal and Angara basins

O.N. Lipka^{1,2)}, A.Yu. Bogdanovich¹⁾, A.P. Andreeva¹⁾, A.S. Karavaeva¹⁾,
S.V. Krylenko¹⁾, A.M. Sterin³⁾, N.N. Korshunova³⁾*

¹⁾ Yu.A. Izrael Institute of global climate and ecology,
20B, Glebovskaya str., 107258, Moscow, Russian Federation

²⁾National Research University Higher School of Economics,
11, Pokrovsky Boulevard, 109028, Moscow, Russian Federation

³⁾Federal state budgetary institution «All Russian RI of Hydrometeorological Information – World
Data Centre»,
6, Koroleva str., 249035, Kaluga region, Obninsk, Russian Federation

* Correspondence address: *olipka@mail.ru*

Abstract. Climate change in the lake Baikal and Angara River basins exacerbates the accumulated unresolved social and environmental problems through the intensification of dangerous and adverse hydrometeorological phenomena, as well as a result of a slow directed change in the abiotic components of the environment. The goal of the research is to find and analyze the characteristics of modern climate change and climate-related risks in the region according to observations data, including the analysis of trends in dangerous and adverse hydrometeorological phenomena. The increase in the average annual and seasonal temperature since the 70s of the last century are clearly manifested in the region. The number of warm days is increasing and the number of cold days is decreasing. Changes in annual and seasonal precipitation occur unevenly. There is a tendency to increase the annual amount of precipitation in the west (Irkutsk region), and to decrease in the east (Buryatia and Transbaikalia) and the south of the region (Mongolia). Precipitation increases almost everywhere in winter and spring. In summer and autumn, it decreases in the south and east. The growing extremeness of the climate is manifested in uneven precipitation (high daily values and prolonged droughts) and an increase in fire hazard. In addition, intense precipitation leads to floods and the activation of slope processes (mudflows and landslides), which regularly damage the economy.

Keywords. Climate change, climate-related risks, dangerous hydrometeorological phenomena, Baikal basin, Angara basin.

Введение

Уникальность оз. Байкал, его ценность и неповторимость как экосистемы были официально признаны международным сообществом в 1996 г., когда озеру был присвоен статус объекта Всемирного природного наследия ЮНЕСКО (UNESCO, 1997). Уже в то время на Байкальской природной территории существовал комплекс экологических, социальных и экономических проблем, сложным образом переплетающихся между собой (Государственный доклад..., 2022; Эколого-географический..., 2019).

Изменения климата в бассейнах оз. Байкал и единственной вытекающей из него реки Ангары приводят к обострению накопившихся нерешенных проблем через увеличение частоты и амплитуды опасных и неблагоприятных гидрометеорологических явлений, а также в результате плавного направленного «изменения климатических параметров окружающей среды: температуры, количества осадков и их распределения, характе-

ристик ветра и др. Как правило, максимальные ущербы охватывают сферы здоровья населения, климатозависимые отрасли экономики и природные системы, а также связанные с ними возобновляемые ресурсы (Третий оценочный доклад..., 2022; IPCC, 2022).

В районе исследования расположены крупные города (Иркутск и Улан-Удэ), предприятия горнодобывающей и перерабатывающей промышленности, а также три крупных инженерных сооружения – каскад Ангарских ГЭС, повреждение которых в результате опасных гидрометеорологических явлений может привести к катастрофическим последствиям (Абаринова и др., 2021). Даже снижение эффективности их работы в результате волн жары или низких меженок скажется негативно на благополучии населения и экономике всего региона.

Для принятия решений по адаптации к изменениям климата прежде всего необходима объективная информация, основанная на обработке данных наблюдений, а также современные прогнозы изменений климата, выполненные с максимально возможным пространственным разрешением.

Целью исследования является анализ характеристик современных изменений климата и климатообусловленных рисков для бассейна р. Ангары и оз. Байкал, по данным наблюдений, включая анализ трендов характеристик опасных и неблагоприятных гидрометеорологических явлений.

Решались следующие задачи:

- оценить долгосрочные тенденции изменения в термическом режиме, включая тенденции изменений экстремумов;
- оценить долгосрочные тенденции изменения режима выпадения осадков, включая тенденции изменений засух и экстремальных осадков;
- охарактеризовать изменения ветрового режима, в том числе распределение и интенсивность сильных ветров;
- выявить наиболее опасные и наносящие значительный ущерб людям и экономике в исследуемом регионе климатообусловленные явления, которые теоретически могут усилиться при изменении режимов температуры, осадков и ветра в регионе. Дать их характеристику.

Материалы и методика

В ходе исследования использовались следующие **источники информации**:

- данные 25 опорных (собирающих наиболее полную информацию и включенных в сеть Всемирной метеорологической организации) метеорологических станций на территории России за 1970-2021 гг. (Булыгина и др., 2022а, 2022б);
 - дополнительно данные 50 метеостанций на территории России за 2013-2020 гг. (все действующие станции Росгидромета в районе исследований из Госфонда ВНИИГМИ-МЦД);
 - данные 9 опорных метеостанций в Монголии за 1970-2021 гг. из открытых источников информации (рис. 1);
-

– массивы данных о метеорологических параметрах Группы климатических исследований (Climate Research Unit – CRU, v. 4.06, 2022) Университета Восточной Англии за 1971-2021 гг.;

– опубликованные материалы (в том числе базы данных) об опасных гидрометеорологических явлениях и их последствиях.

Необходимость использования нескольких взаимодополняющих источников информации обусловлена многоплановостью задач и отсутствием единого ресурса для получения исчерпывающей информации по интересующему региону.

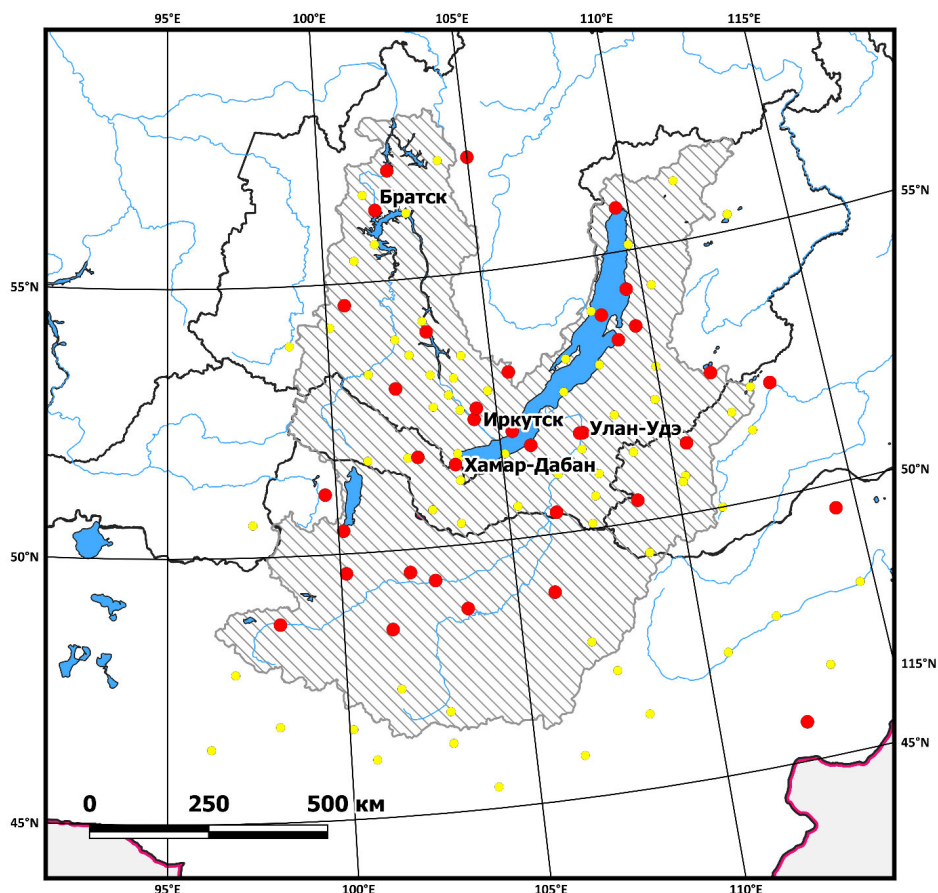


Рисунок 1. Расположение метеорологических станций в районе исследований
Красные точки – станции ВМО, желтые точки – прочие станции

Figure 1. Location of meteorological stations in the study area
Red dots are WMO stations, yellow dots – other stations

В ходе анализа применялись стандартные статистические методы обработки метеорологической информации (Дегтярев и др., 2015).

Обработка картографических материалов из различных источников и построение карт выполнены в программе QGIS. В качестве цифровой модели рельефа использовалась интерактивная гипсометрическая карта проекта Open Street Map (Проект OpenStreetMap...).

Карты, построенные на основе баз данных Группы климатических исследований Университета Восточной Англии (Climate Research Unit – CRU, v. 4.06, 2022), являются результатом обработки данных постанционных наблюдений – интерполяции в узлы широтно-долготной сетки.

В рамках экспедиции в сентябре 2022 г. в бассейне Ангары была уточнена информация о развитии некоторых климатообусловленных явлений и их последствий.

Результаты и обсуждение

Бассейн Байкала и Ангары (до Усть-Илимской ГЭС) можно рассматривать как единый географический объект со сложной структурой. Административно его южная часть находится на территории Монголии, российская часть охватывает большую часть Республики Бурятия и значительную часть Иркутской области, небольшой фрагмент Забайкальского края и восточные районы Республики Тыва. При этом Иркутская область и Тыва относятся к Сибирскому федеральному округу, а Бурятия и Забайкальский край – к Дальневосточному. Водосборная площадь бассейна Ангары, включая озеро Байкал, составляет 1 039 000 кв. км, из которых бассейн Байкала занимает половину территории (Баженова, Мартянова, 2003).

По классификации Алисова, российская часть бассейна преимущественно соответствует двум климатическим областям: континентальной восточно-сибирской и горной области Алтая и Саян (Национальный атлас России, 2007).

По данным массива CRU (2022), в узлах сетки была построена карта средней многолетней температуры за период 1971-2021 гг. Ее разрешение превышает карты, опубликованные в регулярных «Докладах об особенностях климата на территории Российской Федерации» (2023) и охватывает более продолжительный период. На карте выделяется область более высоких температур на юго-востоке региона (в Монголии), а также вдоль долины Селенги и далее на северо-запад через Иркутск и исток Ангары (рис. 2).

По данным наблюдений, температура воздуха последние 50 лет растет во всем регионе со скоростью 0.3-0.4°C/10 лет. При этом отмечается сезонная и пространственная неравномерность:

- быстрее всего теплеет весной (повсеместно более 0.45°C/10 лет, а на северо-западе тренд увеличивается до 0.75°C/10 лет;
 - зимой температура активно повышается в российской части региона (особенно на севере), тогда как на юге (в Монголии) тренды потепления выражены слабо, отмечаются даже области слабого понижения температуры;
 - осенью, наоборот, активнее повышаются температуры на юге и юго-востоке, но потепление выражено слабее, чем среднегодовые тренды;
 - потепление летом выражено в исследуемом регионе повсеместно, причем на его российской части скорость потепления близка к среднегодовым значениям, а на территории Монголии – превышает среднегодовые значения (рис. 3).
-

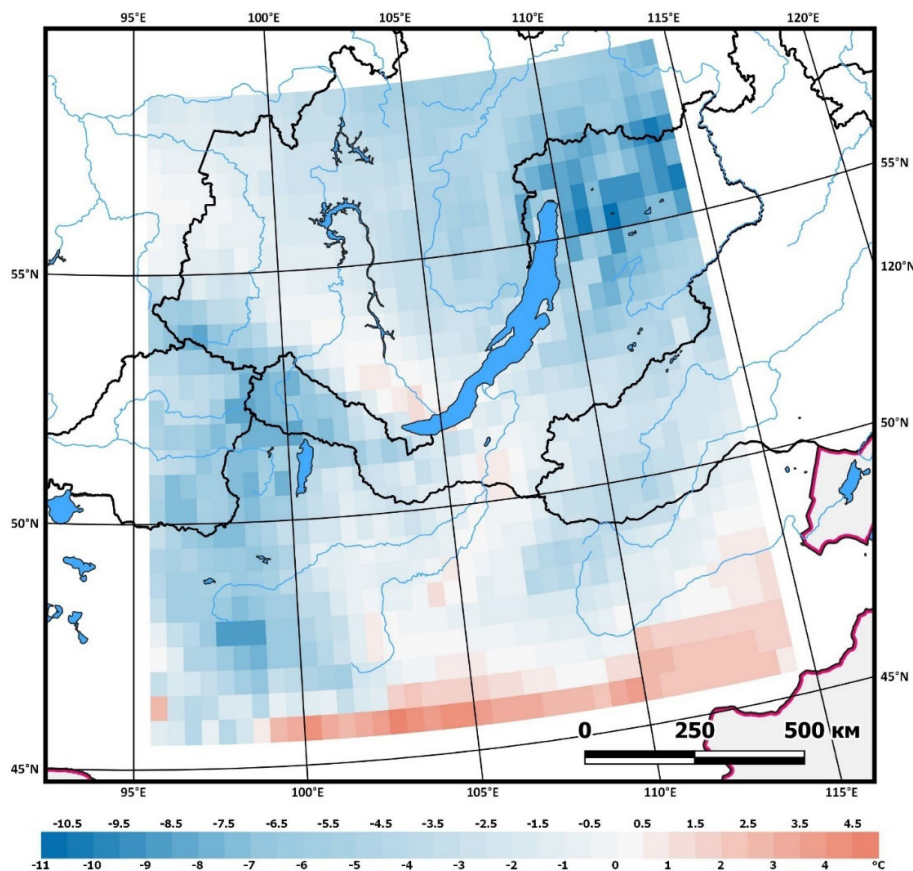


Рисунок 2. Средняя многолетняя среднегодовая температура воздуха, °C (CRU, 2022)

Figure 2. Average long-term annual air temperature, °C (CRU, 2022)

Средняя разница между среднегодовыми значениями трендов по станциям и трендам, построенным по значениям в узлах, составляет 15% (наибольшее несоответствие между значениями выявлено для Читы – 56%). Хорошее совпадение значений наблюдается весной и летом: средняя разница между значениями 10 и 20% соответственно; тогда как зимой и осенью разница увеличивается: 59 и 43%.

Изменение сезонной температуры варьирует при общей тенденции к увеличению. Как правило, на каждой станции рост температур может быть значимым в одни сезоны и почти не проявляться в другие. Например, в Братске (северо-запад региона) и Иркутске (центр) активнее всего температуры повышаются летом и весной, слабо – зимой и осенью (рис. 4а,б). В Улан-Удэ (восток региона) температура быстрее всего повышается весной, а зимой – быстрее, чем летом (рис. 4в). На станции Хамар-Дабан (1442 м, горы) температура зимой и осенью практически не растет, основной вклад в повышение среднегодовой температуры вносят весенние месяцы (рис. 4г).

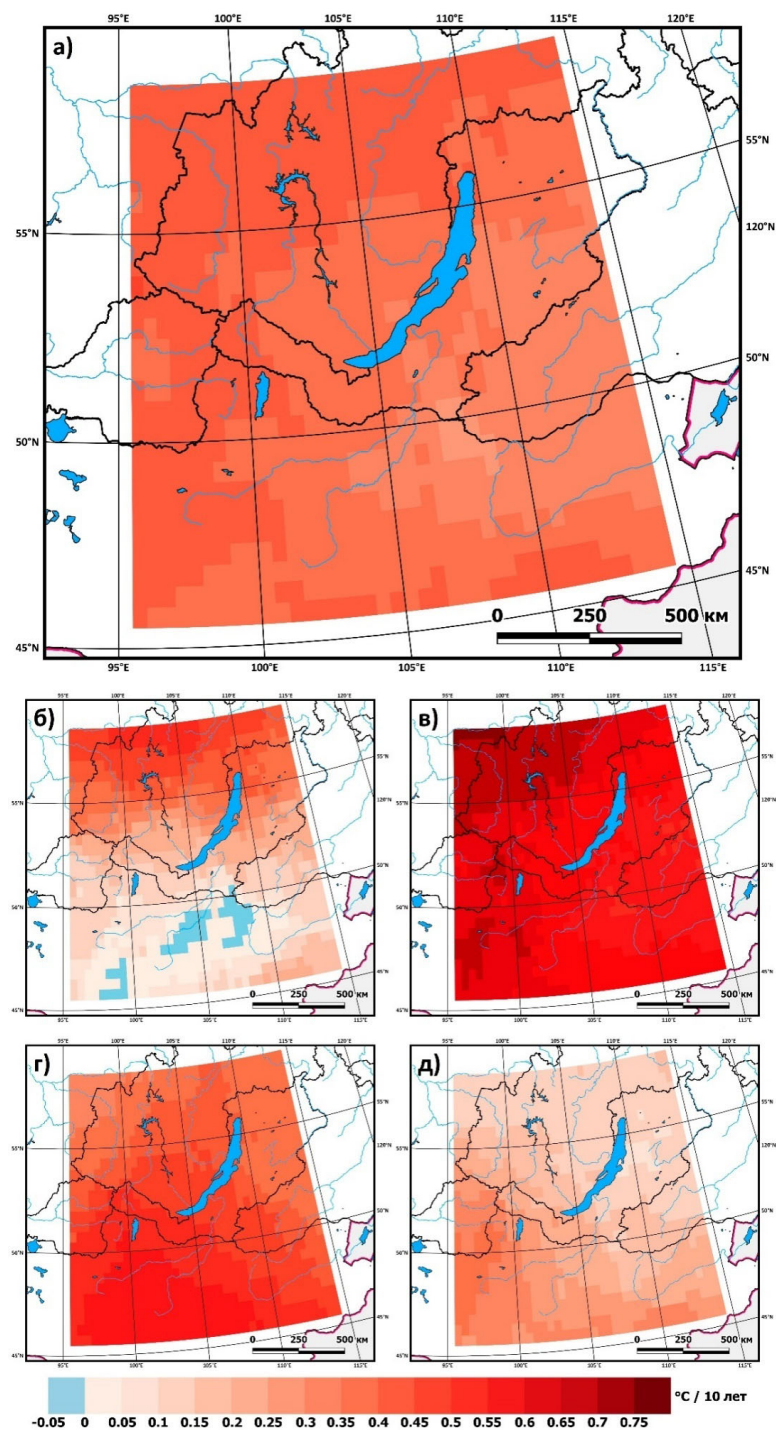


Рисунок 3. Скорость изменения (линейный тренд) температуры (°C/10 лет) за период 1971-2021 гг. а) среднегодовая, б) зима, в) весна, г) лето, д) осень (CRU, 2022)

Figure 3. Rate of change (linear trend) of temperature (°C/10 years) for the period 1971-2021: а) average annual, б) winter, в) spring, г) summer, д) autumn (CRU, 2022)

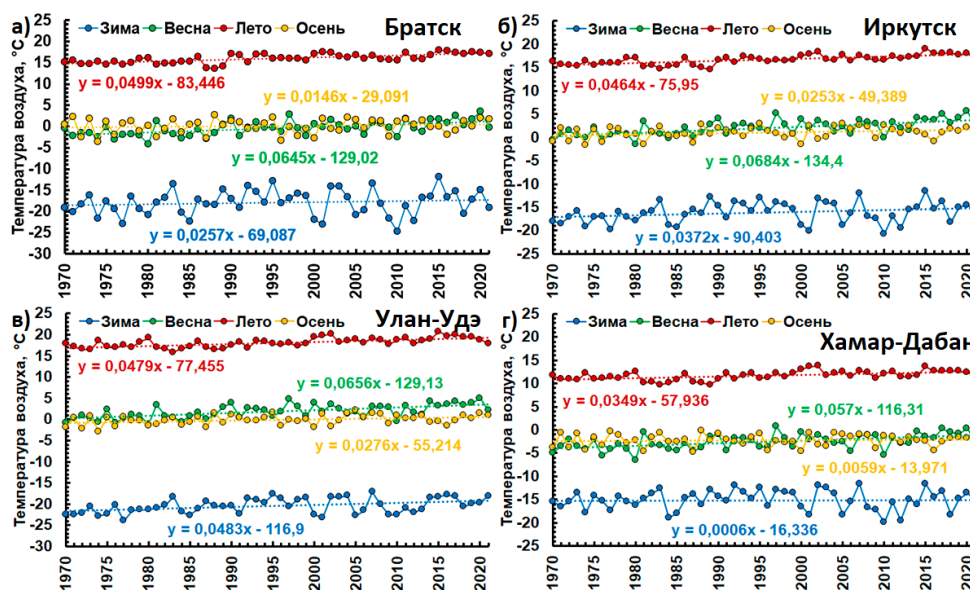


Рисунок 4. Изменение сезонной температуры в российской части региона, по данным метеостанций: а) Братск, б) Иркутск, в) Улан-Удэ, г) Хамар-Дабан

Figure 4. Changes in seasonal temperature in the Russian part of the region according to weather stations: а) Bratsk, б) Irkutsk, в) Ulan-Ude, г) Khamar-Daban

На территории Монголии также быстрее всего повышается температура на всех станциях именно весной. Как правило, лето теплеет быстрее, чем осень. Зимой изменение сезонной температуры может существенно различаться. Например, на станции Мурэн наблюдается повышение температур (рис. 5а), но гораздо чаще оно незначительно, или прослеживается слабый отрицательный тренд (рис. 5б).

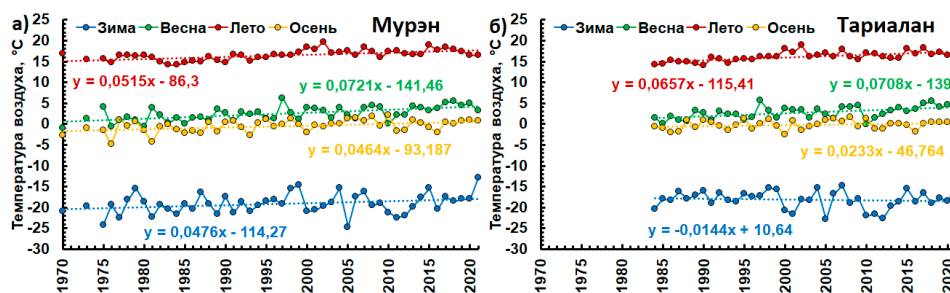


Рисунок 5. Изменение сезонной температуры в монгольской части региона, по данным метеостанций: а) Мурэн, б) Тариалан

Figure 5. Changes in seasonal temperature in the Mongolian part of the region according to weather stations: а) Muren, б) Tariatlan

Практически на всех метеостанциях увеличивается доля в году дней с температурами выше $+20^{\circ}\text{C}$ и уменьшается симметричный показатель отрицательных температур – доля дней с температурами ниже -20°C (рис. 6а,б). На о. Большой Ушканий (Байкал), при наличии четких трендов, доля дней с тем-

температурами выше 20°C и ниже -20°C меньше, чем на большинстве других станций (рис. 6в,г). Сказывается влияние Байкала, который в значительной степени смягчает и «выравнивает» континентальность климата на побережье. На станции Хамар-Дабан при существенном увеличении теплых дней (рис. 6д) доля холодных дней не уменьшается (рис. 6е).

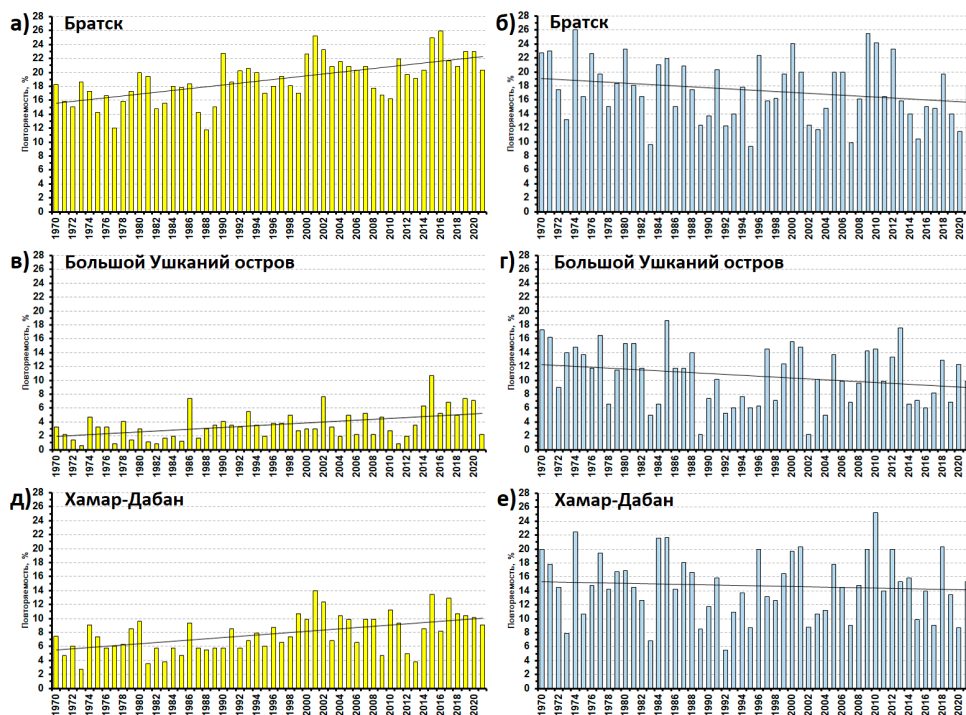


Рисунок 6. Изменение доли в году дней с температурой выше $+20^{\circ}\text{C}$ (слева) и ниже -20°C (справа) на станциях: Братск (а,б), Большой Ушканий остров (в,г), Хамар-Дабан (д,е)

Figure 6. Change in the share of days per year with temperatures above $+20^{\circ}\text{C}$ (left) and below -20°C (right) at the stations: Bratsk (а,б), Bolshoi Ushkany Island (в,г), Khamar-Daban (д,е)

В монгольской части региона тенденции аналогичные, но доля зимних температур ниже -20°C уменьшается медленнее.

Среднесуточные температуры выше $+30^{\circ}\text{C}$ отмечаются не на всех станциях, тренды в большинстве случаев статистически не значимы. Прослеживается увеличение доли в году и частоты проявления по годам дней с высокой среднесуточной температурой (рис. 7а-г).

Тренды для низких температур демонстрируют противоположные тенденции: уменьшается количество в году дней с температурами ниже -20°C и -30°C (рис. 8), но для -35°C и ниже наличие значимых трендов продемонстрировать не удается.

По данным станций, за последние 50 лет минимальная температура была зафиксирована на станции Максимова в Иркутской области (-55°C), но, по литературным данным, известны случаи понижения температуры до -60°C и ниже в прошлом веке (Справочник по опасным..., 1997).

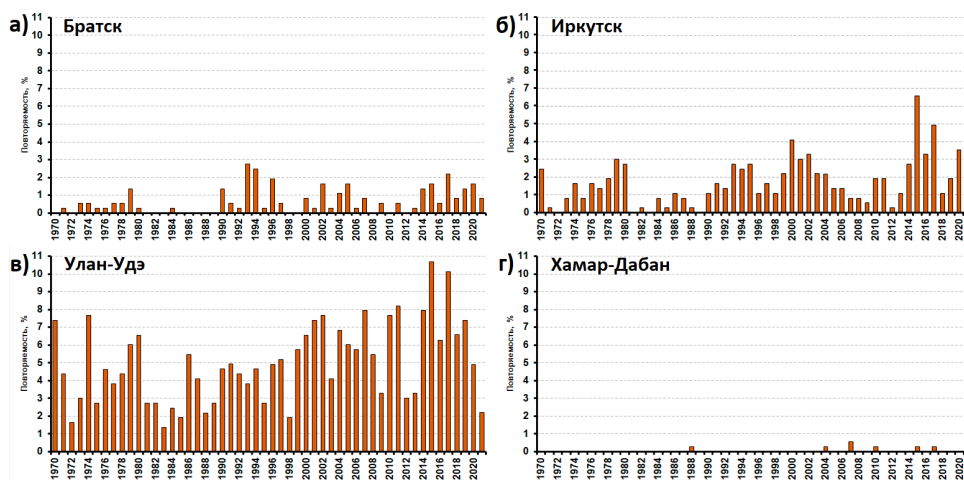


Рисунок 7. Доля дней в году с температурами выше $+30^{\circ}\text{C}$: а) Братск, б) Иркутск, в) Улан-Удэ, г) Хамар-Дабан

Figure 7. Proportion of days per year with temperatures above $+30^{\circ}\text{C}$: а) Bratsk, б) Irkutsk, в) Ulan-Ude, г) Khamar-Daban

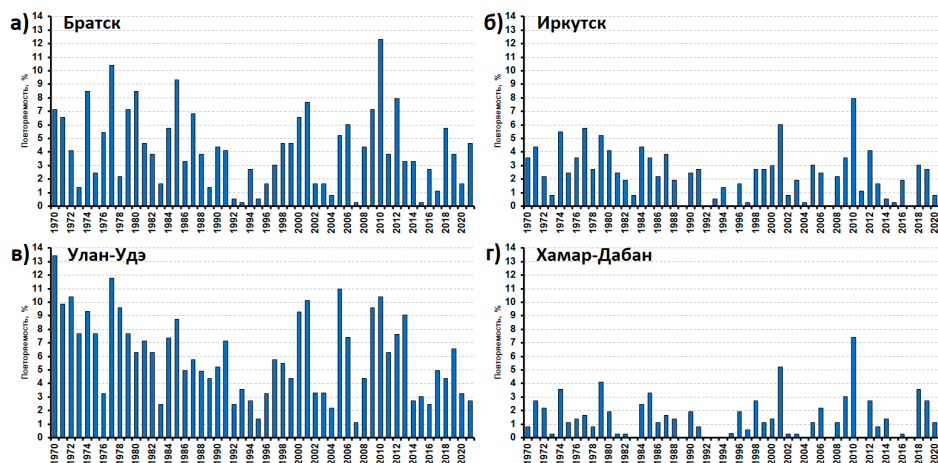


Рисунок 8. Доля дней в году с температурами ниже -30°C : а) Братск, б) Иркутск, в) Улан-Удэ, г) Хамар-Дабан

Figure 8. Proportion of days per year with temperatures below -30°C : а) Bratsk, б) Irkutsk, в) Ulan-Ude, г) Khamar-Daban

По массивам данных суточного разрешения ВНИИГМИ-МЦД (Булыгина и др., 2022б), было подсчитано количество дней с переходом температуры воздуха через 0°C за каждый год (при наличии данных наблюдений) и по месяцам. Годовое количество дней с переходом температуры воздуха через 0°C в регионе варьирует в пределах от 56.4 до 117.2 и в среднем составляет 84.6 дня. Наименьшее количество переходов отмечается на станциях Большой Ушканий о-в, Нижнеангарск и Ершово – 56.4, 62.7 и 68.9 дней соответственно. Максимальные значения приходятся на станции Монды – 117.2 дней и Инга – 101.8 день.

На большинстве станций количество дней с переходами увеличивается, преимущественно за счет зимних оттепелей. Согласно (Коршунова и др., 2018) в конце осени (ноябрь) увеличивается число оттепелей в Предбайкалье, а в начале весны (март) – на юге рассматриваемого региона (табл. 1).

Таблица 1. Число дней с переходом температуры через 0°C

Table 1. Number of days with temperature transition through 0°C

Индекс ВМО	Название станции	Месяц												Год
		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	
30209	Ершово	0.1	0.9	10.7	20.5	10.8	0.5	0	0.1	5.3	15.5	4.1	0.5	68.9
30219	Максимово	0.1	0.7	10.4	23.5	18.8	2.6	0.1	0.9	12.8	18.8	3.2	0.3	92.2
30309	Братск, обс.	0.1	0.8	10.5	21.6	10.9	0.4	0.0	0.1	5.3	16.1	5.0	0.6	71.4
30433	Нижнеангарск	0.0	0.0	3.9	19.2	15.0	0.6	0.0	0.0	3.0	16.7	3.9	0.4	62.7
30536	Баргузинский заповедник	0.1	0.2	4.8	22.5	22.2	4.6	0.1	0.8	11.9	24.7	8.2	0.8	100.9
30603	Зима	0.1	1.0	12.4	22.1	9.9	0.6	0.0	0.3	7.8	21.9	5.8	0.4	82.3
30612	Балаганск	0	0,2	8,3	23,1	10	0,2	0	0	4,5	19,1	6,3	0,3	72,1
30627	Баяндай	0,1	0,6	9,8	22,9	10,4	0,3	0	0,3	8,7	21,5	5,2	0,2	80,1
30632	Большой Ушканий о-в	0.2	0.1	2.9	17.1	13.9	0.2	0.0	0.0	0.3	9.2	9.8	2.7	56.4
30703	Инга	0.4	2.9	15.4	23.0	14.1	2.0	0.1	0.8	11.6	23.4	7.6	0.5	101.8
30710	Иркутск, обс.	0.1	1.3	13.6	23.1	9.8	0.7	0.0	0.2	6.8	21.6	8.6	0.6	86.4
30731	Горячинск	0.2	0.6	6.7	22.2	16.8	1.4	0.0	0.1	4.6	20.7	9.2	1.2	83.7
30745	Сосново-Озерское	0	0,3	8	23,5	17,1	1,1	0	0,7	11,9	21,7	3,1	0	87,3
30802	Монды	0.3	2.9	15.2	23.2	18.3	3.9	0.3	1.6	16.6	23.5	10.0	1.4	117.2
30811	Тунка	0.0	0.9	15.1	25.4	12.5	0.7	0.0	0.4	10.2	25.4	5.3	0.1	96.0
30815	Хамар-Дабан	1.1	2.6	9.7	18.4	17.2	2.7	0.1	1.3	12.1	18.9	8.1	2.1	94.3

Примечание. Период осреднения от начала наблюдения на метеостанции до 2021 года.

Изменение количества осадков происходит более неравномерно. Данные наблюдений на станциях фиксируют их увеличение в одних регионах и уменьшение в других. Также проявляется сезонная неравномерность выпадения осадков, по данным массива CRU (2022):

- в годовом ходе осадков тренд на увеличение со скоростью 3% от нормы/10 лет наблюдается на востоке региона и аналогичное уменьшение – на юге; на большей части региона тренды прослеживаются слабо;
- зимой и весной происходит почти повсеместное увеличение количества осадков, со скоростью до 7-12% от нормы/10 лет в отдельных районах;
- летом (за исключением запада региона) происходит уменьшение количества осадков со скоростью 2-3% от нормы/10 лет;
- осенью тренды осадков наиболее контрастные: увеличение до 4-5% от нормы/10 лет на российской части территории и уменьшение на 2-5% – в Монголии (рис. 9).

Как отмечалось в (Коршунова и др., 2018) на западе региона летом выявлена тенденция увеличения числа дней с экстремальными осадками (превышающими значение границы 95% интервала ранжированного ряда сезонных сумм осадков), что свидетельствует о потенциальной угрозе повторения масштабных наводнений, подобных Тулунскому 2019 года.

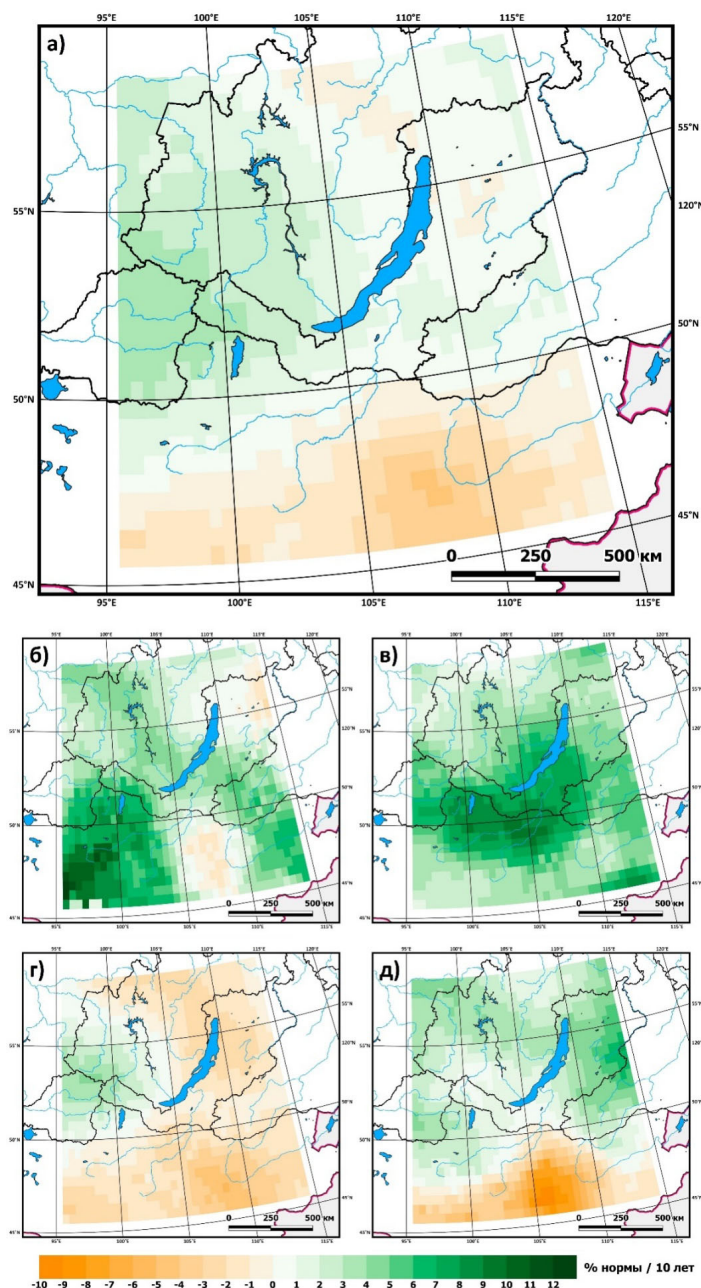


Рисунок 9. Пространственные распределения локальных коэффициентов линейного тренда сумм атмосферных осадков 1971-2021 гг.: а) среднегодовых, б) зима, в) весна, г) лето, д) осень

Figure 9. Spatial distributions of local coefficients of the linear trend of precipitation amounts for 1971-2021: а) annual average, б) winter, в) spring, г) summer, д) autumn

Атмосферные засухи отмечаются в регионе ежегодно. Их продолжительность, по данным наблюдений на станциях, колеблется от 10 до 61 дня подряд с осадками менее 1 мм (рис. 10). На фоне значительной межгодовой изменчивости в Братске количество последовательных сухих дней увеличивается, в Иркутске уменьшается, в Улан-Удэ и на Хамар-Дабане растет, в Чите сокращается. При этом тренды разнонаправленные, не подтверждаются на уровне значимости 0.1. Интересный факт: на Большом Ушканьем острове количество последовательных сухих дней оказалось неожиданно большим (в среднем 30, что больше, чем в Братске или Иркутске) (рис. 10).

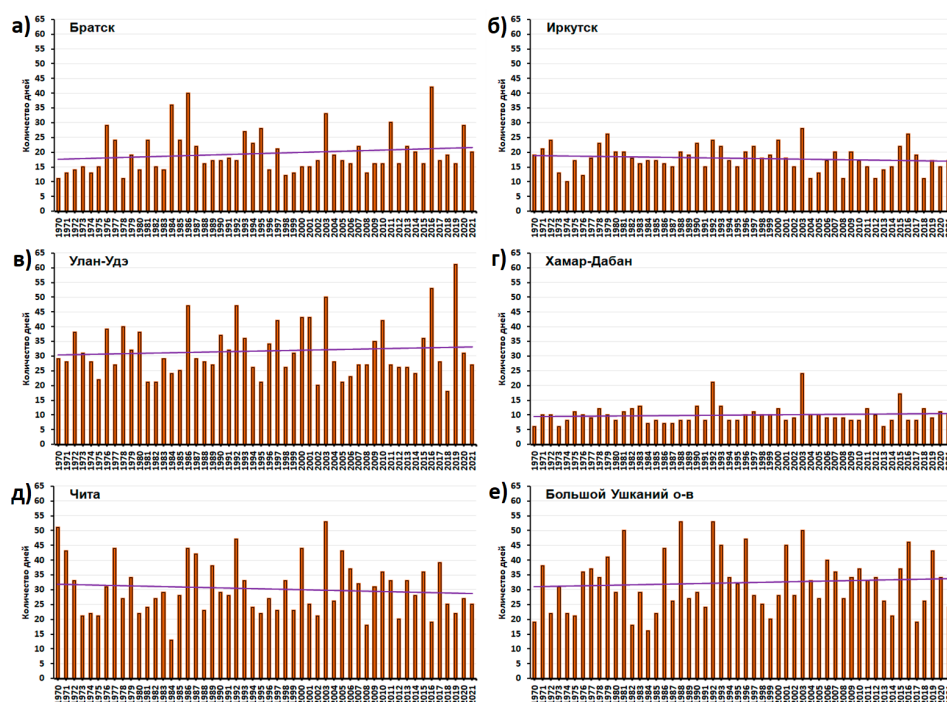


Рисунок 10. Изменение максимального числа последовательных дней в году с осадками менее 1 мм: а) Братск; б) Иркутск; в) Улан-Удэ; г) Хамар-Дабан; д) Чита; е) Большой Ушканый остров

Figure 10. Change in the maximum number of consecutive days per year with precipitation less than 1 mm: а) Bratsk; б) Irkutsk; в) Ulan-Ude; г) Khamar-Daban; д) Chita; е) Bolshoi Ushkaniy Island

Экстремально высокое количество осадков оценивалось по средним месячным и максимальным суточным значениям (рис. 11). Согласно нормативам, принятым Росгидрометом (РД 52.88.699-2008, 2008; РД 52.27.724-2019, 2019), в летний период выпадение 30 и более мм/сут. на равнинной территории считается неблагоприятным явлением, 50 мм – опасным (в горах порог опасного явления 30 мм). Для твердых осадков порог понижается до 20 мм. На большинстве станций указанные пороги превышаются, что может одновременно превышать среднюю месячную сумму осадков. На

северном склоне хребта Хамар-Дабан фиксируется до 209 мм/сут. – катастрофический уровень.

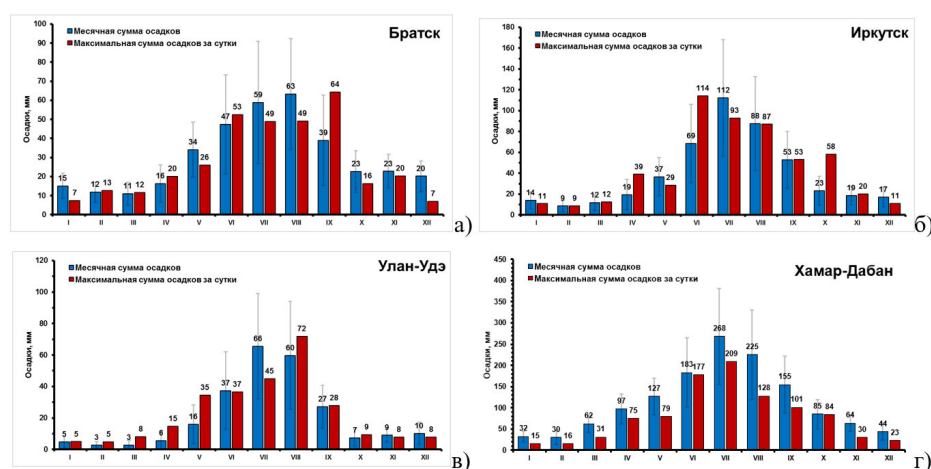


Рисунок 11. Среднемесячное и максимальное суточное количество осадков, мм, на станциях:
а) Братск, б) Иркутск, в) Улан-Удэ, г) Хамар-Дабан

Figure 11. Average monthly and maximum daily precipitation, mm, at stations:
а) Bratsk, б) Irkutsk, в) Ulan-Ude, г) Khamar-Daban

Пространственное распределение абсолютных значений порогов экстремальных осадков качественно повторяет распределение средних значений осадков, отражая климатические особенности местности и рельеф. Это фундаментальное свойство экстремальных осадков, оцениваемых с помощью гамма-распределения (или других экстремальных распределений), поскольку величины экстремальных осадков скоррелированы с параметрами формы и масштаба, которые определяют среднее в таких распределениях (Золина, Булыгина, 2016). По оценкам МГЭИК, в глобальном масштабе экстремальные суточные осадки, по прогнозам, будут усиливаться примерно на 7% на каждый 1°C глобального потепления (высокая достоверность) (IPCC, 2021).

К более редким опасным явлениям, связанным с осадками, относится выпадение крупного града (диаметр более 20 мм). В 1992 г. в Бурятии и в 2008 г. в Иркутской области был зафиксирован град диаметром 80 мм (Шамин и др., 2022).

К опасным атмосферным явлениям, которые зачастую связаны с выпадением конвективных осадков летом, относятся грозы. Район оз. Байкал и территория к северу от него характеризуются невысоким среднегодовым количеством дней с грозой – от 10 до 20 (табл. 2).

К западу и востоку количество дней с грозой на большей части бассейна увеличивается до 30, а в горах на юго-востоке – до 40 и более (Национальный атлас России, 2007). Сухие грозы в регионе регулярно приводят к возникновению природных пожаров. На территории Баргузинского заповедника самые ранние «сухие» грозы отмечались в конце мая, а самые поздние – в начале октября (Янкус, Сахаров, 2018).

Таблица 2. Среднее многолетнее число дней с грозой (дни) 1966-2021 гг.

Table 2. Average long-term annual number of days with thunderstorms (days) 1966-2021

Индекс ВМО	Название станции	Месяц												Год
		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	
30309	Братск, обс.				0.09	1.27	5.14	6.82	4.84	0.95	0.05			19.16
30504	Тулун				0.04	1.14	5.36	7.02	5.25	0.80	0.05	0.02		19.68
30710	Иркутск, обс.	0.02			0.09	0.77	3.48	5.84	3.61	0.88			0.02	14.70
30716	Хомутово	0.02		0.04	0.05	1.13	4.77	7.73	4.63	1.07				19.43
30729	Кабанск				0.02	0.29	2.46	4.21	2.89	0.54		0.02	0.02	10.45
30815	Хамар-Дабан				0.05	0.63	4.35	6.36	4.46	0.93				16.78
30433	Нижеангарск				0.04	0.32	2.34	3.48	2.93	0.46	0.02	0.02		19.61
30437	Карам				0.07	1.50	6.44	8.04	5.13	0.93				22.10

Ветровой режим. По данным Доклада об особенностях климата... (2023), средняя сезонная скорость ветра в регионе с 1976 г. слабо уменьшается летом и осенью, а в остальные сезоны остается без значимых изменений. Более высокие скорости ветра характерны, как правило, на открытых пространствах степей и в высокогорьях. На побережье оз. Байкал отмечается локальный феномен – «сарма» – сильный ветер, достигающий скорости урагана (более 40 м/с в порывах) (Гареева, 2018). По данным наблюдений на опорных станциях, ветра ураганной силы (33 м/с и более) фиксировались в шести точках (Булыгина и др., 2022а). Из них скорость 40 м/с была зафиксирована в Большом Голоустном, а 35 м/с – в Улан-Удэ (рис. 12).

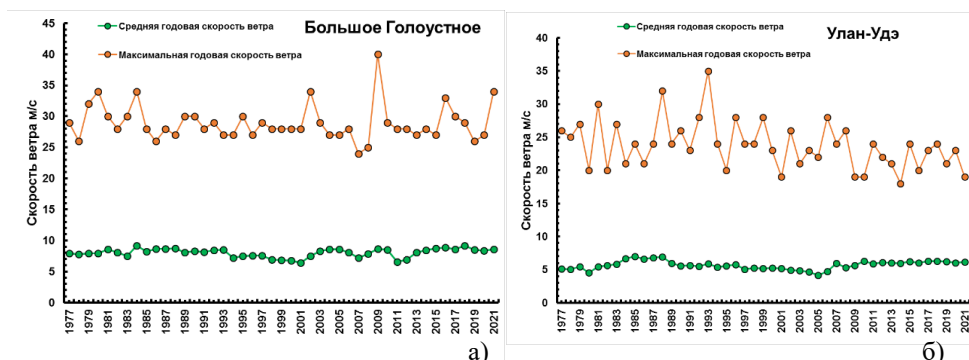


Рисунок 12. Максимальная скорость ветра, м/с: а) Большое Голоустное, б) Улан-Удэ

Figure 12. Maximum wind speed, m/s: a) Bolshoye Goloustnoye, b) Ulan-Ude

Климатообусловленные явления

Изменения климата, в том числе увеличение количества и интенсивности опасных явлений, проявляются в виде каскадных эффектов из климатообусловленных явлений и их последствий как в России, так и за рубежом

(Третий оценочный..., 2022; IPCC, 2021, 2022; Доклад о климатических рисках..., 2017).

К наиболее опасным климатообусловленным явлениям для бассейнов Байкала и Ангары относятся **наводнения** (Кичигина, 2018; Слепнева и др., 2020).

Повторяемость масштабных наводнений в бассейне Байкала за период 1936-2012 гг. составляла 5-12%. В прошлом веке наиболее крупные наводнения были зафиксированы в 1932, 1936, 1971, 1973, 1993, 1998 гг. (Экологический атлас..., 2015). На Байкальской природной территории наиболее масштабным считалось наводнение 1971 г., когда за период с 17 по 23 июля на ст. Байкальск выпало 171 мм, на ст. Хамар-Дабан – 249.1 мм осадков, а за период с 25 по 26 июля – соответственно 258.9 мм и 300.2 мм (Колотов и др., 2021). Значительные наводнения регулярно отмечаются на реках Селенге, Хилке, Уде, Верхней Ангаре, Баргузине. Как правило, глубина затопления поймы не превышает 0.5-1 м, но может достигать 1.8-3 м. Наиболее продолжительные разливы воды на поймах (30-90 суток) наблюдаются в долине р. Селенги и в нижнем течении р. Чикоя, менее продолжительные (до 25 суток) – в бассейнах рек Баргузин, Верхняя Ангара, Уда, Джиды и др., на небольших реках не превышает 3-7 дней (Экологический атлас..., 2015).

Последним катастрофическим наводнением в российской части бассейна стали события 2019 г. в Иркутской области, когда количество выпавших дождей в период 25-27 июня превысило месячную норму в 1.5-4 раза. В результате на территории области произошло затопление в 109 населенных пунктах 10890 жилых домов, 49 социально значимых объектов, 11058 приусадебных участков, 49 участков автомобильных дорог, повреждены 22 автомобильных моста местного значения. Наводнение в Иркутской области было объявлено **чрезвычайной ситуацией федерального характера** (Росгидромет, НИЦ «Планета», 2019). Ситуация усугубилась разрушением 10-метровой дамбы на р. Тулун. Максимальный уровень подъема воды достиг отметки 13 м 87 см 29 июня в 14 ч, что почти в 2 раза превышало критическую отметку (Орлов, Чернов, 2019).

По телеграммам «Шторм», которые передаются по каналам связи с наблюдательной сети Росгидромета, пострадали 1400 чел., из них 26 погибли, были эвакуированы 1161 человек. В превентивных целях отключено электроснабжение в 20 населенных пунктах с населением более 11200 человек. В июле на реках западных районов Иркутской области наблюдалась вторая волна дождевых паводков. В зону подтопления попали Нижнеудинский, Черемховский, Тулунский, Шелеховский, Слюдянский, Зиминский районы. Пик второй волны паводка был достигнут 31 июля 2019 года, когда уровень воды поднимался до 1125 см (на 425 см выше критического уровня). Частично разрушена автомобильная инфраструктура. Было прервано движение по федеральной трассе Р-258 Байкал, входящей в состав автомобильного коридора Москва-Владивосток. Это единственная автодорога, связывающая центр России с Сибирью и Дальним Востоком. В зону подтопления попали десятки населённых пунктов, подтоплено более 6700 жилых домов.

Прямой экономический ущерб населению, секторам экономики и социальной инфраструктуре в г. Тулуне оценивается в 24.4 млрд руб., в том числе на коммуникации и инженерные сооружения пришлось 10 млрд руб. (41%), на жилой сектор – 7.2 млрд руб. (34%), промышленность – 3.9 млрд руб. (16%), социально значимые объекты – 2.2 млрд руб. (9%) (Дугарова, 2021).

Следующим по уровню ущерба для региона опасным явлением можно назвать **природные пожары** (Государственный доклад..., 2022). Сухие грозы как метеорологический источник их возникновения были охарактеризованы выше. Большинство исследователей сходится во мнении, что в 70-90% (в зависимости от региона) лесных пожаров источник возгорания носит антропогенный характер (Второй оценочный доклад..., 2014). Тем не менее, для возникновения пожара необходима соответствующая пожароопасная обстановка, т.е. лес должен быть достаточно сухим, а более высокая температура значительно усиливает как вероятность, так и последствия пожаров.

В России **уровень пожарной опасности** оценивается по специализированному индексу Нестерова, включающему информацию о температуре, осадках и влажности. Значение показателя более 1000 считается опасным, а 10 000 и более – катастрофическим. Расчет значений индекса Нестерова для опорных станций с 1971 по 2021 гг. показал значительный разброс максимальных значений: от 5000 (°C)²сут. на станциях Бабушкин и Хамар-Дабан до более 25000 (°C)²сут. для Читы и Улан-Удэ. Распределение значений соответствует общему увеличению условий засухливости с запада на восток и с севера на юг, за исключением более увлажненных высокогорий.

В конце XX в. на востоке региона отмечалось незначительное сокращение (менее 10 дней) пожароопасного периода со значениями индекса Нестерова выше 1000 (°C)²сут., но на большей части региона фиксировалось увеличение в пределах 20 дней за период 1974-2004 гг., а в бассейне Ангары – до 29 дней (Росгидромет, 2012). Прогнозы изменения числа пожароопасных дней показывали их дальнейшее увеличение на 10-20 к 2030 г. и на 30-50 к 2099 г. в условиях сценария RCP8.5 по сравнению с концом прошлого века (Росгидромет, 2012).

Повышение температуры и увеличение засухливости способствовали 20-кратному увеличению количества лесных пожаров в бассейне Байкала в последние годы (Safronov, 2020), причем оба процесса исследователи связывают с глобальным изменением климата (Brown et al., 2021). В ходе полевых обследований и проведения геоботанических описаний в каждой из точек наблюдений в бассейне Ангары нами были обнаружены следы пожаров разной давности. В 2014-2016 гг. на берегах Байкала и окружающих хребтах выгорело почти 1.5 млн га леса. В 2019 г. в Иркутской области суммарно сгорело более 1.5 млн га леса (Каликхман, Каликхман, 2017; Brown et al., 2021). Ежегодный экономический ущерб от уничтожения лесобразующих пород, рассчитанный как произведение уничтоженной при пожаре плотной на стоймость 1 м³ древесины, в Байкальском регионе составляет порядка 82.22 млн руб. (Тимофеева и др., 2022).

В районе исследования проявляются опасные климатообусловленные **экзогенные процессы: сели и оползни**. Сели, оползни и карст имеют не только широкое распространение в бассейнах Байкала и Ангары, но также наносят существенный экономический ущерб. Регион исследований наряду с Кавказом относится к одной из двух областей в стране с наибольшей селевой активностью – Байкальской (Национальный атлас России, 2007).

Селевые наводнения возникают в результате интенсивных ливней на участках со значительной крутизной склонов и наличием легко смываемого рыхлого грунта. Сели обладают большой разрушительной силой, способны приобрести катастрофический характер и привести к значительным ущербам. Наибольшее развитие селевые процессы имеют в приустьевых частях русел рек северного склона хр. Хамар-Дабан (Экологический атлас..., 2015). На южном побережье оз. Байкал (от устья р. Мысовки до истока р. Ангары), на юго-восточной склоне Байкальского хребта, а также на ряде притоков р. Селенги прохождение паводков часто усугубляется селями (Макаров, 2012).

По данным Государственного доклада о состоянии оз. Байкал... (2019), в результате экстремальных ливней в 1971 г. мощные и разрушительные селевые потоки прошли практически по всем водотокам юго-западного Прибайкалья, в результате чего семь дней не работала Транссибирская железнодорожная магистраль, 20 км путей было смыто в оз. Байкал, было повреждено несколько мостов, размыто полотно федеральной автодороги Иркутск-Улан-Удэ, порвана линия кабельной связи. В августе 2009 г. в результате прохождения ливней в районе г. Улан-Удэ были засыпаны асфальтированные проезды, водой смыт мусор на городских свалках, серьезно повреждены и даже полностью разрушены жилые дома; образовались овраги, шириной до 19 м, длиной – 200-300 м (Госдоклад..., 2019).

Наиболее селеопасным районом в Иркутской области является юго-западная оконечность Байкала, где в узкой прибрежной полосе проходят крупные транспортные артерии, линии электропередачи, расположены города, рекреационные центры. Для них наибольшую опасность представляют грязекаменные потоки, плотностью в 1600-2500 кг/м³ и наносоводные сели, плотностью около 1600 кг/м³. Например, в результате массового схода селей в 1962 и 1971 гг. в оз. Байкал было вынесено, соответственно, более 3 и 5-8 млн м³ обломочного материала (Кузьмин, 2016). Вероятность сильных селей такого масштаба оценивается 1 раз в 50-60 лет (Сутурин, 2012; Brown et al., 2021).

В России по условиям рельефа и геологическим особенностям значительные территории относятся к оползнеопасным районам различной степени активности (Карта активности..., 2022; СП 115.13330.2016, 2018; Атлас природных и техногенных..., 2010). Небольшие, но высокоподвижные оползни характерны для склонов долины Ангары (Кузьмин, 2016), отмечаются вдоль береговой линии Иркутского и Братского водохранилищ. В ходе экспедиции в сентябре 2022 г. нами было обнаружено, что обвальнo-оползневой склон примыкает непосредственно к объектам Братской ГЭС.

При общей протяженности береговой линии водохранилищ Ангарского каскада около 7800 км на абразионные берега приходится более 2100 км, из которых при размыве пород юрской системы формируется 69 км подверженных абразии берегов, кембрийской – 519 км, ордовикской – 544 км, силурийской и каменноугольной – 393 км, в четвертичных отложениях – 716 км. Ежегодное поступление осадочного материала в водохранилища составляет более 227 млн т, из них абразия берегов даёт 98.5% суммарного поступления. На долю абразионного материала в Иркутском водохранилище приходится 77.9, Братском – 98.8 и Усть-Илимском – 87.1%. Речной сток по величине приносимого материала значительно уступает поступлениям от размыва берегов (Карнаухова, 2019). Иркутское водохранилище (включая оз. Байкал) удерживает 64% поступающего осадочного материала, Братское – 98.8%, Усть-Илимское – 97.9%, из них большая часть материала переходит в донные отложения (Карнаухова, 2009). Прибрежная зона ангарских водохранилищ имеет высокий темп накопления осадочного материала, т.е. **является областью сверхбыстрой седиментации** (Карнаухова, 2014).

Регион исследований включает один из районов распространения крупнейших **карстовых полостей** в стране – Ангаро-Ленский. Они заложены в легкорастворимых карбонатных породах, суммарная протяженность составляет 75.42 км, глубина – 239 м (Национальный атлас России, 2007). Для оценки масштабов возможных последствий карстовых провалов необходимы дополнительные исследования.

Выводы

В регионе, по данным наблюдений, на станциях четко проявляется рост среднегодовой и сезонной температуры с 70-х годов прошлого столетия. Увеличивается количество теплых и сокращается количество холодных дней.

Изменение годового и сезонного количества осадков происходит неравномерно на территории региона. На территории Иркутской области прослеживается тенденция к увеличению годового количества осадков, а на востоке (Бурятия и Забайкалье) и юге региона (Монголия) – к уменьшению. Зимой и весной осадки растут практически на всей территории региона, летом и осенью сокращаются на юге и востоке.

Тенденция к уменьшению средней и максимальной скорости ветра не исключает вероятности сильных ветров, наносящих ущерб.

Нарастающая экстремальность климата проявляется в неравномерности выпадения осадков (высокие суточные значения и продолжительные засухи) и росте пожароопасности. Последнее катастрофическое наводнение и масштабные пожары были зафиксированы в 2019 г. Кроме того, интенсивные осадки приводят к активизации склоновых процессов (сели и оползни), которые регулярно наносят ущербы экономике.

Благодарности

Работа выполнена в рамках темы госзадания № АААА-А20-120070990079-6 ФГБУ «ИГКЭ». Благодарим компанию Эн+ Груп за оказанную в рамках проекта «Адаптация ГЭС Ангарского каскада к изменениям климата» поддержку, предоставление материалов и помощь в организации экспедиции в район исследований.

Список литературы

Абаринова, Н.Г., Гербер, А.С., Липка, О.Н., Льюмменс, Х., Толстых, Н.И., Федоров, А.В., Яблоков, М.С., Куклина, С.Л., Шейнфельд, С.А. (2021) Проект «Оценка экологических и социальных проблем Байкальской природной территории», М., Экоцентр «Заповедники», 587 с.

Атлас природных и техногенных опасностей и рисков чрезвычайных ситуаций в Российской Федерации (2010) М., МЧС России, ООО Издательско-продюсерский центр «Дизайн. Информация. Картография», 398 с.

Баженова, О.И., Мартынова, Г.Н. (2003) Оценка интенсивности эрозионных процессов в бассейне Ангары по стоку взвешенных наносов, *Проблемы геологии и географии Сибири: материалы научной конференции, посвященной 125-летию основания Томского государственного университета и 70-летию образования геолого-географического факультета, Томск, 02-04 апреля 2003 года*, Томск, Национальный исследовательский Томский государственный университет, с. 27-29.

Булыгина, О.Н., Веселов, В.М., Разуваев, В.Н., Александрова, Т.М. (2022а) «Описание массива срочных данных об основных метеорологических параметрах на станциях России», *свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2014620549*, URL: <http://meteo.ru/data/163-basic-parameters#описание-массива-данных>.

Булыгина, О.Н., Разуваев, В.Н., Александрова, Т.М. (2022б) *Описание массива данных суточной температуры воздуха и количества осадков на метеорологических станциях России и бывшего СССР (TTTR)*.

Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата на территории Российской Федерации (2014) М., Росгидромет, 1008 с.

Гареева, Г.Н. (2018) Роль ветра в формировании рельефа Прибайкалья – Байкал – Родина – Планета, *Материалы IV Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, г. Иркутск, 9-10 ноября 2018 г.*, Иркутск, Изд-во Института географии им. В.Б. Сочавы СО РАН, с. 15-16.

Государственный доклад «О состоянии озера Байкал и мерах по его охране в 2018 году» (2019) Иркутск, АНО «КЦ Эксперт», 341 с.

Государственный доклад «О состоянии озера Байкал и мерах по его охране в 2021 году» (2022) Иркутск, ФГБУН Институт географии им. В.Б. Сочавы СО РАН, 370 с.

Дегтярев, А.С., Драбенко, В.А., Драбенко, В.А. (2015) *Статистические методы обработки метеорологической информации*, Учебник, СПб, ООО «Андреевский издательский дом», 225 с.

Доклад о климатических рисках на территории Российской Федерации (2017) Санкт-Петербург, 106 с.

Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации в 2022 г. (2023) М., Росгидромет, 104 с.

Дугарова, Г.Б. (2021) Анализ и оценка последствий наводнения в г. Тулуне (Иркутская область), *Всероссийский экономический журнал ЭКО*, № 1 (559), с. 130-150.

Золина, О.Г., Булыгина, О.Н. (2016) Современная климатическая изменчивость характеристик экстремальных осадков в России, *Фундаментальная и прикладная климатология*, т. 1, с. 84-103.

Карнаухова, Г.А. (2019) Обстановки осадконакопления и особенности состава донных отложений в Ангарских водохранилищах, *Отечественная геология*, № 3, с. 74-82.

Карнаухова, Г.А. (2009) *Процессы осадкообразования в водохранилищах Ангарского каскада*, Иркутск, ИГ СО РАН, 44 с.

Карнаухова, Г.А. (2014) Прибрежная зона осадконакопления в ангарских водохранилищах, *Известия Иркутского государственного университета. Серия: Науки о Земле*, т. 10, с. 67-77.

Кичигина, Н.В. (2018) Опасность наводнений на реках Байкальского региона, *География и природные ресурсы*, № 2, с. 41-51.

Коршунова, Н.Н., Булыгина, О.Н., Разуваев, В.Н., Давлетшин, С.Г. (2018) Оценка экстремальности температурного режима и режима осадков на территории РФ и ее регионов, *Труды ВНИИГМИ-МЦД*, вып. 183, с. 20-30.

Кузьмин, С.Б. (2016) Опасные природные процессы Иркутской области, *Безопасность жизнедеятельности*, № 12 (192), с. 27-34.

Макаров, С.А. (2012) *Сели Прибайкалья, Иркутск*, Изд-во Ин-та географии им. В.В. Сочавы СО РАН, 111 с.

Национальный атлас России (2007) Т. 2, Природа. Экология, М., ПКО «Картография», 496 с.

Орлов, Е.А., Чернов, К.А. (2019) Результаты выполнения аварийно-восстановительных работ и анализ медицинского обеспечения в ходе ликвидации наводнения на территории Иркутской области аэромобильной группой Тульского спасательного центра МЧС России (с 6 июля по 15 августа 2019 г.),

Медико-биологические и социально-психологические проблемы безопасности в чрезвычайных ситуациях, № 3, с. 52-58.

Проект OpenStreetMap. Гунсометрическая карта, URL: <https://www.openstreetmap.org/#map=9/61.3256/60.2902&layers=Y> (дата обращения 02 февраля 2024).

РД 52.27.724-2019 (2019) *Наставление по краткосрочным прогнозам погоды общего назначения*, М., ФГБУ «Гидрометцентр России», 72 с.

РД 52.88.699-2008 (2008) *Положение о порядке действий учреждений и организаций при угрозе возникновения и возникновении опасных природных явлений*, М., Росгидромет, 31 с.

Росгидромет (2012) *Методы оценки последствий изменения климата для физических и биологических систем*, под ред. С.М. Семенова, М., Росгидромет, 512 с.

Росгидромет, НИЦ «Планета», *Мониторинг наводнения в Иркутской области. 20 июля 2019*, URL: <http://www.meteorf.ru/press/news/19528/> (дата обращения 02 февраля 2024).

Слепнева, Е.В., Парыгина, Е.А., Кичигина, Н.В. (2020) Генезис наводнений в Иркутской области, *Известия Иркутского государственного университета, серия: Науки о Земле*, т. 34, с. 96-112.

СП 115.13330.2016 (2018) *Геофизика опасных природных воздействий. Актуализированная редакция СНиП 22-01-95*, Издание официальное, М., Минстрой России, Стандартинформ, 36 с.

Справочник по опасным природным явлениям в республиках, краях и областях Российской Федерации (1997) Санкт-Петербург, Гидрометеиздат, 588 с.

Сутурин, А.Н. (2012) Экосистема Байкала может быть уничтожена техногенными отходами, *Экология и жизнь*, № 2, с. 82-85.

Тимофеева, С.С., Гармышев, В.В., Астраханцева, А.Ю. (2022) Сравнительный анализ экологических рисков природных пожаров на территории Байкальского региона, *Безопасность техногенных и природных систем*, № 4, с. 22-29.

Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации (2022) Под ред. В.М. Катцова, Росгидромет, Санкт-Петербург, Научное издание, 676 с.

Карта активности оползневых процессов на территории Российской Федерации по состоянию на 01.11.2022 г. Масштаб 1:25 000 000 (2022) Москва, Гидроспецгеология, ФГБУ «Гидроспецгеология».

Шамин, С.И., Бухонова, Л.К., Санина, А.Т. (2022) Сведения об опасных и неблагоприятных гидрометеорологических явлениях, которые нанесли материальный и социальный ущерб на территории России, *Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2019621326*.

Экологический атлас бассейна озера Байкал (2015) Иркутск, Изд-во Института географии им. В.Б. Сочавы СО РАН, 145 с.

Эколого-географический атлас-монография «Селенга-Байкал» (2019) Под ред. Н.С. Касимова, М., Географический факультет МГУ, 288 с.

Янкус, Г.А., Сахаров, Л.В. (2018) Природные пожары в Северо-Восточном Прибайкалье, *Биосферное хозяйство: теория и практика*, № 3, с. 28-47.

Brown, K.P., Gerber, A., Bedulina, D., Timofeyev, M.A. (2021) Human impact and ecosystemic health at Lake Baikal, *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, vol. 8, no. 4, p. e1528.

CRU (2022) *Climatic Research Unit: Data. High-resolution gridded datasets and derived products*, URL: <https://crudata.uea.ac.uk/cru/data/hrg/> (accessed 02 Feb 2024).

IPCC (2021) *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, 1300 p.

IPCC (2022) *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate*, Cambridge University Press, in Press.

Safronov, A.N. (2020) *Effects of climatic warming and wildfires on recent vegetation changes in the Lake Baikal Basin*, *Climate*, no. 8(4), p. 57, URL: <https://doi.org/10.3390/cli8040057>.

UNESCO (1997) *World Heritage Committee. Twentieth session, Merida, Mexico, 2-7 December 1996*, WHC-96/CONF.201/21, 10 March 1997, URL: <https://whc.unesco.org/archive/repcom96.htm> (accessed 02 Feb 2024).

References

Abarinova, N.G., Gerber, A.S., Lipka, O.N., Leummens, H., Tolstykh, N.I., Fedorov, A.V., Yablokov, M.S., Kuklina, S.L., Sheinfeld, S.A. (2021) *Proekt «Ocenka ekologicheskikh i social'nykh problem Bajkal'skoj prirodnoj territorii»* [Project “Assessment of environmental and social problems of the Baikal natural territory”], Ecocenter “Reserves”, Moscow, Russia, 587 p.

Atlas prirodnih i tekhnogennykh opasnostej i riskov chrezvychajnykh situacij v Rossijskoj Federacii [Atlas of natural and man-made hazards and risks of emergency situations in the Russian Federation] (2010) Ministry of Emergency Situations of Russia, LLC Publishing and Producing Center Design, Information, Cartography, Moscow, Russia, 398 p.

Bazhenova, O.I., Martyanova, G.N. (2003) Assessment of the intensity of erosion processes in the Angara basin based on suspended sediment runoff [Assessment of the intensity of erosion processes in the Angara basin based on suspended sediment runoff], *Problemy geologii i geografii Sibiri: materialy*

nauchnoj konferencii, posvyashchennoj 125-letiyu osnovaniya Tomskogo gosudarstvennogo universiteta i 70-letiyu obrazovaniya geologo-geograficheskogo fakul'teta [Problems of geology and geography of Siberia: materials of the scientific conference dedicated to the 125th anniversary of the founding of Tomsk State University and the 70th anniversary of the formation of the Faculty of Geology and Geography], Tomsk, April 02-04, 2003, National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia, pp. 27-29.

Bulygina, O.N., Veselov, V.M., Razuvaev, V.N., Alexandrova, T.M. (2022a) *Opisanie massiva srochnykh dannykh ob osnovnykh meteorologicheskikh parametrokh na stantsiyakh Rossii* [Description of an array of urgent data on the main meteorological parameters at Russian stations], *Certificate of state registration of the database no. 2014620549*, URL: <http://meteo.ru/data/163-basic-parameters#description-of-data-array>.

Bulygina, O.N., Razuvaev, V.N., Alexandrova, T.M. (2022b) *Opisanie massiva dannykh sutochnoy temperatury vozduha i kolichestva osadkov na meteorologicheskikh stantsiyakh Rossii i byvshego SSSR* [Description of a data array of daily air temperature and precipitation at meteorological stations in Russia and the former USSR].

Vtoroj ocenochnyj doklad Rosgidrometa ob izmeneniyakh klimata na territorii Rossijskoj Federacii [The second assessment report of Roshydromet on climate change in the Russian Federation] (2014) Roshydromet, Moscow, Russia, 1008 p.

Gareeva, G.N. (2018) *Rol' vetra v formirovanii rel'efa Pribajkal'ya – Bajkal – Rodina – Planeta* [The role of wind in the formation of the relief of the Baikal region - Baikal – Motherland – Planet], *Materialy IV Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferencii s mezhdunarodnym uchastiem (g. Irkutsk, 9-10 noyabrya 2018 g.)* [Materials of the IV All-Russian scientific and practical conference with international participation (Irkutsk, November 9-10, 2018)], Publishing House of the Institute of Geography named after V.B. Sochavy SB RAS, Irkutsk, Russia, pp. 15-16.

Gosudarstvennyj doklad «O sostoyanii ozera Bajkal i merah po ego ohrane v 2018 godu» [State report “On the state of Lake Baikal and measures for its protection in 2018”] (2019) ANO “KC Expert”, Irkutsk, Russia, 341 p.

Gosudarstvennyj doklad «O sostoyanii ozera Bajkal i merah po ego ohrane v 2021 godu» [State report “On the state of Lake Baikal and measures for its protection in 2021”] (2022) Federal State Budgetary Institution of Science Institute of Geography named after V.B. Sochavy SB RAS, Irkutsk, Russia, 370 p.

Degtyarev, A.S., Drabenko, V.A., Drabenko, V.A. (2015) *Statisticheskie metody obrabotki meteorologicheskoy informacii* [Statistical methods for processing meteorological information], Textbook, Andreevsky Publishing House LLC, St. Petersburg, Russia, 225 p.

Doklad o klimaticheskikh riskakh na territorii Rossijskoj Federacii [Report on climate risks on the territory of the Russian Federation] (2017) St. Petersburg, Russia, 106 p.

Doklad ob osobennostyakh klimata na territorii Rossijskoj Federacii v 2022 g. [Report on climate features on the territory of the Russian Federation in 2022] (2023) Roshydromet, Moscow, Russia, 104 p.

Dugarova, G.B. (2021) Analiz i ocenka posledstvij navodneniya v g. Tulune (Irkutskaya oblast') [Analysis and assessment of the consequences of flooding in the city of Tulun (Irkutsk region)], *Vserossijskij ekonomicheskij zhurnal EKO*, no. 1 (559), pp. 130-150.

Zolina, O.G., Bulygina, O.N. (2016) Sovremennaya klimaticheskaya izmenchivost' kharakteristik ekstremal'nykh osadkov v Rossii [Modern climatic variability of extreme precipitation characteristics in Russia], *Fundamental'naya i prikladnaya klimatologiya*, vol. 1, pp. 84-103.

Karnaukhova, G.A. (2019) Obstanovki osadkonakopleniya i osobennosti sostava donnykh otlozhenij v Angarskikh vodohranilishchah [Sedimentation environments and features of the composition of bottom sediments in the Angara reservoirs], *Otechestvennaya geologiya*, no. 3, pp. 74-82.

Karnaukhova, G.A. (2009) *Processy osadkoobrazovaniya v vodohranilishchah Angarskogo kaskada* [Sedimentation processes in reservoirs of the Angara cascade], IG SB RAS, Irkutsk, Russia, 44 p.

Karnaukhova, G.A. (2014) Pribrezhnaya zona osadkonakopleniya v angarskikh vodohranilishchah [Coastal sedimentation zone in the Angara reservoirs], *Izvestiya Irkutskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Nauki o Zemle*, vol. 10, pp. 67-77.

Kichigina, N.V. (2018) Opasnost' navodnenij na rekah Bajkal'skogo regiona [The danger of floods on the rivers of the Baikal region], *Geografiya i prirodnye resursy*, no. 2, pp. 41-51.

Korshunova, N.N., Bulygina, O.N., Razuvaev, V.N., Davletshin, S.G. (2018) Ocenka ekstremal'nosti temperaturnogo rezhima i rezhima osadkov na territorii RF i ee regionov [Assessment of extreme temperature and precipitation regimes on the territory of the Russian Federation and its regions], *Trudy VNIIGMI-MCD*, vol. 183, pp. 20-30.

Kuzmin, S.B. (2016) Opasnye prirodnye processy Irkutskoj oblasti [Hazardous natural processes in the Irkutsk region], *Bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti*, no. 12 (192), pp. 27-34.

Makarov, S.A. (2012) *Seli Pribajkal'ya* [Mudflows in the Baikal region], Publishing House of the Institute of Geography named after B.V. Sochavy SB RAS, Irkutsk, Russia, 111 p.

Nacional'nyj atlas Rossii [National Atlas of Russia] (2007) Vol. 2, Nature. Ecology, PKO "Cartography", Moscow, Russia, 496 p.

Orlov, E.A., Chernov, K.A. (2019) Rezul'taty vypolneniya avarijno-vosstanovitel'nykh rabot i analiz medicinskogo obespecheniya v hode likvidacii navodneniya na territorii Irkutskoj oblasti aeromobil'noj gruppoj Tul'skogo

spasatel'nogo centra MCHS Rossii (s 6 iyulya po 15 avgusta 2019 g.) [Results of emergency recovery work and analysis of medical support during flood liquidation in the Irkutsk region by the airmobile group of the Tula Rescue Center of the Ministry of Emergency Situations of Russia (from July 6 to August 15, 2019)], *Mediko-biologicheskie i social'no-psihologicheskie problemy bezopasnosti v chrezvychajnyh situatsiyah*, no. 3, pp. 52-58.

OpenStreetMap project. Hypsometric map, URL: <https://www.openstreetmap.org/#map=9/61.3256/60.2902&layers=Y>. (accessed February 02, 2024).

Rukovodyashchij Dokument 52.27.724-2019 Nastavlenie po kratkosrochnym prognozam pogody obshchego naznacheniya [Guidance Document 52.27.724-2019. A Manual on General Weather Forecasts] (2019) Federal State Budgetary Institution "Hydrometeorological Center of Russia", Moscow, Russia, 72 p.

Rukovodyashchij Dokument 52.88.699-2008. Polozhenie o poryadke dejstvij uchrezhdenij i organizacij pri ugroze vozniknoveniya i vozniknovenii opasnykh prirodnykh yavlenij [Guiding Document 52.88.699-2008. Regulations on the procedure for actions of institutions and organizations in the event of the threat and occurrence of hazardous natural phenomena] (2008) Roshydromet, Moscow, Russia, 31 p.

Metody ocenki posledstvij izmeneniya klimata dlya fizicheskikh i biologicheskikh sistem [Methods for assessing the effects of climate change on physical and biological systems] (2012) In: C.M. Semenov (ed.), Roshydromet, Moscow, Russia, 512 p.

Rosgidromet, NIC «Planeta». Monitoring navodneniya v Irkutskoj oblasti [Roshydromet, Scientific Research Center "Planeta". Monitoring of floods in the Irkutsk region]. July 20, 2019, URL: <http://www.meteorf.ru/press/news/19528/> (accessed February 02, 2024).

Slepneva, E.V., Parygina, E.A., Kichigina, N.V. (2020) Genezis navodnenij v Irkutskoj oblasti [Genesis of floods in the Irkutsk region], *Izvestiya Irkutskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Nauki o Zemle*, vol. 34, pp. 96-112.

SP 115.13330.2016. Geofizika opasnykh prirodnykh vozdeystvij. Aktualizirovannaya redaktsiya SNIp 22-01-95. Izdaniye ofitsial'noye [SP 115.13330.2016. Geophysics of hazardous natural impacts. Updated edition of SNIp 22-01-95. Official edition] (2018) Minstroy Rossii, Standartinform, Moscow, Russia, 36 p.

Spravochnik po opasnym prirodnykh yavleniyam v respublikah, krayah i oblastyah Rossijskoj Federacii [Handbook on natural hazards in the republics, territories and regions of the Russian Federation] (1997) Gidrometeoizdat, St. Petersburg, Russia, 588 p.

Suturin, A.N. (2012) Ekosistema Bajkala mozhet byt' unichtozhena tekhnogennymi othodami [The Baikal ecosystem can be destroyed by man-made waste], *Ekologiya i zhizn'*, no. 2, pp. 82-85.

Timofeeva, S.S., Garmyshev, V.V., Astrakhantseva, A.Yu. (2022) Comparative analysis of environmental risks of natural fires in the Baikal region [Comparative analysis of environmental risks of natural fires in the Baikal region], *Safety of man-made and natural systems*, no. 4, pp. 22-29.

Tretij ocenochnyj doklad ob izmeneniyah klimata i ih posledstviyah na territorii Rossijskoj Federacii [Third assessment report on climate change and its consequences on the territory of the Russian Federation] (2022) In: V.M. Kattsova (ed.), Roshydromet, High technology, St. Petersburg, Russia, 676 p.

FGBU «Gidrospetsgeologiya». *Karta aktivnosti opolznevogo protsessa na territorii Rossiyskoy Federatsii po sostoyaniyu na 01.11.2022 g.* [Map of landslide process activity on the territory of the Russian Federation as of November 1, 2022] (2022) 1: 25 000 000, Gidrospetsgeologiya, Moscow, Russia.

Shamin, S.I., Bukhonova, L.K., Sanina, A.T. (2022) Svedeniya ob opasnyh i neblagopriyatnyh gidrometeorologicheskikh yavleniyah, kotorye nanesli material'nyj i social'nyj ushcherb na territorii Rossii [Information about dangerous and unfavorable hydrometeorological phenomena that caused material and social damage on the territory of Russia], *Certificate of state registration of the database no. 2019621326*.

Ekologicheskij atlas bassejna ozera Bajkal [Ecological atlas of the Lake Baikal basin] (2015) Publishing House of the Institute of Geography named after V.B. Sochav SB RAS, Irkutsk, Russia, 145 p.

Ekologo-geograficheskij atlas-monografiya «Selenga-Bajkal» [Ecological and geographical atlas-monograph “Selenga-Baikal”] (2019) In: N.S. Kasimova (ed.), Faculty of Geography of Moscow State University, Moscow, Russia, 288 p.

Yankus, G.A., Sakharov, L.V. (2018) Prirodnye pozhary v Severo-Vostochnom Pribajkal'e [Natural fires in the North-Eastern Baikal region], *Biosfernoe hozyajstvo: teoriya i praktika*, no. 3, pp. 28-47.

Brown, K.P., Gerber, A., Bedulina, D., Timofeyev, M.A. (2021) Human impact and ecosystemic health at Lake Baikal, *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, vol. 8, no. 4, p. e1528.

CRU (2022) *Climatic Research Unit: Data. High-resolution gridded datasets (and derived products)*, URL: <https://crudata.uea.ac.uk/cru/data/hrg/> (accessed 02 Feb 2024).

IPCC (2021) *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, 1300 p.

IPCC (2022) *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate*, Cambridge University Press, in Press.

Safronov, A.N. (2020) Effects of climatic warming and wildfires on recent vegetation changes in the Lake Baikal Basin, *Climate*, no. 8(4), p. 57, URL: <https://doi.org/10.3390/cli8040057>.

UNESCO (1997) *World Heritage Committee. Twentieth session, Merida, Mexico, 2-7 December 1996*, WHC-96/CONF.201/21, 10 March 1997, URL: <https://whc.unesco.org/archive/repcom96.htm> (accessed 02 Feb 2024).

Статья поступила в редакцию (Received): 07.01.2024.

Статья доработана после рецензирования (Revised): 01.03.2024.

Принята к публикации (Accepted): 16.04.2024.

Для цитирования / For citation:

Липка, О.Н., Богданович, А.Ю., Андреева, А.П., Караваева, А.С., Крыленко, С.В., Стерин, А.М., Коршунова, Н.Н. (2024) Наблюдаемые изменения климата в бассейнах Байкала и Ангары, *Фундаментальная и прикладная климатология*, т. 10, № 2, с. 244-271, doi: 10.21513/0207-2564-2024-2-244-271.

Lipka, O.N., Bogdanovich, A.Yu., Andreeva, A.P., Karavaeva, A.S., Krylenko, S.V., Sterin, A.M., Korshunova, N.N. (2024) Observed climate changes in the Baikal and Angara basins, *Fundamental and Applied Climatology*, vol. 10, no. 2, pp. 244-271, doi: 10.21513/0207-2564-2024-2-244-271.

Влияние снежного покрова на рост припая у побережья о. Большевик (Северная Земля)

О.Р. Сидорова, П.В. Богородский, В.А. Меркулов, Д.Д. Ризе*

Арктический и Антарктический научно-исследовательский институт,
Россия, 199397, Санкт-Петербург, ул. Беринга, 38

* Адрес для переписки: olsid@aari.ru

Реферат. Представлены результаты наблюдений льдообразования в проливе Шокальского (Северная Земля) в 2016-2023 гг., дополненные расчётами по термодинамической модели на основе классического варианта задачи Стефана с учётом изменения теплоизолирующих свойств снежного покрова и эмпирической формуле, использующей сумму градусо-дней мороза.

Судя по данным измерений на специальных ледовых полигонах 80х100 м, характер роста припая последние семь зим был примерно одинаков, несмотря на различную продолжительность льдообразования (234-275 сут.). Средние максимальные толщины льда изменялись от 132 (зима 16/17 гг.) до 174 см (зима 22/23 гг.) и, независимо от продолжительности ледостава, достигали их в конце мая с разницей 10-15 сут. Плотность снега на льду (до 450 кг/м³) существенно превосходила её средние величины для Северного Ледовитого океана в целом (292.5 кг/м³).

Результаты моделирования с использованием как данных измерений снежно-ледяного покрова в проливе Шокальского, так и их климатических величин показали, что в условиях типичной зимы рост потока тепла из моря на 1 Вт/м² приводит к уменьшению максимальной толщины льда на 4.6 см. Сходный эффект оказывает уменьшение плотности снега, составляющее 0.2-0.3 см льда на 1 кг/м³. Увеличение толщины припая может происходить как в результате конжеляционного, так и снежного льдообразования за счёт избыточного снегонакопления, более типичного для антарктических морей. Расчёты толщины льда по простой эмпирической формуле на основе суммы температур хорошо соответствуют данным измерений.

Ключевые слова. Северная Земля, припайный лёд, снежный покров, наблюдения, моделирование.

The impact of snow on fast ice formation in the area of the Bolshevik Island (Severnaya Zemlya Archipelago)

O.R. Sidorova, P.V. Bogorodskiy, V.A. Merkulov, D.D. Rize*

Arctic and Antarctic Research Institute,
38, Bering str., 199397, St. Petersburg, Russian Federation

*Correspondence address: olsid@aari.ru

Abstract. The results of observations of ice formation in the Shokalsky Strait (Severnaya Zemlya) during 2016-2023 are presented. The data are supplemented with calculations performed with a thermodynamic model based on the Stefan problem classic version with taking into account changes in the snow cover thermal insulating properties, and an empirical formula which uses the sum of degree days frost.

Judging by the measurement data at special ice sites of 80x100 m, the fast ice growth over the last seven winters was approximately the same, despite the different duration of ice formation (234-275 days). The average maximum values of ice thickness varied from 132 cm (Winter 2016/17) to 174 cm (Winter 2022/23) and, regardless of the duration of freeze-up, reached them at the end of May with a difference of 10-15 days. The density of snow on ice (up to 450 kg/m³) significantly exceeded its average values for the Arctic basin as a whole (292.5 kg/m³).

The results of modelling with using both measured snow and ice cover data and their average values for the Arctic Ocean showed that in a typical winter, an increase in heat flux from the sea by 1 W/m² leads to a decrease in the maximum ice thickness by 4.6 cm. A decrease in snow density amounting to 0.2-0.3 cm of ice per 1 kg/m³ has a similar effect. An increase in the thickness of fast ice can occur both as a result of congelation and snow ice formation due to a heavy snow accumulation, more typical of the Antarctic Seas. Calculations of ice thickness using a simple empirical formula based on the sum of temperatures correspond well to the measured data.

Keywords. Severnaya Zemlya, land fast ice, snow cover, observations, modeling.

Введение

Прибрежные акватории играют особую роль в ледовом режиме морей сибирского шельфа. В холодное время года в них образуется припай – примыкающий к суше неподвижный ледяной покров, распространяющийся на десятки и даже сотни километров от береговой линии (Визе, 1944; Zhai et al., 2021). Эволюция припая, важного элемента арктической климатической системы, являющегося одновременно продуктом и регулятором энерго- и массообмена моря и атмосферы в шельфовых зонах, во многом обуславливается свойствами снега, аккумулирующегося на его поверхности (Завьялов, Саломеха, 2019; Macfarlane et al., 2023; Warren et al., 1999). Кроме научной значимости, сведения о параметрах и, прежде всего, толщине неподвижного морского льда и её эволюции исключительно важны для решения ряда прикладных проблем, в т.ч. планирования перевозок по Северному морскому пути и добычи углеводородов, обеспечивающих развитие не только арктических регионов, но и страны в целом. Поэтому учёт влияния снега на термодинамическую эволюцию морского льда относится к одной из основных задач его математического моделирования.

Как известно, свойства снежного покрова определяются, прежде всего, его высотой и плотностью (Wagner et al., 2022; Chung et al., 2011; Batrak, Muller, 2019). Для свежего снега последняя обуславливается типом осадков и погодных условий во время снегопадов, между которыми она растёт как из-за ветрового уплотнения, так и внутреннего метаморфизма. Из-за влияния ветра и температурного градиента, снежный покров плавающих льдов обычно имеет меньшую высоту, водный эквивалент и большую плотность, чем снежный покров суши, а его теплоизолирующие свойства (термическое сопротивление), примерно в 2 раза ниже, чем у берегового (Sturm, Liston, 2003). Плаваемость льда мала, поэтому интенсивное снегонакопление может привести к затоплению ледяного покрова и нарастанию льда сверху за счёт снежного (инфильтрационного) льдообразования (Zhai et al., 2021).

Несмотря на интенсивные исследования последних лет, аккумуляция снега на морских и особенно припайных льдах, изучена недостаточно (Завьялов, Саломаша, 2019; Warren et al., 1999; Yang Y. et al., 2015; Zhai et al., 2021). Во многом это связано с сохраняющимся дефицитом натурных данных об эволюции снежно-ледяного покрова, из-за чего плотность снега зачастую задаётся постоянной даже в самых продвинутых термодинамических моделях (Bitz, Lipscomb, 1999). Цель настоящей работы – получение количественных и качественных оценок нарастания припайного льда в малоизученной прибрежной зоне пролива Шокальского на основе достаточно точных ледовых наблюдений 2016-2023 гг. на станции ААНИИ «Ледовая база «Мыс Баранова» (Северная Земля)». С использованием термодинамической модели описаны особенности роста припая в типичных климатических условиях архипелага. Результаты модельных расчётов для зимы 2021/22 гг. дополнены данными вычислений толщины льда по эмпирической формуле на основе суммы градусо-дней мороза (СГДМ). Проанализированы возможности возникновения изостатического льдообразования при опускании границы их раздела под воду.

Объект и методы исследований

Ледовая база «Мыс Баранова» (79°17' с.ш., 101°37' в.д.) расположена на восточном берегу о. Большевик и является одним из двух действующих гидрометеорологических стационаров на архипелаге. Пролив Шокальского, ширина которого в районе станции близка к 45 км, а глубина к 350 м, соединяет моря Карское и Лаптевых и, наряду с проливом Вилькицкого, играет важную роль в их водообмене (рис. 1а). Трёхслойная структура вод (верхний квазиоднородный слой, термоклин и придонный слой атлантических вод), подвержена существенной изменчивости, обусловленной системой течений как реверсивного, так и смешанного характера (Савельева и др., 2021). Район характеризуется суровыми климатическими условиями. При коротком лете и продолжительной зиме с частыми метелями (до 100) и сильными ветрами (до 40 м/с), среднегодовая температура воздуха близка к -14°C; средняя температура января от -28 до -30°C, июля от -0.5 до -1.6°C, а минимальные темпера-

туры зимой достигают -50°C (Речнов, 2021). Образующийся припайный лед в основном представляет смесь поверхностных вод Карского моря и вод материкового стока. Несмотря на сильные морозы, из-за тепла атлантических вод его толщина обычно не превышает полутора метров. Кроме того, рост льда может прерываться частыми разломами и подвижками с образованием разводий при стонных ветрах и торосов при нагонных (Бородкин и др., 2016). Благодаря интенсивному ветровому переносу снега и крутому береговому склону высотой 20-30 м, толщина снега у берега может достигать 1 м, оставаясь на удалении 150 м от него практически неизменной и не превышающей 30-40 см.



Рисунок 1. Район исследований (а) и расположение объектов натурных наблюдений (б)

Figure 1. The area of study (a) and location of field observation objects (b)

Измерения морфометрических характеристик снежно-ледяного покрова пролива (толщины, возвышенности, погруженности льда и высоты снега) осуществляются с 2016 г. Для них выбирается равномерно заснеженный участок ровного молодого льда – ледовый полигон (рис. 1б) на расстоянии примерно 400 м от берега, ледовая обстановка в районе которого фиксируется визуальными наблюдениями. Полигон организуется в виде прямоугольной сетки размером 80х100 м с шагом 20 м. Первый выход на лёд производится, как правило, через 2 месяца после появления начальных форм льда, после чего наблюдения на полигоне выполняются каждые 10-15 дней (табл. 1). К сожалению, в силу нестабильности ледяного покрова период наиболее интенсивного энергообмена моря и атмосферы около двух месяцев и, следовательно, роста припая не освещается данными измерений. Толщина льда в скважинах, пробуриваемых в 30 узлах сетки мотобуром, измеряется с помощью ледомерной рулетки, высота снега – снегомерной рейкой с погрешностью в 0.5-1 см. Здесь же весовым снегомером ВС-43 эпизодически определяется плотность снега. Автоматическая метеостанция MAWS-420 (Vaisala, Финляндия), расположенная примерно в 300 м от уреза воды (рис. 1б), обеспечивает ледовые наблюдения непрерывной информацией о характеристиках пограничного слоя атмосферы. Термохалинная структура вод в период ледостава ежедневно измеряется зондом CTD-Sea Bird SBE 19 plus

(США) в режиме профилирования с частотой 4 Гц в океанологическом павильоне на расстоянии около 1.5 км от ледового полигона (рис.1б).

Таблица 1. Сведения о полигонных съёмках 2016-2023 гг.

Table 1. Observations at the test site 2016-2023

Сезон	Кол-во	Период
2016/17	27	01.12.- 09.08.
2017/18	29	16.10.- 18.07.
2018/19	22	30.11.- 13.07.
2019/20	18	05.11.- 23.04.
2020/21	15	18.12.- 21.06.
2021/22	19	28.11.- 09.06.
2022/23	18	15.12.- 01.06.

Помимо данных прямых измерений, для количественных оценок характеристик процесса использовалась локально-одномерная термодинамическая модель, реализующая вариант фронтальной схемы Стефана (Mcguinnes, 2009). Для наиболее ясного выявления влияния снегонакопления была выбрана простая конфигурация модели с постоянным потоком тепла внутри снежно-ледяного покрова, означающим линейное изменение температуры с глубиной. Энергообмен с атмосферой учитывает только конвективный поток тепла от поверхности снежно-ледяного покрова. В такой постановке модель замерзания сводится к единственному уравнению

$$\rho_i L \frac{dh_i}{dt} = Q_{as} - Q_{iw}, \quad (1)$$

где Q – поток тепла, Вт/м²; ρ – плотность, кг/м³; h – толщина, м; k – коэффициент теплопроводности, Вт/(м°C); L – скрытая теплота льдообразования, Дж/кг; t – время, с; однобуквенные индексы a, i, s, w относятся к воздуху, снегу, льду и воде, соответственно, двухбуквенные – границам их разделов.

При линейном профиле температуры, $Q_{as} = \frac{T_{iw} - T_a}{1/\alpha + h_s/k_s + h_i/k_i}$,

где T – температура, °C; $T_{iw} = mS_w$, m – константа, °C/‰; S_w – солёность морской воды, ‰; α – коэффициент теплоотдачи от поверхности снега к воздуху, Вт/(м²°C).

Для полноты картины льдообразования динамика толщины припая вычислялась также по формуле (Визе, 1944)

$$h_i = a\theta^b, \quad (2)$$

где a и b – эмпирические коэффициенты, учитывающие совокупное влияние высоты и плотности снежного покрова, солёности и температуры морской воды, скорости подлёдного течения, физических свойств льда, глубины моря,

облачности, ветра и др. гидрометеорологических факторов, помимо температуры воздуха, оказывающих влияние на рост льда в конкретных гео-

графических пунктах; $\theta \equiv \int_0^{t^*} (T_{iw} - T_a) dt$ – СГДМ, t^* – продолжительность холодного ($T_a < T_w$) периода, сут.

Результаты наблюдений

Зимы 2016-2023 гг. характеризовались примерно одинаковой продолжительностью, близкой к 250 сут., но при этом существенным разбросом величин СГДМ с выраженным положительным трендом. Средняя толщина снега превышала 25 см, льда – примерно 1.5 м, тенденция к её уменьшению отсутствовала (табл. 2). Наибольшие средние толщины снега в этот период колебались в пределах 21 см, льда – 42 см при отношении толщин снега и льда в основной период ледостава примерно 0.1 (рис. 2б). Толщина льда достигала своего максимума в конце мая с разницей 10-15 сут., независимо от продолжительности зимы и не всегда соответствовала её суровости, по показателю СГДМ (рис. 2а). Максимальная плотность снега составила 450 кг/м^3 (декабрь 2019 г.), минимальная 290 кг/м^3 (январь 2017 г.), что существенно превосходило её среднюю величину 292.5 кг/м^3 для Северного Ледовитого океана в целом (Warren et al., 1999) (рис. 2б).

Таблица 2. Основные параметры льдообразования в период 2016-2023 гг.

Table 2. Main parameters of ice formation in the period 2016-2023

Даты, дд.мм.гг.	Продолжительность, дни	СГДМ	Наибольшая средняя толщина, см	
			Лёд	Снег
14.10.16 – 11.06.17	241	-3623	132	29
03.09.17 – 04.06.18	275	-4827	159	31
10.10.18 – 31.05.19	234	-4202	148	36
30.09.19 – 01.06.20	246	-4063	160	15
02.10.20 – 29.05.21	240	-3997	166	16
30.09.21 – 07.06.22	251	-4375	145	24
15.09.22 – 24.05.23	252	-4910	174	25

Несмотря на равномерное нарастание и отсутствие подвижек в период ледостава, перепад высот снега и толщин так называемого ровного льда в пределах выбранной площадки доходил до десятков см, причём значения СКО для снега обычно превосходили их значения для льда. Зимой 2021/22 гг. их значения были примерно одинаковы, 3-10% и близки к 5% от средней толщины льда и 20-30% для снега, соответственно, изменяясь в абсолютных значениях на величину 4-8 см (табл. 3). Учитывая типичность атмосферных условий этой зимы, такие величины, по-видимому, можно считать достаточно репрезентативными для притая в районе исследований. Сравнение эволюции

высоты и плотности снежного покрова на льду (рис. 3а) и на берегу (рис. 3б), вычисленной по количеству твёрдых осадков $\rho_s = \rho_w h_w / h_s$, показывает высоту наземного снега примерно в полтора раза большую, чем морского, и его в половину меньшую плотность по сравнению с береговым. При таком же уменьшении коэффициента теплопроводности ($k_s \sim 0.001 \rho_s$) это даёт превышение термического сопротивления (равного h_s/k_s) первого над вторым в три-четыре раза, показывая некорректность использования характеристик снежного покрова суши для расчёта морского льдообразования, даже при небольших, в сотни метров, расстояниях между пунктами измерений, разделённых береговой чертой.

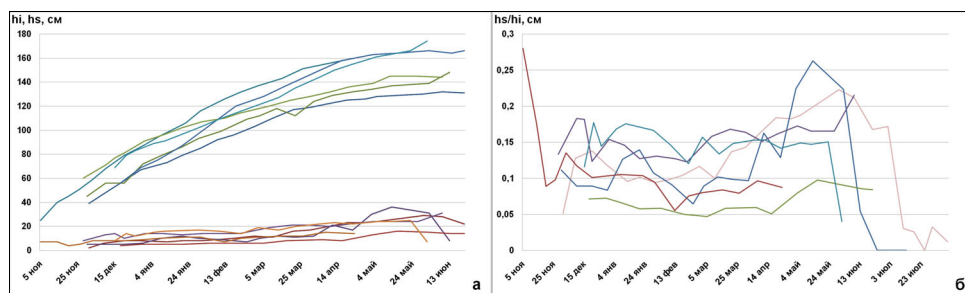


Рисунок 2. Временной ход средних высот снега (h_s , внизу) и толщин льда (h_i ,верху) (а) и их отношений (б) по данным полигонных съёмок 2016/17 – 2022/23 гг.

Figure 2. Temporal evolution of average snow heights (h_s , below) and ice thicknesses (h_i above) (а) and their ratios (b) according to survey data from 2016/17 – 2022/23

Таблица 3. Минимальные (индекс min), максимальные (индекс max) и средние (индекс mid) толщины снега и льда и их СКО (см) зимой 2021/22 гг., по данным полигонных измерений

Table 3. Minimum (index min), maximal (index min) and average (index min) thickness of snow and ice cover and their standard deviation (cm) based on field measurements during Winter 2021/22

Дата съёмки	Параметр							
	h_i^{min}	h_s^{min}	h_i^{mid}	h_s^{mid}	h_i^{max}	h_s^{max}	$CKO[h_i]$	$CKO[h_s]$
28.11.21	52	2	60	8	68	13	5	5
10.12.21	66	8	71	13	76	22	3	3
15.12.21	69	7	77	14	85	31	4	6
20.12.21	73	3	81	10	90	28	5	6
31.12.21	83	7	91	14	101	31	4	6
10.01.22	83	7	96	14	109	28	5	6
20.01.22	90	8	102	13	109	31	5	5
31.01.22	93	8	107	14	116	30	5	6
12.02.22	99	8	110	14	119	30	5	5
20.02.22	101	5	114	14	122	30	5	6
08.03.22	109	11	120	19	129	39	6	5
20.03.22	113	10	125	21	131	39	6	7
30.03.22	116	10	128	21	134	40	6	8
10.04.22	119	9	132	20	141	38	6	8
20.04.22	122	10	136	24	143	22	6	8

Продолжение таблицы 3

Дата съёмки	Параметр							
	h_i^{min}	h_s^{min}	h_i^{mid}	h_s^{mid}	h_i^{max}	h_s^{max}	$CKO[h_i]$	$CKO[h_s]$
03.05.22	126	7	139	24	147	28	6	8
12.05.22	129	11	145	24	154	46	2	7
27.05.22	128	10	145	24	155	46	7	10
09.06.22	128	22	144	31	156	57	8	9

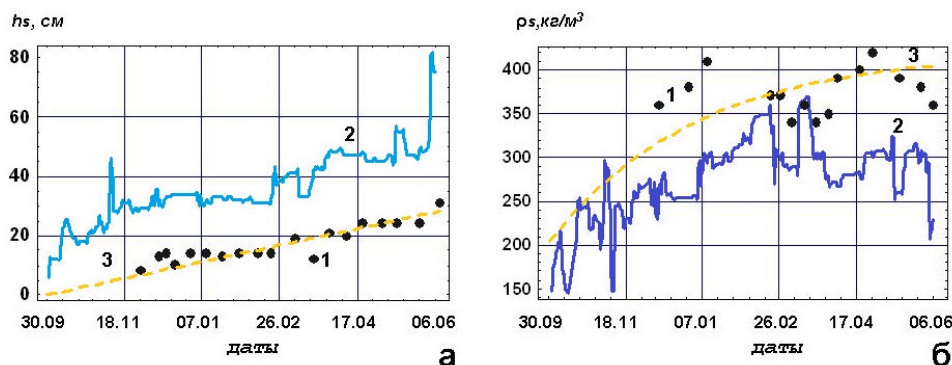


Рисунок 3. Временной ход высоты (а) и плотности (б) снега на льду (1) и на суше (2), по данным измерений и их аппроксимации для льда (3)

Figure 3. Temporal evolution of snow height (a) and density (b) on ice (1) and on land (2) according to measurement data and their approximation for ice (3)

В отсутствие специальных пульсационных измерений в подлёдном слое существование потока тепла к нижней поверхности льда косвенно подтверждается изменениями термохалинной структуры вод. Судя по конфигурации изотерм, зимой 2021/22 гг. (рис. 4а) наблюдался трёхразовый заток в пролив атлантических вод с температурой, превышающей температуру замерзания примерно на 1°C и продолжительностью порядка 20-30 сут. каждый. Температура воды в подлёдном слое в этот период характеризовалась небольшим (около 0.04°C) понижением и существенным (около 1‰) повышением солёности. На этом фоне развивались короткопериодные вариации порядка 0.02°C и 0.1‰ с временными масштабами около суток (рис. 4б). Причиной таких колебаний, по-видимому, явились постоянные подвижки льда, обусловленные сильными ветрами западного и северо-западного направлений, способствующие льдообразованию на открытой воде и осолонению подлёдного слоя. Это привело к ослаблению вертикальной плотностной стратификации и созданию благоприятных предпосылок проникновения конвекции в слой атлантических вод (Аксенов, Иванов, 2018; Lin, Zhao, 2019). Ближе к берегу возможным механизмом теплопереноса также может служить интенсификация внутренних волн, генерированных баротропным приливом, максимальные амплитуды которых в районе архипелага приходятся на склон с перепадом глубин от 15 до 30 м (Морозов и др., 2012).

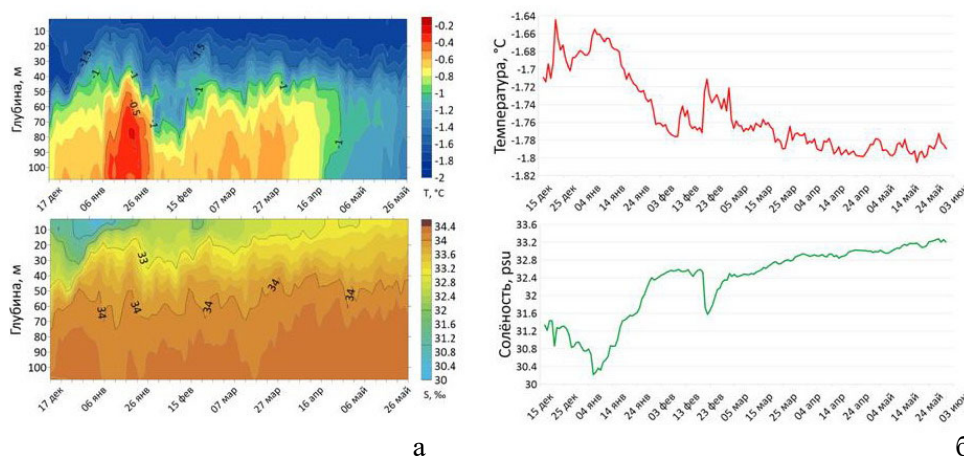


Рисунок 4. Изменчивость температуры и солёности вод пролива Шокальского зимой 2021/22 гг. в верхнем 100 м слое (а) и на глубине 5 м (б)

Figure 4. Variability of water temperature and salinity in the Shokalsky Strait during winter 2021/22 in the upper 100 m layer (a) and at 5 m depth (b)

Расчёты

Внешний форсинг модели (1) задавался среднесуточными данными температуры воздуха и скорости ветра на стационаре зимой 2021/22 гг. Разницей их величин на суше и на льду, в отличие от снегонакопления, пренебрегалось. Последнее задавалось двумя вариантами: реалистичным, использующим данные наблюдений, и упрощённым, использующим климатические данные. В первом варианте рост снежного покрова аппроксимировался формулами, выбранными с учётом океанографической специфики задачи на основе измерений $h_s = 1.29 \times 10^{-8} t$, м; $\rho_s = \rho_{s0} + (\rho_s^{max} - \rho_{s0})[1 - \exp(-k h_s)]$ (Sturm et al., 2010), где $\rho_{s0} = 500 [1 - 0.951 \exp(-1.4(5.0 - T_a)^{-1.15} - 0.008 U^{1.7})]$ (Jordan et al., 1999) – начальная и ρ_s^{max} – максимальная плотность снега, кг/м³; k – коэффициент формы, определявшийся, по данным измерений, методом наименьших квадратов; U – скорость ветра, м/с. Для метеоусловий 30 сентября 2021 г. $\rho_{s0} = 202$ кг/м³, $\rho_s^{max} = 420$ кг/м³, $k = -1.22 \times 10^{-7}$ (рис. 5б).

Во втором варианте вместо данных измерений использовались данные для акватории СЛО в целом. Плотность снега линейно изменялась от 250 кг/м³ в сентябре до 320 кг/м³ в мае (Warren et al., 1999), а высота задавалась ступенчатой зависимостью $h_s = n h_i$, где коэффициент n равен 0 при $h_i < 5$ см, 0.05 при $5 \text{ см} < h_i < 20$ см и 0.1 при $20 \text{ см} < h_i$ (Доронин, 1969). Расчёт коэффициентов k_s и α осуществлялся по формулам $k_s = 0.024 - 1.23 \cdot 10^{-4} \rho_s + 25 \cdot 10^{-6} \rho_s^2$ (Calonne et al., 2011) и $\alpha = 23.2 \sqrt{U} + 0.3$ (Винников, Викторова, 2009), соответственно. Остальные параметры модели брались одинаковыми и равными $m = -0.054$, °C/‰; $\rho_i = 910$ кг/м³; $k_i = 2.07$ Вт/(м°C); $L = 3.33 \times 10^5$ Дж/кг; $S_w = 33$ ‰ (Доронин, 1969) для обоих вариантов расчётов. Необходимое значение Q_{iw}

также задавалось постоянным и, принимая во внимание данные гидрологических измерений, равным его средней для Северного Ледовитого океана (СЛО) величине в 2 Вт/м^2 (Jordan et al., 1999).

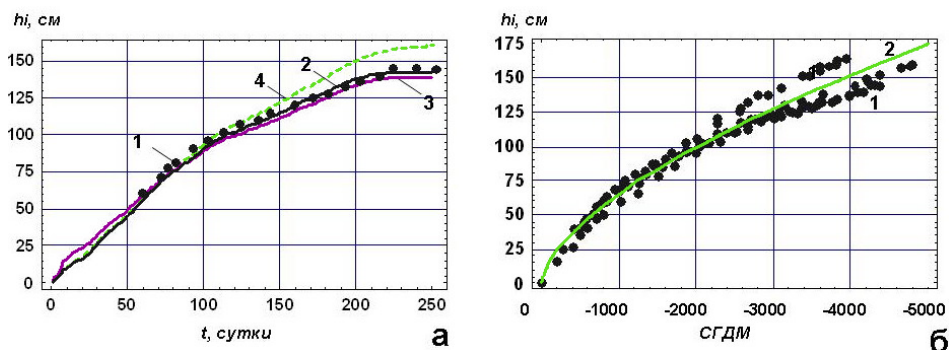


Рисунок 5. Временной ход толщины льда (а), по данным измерений (1), моделирования для реалистичного (2) и климатического (3) варианта снегонакопления и расчётов по СГДМ (4) с 30 сентября по 7 июня (а) и толщины по СГДМ за последние 6 лет (б)

Figure 5. Temporal evolution of ice thickness and snow height (а) according to measurements (1), modeling for realistic (2) and climatic (3) variants of snow accumulation options and calculations according to DDF (4) from September 30 to June 7 (а) and thickness according to DDF for the last 6 years (б)

Судя по вычислениям, что модель (1) достаточно точно воспроизвела рост припая в период t^* (рис. 6а), ещё раз показав, что основным фактором роста льда является температура воздуха. При этом результаты расчётов для обоих вариантов снегонакопления оказались практически одинаковыми. Незначительные расхождения с данными наблюдений в конце зимы могут объясняться, помимо упрощений в постановке задачи, началом радиационного прогрева, естественной неоднородностью снежно-ледяного покрова (табл. 3), а также вариациями потока тепла из моря, из-за которых лучшая согласованность результатов наблюдений и моделирования маловероятна.

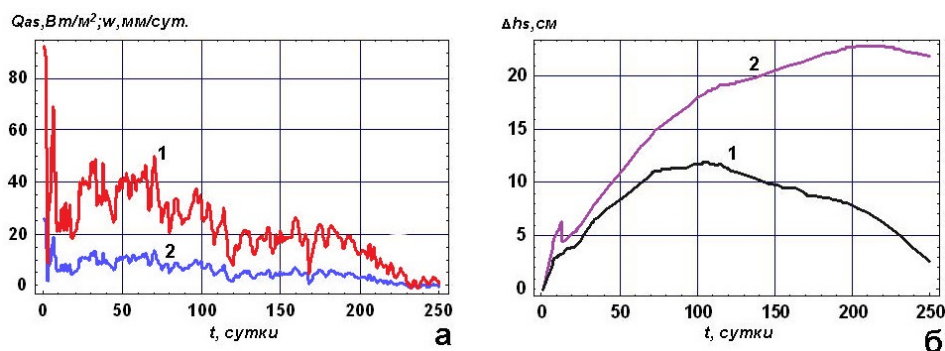


Рисунок 6. Временной ход потока тепла (1) и скорости нарастания льда (2) (а) и его критической высоты (б) для реалистичного (1) и климатического (2) варианта снегонакопления, по данным моделирования, с 30 сентября по 7 июня

Figure 6. Temporal evolution of heat flow (1) and the rate of ice growth (2) (а) and its critical height (б) for the realistic (2) and climatic (3) variants version of snow accumulation according to modeling data from September 30 to June 7

Несколько неожиданными стали результаты вычислений толщины льда по эмпирической формуле (2), в которой из-за неизвестности коэффициентов для пролива Шокальского использовались значения $a=0.957$ и $b=0.611$, выведенные для пролива Вилькицкого почти 100 лет назад полученными, по данным всего нескольких лет наблюдений (Визе, 1944). Тем не менее зависимость (2) с этими коэффициентами, несмотря на расстояние около 200 км между мысами Баранова и Челюскина, уверенно описала рост льда в исследуемой акватории (рис. 6б), практически повторив ход данных измерений и моделирования в течение первых пяти месяцев льдообразования, превысив их на 10-15 см лишь в конце следующих трёх (рис. 6а). Это завышение, впрочем, не вышло за рамки погрешности расчётов в 10-20%, заложенной в (2), а также естественной неравномерности ледяного покрова (табл. 2) и погрешностей расчётов, возникающих из-за обычного для большинства полярных станций отсутствия сведений о снежном покрове.

Результаты расчётов для метеоусловий зимы 2021/22 гг. позволяют оценить типичные количественные характеристики процесса льдообразования в исследуемом участке акватории. Так, уменьшение плотности снега ρ_{smax} от 420 до 300 кг/м³ при потоке $Q_w=2$ Вт/м² привело к снижению толщины льда со 143 до 115 см, т.е. примерно на 0.23 см/(кг/м³). Увеличение потока Q_w от 0 до 10 Вт/м² при $\rho_s^{max}=420$ кг/м³ вызвало уменьшение максимальной толщины льда со 153 до 105 см, или около 4 см/Вт. При существенной временной изменчивости и сходном характере изменения потока Q_{as} и скорости нарастания льда w их средние величины близки к 25 Вт/м² и 6 мм/сут. и закономерно уменьшаются по мере нарастания льда и в масштабах рисунка практически неразличимы для обоих вариантов снегонакопления. Учитывая типичность атмосферных условий в рассматриваемую зиму, эти величины можно считать в целом репрезентативными для припая в проливе Шокальского.

Говоря о влиянии снега на рост льда, необходимо затронуть вопрос о снежном льдообразовании (Zhai et al., 2021). Возможность нарастания льда сверху для обоих вариантов снегонакопления оценивалась путём расчёта временного хода разности $\Delta h_s = h_s^* - h_s$, где $h_s^* = (\rho_w - \rho_i)h_i / \rho_s$ – высота снега, при которой верхняя граница ледяного покрова опускается до уровня воды; обычно она близка к 30-40% толщины льда. Здесь, из-за высокой плотности снега, она была в полтора-два раза ниже. По этой же причине, в отличие от величин Q_{as} и w , перепад Δh_s для двух вариантов снегонакопления существенно различался (рис. 6б). При своих сравнительно небольших значениях, не превышающих 12 и 23 см соответственно, величины Δh_s оставались положительны в течение всего зимнего периода, что, с одной стороны, свидетельствует о конжеляционном характере льдообразования. С другой стороны, следует иметь в виду, что рост высоты снега повлечёт за собой уменьшение толщины льда. Таким образом, наблюдавшийся в сезоне 2021/22 гг. на полигоне разброс высот снега (см. табл. 3) и соответствующих ему вариаций толщины льда вполне способен привести к затоплению льда как за счёт метелевого переноса и накопления снега вблизи препятствий, так и его локальной аккумуляции на открытых участках ледяного покрова вследствие снегопадов.

Заключение

Сравнение данных наблюдений роста припая у побережья Северной Земли и результатов его моделирования как при реалистичном, так и климатическом задании изменчивости снежного покрова показало хорошее соответствие. Своей средней максимальной толщины 150 ± 20 см лёд в последние зимы достигал в конце мая с разницей 10-15 сут. Плотность его снежного покрова (до 450 кг/м^3) существенно превосходила средние величины для СЛО в целом (292.5 кг/м^3).

По данным выполненных расчётов, средний поток тепла к нижней поверхности льда зимой составлял 2 Вт/м^2 . Его рост на каждый Вт/м^2 приводил к уменьшению максимальной толщины льда на 4 см. Сходный эффект оказывало уменьшение плотности снега, увеличению которой на 1 кг/м^3 соответствовал прирост толщины льда на 0.2-0.3 см.

Рост толщины припая может происходить как в результате конжеляционного, так и снежного льдообразования, нарушающего закономерность уменьшения толщины льда с ростом высоты снега и более типичного для антарктических морей. Очевидно, что эти процессы оказывают существенное влияние на тепловой и массовый баланс припая в зимний период, которое должно учитываться при математическом моделировании морского льда.

Эмпирические формулы на основе СГДМ также вполне пригодны для оценки темпов нарастания льда в современных погодных условиях, по крайней мере, для прибрежных акваторий Северной Земли.

Благодарности

Авторы выражают искреннюю признательность д.ф.-м.н А.П. Макштасу за просмотр рукописи и сделанные в его ходе ценные замечания.

Работы выполнены в рамках Федеральной научно-технической программы в области экологического развития Российской Федерации и климатических изменений на 2021-2030 годы.

Список литературы

Аксенов, П.В., Иванов, В.В. (2018) «Атлантификация» как вероятная причина сокращения площади морского льда в бассейне Нансена в зимний сезон, *Проблемы Арктики и Антарктики*, т. 64, № 1 (115), с. 42-54.

Бородкин, В.А., Макштас, А.П., Богородский, П.В. (2016) Припайный лёд пролива Шокальского, *Лёд и снег*, вып. 56, № 4, с. 525-532, URL: doi:10.15356/2076-6734-2016-4-525-532.

Визе, В.Ю. (1944) Основы долгосрочных ледовых прогнозов для арктических морей, *Труды Арктического НИИ*, т. 159, М., Изд-во Главсевморпути, 274 с.

Винников, С.Д., Викторова, Н.В. (2009) *Физика вод суши*, Учебник, СПб., РГТУ, 430 с.

Доронин, Ю.П. (1969) *Тепловое взаимодействие атмосферы и гидросферы в Арктике*, Л., Гидрометеиздат, 300 с.

Завьялов, Д.Д., Саломаха, Т.А. (2019). Влияние свежеснежавшего снега на нарастание и таяние морского льда, *Лёд и снег*, т. 59. № 1, с. 103-111.

Морозов, Е.Г., Демидова, Т.А., Нечволодов, Л.В. (2012) Внутренние волны и уменьшение толщины ледяного покрова над крутыми подводными склонами, *Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева*, № 1(94), с. 54-59.

Речнов, А.А. (2021) *Гидрометеорологический режим острова Большевик во второй декаде XXI века по стандартным метеорологическим и актинометрическим наблюдениям. Исследование природной среды высокоширотной Арктики на НИС «Ледовая база Мыс Баранова»*. Под общей редакцией А.П. Макштаса и В.Т. Соколова, СПб., ААНИИ. с. 10-19.

Савельева, Н.И., Добротина, Е.Д., Кузьмин, С.Б., Ипатов, А.Ю., Гончарова, А.Б., Недашковский, А.П. (2021) Изменчивость гидрохимических характеристик поверхностных вод пролива Шокальского, по результатам наблюдений на научно-исследовательском стационаре «Ледовая база Мыс Баранова» в 2018-2019 гг., *Проблемы Арктики и Антарктики*, вып. 67, № 1, с. 10-27, URL: <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2021-67-1-10-27>.

Batrak, Y., Müller, M. (2019) On the warm bias in atmospheric reanalyses induced by the missing snow over Arctic sea-ice, *Nat. Commun.*, vol. 10, pp. 1-8, URL: <https://doi.org/10.1038/s41467-019-11975-3>.

Bitz, C.M., Lipscomb, W.H. (1999) An energy-conserving thermodynamic model of sea ice, *J. Geophys. Res.*, vol. 104, no. C7, pp. 15669-15677.

Calonne, N., Flin, F., Morin, S., Lesaffre, B., du Roscoat, S.R., Geindreau, C. (2011) Numerical and experimental investigations of the effective thermal conductivity of snow, *Geophys. Research Letters*, vol. 38, L23501.

Chung, Y.C., Bélair, S., Mailhot, J. (2011) Blowing Snow on Arctic Sea Ice: Results from an Improved Sea Ice-Snow-Blowing Snow Coupled System, *J. Hydrometeorol.*, vol. 12, pp. 678-689, URL: <https://doi.org/10.1175/2011JHM1293.1>.

Yang, Y., Leppäranta, M., Li, Z.J., Cheng, B., Zhai, M., Demchev, D. (2015) Model simulations of the annual cycle of the landfast ice thickness in the East Siberian Sea Adv, *Polar Sci.*, vol. 26, no. 2, pp. 168-178, doi: 10.13679/j.advp. 2015.2.00168.

Jordan, R.E., Andreas, E.L., Makshtas, A.P. (1999) Heat budget of snow-covered sea ice at North Pole 4, *J. Geophys. Res.*, vol. 104, no. C4, pp 7785-7806.

Lin, L., Zhao, J. 2019. Estimation of oceanic heat flux under sea ice in the Arctic Ocean, *J. Ocean Univ. (Oceanic and Coastal Sea Research)*, vol. 18 (3), pp. 605-614, URL: 10.1007/s11802-019-3877-7 ISSN 1672-5182.

Macfarlane, A.R., Löwe, H., Gimenes, L., Wagner, D.N., Dadic, R., Ottersberg, R., Hämmerle, S., Schneebeli, M. (2023) *Thermal conductivity of snow on Arctic sea ice*, EGU sphere [preprint], URL: <https://doi.org/10.5194/egusphere-2023-83>.

Mcguinnes, M.J. (2009) Modelling sea ice growth, *The ANZIAM Journal*, vol. 50, pp. 306-319, doi: 10.1017/S1446181109000029.

Sturm, M., Liston, G.E. (2003) The snow cover on lakes of the Arctic Coastal Plain of Alaska, U.S.A, *Journal of Glaciology*, vol. 49, no. 166, pp. 370-380.

Sturm, M., Taras, B., Liston, G.E., Derksen, C., Jonas, T., Lea, J. (2010) Estimating snow water equivalent using snow depth data and climate classes, *Journ. Hydrometeorology*, vol. 11(6), pp. 1380-1394, URL: <https://doi.org/10.1175/2010jhm1202.1>.

Wagner, D.N., Shupe, M.D., Cox, C., Persson, O.G., Uttal, T., Frey, M.M., Kirchgaessner, A., Schneebeli, M., Jaggi, M., Macfarlane, A.R., Itkin, P., Arndt, S., Hendricks, S., Krampe, D., Nicolaus, M., Ricker, R., Regnery, J., Kolabutin, N., Shimanshuck, E., Oggier, M., Raphael, I., Stroeve, J., Lehning, M. (2022) Snowfall and snow accumulation during the MOSAiC winter and spring seasons, *The Cryosphere*, vol. 16, pp. 2373-2402, URL: <https://doi.org/10.5194/tc-16-2373-2022>.

Warren, S.G., Rigor, I.G., Untersteiner, N. et al. (1999) Snow depth on Arctic sea ice, *J. Clim.*, vol. 12, no. 6, pp.1814-1829.

Zhai, M.X, Leppäranta, M., Cheng, B., Lei, R., Zhan, F. (2021) Physics of Arctic landfast sea ice and implications on the cryosphere: an overview, *Adv. Polar Sci.*, vol. 32(4), pp. 281-294.

References

Aksenov, P.V., Ivanov, V.V. (2018) «Atlantifikaciya» kak veroyatnaya prichina sokrashcheniya ploshchadi morskogo l'da v bassejne Nansena v zimnij sezon [“Atlanticification” as a likely cause of sea ice decline in the Nansen Basin during the winter season], *Problemy Arktiki i Antarktiki*, vol. 64, no. 1 (115), pp. 42-54.

Borodkin, V.A., Makshtas, A.P., Bogorodskij, P.V. (2016) Pripajnyj lyod proliva Shokal'skogo [Fast ice of the Shokalsky Strait], *Lyod i sneg*, vol. 56, № 4, pp. 525-532, URL: doi:10.15356/2076-6734-2016-4-525-532.

Vize, V.Yu. (1944) Osnovy dolgosrochnyh ledovyh prognozov dlya arkticheskikh morej [Fundamentals of long-term ice forecasts for the Arctic seas], *Trudy Arkticheskogo NII*, vol. 159, Izd-vo Glavsevmorputi, Moscow, Russia, 274 p.

Vinnikov, S.D., Viktorova, N.V. (2009) *Fizika vod sushi* [Physics of land waters] Textbook, RGGMU, Sankt Peterburg, Russia, 430 p.

Doronin, Yu.P. (1969) *Teplovoe vzaimodejstvie atmosfery i gidrosfery v Arktike* [Thermal interaction of the atmosphere and hydrosphere in the Arctic], Gidrometeoizdat, Leningrad, Russia, 300 p.

Zav'yalov, D.D., Salomaha, T.A. (2019) Vliyanie svezhevypavshogo snega na narastanie i tayanie morskogo l'da [The influence of fresh snow on the growth and melting of sea ice], *Lyod i Sneg*, vol. 59, no. 1, pp. 103-111.

Morozov, E.G., Demidova, T.A., Nechvolodov, L.V. (2012) Vnutrennie volny i umen'shenie tolshchiny ledyanogo pokrova nad krutymi podvodnymi sklonami [Internal waves and ice thickness reduction over steep submarine slopes], *Trudy NGTU im. R.E. Alekseeva*, vol. 1(94), pp. 54-59.

Rechnov, A.A. (2021) Gidrometeorologicheskij rezhim ostrova Bol'shevik vo vtoroj dekadke XXI veka po standartnym meteorologicheskim i aktinometricheskim nablyudeniya [Hydrometeorological conditions of Bolshevik Island in the second decade of the XXIst century according to standard meteorological and actinometric observations], *Issledovanie prirodnoj sredy vysokoshirotnoj Arktiki na NIS «Ledovaya baza Mys Baranova»*, in A.P. Makshtas and V.T. Sokolov (eds.), ААНИИ, Sankt Peterburg, Russia, pp. 10-19.

Savel'eva, N.I., Dobrotina, E.D., Kuz'min, S.B., Ipatov, A.Yu., Goncharova, A.B., Nedashkovsky, A.P. (2021) Izmenchivost' gidrohimicheskikh harakteristik poverhnostnykh vod proliva Shokal'skogo po rezul'tatam nablyudenij na nauchno-issledovatel'skom stacionare «Ledovaya baza Mys Baranova» v 2018-2019 gg. [Variability of the hydrochemical characteristics of the surface waters of the Shokalsky Strait based on the results of observations at the research station “Ice Base Cape Baranova” in 2018-2019], *Problemy Arktiki i Antarktiki*, vol. 67, no. 1, pp. 10-27, URL: <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2021-67-1-10-27>.

Batrak, Y., Müller, M. (2019) On the warm bias in atmospheric reanalyses induced by the missing snow over Arctic sea-ice, *Nat. Commun.*, vol. 10, pp. 1-8, URL: <https://doi.org/10.1038/s41467-019-11975-3>.

Bitz, C.M., Lipscomb, W.H. (1999) An energy-conserving thermodynamic model of sea ice, *J. Geophys. Res.*, vol. 104, no. C7, pp. 15669-15677.

Calonne, N., Flin, F., Morin, S., Lesaffre, B., du Roscoat, S.R., Geindreau, C. (2011) Numerical and experimental investigations of the effective thermal conductivity of snow, *Geophys. Research Letters*, vol. 38, L23501.

Chung, Y.C., Bélair, S., Mailhot, J. (2011) Blowing Snow on Arctic Sea Ice: Results from an Improved Sea Ice-Snow-Blowing Snow Coupled System, *J. Hydrometeorol.*, vol. 12, pp. 678-689, URL: <https://doi.org/10.1175/2011JHM1293.1>.

Yang, Y., Leppäranta, M., Li, Z.J., Cheng, B., Zhai, M., Demchev, D. (2015) Model simulations of the annual cycle of the landfast ice thickness in the East Siberian Sea Adv, *Polar Sci.*, vol. 26, no. 2, pp. 168-178, doi: 10.13679/j.advps.2015.2.00168.

Jordan, R.E., Andreas, E.L., Makshtas, A.P. (1999) Heat budget of snow-covered sea ice at North Pole 4, *J. Geophys. Res.*, vol. 104, no. C4, pp 7785-7806.

Lin, L., Zhao, J. (2019) Estimation of oceanic heat flux under sea ice in the Arctic Ocean, *J. Ocean Univ. (Oceanic and Coastal Sea Research)*, vol. 18 (3), pp. 605-614, URL: 10.1007/s11802-019-3877-7 ISSN 1672-5182.

Macfarlane, A.R., Löwe, H., Gimenes, L., Wagner, D.N., Dadic, R., Ottersberg, R., Hämmerle, S., Schneebeli, M. (2023) *Thermal conductivity of snow on Arctic sea ice*, EGU sphere [preprint], URL: <https://doi.org/10.5194/egusphere-2023-83>.

McGuinness, M.J. (2009) Modelling sea ice growth, *The ANZIAM Journal*, vol. 50, pp. 306-319, doi:10.1017/S1446181109000029.

Sturm, M., Liston, G.E. (2003) The snow cover on lakes of the Arctic Coastal Plain of Alaska, U.S.A, *Journal of Glaciology*, vol. 49, no. 166, pp. 370-380.

Sturm, M., Taras, B., Liston, G.E., Derksen, C., Jonas, T., Lea, J. (2010) Estimating snow water equivalent using snow depth data and climate classes, *Journ. Hydrometeorology*, vol. 11(6), pp. 1380-1394, URL: <https://doi.org/10.1175/2010jhm1202.1>.

Wagner, D.N., Shupe, M.D., Cox, C., Persson, O.G., Uttal, T., Frey, M.M., Kirchgaessner, A., Schneebeli, M., Jaggi, M., Macfarlane, A.R., Itkin, P., Arndt, S., Hendricks, S., Krampe, D., Nicolaus, M., Ricker, R., Regnery, J., Kolabutin, N., Shimanshuck, E., Oggier, M., Raphael, I., Stroeve, J., Lehning, M. (2022) Snowfall and snow accumulation during the MOSAiC winter and spring seasons, *The Cryosphere*, vol. 16, pp. 2373-2402, URL: <https://doi.org/10.5194/tc-16-2373-2022>.

Warren, S.G., Rigor, I.G., Untersteiner, N. et al. (1999) Snow depth on Arctic sea ice, *J. Clim.*, vol. 12, no. 6, pp. 1814-1829.

Zhai, M.X., Leppäranta, M., Cheng, B., Lei, R., Zhan, F. (2021) Physics of Arctic landfast sea ice and implications on the cryosphere: an overview, *Adv. Polar Sci.*, vol. 32(4), pp. 281-294.

Статья поступила в редакцию (Received): 01.03.2024.

Статья доработана после рецензирования (Revised): 03.04.2024.

Принята к публикации (Accepted): 16.04.2024.

Для цитирования / Forcitation

Сидорова, О.Р., Богородский, П.В., Меркулов, В.А., Ризе Д.Д. (2024) Влияние снежного покрова на рост припая у побережья о. Большевик (Северная Земля), *Фундаментальная и прикладная климатология*, т. 10, № 2, с. 272-287, doi: 10.21513/0207-2564-2024-2-272-287.

Sidorova, O.R., Bogorodskiy, P.V., Merkulov, V.A., Rize D.D. (2024) The impact of snow on fast ice formation in the area of the Bolshevik Island (Severnaya Zemlya Archipelago), *Fundamental and Applied Climatology*, vol. 10, no. 2, pp. 272-287, doi: 10.21513/0207-2564-2024-2-272-287.

Особенности температурного режима у поверхности Земного шара в 2023 году

Э.Я. Ранькова^{1)*}, О.Ф. Самохина¹⁾, У.И. Антипина^{1,2)}, В.Д. Смирнов¹⁾

¹⁾ Институт глобального климата и экологии имени академика Ю.А. Израэля,
РФ, 107258, г. Москва, ул. Глебовская, д. 206

²⁾ Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова Российской академии наук,
РФ, 119017, г. Москва, Пыжевский пер., д. 3

* Адрес для переписки: firankova@gmail.com

Реферат. Рассматривается состояние температурного режима у поверхности Земного шара в 2023 г. и его изменчивость в течение 1850-2023 гг. По данным инструментальных наблюдений, анализируются основные температурные аномалии 2023 года и текущие тенденции в их изменении.

Показано, что 2023 год был самым теплым в истории наблюдений (с 1850 г.) по всем категориям данных (суша, море, суша+море) и всем трем глобальным территориям (Земной шар, Северное и Южное полушария). В целом по Земному шару аномалия приповерхностной температуры составила $+0.533^{\circ}\text{C}$ (на суше $+0.738^{\circ}\text{C}$). Предыдущий максимум глобальной температуры $+0.345^{\circ}\text{C}$ был установлен в 2016 г.

Более 87% всех наблюдений (на суше 89%) оказались в среднем за год выше климатической нормы 1991-2020 гг. Среди них около 50% всех данных оказались выше 95-го процентиля (5%-е экстремумы тепла), в том числе 15% стали для своих пунктов рекордными. Отрицательные аномалии составили лишь 8% всех данных (еще 5% практически равны нулю).

Все сезоны, как и месяцы, на акваториях океанов и на континентах обоих полушарий также были экстремально теплыми: бóльшая их часть попала в число 5%-х экстремумов тепла или глобальных температурных рекордов, сезонных и/или месячных.

Локальные оценки линейного тренда за 1976-2023 гг. уверенно подтверждают тенденцию потепления – 97% всех коэффициентов тренда положительны. Наибольшая интенсивность потепления, в среднем по территории региона, отмечается в Арктическом поясе ($+0.563^{\circ}\text{C}/10$ лет) и в Европе ($+0.498^{\circ}\text{C}/10$ лет).

За период современного глобального потепления (1976-2023 гг.) средне-годовая глобальная температура увеличилась (по линии тренда) на 0.925°C . За это время при использовании фиксированных значений процентилей с базовым периодом 1911-2022 гг. площадь под экстремумами холода (значения меньше 5-го процентиля) уменьшилась с 15-20% практически до нуля, а под

экстремумами тепла (значения, больше 95-го перцентиля) – напротив, увеличилась от нуля до 20-30%. В 2023 и 2016 гг. (самые теплые годы) площадь 5%-х экстремумов тепла подскочила до 45-50% всей территории Земного шара.

В целом по всей территории Земного шара и за год современное приповерхностное потепление 1976-2023 гг. на суше протекает вдвое активнее, чем на поверхности океанов, в Северном полушарии вдвое интенсивнее, чем в Южном, и в Северном полушарии ускорилось в сравнении с последним столетием более чем вдвое (на континентах и океанах). Однако в Южном полушарии над сушей коэффициент ускорения существенно ниже (лишь 1.6), а на поверхности океанов ускорения потепления практически не произошло.

Приведенные в статье актуализированные глобальные оценки приповерхностного температурного режима, полученные по данным массива T3288 (данные ФГБУ «ИГКЭ»), хорошо согласуются с оценками по данным массива CRUTEM5 (данные Hadley/CRU, один из базовых массивов ВМО).

Ключевые слова. Климат, мониторинг климата, изменение климата, приземная температура, линейный тренд, глобальное потепление.

Features of the surface temperature regime over the Globe in 2023

E.Ya. Rankova^{1)}, O.F. Samokhina¹⁾, U.I. Antipina^{1,2)}, V.D. Smirnov¹⁾*

¹⁾Yu.A. Izrael Institute of Global Climate and Ecology,
20B, Glebovskaya str., 107258, Moscow, Russian Federation

²⁾Obukhov Institute of Atmospheric Physics, Russian Academy of Sciences,
3, Pyzhevskii lane, 119017, Moscow, Russian Federation

*Correspondence address: firankova@gmail.com

Abstract. The article considers the state of the temperature regime on the surface of the earth in 2023, as well as its variability over the period 1850-2023. Based on instrumental observations, main temperature anomalies in 2023 and current trends in change are analyzed. The results show that 2023 has been the warmest year on record (since 1850), for all data categories and all three global areas (the Globe, the Northern and Southern Hemispheres considered). The average surface temperature anomaly for the Globe was +0.533°C (on land +0.738°C). The previous maximum global temperature, +0.345°C, was recorded in 2016.

More than 87% (89% for land) of all annual observations were above the 1991-2020 climatic normal. Approximately 50% of these exceeded the 95th percentile (5% heat extremes), including 15% that set a record for their location. Only 8% of observations had negative anomalies, and another 5% were almost zero.

All seasons and months in oceans and continents of both hemispheres also experienced extremely warm conditions. Most of the continents and oceans were among the top 5% for extreme heat or global temperature records.

Local estimates of the linear trend from 1976 to 2023 strongly confirm the warming trend with 97% of trend coefficients being positive. The highest rate of temperature increase, on average, was observed in the Arctic zone ($+0.563^{\circ}\text{C}$ per decade) and in Europe ($+0.498^{\circ}\text{C}$ per decade).

During the period from 1976 to 2023, the average annual global temperature rose (following a linear trend) by 0.925 degrees Celsius. During this period, when using fixed percentile values based on a base period from 1911 to 2022, the areas under cold extremes (i.e., values less than the fifth percentile) decreased from approximately 15 to 20% to virtually zero. Meanwhile, areas under heat extremes (values greater than the 95th percentile) increased from zero to approximately 20-30%. In 2023 and 2016 (the warmest years), the areas of 5% of the heat extreme values occurred increased to 45-50% of the entire Globe.

Overall, over the Globe and over time, the current surface warming in the near-ground layer from 1976 to 2023 is twice as strong on land as on the ocean surface, with the Northern Hemisphere being twice as intense than the Southern Hemisphere. Additionally, the rate of warming in the Northern Hemisphere has accelerated more than doubled compared to the previous century on continents as well as oceans. However, the Southern Hemisphere shows a significantly lower acceleration coefficient over land (only 1.6) and there has been minimal or no acceleration in the rate of temperature increase on the ocean's surface.

The updated global temperature estimates presented in the article, based on the T3288 dataset (IGCE data), agree well with estimates from another commonly used dataset, CRUTEM5 (Hadley/CRU, one of WMO's base data sets).

Keywords. Climate, climate monitoring, climate change, surface temperature, linear trend, global warming.

Введение

Статья продолжает серию ежегодных публикаций в настоящем журнале (Груза и др., 2016-2023) о современном состоянии температурного режима Земного шара (приземная температура) на основе данных регулярного мониторинга климата в ФГБУ «ИГКЭ» (ЦМКП, 2016; Груза и др., 2017б). В обзорах и климатических бюллетенях ведущих научных центров мира регулярно публикуется информация о текущем состоянии климатической системы Земли, о наблюдаемых климатических аномалиях, рекордах и экстремальных событиях. Кроме того, Всемирная Метеорологическая организация (ВМО) обобщает материалы, которые разрабатываются и поддерживаются научными коллективами: NOAA/NCEI, NASA, Met Office Hadley Centre&CRUUEA, JMA, а также ECMWF Copernicus, группа Berkeley Earth и др. В результате ежегодные обзоры ВМО о состоянии глобального климата базируются на шести базовых наборах данных: HadCRUT5 (1850-2023), NOAA Global Temp (1850-2023), GISTEMP (1880-2023), Berkeley Earth (1850-2023), JRA (1958-2023), ERA5 (1940-2023).

Относительно 2023 г. ВМО уже в октябре сообщила, что 2023 год должен стать самым теплым годом в истории наблюдений, причем с огромным

отрывом (WMO, 2023a). Следующее сообщение ВМО было особенно полным (WMO, 2023б). В нем на основании шести перечисленных выше наборов данных приводятся оценки: (1) среднегодовая глобальная температура за 2023 год на $1.45 \pm 0.12^\circ\text{C}$ выше температуры доиндустриального уровня (1850-1900 гг.); (2) глобальная температура в каждом месяце, с июня по декабрь, устанавливала новые месячные рекорды, а июль и август стали двумя самыми жаркими месяцами за всю историю наблюдений; (3) среднее значение за десять лет с 2014 по 2023 год было на $1.20 \pm 0.12^\circ\text{C}$ выше среднего значения за 1850-1900 гг.

Далее подчеркивается, что мир все ближе подходит к ограничениям, установленным Парижским соглашением, задачей которого было: «удержать рост глобальной средней температуры намного ниже 2°С» и «приложить усилия для ограничения ее на уровне 1.5°С» (Парижское соглашение, 2015) и анализируются участвовавшие имевшие место в 2023 г. опасные явления: длительная засуха, опустошившая Африканский Рог, проливные ливни, которые разрушили плотины и убили тысячи людей в Ливии, и лесные пожары в Канаде, которые загрязнили воздух в Северной Америке.

По расчетам Copernicus (Copernicus, 2023), среднегодовая глобальная температура в 2023 году составила 14.98°C. Она перекрыла рекорд 2016 г. и была на 1.48°C выше температуры доиндустриального периода. В соответствии с этим заявлением «...рекордная жара сделала жизнь невыносимой, а иногда и смертельной в Европе, Северной Америке, Китае и многих других местах».

Практически все публикации (WMO, 2023а,б; Sopernicus, 2023; NASA, 2024; JMA, 2023, NOAA/NOAA/CEI 2024а,б) подчеркивают роль Эль-Ниньо, которое, как считается, в сочетании с изменением климата способствовало повышению глобальной температуры во второй половине 2023 г.

Но глобальная температура – лишь один из показателей климата и его изменений. Другие ключевые показатели включают концентрацию парниковых газов в атмосфере, теплосодержание и закисление океана, уровень моря, протяженность морского льда и баланс массы ледников. Все они в 2023 г. были на уровне рекордов.

По прогнозам (NOAANCEI, 2024а,б, Copernicus, 2023), в 2024 г. значения аномалий температуры приземного воздуха.) будут еще выше.

Забегая вперед, отметим, что приведенные ниже результаты и выводы относительно аномалий и экстремумов приповерхностной температуры в 2023 г. (локальных, региональных и глобальных, для Земного шара и полушарий), как и обновленные оценки климатических трендов, в целом хорошо согласуются с уже опубликованными оценками и выводами других авторов, по данным альтернативных источников.

Все выпуски сезонных бюллетеней и годовых обзоров ИГКЭ доступны на Web-сайте ИГКЭ (ИГКЭ, 2023), начиная с 2015 года – с начала функционирования в ИГКЭ системы мониторинга глобального климата (GCCM – Global Climate Change Monitoring).

В тексте статьи (в таблицах) допускаются сокращения: Земной шар (ЗШ), Северное полушарие (СП), Южное полушарие (ЮП), Атлантический

океан (АО), Тихий океан (ТО), Северная Америка (С. Америка), Южная Америка (Ю. Америка).

Данные

Как и в предыдущих публикациях данной серии, все результаты получены в рамках действующей в ИГКЭ технологии мониторинга глобального климата по разделу «Приземная температура». Соответственно, все оценки получены, по данным наблюдений за приземной (приповерхностной) температурой, из двух источников – ИГКЭ и Hadley/CRU.

Данные ИГКЭ (массив T3288 (суша)) включают данные стандартных наблюдений за температурой приземного воздуха (температура на высоте 2 м) с 1901 года на глобальной сети 3288 наземных станций. Описание массива и каталог включенных в него станций можно найти на web-сайте ИГКЭ (ИГКЭ, 2016). Массив пополняется в квазиреальном времени оперативными данными с каналов связи ГСТ (сводки КЛИМАТ) после надлежащей процедуры контроля и верификации (ЦМКП, 2016). Для контроля и заполнения пропусков в данных КЛИМАТ используются также данные станционных синоптических наблюдений (сводки СИНОП).

Данные Hadley/CRU – это признанные мировым научным сообществом данные Метеослужбы Великобритании (Met Office Hadley Center, UK) и Университета Восточной Англии (CRUUEA, UK) о приповерхностной температуре, в том числе: температура воздуха над сушей – CRUTEM5 (суша), температура воды на поверхности океанов – HadSST4 (море) и объединенные данные на всей территории – HadCRUT5 (суша+море). В каждой категории содержатся глобальные сеточные поля и глобально осредненные временные ряды для Земного шара, Северного и Южного полушарий (полное описание данных см. <http://www.metoffice.gov.uk>). Из этих данных в предлагаемом анализе использованы сеточные поля HadCRUT5 (суша+море) и глобально осредненные временные ряды для данных всех трех категорий: HadCRUT5, CRUTEM5, HadSST4.

Результаты

2023 год – самый теплый год в истории наблюдений

2023 год оказался самым теплым (с 1850 г.) по всем четырем наборам данных и трем глобальным территориям (Земной шар, Северное и Южное полушария). В целом по Земному шару (HadCRUT5, суша+море), среднегодовая аномалия температуры составила $+0.533^{\circ}\text{C}$, что больше предыдущего максимума на 0.188°C (2016 г.). Информация о шести самых теплых годах по всем видам данных приведена в табл. 1. Здесь же показано положение температуры 2023 года в соответствующих упорядоченных по убыванию временных рядах (ранг). Все анализируемые глобальные временные ряды приведены на рис. 1.

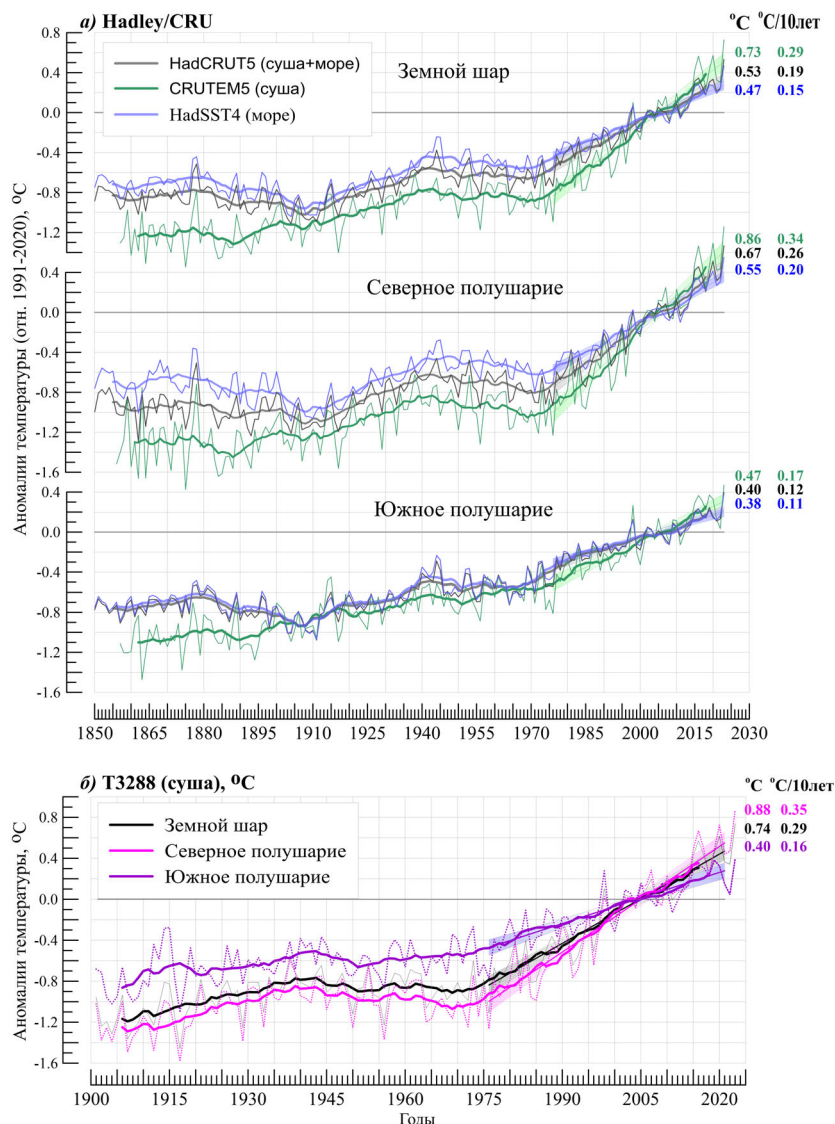


Рисунок 1. Временные ряды среднегодовых аномалий приземной температуры, осредненных по территории Земного шара, Северного и Южного полушарий, по данным:
а) HadCRUT5 (суша+море, черные кривые), CRUTEM5 (суша, зеленые кривые), HadSST4 (море, синие кривые); использованы оригинальные ряды Hadley/CRU;
б) T3288 (суша); использованы данные и методика пространственного осреднения ИГКЭ. Каждый временной ряд дополнен ходом 11-летних скользящих средних и линией тренда за 1976-2023 гг. с 95%-м доверительным интервалом. Справа приведены числовые значения среднегодовых аномалий 2023 г. и значения коэффициентов линейного тренда за 1976-2023 гг. (°C/10 лет)

Figure 1. Time series of mean annual surface temperature anomalies, averaged on the territory of the Globe, the Northern and Southern hemispheres according to:
а) HadCRUT5 (land + sea, black curves), CRUTEM5 (land, green curves), HadSST4 (sea, blue curves); original Hadley/CRU series were used;
б) T3288 (land); the data and the technique of spatial averaging of the IGCE were used. Each time series is supplemented with 11-year moving averages and a trend line for 1976-2023 with 95% confidence interval. On the right are the numerical values of the mean annual anomalies in 2023 and the values of the linear trend coefficients for 1976-2023 (°C/10 years)

Таблица 1. Самые теплые годы, по данным разных источников, в среднем по территории Земного шара, Северного и Южного полушарий: средняя за год аномалия температуры VT и год наблюдения

Table 1. Warmest years according to different sources on average over the territory of the Globe, the Northern and Southern hemispheres: yearly average temperature anomaly VT and year of observation

Ранг	Земной шар		Северное полушарие		Южное полушарие	
	VT, °C	Год	VT, °C	Год	VT, °C	Год
HadCRUT5 (Hadley/CRU, суша+море)						
1	0.533	2023	0.668	2023	0.397	2023
2	0.345	2016	0.514	2020	0.246	2019
3	0.335	2020	0.457	2016	0.233	2016
4	0.315	2015	0.424	2015	0.205	2015
5	0.307	2019	0.369	2019	0.166	2017
6	0.262	2017	0.358	2017	0.156	2020
T3288 (ИГКЭ, суша)						
1	0.738	2023	0.876	2023	0.399	2023
2	0.617	2020	0.724	2020	0.384	2019
3	0.570	2016	0.670	2016	0.328	2016
4	0.454	2019	0.492	2017	0.325	2020
5	0.438	2017	0.488	2015	0.310	2017
6	0.425	2015	0.482	2019	0.277	1998
CRUTEM5 (Hadley/CRU, суша)						
1	0.729	2023	0.859	2023	0.468	2023
2	0.573	2020	0.696	2020	0.370	2019
3	0.565	2016	0.664	2016	0.366	2016
4	0.429	2019	0.497	2015	0.329	2020
5	0.429	2015	0.480	2017	0.312	2017
6	0.424	2017	0.459	2019	0.293	2015
HadSST4 (Hadley/CRU, море)						
1	0.469	2023	0.552	2023	0.382	2023
2	0.281	2016	0.415	2020	0.230	2016
3	0.278	2019	0.346	2015	0.219	2019
4	0.271	2020	0.342	2019	0.186	2015
5	0.262	2015	0.341	2016	0.162	2022
6	0.235	2022	0.307	2022	0.154	2017

Для всех глобальных временных рядов (рис. 1) показан тренд за 1976-2023 гг. (условно принят за период «современного глобального потепления») и сглаженная кривая, отражающая ход 11-летней скользящей средней. Справа, у каждой кривой приведено значение аномалии в конечной точке (средняя за 2023 год) и коэффициент линейного тренда за 1976-2023 гг. (По-видимому, не вредно напомнить, что сближение всех кривых на конечном отрезке рядов объясняется выбором 1991-2020 гг. в качестве базового периода при расчете

аномалий. В результате все ряды приведены к единому (нулевому!) среднему значению в этом 30-летии.

Географические и сезонные особенности распределения аномалий приповерхностной температуры в 2023 году

В настоящем разделе представлены данные о региональных особенностях температурного режима 2023 г. для года в целом, каждого сезона и отдельных месяцев.

В соответствии со среднегодовыми оценками (табл. 2, рис. 2) в 2023 году на территории Земного шара положительные аномалии температуры составили около 90% всех локальных данных (87%, по данным, в боксах и 89% – на станциях); из них около 50% (47% и 53%) оказались выше 95-го перцентиля (5%-е экстремумы тепла), в том числе более 15% стали для своих пунктов рекордными (абсолютные максимумы).

Такая ситуация сложилась за счет северных частей Тихого и Атлантического океанов, Северной и Южной Америк, Евразии и Африки, где больше половины (от 54 до 73%) локальных значений среднегодовой температуры были выше 95-го перцентиля, а 2023 год в среднем по территории каждого из этих регионов оказался в числе первых трех самых теплых лет в истории наблюдений.

Дополнительно отметим, что на 472 станциях земного шара (19.2% всех поступивших станционных данных) были зафиксированы новые абсолютные максимумы среднегодовой температуры (локальные рекорды), в т.ч. 89% наблюдались в Северном полушарии, 11% – в Южном. В свою очередь, локальные абсолютные минимумы отмечались только на трех станциях Австралии. По сеточным данным HadCRUT5 (суша+море), в 2023 г. абсолютные максимумы перекрыты в 223 боксах (15.3% ячеек глобальной сетки), в т.ч. 78% в Северном и 22% в Южном полушариях, а новых минимумов не выявлено.

Отрицательные среднегодовые аномалии (около 8% всех данных) также наблюдались и на суше, и на акваториях океанов. В Южном полушарии – это области на севере Австралии, в Антарктиде, на востоке Бразилии, в восточной части Индийского океана и в отдельных районах Тихого океана. В Антарктиде на шести станциях из 18-ти наблюдались отрицательные аномалии. В Северном полушарии отрицательные аномалии отмечены в западных штатах США и прилегающей акватории Тихого океана, в Скандинавии, в Северном море и на севере Индии.

Дополнительную информацию о сезонных особенностях температурного режима 2023 года дают поля локальных аномалий сезонной и месячной дискретности (рис. 3, 3а) и их региональные обобщения. Численные значения аномалий температуры в натуральной ($^{\circ}\text{C}$) и вероятностной (вероятность превышения, %) шкалах в каждом из рассматриваемых регионов приведены в табл. 3, 4, 4а с детализацией до сезона и месяца.

Таблица 2. Частотные распределения среднегодовых локальных аномалий на территории Земного шара в 2023 г., по данным массивов T3288 и HadCRUT4 (все значения приведены в процентах от NN)

Table 2. Frequency distributions of mean annual local anomalies on the territory of the Globe in 2023 according to the data of T3288 and HadCRUT4 arrays (all values are given as a percentage of NN)

Регион		NN- число боксов/ стан- ций	Число значений в каждой категории (в % от NN)						
			Аномалии (отн. 1991-2020 гг.)			5%-е экстремумы холода/тепла		Абсолютные экстремумы	
			V < 0	V = 0	V > 0	X ≤ P ₀₅	X ≥ P ₉₅	X = min	X = max
HadCRUT5 (суша+море)									
ЗШ		1455	8.1	4.7	87.2	-	46.9	-	15.3
СП		892	6.2	2.9	90.9	-	54.5	-	19.5
ЮП		563	11.2	7.5	81.3	-	35.0	-	8.5
АО, 15-70N		129	0.8	-	99.2	-	64.3	-	40.3
ТО, 20-65N		149	1.3	5.4	93.3	-	72.5	-	24.2
Широтные пояса	65-90N	83	20.5	2.4	77.1	-	19.3	-	4.0
	25-65N	522	4.0	1.7	94.3	-	58.8	-	22.0
	25S-25N	561	7.8	6.4	85.7	-	47.1	-	11.6
	65-25S	276	10.5	7.6	81.9	-	34.1	-	13.8
	90-65S	13	53.8	-	46.2	-	15.0	-	8.0
T3288 (только суша)									
ЗШ		2460	8.2	3.0	88.8	0.6	52.6	0.1	19.2
СП		2089	6.0	2.1	91.9	0.0	55.5	-	20.2
ЮП		371	20.5	8.1	71.4	3.5	36.4	0.8	13.5
С. Америка		412	4.9	2.7	92.5	-	60.9	-	21.1
Евразия		1471	6.5	1.8	91.7	0.1	53.8	-	19.2
Ю. Америка		123	7.3	5.7	87.0	-	58.5	-	26.8
Африка		120	2.5	5.0	92.5	-	56.7	-	15.8
Австралия		137	36,5	9,5	54,0	8,0	18,2	2,2	2,9
Антарктида		18	27,8	-	72,2	-	11,1	-	-
Европа		539	6.5	1.5	92.0	-	68.6	-	23.9
Азия		941	6.4	2.0	91.6	0.1	45.8	-	16.6
Арктика, суша		146	7.5	3.4	89.0	-	28.1	-	2.7

Условные обозначения.

1. $V < 0$, $V = 0$, $V > 0$ – категории аномалий;
2. P_{05} , P_{95} – 5-й и 95-й проценти;
3. min , max – абсолютные экстремумы: наименьшее и наибольшее значения с 1911 г.

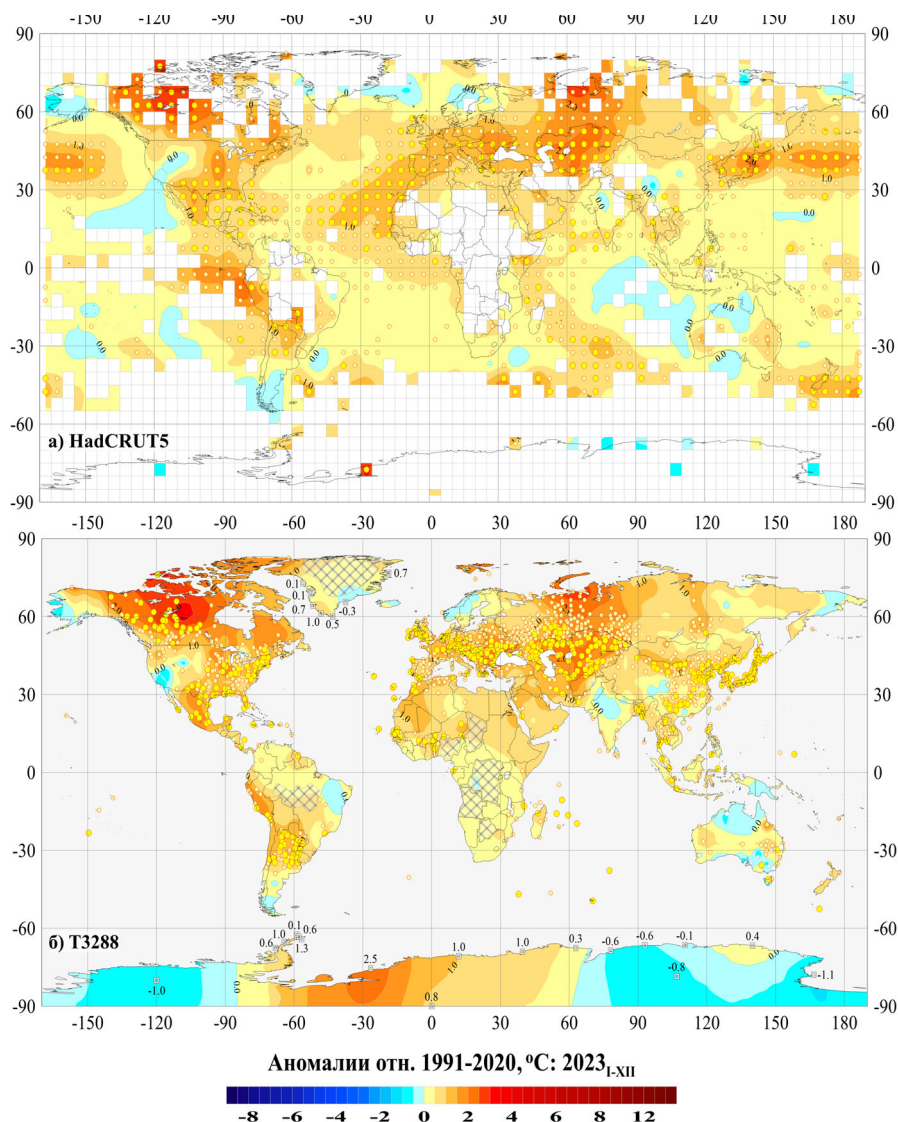


Рисунок 2. Пространственное распределение среднегодовых аномалий приземной температуры (°C) на территории Земного шара в 2023 г.: а) по сеточным данным HadCRUT5 (суша+море, Hadley/CRU, UK); б) по станционным данным T3288 (только суша, ИГКЭ) Аномалии приведены в отклонениях от средних за 1991-2020 гг. Кругами белого (минимумы) и желтого (максимумы) цвета указано положение боксов/станций с рекордными значениями аномалий, а значками меньшего размера – положение 5%-х экстремумов того же знака. В точках расположения станций Антарктиды и Гренландии показаны числовые значения наблюдаемых аномалий. Пустыми боксами (а) и штриховкой (б) показаны области отсутствия наблюдений

Figure 2. Spatial distribution of the surface temperature annual anomalies (°C) on the territory of the Globe in 2023: а) according to HadCRUT4 grid data (land + sea, Hadley/CRU, UK); б) according to station data T3288 (land only, IGCE) Anomalies are given in deviations from the average for 1991-2020. White (minimum) and yellow (maximum) circles indicate the position of boxes/stations with record values of anomalies. Smaller icons indicate the position of 5% extrema of the same sign. The numerical values of the observed anomalies are shown at the points of location of stations in Antarctica and Greenland. Empty boxes (а) and shading (б) show the areas of absence of observations

Таблица 3. Пространственно-осредненные значения аномалий приземной температуры на территории Земного шара в 2023 г. (°C) и их вероятности непревышения (в среднем за год и в каждом из сезонов)

Table 3. Spatially averaged values of surface temperature anomalies on the territory of the Globe in 2023 (°C) and their probabilities of not exceeding (on average per year and in each of the seasons)

Регион		Год		Зима		Весна		Лето		Осень	
		vT	F%	vT	F%	vT	F%	vT	F%	vT	F%
HadCRUT5 (суша+море)											
Земной шар		0.53	100	0.28	97.3	0.39	99.1	0.60	100	0.71	100
Северное полушарие		0.67	100	0.34	95.5	0.43	98.2	0.71	100	0.98	100
Южное полушарие		0.40	100	0.22	96.4	0.36	100	0.49	100	0.45	100
Атлантика (15-70N)		0.71	100	0.42	99.1	0.57	100	1.03	100	0.77	100
Тихий океан (20-65N)		0.64	99.1	0.56	100	0.44	97.3	0.62	98.2	0.86	100
Широтные пояса	65-90N	0.78	96.4	0.35	84.8	0.36	89.3	0.71	97.3	1.23	98.2
	25-65N	0.86	100	0.53	97.3	0.62	99.1	0.86	100	1.19	100
	25S-25N	0.41	100	0.05	87.5	0.25	94.6	0.53	100	0.63	100
	65-25S	0.43	100	0.46	100	0.47	100	0.45	100	0.34	100
	90-65S	0.16	76.9	-0.08	52.3	0.49	71.2	-0.22	60.8	0.65	87.3
T3288 (суша)											
Земной шар		0.74	100	0.31	94.6	0.46	96.4	0.77	100	1.11	100
Северное полушарие		0.88	100	0.43	95.5	0.57	97.3	0.83	100	1.30	100
Южное полушарие		0.40	100	0.02	83.0	0.22	92.0	0.62	100	0.65	100
Северная Америка		1.25	100	0.65	92.0	0.31	88.4	1.00	100	1.55	100
Евразия		0.93	99.1	0.39	89.3	0.71	93.7	0.81	100	1.54	100
Южная Америка		0.67	100	0.22	92.0	0.59	99.1	0.94	100	1.04	100
Африка		0.55	98.2	0.43	98.2	0.38	92.9	0.73	100	0.93	100
Австралия		0.02	82.1	-0.81	22.3	-0.93	19.6	0.60	96.4	0.57	95.5
Антарктида		0.10	74.7	-0.28	40.5	0.38	68.4	-0.26	58.2	0.66	93.7
Европа		1.20	99.1	1.32	94.6	1.02	96.4	0.77	95.5	1.58	100
Азия		0.85	100	0.14	83.9	0.62	92.9	0.82	100	1.52	100
Арктика (суша)		1.19	97.3	0.39	84.8	0.82	90.2	1.15	100	2.23	99.1
CRUTEM5 (суша)											
Земной шар		0.73	100	0.31	93.7	0.45	97.3	0.79	100	1.07	100
Северное полушарие		0.86	100	0.45	95.5	0.50	96.4	0.84	100	1.29	100
Южное полушарие		0.47	100	0.02	85.7	0.33	95.5	0.70	100	0.64	100
HadSST4 (Hadley/CRU, море)											
Земной шар		0.47	100	0.28	98.2	0.38	100	0.55	100	0.59	100
Северное полушарие		0.55	100	0.32	98.2	0.39	99.1	0.64	100	0.77	100
Южное полушарие		0.38	100	0.25	97.3	0.37	100	0.45	100	0.40	100

Условные обозначения.

1. vT , °C – наблюдаемая аномалия в 2023 году (базовый период 1991-2010 гг.);
2. $F\%$ – значение эмпирической функции распределения $F=\text{prob}(X \leq vT_{2023})$, по данным за 1911-2023 гг. (вероятность непревышения);
3. Красным шрифтом выделены абсолютные максимумы (наибольшие из всех значений ряда за 1911-2023 гг.), синим – отрицательные аномалии.

В целом по Земному шару (HadCRUT5, суша+море) все сезоны второго полугодия, как и большинство месяцев, были экстремально теплыми (ранг не выше 3). При этом на акваториях океанов (HadSST4, только море) такими были практически все месяцы года, кроме января-февраля в южном полушарии, а на суше (CRUTEM5/T3288, только суша) – начиная с июня.

Зима (рис. 3, 3а). В среднем по территории Земного шара зима 2023 г. стала четвертым самым теплым зимним сезоном (с 1850 г.), по данным HadCRUT5 (суша+море, аномалия $+0.28^{\circ}\text{C}$), седьмым/восьмым – по данным T3288/CRUTEM5 (только суша, $+0.31^{\circ}\text{C}$) и третьим – по данным HadSST4 (только море, $+0.28^{\circ}\text{C}$). Основной особенностью этой зимы является осуществление крупных аномалий обоих знаков, на континентах и океанах, в среднем за сезон и в отдельные месяцы.

В целом, положительные сезонные аномалии составили этой зимой 62% данных глобальной сети 5-градусных боксов (HadCRUT5, суша+море) и 60% всех данных наземных станций (T3288, суша). Из регионов выделяются: Европа, Африка и северные части Атлантического (АО) и Тихого (ТО) океанов, в каждом из которых 80-87% региональных данных составляли положительные аномалии. В южном умеренном поясе и в северных частях Атлантического и Тихого океанов обновлены региональные рекорды, сезонные и в отдельные месяцы, а на станциях Северной и Южной Америк, Европы и Африки (соответственно: 64, 44, 15, 15%) наблюдались локальные 5%-е экстремумы тепла (температура выше 95-го перцентиля).

Отрицательные сезонные аномалии отмечены, преимущественно, в Австралии (77% станций) и Антарктиде (50% станций), а также в Азии и в Арктическом и экваториальном широтных поясах. 5%-е экстремумы холода (температура ниже 5-го перцентиля) наблюдались лишь в Австралии и Антарктиде (в среднем за сезон и в декабре).

Весна (рис. 3). В среднем по всей территории Земного шара (HadCRUT5, суша+море), весна 2023 г. оказалась на третьем месте среди самых теплых весенних сезонов в истории наблюдений. Особенно теплым сезон был на акваториях океанов (по данным HadSST4): самым теплым – в целом по Земному шару и Южному полушарию, на втором месте – по Северному. На суше Северного полушария (по данным T3288/CRUTEM5) весна заняла в соответствующих рядах пятую/четвертую строку, а на суше Южного – десятую/шестую.

Основная особенность весны – экстремальные аномалии тепла (абсолютные максимумы и 5%-е экстремумы) в среднем по территории регионов. Абсолютные максимумы (вероятность непревышения $F=100\%$), сезонные и/или месячные, обновлены этой весной, в основном, на акваториях океанов: в среднем по Земному шару и полушариям, а также по северной части акватории Атлантики. На суше прежний максимум (в среднем, по континенту) обновлен только в Северной Америке (и только в мае). Экстремальные положительные аномалии (5%-е экстремумы тепла, $F\geq 95\%$), также сезонные и/или месячные, отмечены в Азии, Европе и Южной Америке.

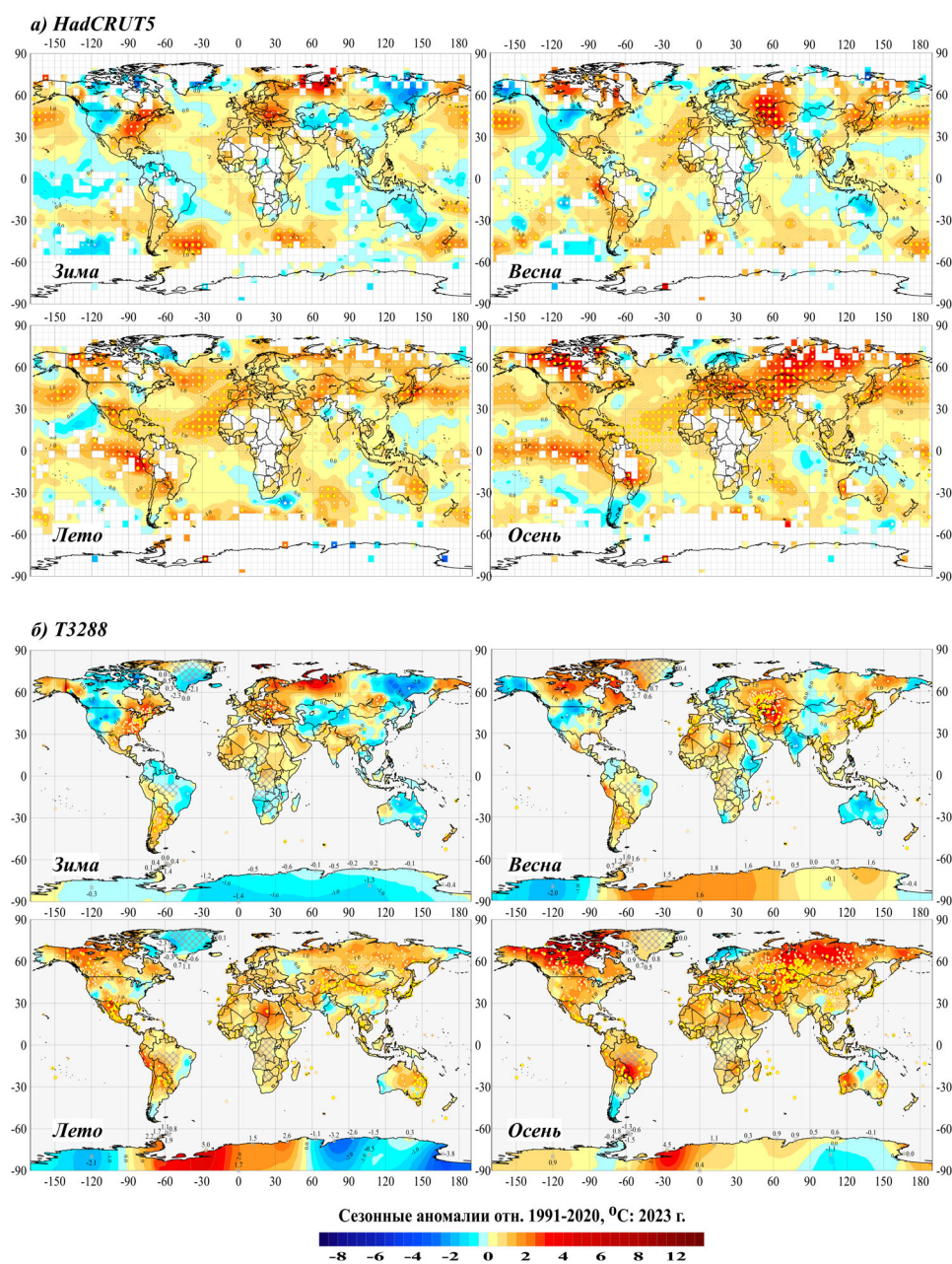


Рисунок 3. См. рис. 2, но для сезонных аномалий
 Figure 3. See figure 2, but for seasonal anomalies

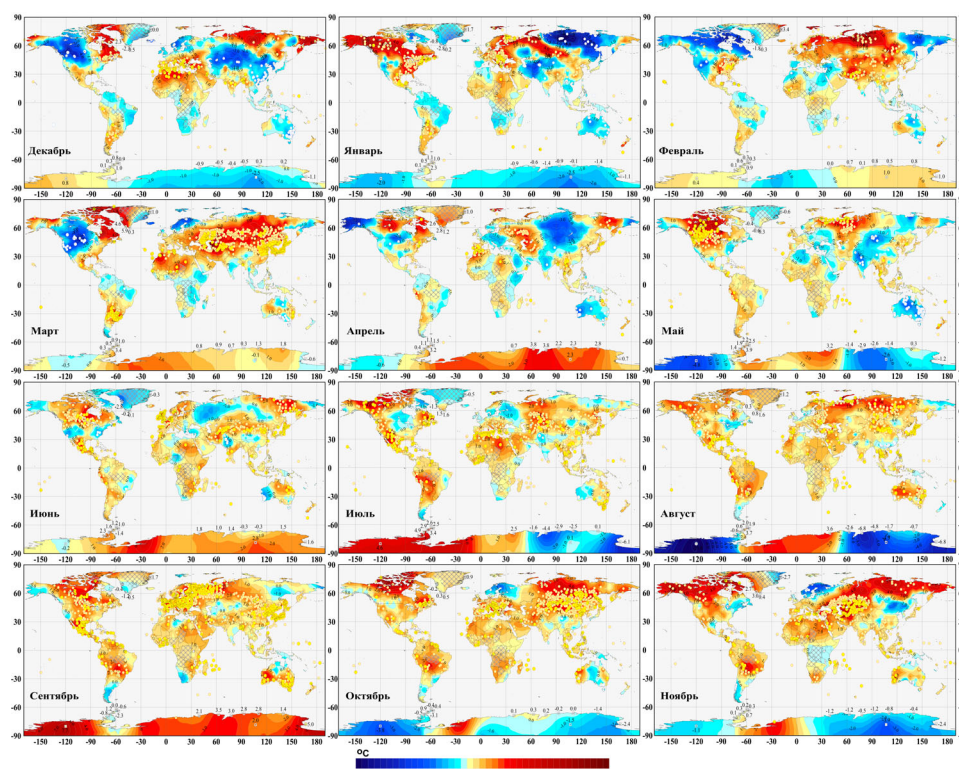


Рисунок 3а. См. Рис.2, но для месячных аномалий

Figure 3a. See Figure 2, but for monthly anomalies

Локализация и интенсивность аномалий от месяца к месяцу менялась. Лишь в Северной Атлантике и в северной части Тихого океана все три месяца сезона было экстремально тепло. В марте крупные положительные аномалии наблюдались на большей части Евразии и на севере Африки.

Лето (рис. 3) для Земного шара стало самым теплым летним сезоном с 1850 г. по всем наборам данных (T3288, HadCRUT5, CRUTEM5, HadSST4) и трем глобальным территориям (Земной шар, Северное и Южное полушарии).

Положительные сезонные аномалии составили более 80% всех локальных данных земного шара (на станциях и/или в центрах боксов), в числе которых более 35% превысили уровень 95-го перцентиля. Регионально-осредненные аномалии достигли рекордных значений на четырех (из 6) континентах: Северная и Южная Америки, Африка, Евразия (аномалия, +1.00, 0.94, 0.82, 0.81°C, соответственно), притом что рекорд Евразии сложился, по-видимому, за счет азиатской территории (рекордно высокая аномалия +0.82°C). По сеточным оценкам (с учетом всей территории: континентов и океанов) рекордно высокой оказалась температура в Северной Атлантике (+1.03°C) и в широтных поясах: 65-25N, 25S-25N и 25-65S (аномалии равны +0.86, +0.53 и +0.46°C, соответственно).

На отрицательные аномалии приходится менее 15% всех локальных данных (остальные менее 5% – значения, близкие к климатической норме 1991-2020 гг.), которые наблюдались в Антарктическом поясе (включая Антарктиду), в тропических широтах северного полушария, а также в Гренландии, в Тихом океане у берегов Индонезии и у берегов Австралии в Индийском океане.

Все три месяца летнего сезона были рекордно теплыми, 5%-е экстремумы тепла во все месяцы наблюдались на 24-30% станций Земного шара, в числе которых выделяются в июле – станции Африки и Антарктиды (48.9 и 16.7%, соответственно), в августе – станции Австралии и Арктики (40.6 и 52.6%).

Осень (рис. 3). Осенний сезон, как и летний, оказался рекордно теплым по всем глобальным наборам данных (суша, море, суша+море). Сезонные рекорды регионального масштаба (региональные максимумы) обновлены, во всех рассмотренных регионах, кроме обоих полярных широтных поясов и двух южных континентов (Австралия и Антарктида). Новые месячные рекорды установлены в Южной Америке, северной Атлантике и широтных поясах 25S-25N, 25-65N.

Таблица 4. Пространственно-осредненные значения среднемесячных аномалий приземной температуры в 2023 г. и их ранги (в целом по Земному шару и полушариям)

Table 4. Spatially averaged values of monthly surface temperature anomalies in 2023 and their ranks (over the Globe as a whole and Hemispheres)

Регион	Месяцы 2023 г.												Год
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	I-XII
HadCRUT5 (суша+море)													
ЗШ	0.30 ₅	0.32 ₄	0.50 ₃	0.30 ₄	0.37 ₁	0.50 ₁	0.63 ₁	0.67 ₁	0.73 ₁	0.68 ₁	0.73 ₁	0.66 ₁	0.53 ₁
СП	0.40 ₅	0.40 ₄	0.63 ₃	0.27 ₈	0.44 ₂	0.54 ₁	0.75 ₁	0.82 ₁	0.96 ₁	0.97 ₁	1.01 ₁	0.86 ₁	0.67 ₁
ЮП	0.19 ₆	0.24 ₆	0.38 ₂	0.37 ₁	0.31 ₁	0.45 ₁	0.50 ₁	0.52 ₁	0.51 ₁	0.39 ₁	0.45 ₁	0.45 ₁	0.40 ₁
T3288 (суша)													
ЗШ	0.41 ₆	0.44 ₆	0.85 ₃	0.15 ₁₅	0.38 ₄	0.61 ₁	0.82 ₁	0.90 ₁	1.11 ₁	1.08 ₁	1.12 ₁	1.07 ₂	0.74 ₁
СП	0.60 ₅	0.59 ₆	1.06 ₃	0.16 _{16.5}	0.47 ₄	0.63 ₂	0.90 ₁	0.98 ₁	1.23 ₁	1.30 ₁	1.37 ₁	1.25 ₂	0.88 ₁
ЮП	-0.05 ₂₅	0.10 ₁₇	0.34 ₆	0.14 ₁₄	0.16 ₁₂	0.57 ₁	0.61 ₁	0.68 ₁	0.82 ₁	0.55 ₁	0.55 ₃	0.64 ₂	0.40 ₁
CRUTEM5 (суша)													
ЗШ	0.41 ₆	0.46 _{4.5}	0.77 ₃	0.17 ₁₄	0.40 ₃	0.65 ₁	0.82 ₁	0.91 ₁	1.05 ₁	1.07 ₁	1.09 ₁	0.96 ₂	0.73 ₁
СП	0.63 ₅	0.64 ₅	0.98 ₃	0.08 ₁₇	0.45 ₅	0.65 ₂	0.90 ₁	0.97 ₁	1.19 ₁	1.32 ₁	1.35 ₁	1.17 ₂	0.86 ₁
ЮП	-0.03 ₂₂	0.11 ₁₅	0.36 ₆	0.34 ₇	0.29 ₈	0.64 ₁	0.68 ₁	0.79 ₁	0.76 ₁	0.56 ₁	0.58 ₁	0.538 ₃	0.47 ₁
HadSST4 (море)													
ЗШ	0.26 ₃	0.27 ₃	0.36 ₃	0.41 ₁	0.38 ₁	0.46 ₁	0.58 ₁	0.60 ₁	0.64 ₁	0.55 ₁	0.57 ₁	0.54 ₁	0.47 ₁
СП	0.31 ₃	0.28 ₃	0.34 ₃	0.41 ₂	0.43 ₁	0.51 ₁	0.68 ₁	0.72 ₁	0.82 ₁	0.74 ₁	0.75 ₁	0.66 ₁	0.55 ₁
ЮП	0.22 ₄	0.25 ₄	0.38 ₂	0.40 ₁	0.34 ₁	0.41 ₁	0.46 ₁	0.46 ₁	0.45 ₁	0.37 ₁	0.41 ₁	0.44 ₁	0.38 ₁

Примечание. Нижними индексами показаны ранги в соответствующих временных рядах (1911-2023 гг.). Красным цветом выделены абсолютные максимумы (ранг 1, жирный шрифт) и значения с рангами 2 и 3.

Таблица 4а. Регионально осредненные значения аномалий и их ранги для северных частей Атлантического и Тихого океанов, основных широтных поясов и континентов Земного шара (за каждый месяц и в среднем за год)

Table 4a. Regionally averaged values of anomalies and their ranks for the northern parts of the Atlantic and Pacific Oceans, the main latitudinal belts and continents of the Globe (for each month and on average for the year)

Регион	Месяцы 2023 г.												Год I-XII
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	
HadCRUT5 (суша+море)													
АО,15-70 N	0.5 ₁	0.4 ₃	0.5 ₁	0.6 ₁	0.6 ₁	0.9 ₁	1.2 ₁	1.0 ₁	0.9 ₁	0.8 ₁	0.6 ₁	0.5 ₂	0.7 ₁
ТО,40-60N	0.5 ₁	0.5 ₁	0.5 ₂	0.5 ₃	0.4 ₅	0.4 ₅	0.7 ₂	0.8 ₃	0.9 ₂	0.8 ₂	0.9 ₁	0.8 ₁	0.6 ₂
65-90N	-0.5 ₄₅	0.2 ₂₇	0.3 ₁₆	-0.2 ₃₀	0.9 ₄	0.3 ₁₂	0.7 ₅	1.1 ₁	0.8 ₅	0.9 ₉	2.0 ₂	1.1 ₁₀	0.8 ₅
25-65N	0.7 ₃	0.6 ₆	1.1 ₁	0.3 ₉	0.5 ₆	0.6 ₃	0.9 ₁	1.0 ₁	1.2 ₁	1.2 ₁	1.2 ₁	1.0 ₂	0.9 ₁
25S-25N	0.0 ₁₅	0.1 ₁₃	0.1 ₉	0.3 ₆	0.3 ₆	0.4 ₁	0.5 ₁	0.6 ₁	0.6 ₁	0.6 ₁	0.7 ₁	0.7 ₁	0.4 ₁
65-25S	0.5 ₁	0.4 ₁	0.6 ₁	0.4 ₂	0.4 ₁	0.4 ₁	0.5 ₁	0.5 ₁	0.4 ₁	0.3 ₂	0.3 ₁	0.3 ₃	0.4 ₁
90-65S	-0.4 ₆₅	0.5 ₄	0.9 ₃	1.1 ₁₃	-0.7 ₄₇	1.4 ₉	0.2 ₂₅	-2.2 ₆₂	2.6 ₃	-0.2 ₃₅	-0.5 ₄₉	-0.4 ₆₄	0.2 ₁₉
T3288 (суша)													
С. Америка	2.8 ₂	-0.2 ₃₈	-0.7 ₅₀	-0.1 ₃₆	1.8 ₁	0.9 ₂	1.1 ₁	1.0 ₁	1.7 ₁	1.3 ₅	1.7 ₂	3.7 ₁	1.2 ₁
Евразия	0.0 ₃₀	1.3 ₇	2.1 ₂	-0.1 ₂₁	0.1 ₁₈	0.6 ₅	0.8 ₃	1.1 ₁	1.3 ₁	1.6 ₁	1.7 ₂	0.6 ₁₇	0.9 ₂
Ю. Америка	0.1 ₁₇	0.2 ₁₀	0.8 ₃	0.2 ₁₅	0.8 ₂	0.6 ₈	1.2 ₃	1.4 ₁	1.2 ₁	0.9 ₁	1.0 ₁	0.8 ₁	0.7 ₁
Африка	0.4 ₁₀	0.2 ₁₇	0.6 ₅	0.3 ₁₁	0.2 ₁₅	0.6 ₃	0.9 ₁	0.7 ₂	0.8 ₂	1.0 ₂	1.0 ₁	0.5 ₇	0.5 ₃
Австралия	-1.1 ₈₅	-0.4 ₅₇	0.1 ₄₀	-1.1 ₇₉	-1.8 ₁₀₇	0.3 ₂₂	0.0 ₂₈	1.4 ₂	1.1 ₃	0.1 ₂₄	0.5 ₁₅	1.0 ₇	0.0 ₂₁
Антарктида	-1.0 ₆₉	0.3 ₂₂	0.8 ₁₄	1.5 ₁₀	-1.2 ₅₈	1.0 ₁₇	1.3 ₁₆	-3.1 ₆₉	3.4 ₁	-1.0 ₆₀	-0.6 ₄₉	-0.6 ₆₂	0.1 ₂₁
Европа	1.9 ₈	1.8 ₁₇	1.6 ₁₀	0.7 ₁₃	0.8 ₁₃	0.4 ₂₀	0.4 ₁₉	1.5 ₂	2.7 ₁	1.1 ₇	1.0 ₂₁	0.6 ₂₄	1.2 ₂
Азия	-0.5 ₄₉	1.2 ₇	2.3 ₂	-0.3 ₂₈	-0.1 ₂₄	0.7 ₃	0.9 ₁	1.0 ₁	0.9 ₂	1.8 ₁	1.8 ₁	0.6 ₁₇	0.8 ₁
Арктика,суша	-0.3 ₃₆	0.3 ₂₈	0.7 ₁₇	0.2 ₂₄	1.6 ₂	0.5 ₁₀	1.1 ₂	1.9 ₁	1.4 ₃	2.1 ₅	3.1 ₂	1.5 ₆	0.4 ₁₈

Примечание. Нижними индексами показаны значения рангов (относительно 1911-2023). Красным шрифтом выделены абсолютные максимумы (ранг 1, жирный шрифт) и значения с рангами 2 и 3.

Положительные сезонные аномалии преобладали на территории всех континентов (кроме Антарктиды) и широтных поясов; в целом, на них приходится 87% всех наземных станций и 83% боксов. При этом 5%-е экстремумы тепла отмечены на 49% станций/46% боксов, во все месяцы и на территории всех континентов и широтных зон (кроме Антарктического пояса). Их пространственное распределение от месяца к месяцу менялось. Из месяцев особо выделяется сентябрь (экстремумы тепла наблюдались на ~46% станций и 36% боксов).

Отрицательные аномалии отмечены лишь в октябре-ноябре в Антарктическом широтном поясе и в Антарктиде.

Декабрь 2023 г. (рис. 3б). В упорядоченном по убыванию временном ряду декабрьских температур, глобальная температура 2023 г. оказалась

рекордно высокой (ранг 1) для всей территории Земного шара (HadCRUT5, суша+море: аномалия $+0.664^{\circ}\text{C}$) и для океанических акваторий (HadSST4, аномалия $+0.554^{\circ}\text{C}$). Основной вклад, по-видимому, принадлежит умеренным широтам Северного полушария за счет северных частей Атлантического и Тихого океанов, Северной Америки и юго-запада Евразии.

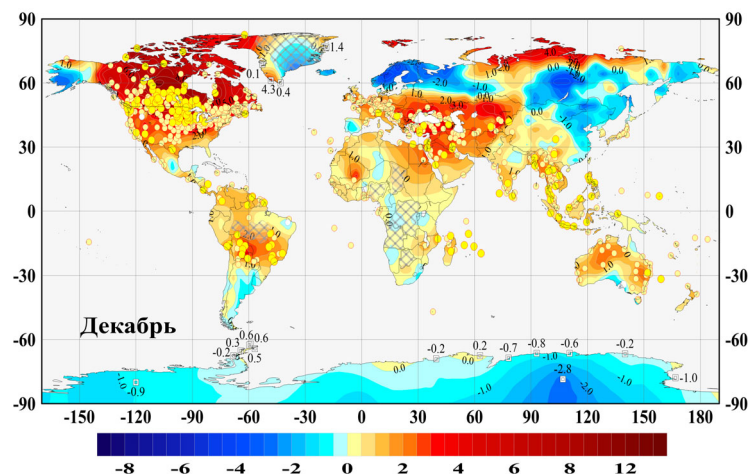


Рисунок 3б – См. рисунок 2, но для аномалий декабря 2023 г.

Figure 3b – See Figure 2, but for December 2023 anomalies

Области отрицательных аномалий сформировались на суше: на севере Европы, на востоке Азии, на Аляске и в Антарктиде.

Тенденции многолетних изменений приземной температуры в крупных регионах мира

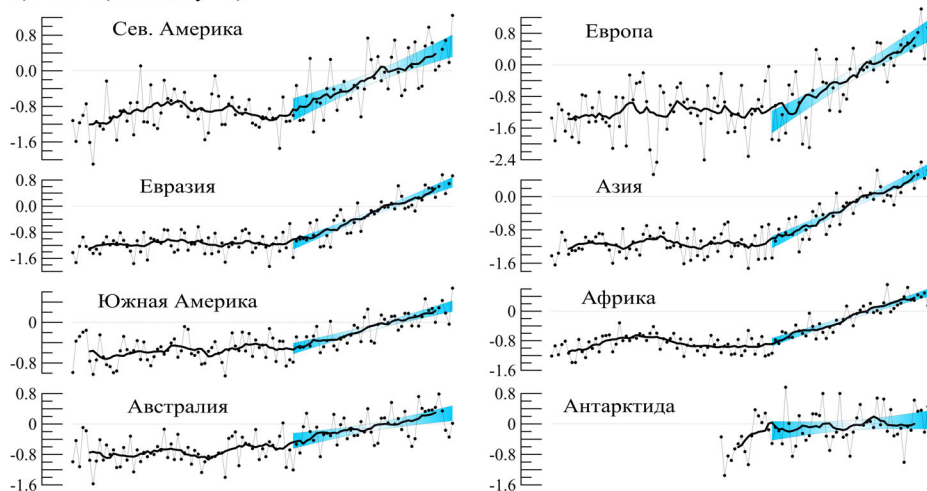
Современные тенденции в изменении приземной температуры анализируются здесь по временным рядам месячного, сезонного и годового разрешения за весь период наблюдений для глобальных территорий и крупных регионов мира (список регионов см., например, табл. 2). Для континентов ряды получены по станционным данным T3288, а для широтных поясов и океанических акваторий – по сеточным данным HadCRUT5. Глобальные временные ряды и ряды для крупных регионов приведены здесь с годовым разрешением (рис. 1, 4), а числовые оценки линейных трендов за 1976-2023 гг. – для всех рассматриваемых территорий, для года в целом, каждого сезона и месяца (табл. 5, 6).

Оценки трендов (табл. 5) уверенно, с доверительной вероятностью не ниже 99%, указывают на тенденцию к потеплению глобального климата во все сезоны, в целом по Земному шару и полушариям, а также в среднем по территории большинства рассматриваемых регионов.

Исключение представляют Северная Америка (весной) и Австралия (зимой), когда тренд статистически значим на 5%-м уровне ($\alpha \leq 5\%$), а также Антарктический пояс в целом (включая Антарктиду), где сезонный тренд статистически значим только осенью ($\alpha \leq 1\%$), а в остальные сезоны не значим

даже на 10%-м уровне ($\alpha > 10\%$). Зимой и весной в Антарктиде и Антарктическом поясе оценки указывают еще и на тенденцию к похолоданию).

а) T3288 (только суша)



б) HadCRUT5 (суша+море)

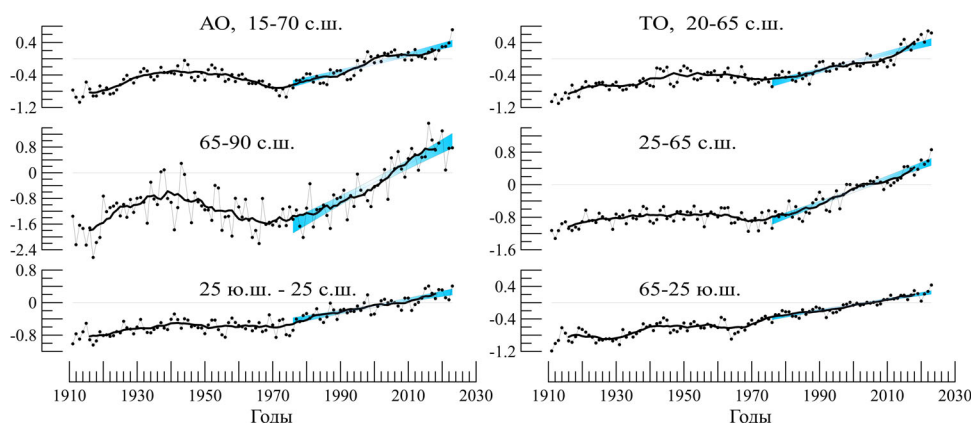


Рисунок 4. Временные ряды пространственно осредненных среднегодовых аномалий приземной температуры: а) для континентов, б) для северных частей Атлантического и Тихого океанов и основных широтных поясов Земного шара

Расчет пространственно осредненных аномалий выполнен по методике ИГКЭ, по данным: а) T3288 (для континентов), б) HadCRUT5 (для океанов и широтных поясов). Аномалии приведены в отклонениях от средних за 1991-2020 гг. Сглаженные кривые (жирная линия) получены 11-летним скользящим осреднением. Показан линейный тренд за 1976-2023 гг. с 95%-м доверительным интервалом (голубая заливка)

Figure 4. Time series of spatially averaged annual surface temperature anomalies: а) for continents, б) for the northern parts of the Atlantic and Pacific oceans and the main latitudinal belts of the Globe

Spatial averaging anomalies were performed by using the IGCE methodology according to the following data: а) T3288 (for continents), б) HadCRUT5 (for oceans and latitudinal belts). Anomalies are given as deviations from the average for 1991-2020. The smoothed curves (thick line) are obtained by 11-year moving average. A linear trend is shown for 1976-2023 with 95% confidence interval (blue shading)

Регион наиболее интенсивного потепления – Арктический широтный пояс (65-90N, суша+море), где оценки колеблются от +0.434°C/10 лет (летом) до +0.620°C/10 лет (весной).

Из континентов выделяется Евразия – тренд в среднем за год +0.405°C/10 лет, весной +0.506°C/10 лет. В Европе наиболее интенсивно потепление зимних (0.564°C/10 лет) и летних (0.531°C/10 лет) сезонов, в Азии – весенних (0.528°C/10 лет). Наименее выражено потепление на континентах Южного полушария: в Антарктиде (0.062°C/10 лет), Австралии (0.154°C/10 лет) и Южной Америке (0.178°C/10 лет).

Более подробно проследить особенности многолетнего хода приземной температуры в каждом регионе можно по временным рядам (рис. 1, 4) и оценкам тренда (табл. 5, 6). Дополнительно отметим, что оценки трендов, по данным о среднемесячных аномалиях (табл. 6), хорошо согласуются с сезонными оценками (табл. 5) и дополняют их.

Таблица 5. Коэффициенты линейного тренда (1976-2023 гг., °C/10 лет) пространственно-осредненных аномалий приземной температуры для Земного шара, полушарий и крупных регионов (в целом за год и по сезонам)

Table 5. Linear trend coefficients (1976-2023, °C/10 years) of spatially averaged surface temperature anomalies for the Globe, Hemispheres and major regions of the world (for the whole year and for seasons)

Регион	Год	Зима	Весна	Лето	Осень
HadCRUT5 (суша+море)					
Атлантика (15-70N)	0.210	0.204	0.183	0.223	0.238
Тихий океан (20-65N)	0.214	0.167	0.178	0.260	0.248
Арктический пояс (65-90N)	0.563	0.526	0.620	0.434	0.611
Умеренный пояс СП (25-65N)	0.308	0.274	0.303	0.332	0.325
Тропики (25S-25N)	0.150	0.140	0.149	0.156	0.153
Умеренный пояс ЮП (65-25S)	0.134	0.113	0.130	0.121	0.113
Антарктический пояс (90-65S)	*0.106	** -0.058	0.009	0.164	0.297
T3288 (суша)					
Северная Америка	0.305	0.377	*0.161	0.295	0.360
Евразия	0.405	0.344	0.506	0.378	0.391
Южная Америка	0.178	0.160	0.128	0.174	0.233
Африка	0.289	0.257	0.325	0.285	0.299
Австралия	0.154	*0.112	0.102	0.160	0.232
Антарктида	0.062	-0.047	-0.008	0.080	0.219
Европа	0.498	0.564	0.425	0.531	0.468
Азия	0.378	0.284	0.528	0.334	0.368
Арктика (суша)	0.645	0.575	0.749	0.450	0.806

Примечание. Оценки, статистически значимые на 1% уровне ($\alpha \leq 1\%$), приведены без выделения. Звездочкой (*) выделены оценки с 5%-м уровнем значимости $1\% < \alpha \leq 5\%$, двумя звездочками (**) – с 10%-м уровнем $5\% < \alpha \leq 10\%$. Затенены значения, не значимые даже на 10%-м уровне (высокая вероятность «ложного» тренда) т.е. отсутствия ненулевого тренда любого знака. Отрицательные значения коэффициентов тренда (тенденция к похолоданию) выделены шрифтом синего цвета.

Таблица 6. Сезонный ход коэффициентов линейного тренда приземной температуры (°C/10 лет), осредненной по территории крупных регионов Земного шара, 1976-2023 гг.

Table 6. Seasonal variation of linear trend coefficients of surface temperature (°C/10 years), spatially averaged over the major regions of the Globe, 1976-2023

Регион	Месяцы											
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
<i>HadCRUT5 (суша+море)</i>												
Земной шар	0.17	0.17	0.21	0.19	0.17	0.19	0.19	0.20	0.19	0.20	0.19	0.16
С. полушарие	0.23	0.24	0.28	0.24	0.23	0.25	0.26	0.28	0.27	0.28	0.27	0.23
Ю. полушарие	0.11	0.11	0.13	0.13	0.11	0.12	0.12	0.13	0.12	0.12	0.11	0.10
АО, 15-70 N	0.21	0.19	0.17	0.19	0.19	0.20	0.21	0.26	0.25	0.25	0.21	0.21
ТО, 40-60 N	0.15	0.16	0.16	0.17	0.21	0.23	0.27	0.28	0.27	0.25	0.23	0.20
65-90 N	0.42	0.55	0.67	0.69	0.50	0.48	0.39	0.43	0.42	0.72	0.72	0.63
25-65 N	0.28	0.29	0.36	0.27	0.27	0.31	0.33	0.35	0.34	0.34	0.30	0.27
25 S-25 N	0.13	0.13	0.14	0.16	0.15	0.15	0.15	0.16	0.16	0.15	0.15	0.14
65-25 S	0.12	0.11	0.13	0.13	0.12	0.12	0.12	0.12	0.10	0.12	0.11	0.11
90-65 S	*-0.08 ₅	-0.03 ₃₀	-0.01 ₉₅	-0.05 ₇₃	0.11 ₄₈	0.06 ₇₃	0.15 ₃₉	**0.28 ₉	*0.35 ₄	0.37	0.17 ₁	**0.07 ₈
<i>T3288 (суша)</i>												
Земной шар	0.29	0.28	0.35	0.29	0.25	0.19	0.19	0.20	0.30	0.33	0.306 ₀	0.26
С. полушарие	0.34	0.35	0.44	0.35	0.31	0.25	0.26	0.28	0.33	0.38	0.37	0.31
Ю. полушарие	0.15	0.12	0.14	0.15	0.11	0.12	0.12	0.13	0.23	0.21	0.16	0.15
С. Америка	0.57	0.11 ₅₈	**0.20 ₈	0.07 ₄₄	0.21	0.31	0.28	0.29	0.38	0.34	*0.36 ₁	0.54
Евразия	*0.30 ₁	0.50	0.67	0.48	0.37	0.39	0.35	0.39	0.35	0.44	0.38	*0.23 ₃
Ю. Америка	0.17	0.14	0.14	0.16	**0.08 ₉	0.18	*0.15 ₁	0.20	0.31	0.20	0.20	0.17
Африка	0.22	0.25	0.33	0.31	0.32	0.31	0.30	0.24	0.26	0.30	0.33	0.30
Австралия	*0.20 ₁	0.03 ₇₃	0.14 ₁₀	**0.17 ₆	-0.01 ₉₈	0.11 ₁₉	0.22	**0.14 ₈	0.30	0.28	0.13 ₁₈	0.12 ₁₃
Антарктида	-0.09 ₁₉	0.01 ₉₈	0.04 ₈₅	-0.07 ₆₈	0.03 ₉₅	-0.11 ₄₅	0.19 ₃₄	0.17 ₂₆	**0.29 ₆	*0.22 ₁	**0.13 ₆	-0.09 ₂₈
Европа	*0.54 ₂	*0.68 ₁	*0.44 ₂	0.48	0.35	0.45	0.51	0.62	0.45	0.47	0.49	*0.51 ₁
Азия	*0.24 ₃	0.45	0.73	0.48	0.37	0.37	0.31	0.33	0.32	0.43	0.36	0.15 ₁₄
Арктика, суша	*0.51 ₁	*0.56 ₁	0.80	0.85	0.60	0.55	0.36	0.43	0.47	1.01	0.93	0.73

Примечание. Оценки, статистически значимые на 1% уровне ($\alpha \leq 1\%$), приведены без выделения. Символом (*) выделены оценки с 5%-м уровнем значимости $1\% < \alpha \leq 5\%$, (**) – с 10%-м уровнем $5\% < \alpha \leq 10\%$. Затенены значения, не значимые даже на 10%-м уровне (высокая вероятность «ложного» тренда) т.е. отсутствия ненулевого тренда любого знака). Шрифтом синего цвета выделены отрицательные значения коэффициентов тренда (тенденция к похолоданию). Нижним индексом указаны критические уровни значимости (в %, с точностью до целых)

Вывод о потеплении осенних сезонов в Антарктическом поясе (90-65 S), Антарктиде и Австралии (при 1%-й статистической значимости) становится менее уверенным, если учесть, что в этих регионах в отдельные осенние месяцы критический уровень значимости α заметно слабее (выше 1%). Так, в Антарктическом поясе в сентябре $\alpha = 4\%$; в Антарктиде в ноябре $\alpha = 6\%$, а в Австралии в ноябре тренд не значим даже на 10%-м уровне ($\alpha=18\%$).

Обращают внимание и оценки тренда для Европы, для которых в зимние месяцы при высоких значениях коэффициентов тренда уровень значимости выше 1%. Это, по-видимому, может указывать на высокую межгодовую изменчивость регионального температурного режима в этом периоде.

Сезонный ход оценок тренда, представленный графически (рис. 5), более наглядно отражает особенности потепления на континентах и океанах в

разных регионах мира. Пунктирными линиями и пустыми кружками на нем показаны месяцы, когда оценки незначимы даже на 5%-м уровне. В подавляющем большинстве остальных случаев критический уровень статистической значимости полученных оценок $\alpha < 1\%$ (табл. 6).

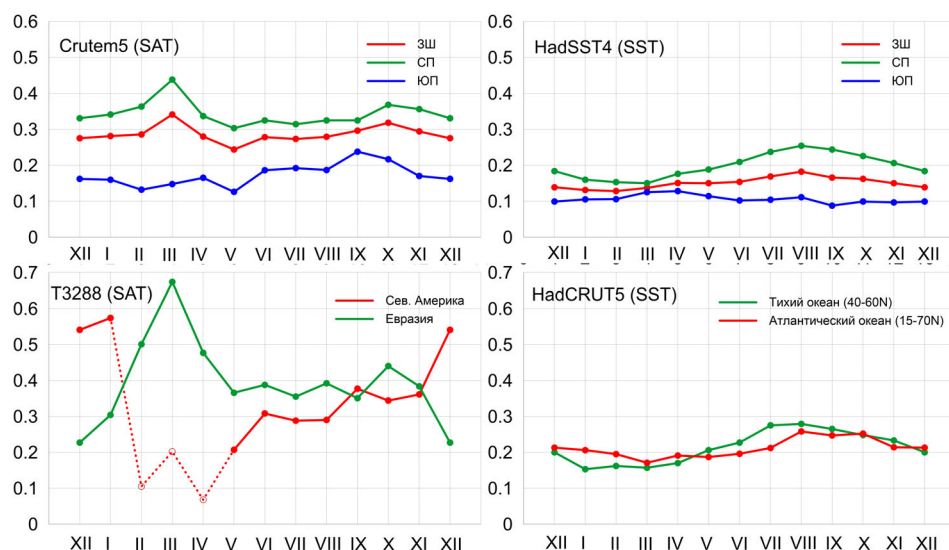


Рисунок 5. Сезонный ход коэффициентов линейного тренда регионально осредненной приповерхностной температуры, 1976-2023 гг.
 Использованы данные Hadley/CRU (CRUTEM5, HadSST4) и ИГКЭ (T3288): слева – SAT (температура приземного воздуха), справа – SST (температура воды на поверхности океанов); верху – Земной шар, С. и Ю. полушария; внизу – континенты и океаны Северного полушария

Figure 5. Seasonal variation of the linear trend coefficients of the regional surface temperature, 1976-2023
 Hadley/CRU datasets (CRUTEM5, HadSST4, HadCRUT5) and IGCE ones (T3288) were used: left: SAT (surface air temperature), right: SST (sea surface temperature); above: the Globe, Northern and Southern Hemispheres; below: the continents and oceans of the Northern Hemisphere

Как следует из рис. 5, в обеих полушариях на поверхности океанов скорость потепления максимальна «осенью», а на суше – «весной» (с учетом сезонного календаря соответствующего полушария). Видно также, что средняя скорость потепления в Южном полушарии во все сезоны ниже, чем в Северном, и на суше всегда выше, чем на акваториях океанов. При этом различия между Южным и Северным полушариями особенно значительны также на суше. Таким образом, современное глобальное потепление протекает особенно активно на континентах Северного полушария в холодный период года. Этот вывод уточняется картиной потепления северных континентов на нижней панели рисунка. По-видимому, Евразия обеспечивает усиление потепления в феврале-апреле, а Северная Америка – в ноябре-декабре. В северных частях Тихого и Атлантического океанов более активное потепление происходит в летне-осенние месяцы.

Для более наглядного сравнения интенсивности (средней скорости) потепления в разных группах данных приведены показатели k_1 - k_3 (табл. 6а),

рассчитанные как отношение соответствующих коэффициентов тренда глобальных температур. Эти показатели количественно уточняют выводы, основанные на визуальном сопоставлении глобальных временных рядов (рис. 1) и оценок трендов (табл. 5).

Таблица 6а. Сравнение средней скорости глобального потепления у поверхности Земного шара в разных группах данных

Table 6a. Comparison of the average rate of global warming near the surface of the Globe in different data groups

	Показатель	1976-2023						1924-2023							
		ЗШ		СП		ЮП		ЗШ		СП		ЮП			
k ₁	$b_{T3288}/b_{HadSST4}$	2.1	2.1	1.8	2.0	1.7	1.4	1.6	1.9	1.7	2.4	1.1	1.0		
			2.0		2.1		1.1		1.8		2.2		1.0		
			1.7		1.4		1.6		1.3		1.2		1.1		
			2.0		1.6		2.1		1.3		1.2		1.2		
	$b_{CRUTEM5}/b_{HadSST4}$	2.0	2.1	1.8	2.1	1.8	1.2	1.5	1.8	1.7	2.2	1.2	1.1		
			2.0		2.1		1.2		1.8		2.2		1.1		
			1.7		1.4		1.8		1.3		1.2		1.3		
			1.9		1.6		2.2		1.4		1.3		1.4		
k ₂	$b_{СП}/b_{ЮП}$	1976-2023						1924-2023							
		T3288		CRUTEM		HadSST		T3288		CRUTEM		HadSST			
		2.1	2.3	2.0	2.3	2.1	1.6	1.6	2.1	1.4	1.7	1.0	0.8		
			2.7		2.5		1.4		1.9		1.7		0.9		
			1.8		1.7		2.2		1.3		1.1		1.2		
			1.8		1.7		2.4		1.1		1.1		1.1		
		k ₃	$b_{1976-2023}/b_{1924-2023}$	СП						ЮП					
				T3288		CRUTEM		HadSST		T3288		CRUTEM		HadSST	
2.2	1.9			2.3	2.0	2.1	2.2	1.6	1.6	1.6	1.5	1.0	1.1		
	2.0				2.0		2.1		1.4		1.4		1.3		
	2.6				2.6		2.3		1.8		1.7		1.2		
	3.0				2.9		2.4		1.9		1.8		1.1		

Примечание. Жирным шрифтом выделены значения «годовых» показателей k₁-k₃ (получены как отношение соответствующих коэффициентов тренда среднегодовых глобальных температур); правее приведены «сезонные» показатели (сверху вниз: зима-весна-лето-осень)

Из этих оценок видно, что при глобальном рассмотрении (1976-2023 гг.) в целом по всей территории Земного шара и за год современное приповерхностное потепление:

- на суше протекает вдвое активнее, чем на поверхности океанов (k₁=2.0-2.1) (особенно заметно в СП зимой и весной, а в ЮП – летом и осенью);
- в Северном полушарии вдвое интенсивнее, чем в Южном (k₂=2.0-2.1) (также особенно заметно на суше – зимой и весной, в океанах – летом и осенью);
- в Северном полушарии, в сравнении со столетним (1924-2023), ускорилось более чем в два раза (k₃=2.1-2.3), как на суше, так и на акваториях океанов; при этом в Южном полушарии коэффициент ускорения на континентах значительно ниже, чем в Северном (k₃=1.6-1.7 против 2.1-2.3), а на поверхности океанов ускорения практически не произошло (k₃=1.0).

Детально проследить, как меняются введенные показатели от сезона к сезону, можно по табл. 6а. Здесь отметим лишь еще одно важное наблюдение:

на столетнем временном интервале в зимне-весеннем периоде потепление поверхности океанов активнее протекает не в Северном полушарии, а в Южном ($k_2 < 1$). Напомним, что сезоны во всем тексте указаны по календарю Северного полушария.

Географические особенности современных изменений климата, 1976-2023 гг.

Рассматриваются пространственные распределения локальных оценок температурных трендов на территории Земного шара (в среднем за год и за каждый сезон) и их частотные распределения по крупным регионам Земного шара, в зависимости от интенсивности тренда и его статистической значимости α (рис. 6-7, табл. 7). Эти данные существенно дополняют и уточняют представления о структуре трендов на основе региональных оценок (табл. 5, 6).

Анализ выполнен по данным наблюдений на 2406 станциях (массив T3288) и в 1417 боксах (массив HadCRUT5), для которых временные ряды охватывают не менее 35 лет наблюдений, включая последний год (в данном случае – 2023). При этом не допускается наличие в ряду более двух пропусков (разрозненных!).

Можно видеть (рис. 6), что на территории Земного шара по-прежнему доминирует тенденция к потеплению. Положительные тренды составляют около 97% всех локальных оценок, с учетом (данные HadCRUT5) и без учета (данные T3288) океанов (табл. 7). Область наиболее интенсивного потепления – Арктика, где положительны все оценки тренда (на суше и во всем широтном поясе) и почти все из них (99.3 и 97.5%) статистически значимы хотя бы на 5%-м уровне. На суше, вдоль побережья Северного Ледовитого океана практически всюду тренд достигает $+0.6-0.8^\circ\text{C}/10$ лет и более.

Из континентов выделяется Европа – все оценки тренда положительны и 99.4% из них статистически значимы на 5%-м уровне (табл. 7). В Восточной Европе скорость потепления достигает $+0.7-0.8^\circ\text{C}/10$ лет, а, в среднем по всей европейской территории, тренд составил $0.50^\circ\text{C}/10$ лет. Близкая ситуация в Азии ($0.38^\circ\text{C}/10$ лет) и, как результат, в Евразии в целом ($0.41^\circ\text{C}/10$ лет). Большая часть океанической поверхности в Северном полушарии (регионы АО и ТО, до $0.3-0.4^\circ\text{C}/10$ лет) и в тропическом поясе (кроме Тихого океана у побережья Южной Америки) также характеризуется статистически значимым трендом к потеплению (рис. 6).

Тенденция к похолоданию подтверждена статистически значимыми оценками ($\alpha \leq 5\%$) лишь в менее 0.5% всех наблюдений (на суше и океанах). На суше таких станций 12, из них три в Северном полушарии (в горных районах Центральной Азии) и девять – в Южном (на востоке Австралии и Антарктиды). На акваториях океанов отрицательный тренд отмечен в Тихом океане у побережья Южной Америки (до $-0.1^\circ\text{C}/10$ лет) и на юго-западе Атлантики у берегов Огненной Земли (до $0.2^\circ\text{C}/10$ лет). Среди них статистически значимы на 5%-уровне лишь значения в двух боксах в Тихом океане.

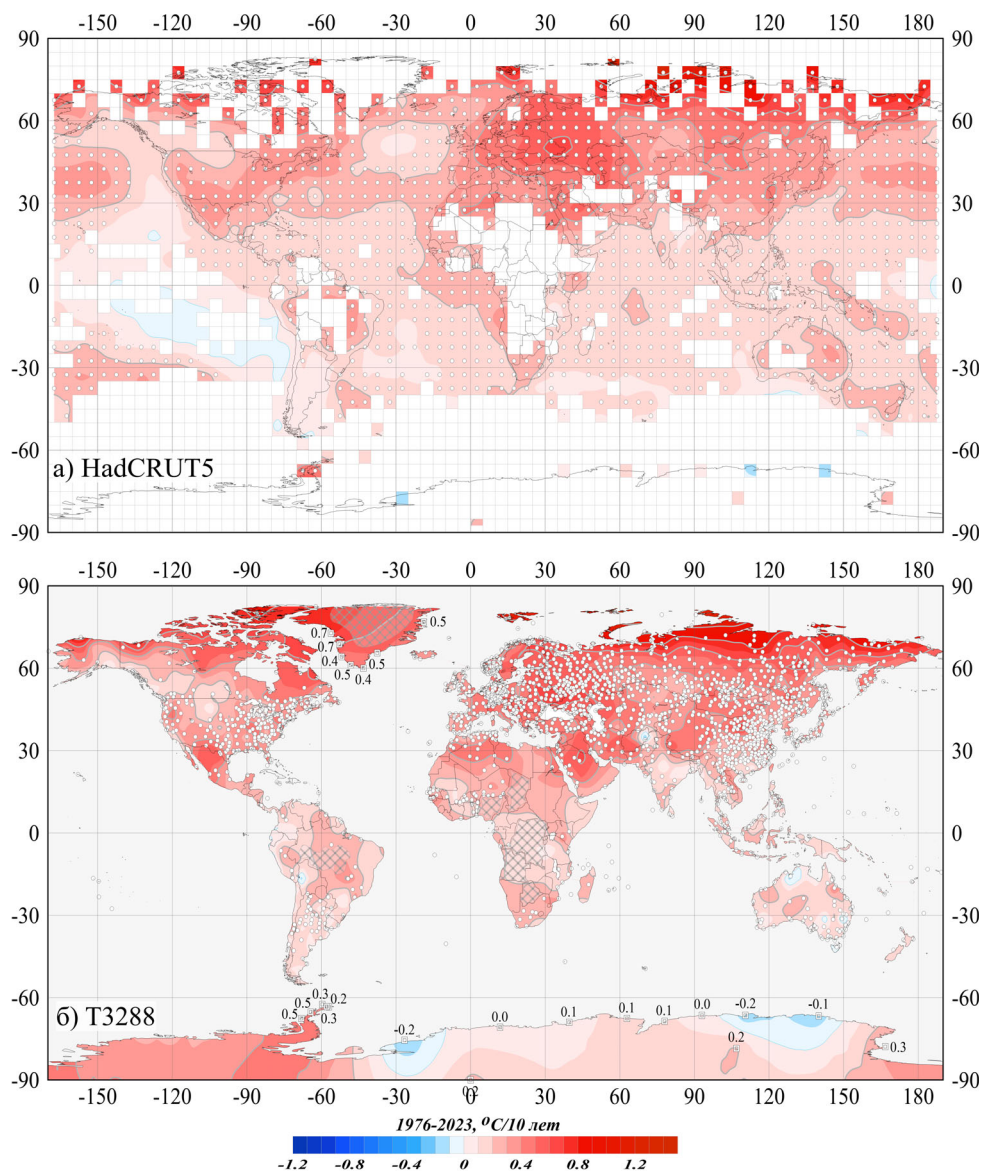


Рисунок 6. Пространственное распределение коэффициентов линейного тренда среднегодовой температуры у поверхности Земного шара, 1976-2023 гг. (°C/10 лет)

Использованы данные: а) HadCRUT5 – сеточные данные Hadley/CRU, UK (суша+море), б) T3288 – станционные данные ИГКЭ (суша). Пустыми боксами (а) и штриховкой (б) показаны области отсутствия наблюдений. В точках расположения станций Антарктиды и Гренландии приведены числовые значения коэффициентов тренда. Белыми кружками выделены боксы/станции, в которых тренд статистически значим на 1%-м уровне

Figure 6. Spatial distribution of the linear trend coefficients of the annual surface temperature, over the Globe, 1976-2023 (°C/10 years).

Data used: a) HadCRUT5 – grid data Hadley/CRU, UK (land + sea), b) T3288 – station data of IGCE (on land only). Empty boxes (a) and shading (b) show the areas of absence of observations. Numerical values of the trend coefficients are given at the points of location of stations in Antarctica and Greenland. White circles indicate boxes/stations in which the trend is statistically significant at the 1% level

Таблица 7. Частотное распределение локальных оценок тренда (1976-2023) по регионам и категориям коэффициента линейного тренда b и уровня значимости α

Table 7. Frequency distribution of local trend estimates (1976-2023) by regions and categories of linear trend coefficient b and significance level α

Регион		NN	$b < 0$			$b = 0$	$b > 0$		
			всего	$\alpha \leq 0,05$	$\alpha > 0,1$		всего	$\alpha \leq 0,05$	$\alpha > 0,1$
HadCRUT5 (суша+море)									
Земной шар		1417	2.5	0.1	2.1	0.6	96.8	87.9	6.6
Северное полушарие		887	0.3	-	0.3	0.2	99.4	93.5	4.1
Южное полушарие		530	6.2	0.2	5.1	1.3	92.5	78.7	10.9
Атлантика, 15-70N		129	-	-	-	-	100.0	96.1	2.3
Тихий океан, 20-65N		148	-	-	-	-	100.0	100.0	-
Широтные пояса	65-90N	81	-	-	-	-	100.0	97.5	-
	25-65N	521	-	-	-	-	100.0	95.2	3.3
	25S-25N	558	4.5	-	3.8	0.9	94.6	85.1	7.5
	65-25S	245	3.3	-	3.3	1.6	95.1	78.0	13.1
	90-65S	12	25.0	8.3	8.3	-	75.0	41.7	25.0
T3288 (только суша)									
Земной шар		2406	2.4	0.5	1.7	0.2	97.3	88.4	6.8
Северное полушарие		2057	0.9	0.1	0.6	0.1	99.0	92.1	5.0
Южное полушарие		349	11.5	2.3	8.0	0.9	87.7	66.5	17.2
С. Америка		404	1.5	-	1.0	-	98.5	76.2	16.6
Евразия		1462	0.5	0.1	0.3	0.1	99.5	96.7	2.0
Ю. Америка		119	10.1	1.7	7.6	1.7	88.2	65.5	18.5
Африка		100	2.0	1.0	1.0	-	98.0	92.0	5.0
Австралия		129	17.1	3.1	13.2	0.8	82.2	58.1	20.2
Антарктида		17	17,6	5,9	-	-	82,4	47,1	23,5
Европа		538	-	-	-	-	100.0	99.4	0.4
Азия		933	0.8	0.2	0.4	0.1	99.1	95.2	2.9
Арктика (суша)		145	-	-	-	-	100.0	99.3	0.7

Примечание. Процентное содержание рассчитано относительно NN, где NN – общее количество станций/боксов в регионе.

Зима (рис. 7, 7а). В географическом распределении трендов, в среднем для зимнего сезона и для каждого зимнего месяца, преобладает тенденция к потеплению. Наиболее интенсивное потепление (более 1.0 C/10 лет, $\alpha = 1\%$) – в Гренландии, на западе США, в Скандинавии, в Восточной Европе, в Юго-Восточной Азии.

Локальная максимальная скорость потепления отмечается на островах Карского и Баренцева морей (на архипелаге Земля Франца Иосифа до +2.5°C/10 лет). Значительный положительный тренд (значимый на 1% уровне) отмечен в декабре и январе на востоке Северной Америки и на севере Европы (в декабре еще на северо-востоке Евразии, а в январе еще в Якутии); в феврале – на большей части Евразии.

Тренд к похолоданию зимой просматривается в Антарктиде (за сезон в целом и в месяцы), в центре Евразии (в декабре и январе), в Северной Америке (в феврале) и в Тихом океане у побережья Южной Америки (за сезон и в отдельные месяцы). На всех континентах выделяются области слабого положительного тренда (а местами и слабого отрицательного), статистически не значимого даже на 10%-м уровне (за сезон и в месяцы).

Весна (рис. 7, 7а). Наиболее активное потепление весенних сезонов (по площади охвата и по интенсивности) отмечается в Евразии. Статистически значимый восходящий тренд (до $+1.4^{\circ}\text{C}/10$ лет на Таймыре и Чукотке, $\alpha < 0.01$) охватывает всю территорию Евразии, за исключением севера Восточно-Европейской равнины и Индии. Несколько ниже тенденция к потеплению в Гренландии и на Канадском архипелаге (до $+0.9^{\circ}\text{C}/10$ лет), на юге Северной Америки и на севере Африки (до $+0.7^{\circ}\text{C}/10$ лет). На акваториях океанов (всех, кроме Южного) – тенденция к потеплению $+0.2$ – $0.3^{\circ}\text{C}/10$ лет.

Отрицательные тренды отмечаются во все месяцы сезона в Северной Америке, Австралии и Антарктиде, в Тихом океане у берегов Южной Америки и в умеренных широтах Южного полушария. Наибольшая доля станций со значимыми (на 5% уровне) отрицательными трендами отмечена в Австралии (17.7% в мае).

Летом (рис. 7, 7а) также преобладает тенденция к потеплению. Регионы наиболее интенсивного потепления летних сезонов – Европа (до $+0.62^{\circ}\text{C}/10$ лет в августе) и Арктический пояс, 65–90N (до $+0.48^{\circ}\text{C}/10$ лет в июне). В пространственном распределении наиболее высокая скорость потепления в течение всего сезона отмечается в Европе, Малой и Передней Азии и Монголии, в Антарктиде и на территории США (до $+0.8$ – $+1.1^{\circ}\text{C}/10$ лет). Интенсивное потепление (до $+1.4^{\circ}\text{C}/10$ лет в июне), статистически значимое на 1% уровне, отмечено на Северо-Сибирской низменности и на севере Среднесибирского плоскогорья.

Отрицательные тренды обнаружены на менее 4% станций/боксов, но из них статистически значимы хотя бы на 5%-м уровне всего 0.8/0.3% (в Австралии, Северной и Южной Америках, Антарктиде). Кроме того, имеются значительные области статистически незначимого положительного тренда на всех континентах в целом за сезон и в отдельные месяцы.

Осень (рис. 7, 7а). Область наиболее интенсивного потепления – Арктика ($+1.9^{\circ}\text{C}/10$ лет, в отдельные месяцы – до $+2.5$), а также Европа, Юго-Восточная Азия и США (до 0.6 – $0.8^{\circ}\text{C}/10$ лет). Тенденция к похолоданию, как правило, статистически незначимая, отмечена в октябре на территории Канады и США; в ноябре – в Сибири и Центральной Азии. На сезонной карте им соответствуют области с практически нулевым трендом.

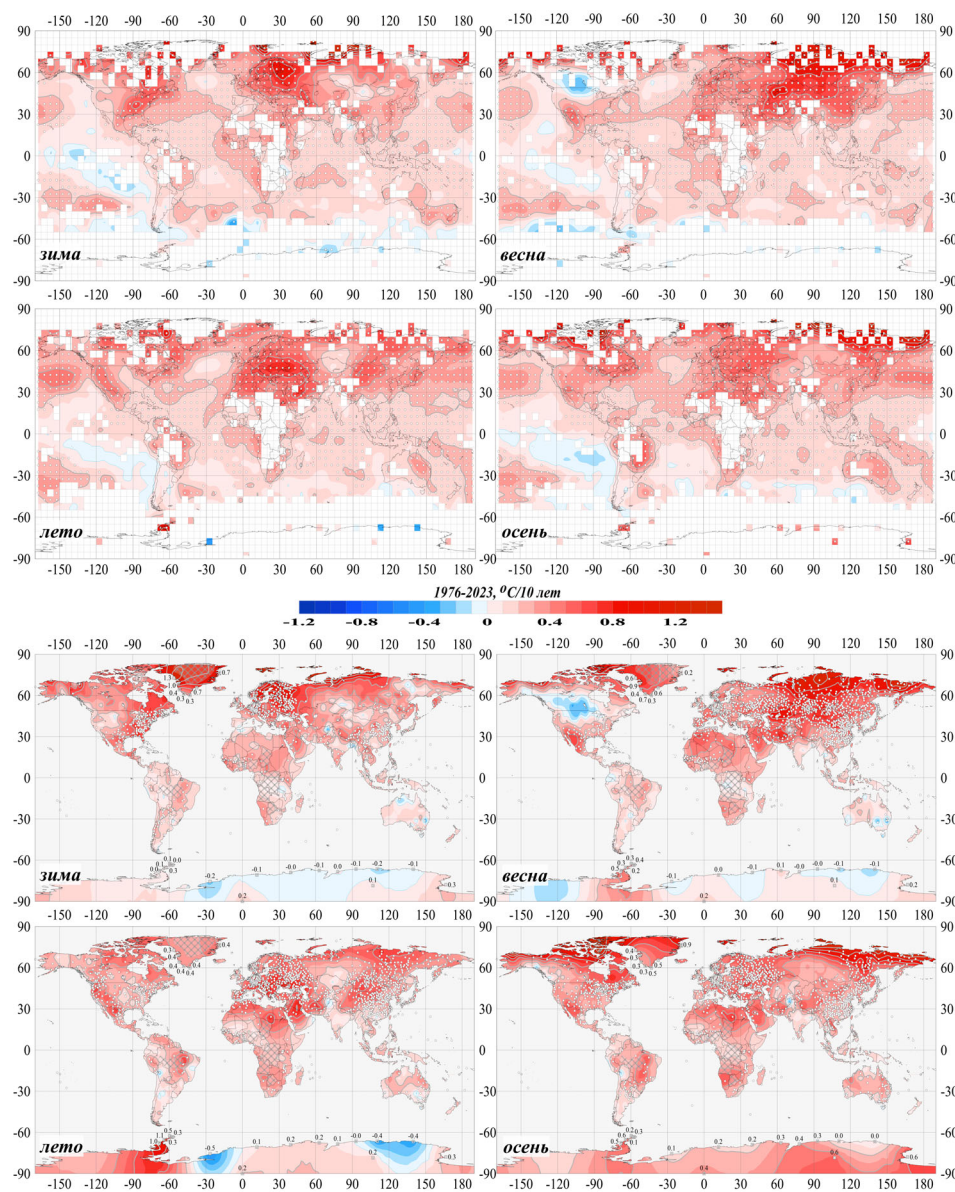


Рисунок 7. См. рис. 6, но для сезонных аномалий температуры

Figure 7. See fig. 6, but for seasonal temperature anomalies

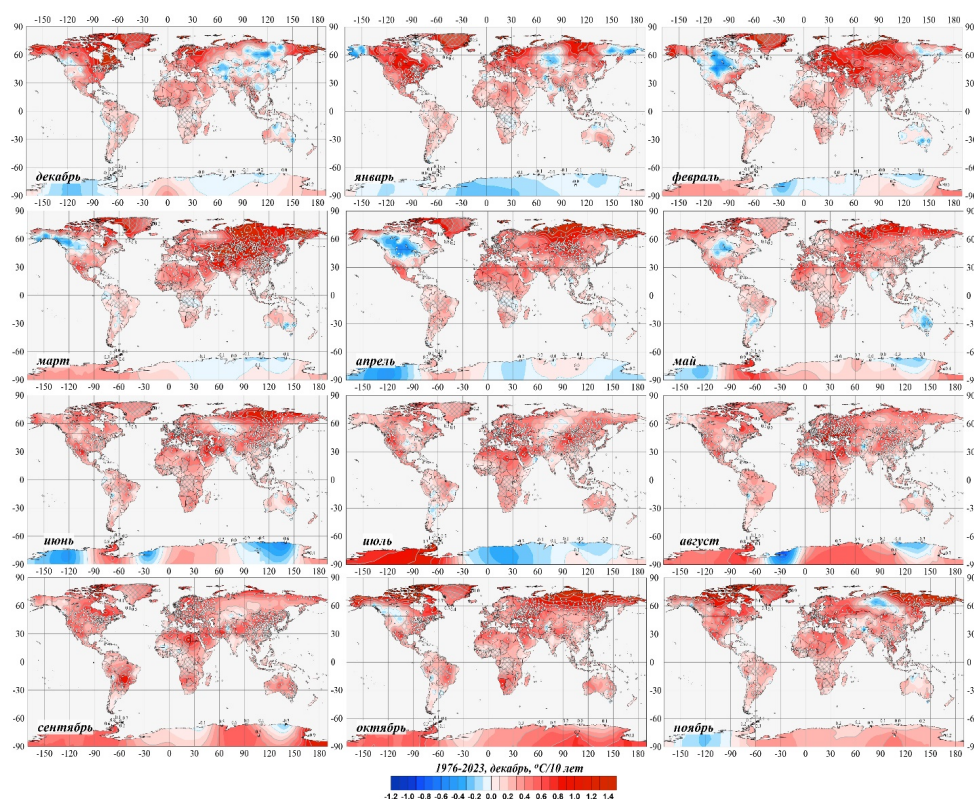


Рисунок 7а. См. рис. 6, но для среднемесячных аномалий температуры

Figure 7a. See fig. 6, but for monthly temperature anomalies

Обсуждение

Ниже анализируются особенности изменения площади Земного шара (и полушарий) под аномалиями температуры разной интенсивности (рис. 8). В зависимости от значения функции распределения $F(x \leq X)$ рассматриваются три градации аномалий, в том числе: экстремальные значения, попавшие в 5% самых холодных ($F \leq 5\%$) и в 5% самых теплых ($F \geq 95\%$), и наиболее «холодная половина» всех значений ряда ($F \leq 50\%$).

Для удобства описания будем считать, что 50-й процентиль соответствует «климатической норме» ряда. Тогда градация $F = \langle 0-50\% \rangle$ соответствует значениям «ниже нормы», а градации «0-5%» и «95-100%» соответствуют 5%-м экстремумам холода и тепла, соответственно.

Значениями «ниже нормы» и на суше, и на поверхности океанов до 1930-х гг. были заняты не менее 70-80% территории, в 1940-х – лишь 50-60%, к 1970-м – опять 70-80%, а с середины 1970-х до настоящего времени эта величина уменьшилась до 20%.

Площадь под «5%-ми экстремумами холода» до 1920-х гг. составляла в Северном полушарии 20-40% всей территории (в Южном – до 1910-х), а к

настоящему времени уменьшилась практически до нуля – эти особенности сохраняются во все сезоны. Площадь под «5%-ми экстремумами тепла», напротив, до 1970-х не превышала 5-10% всей территории, а затем увеличилась в Северном полушарии до 30%, в Южном – до 20%. Сезонные особенности на континентах, как и на поверхности океанов, проявляются слабо (здесь не показаны).

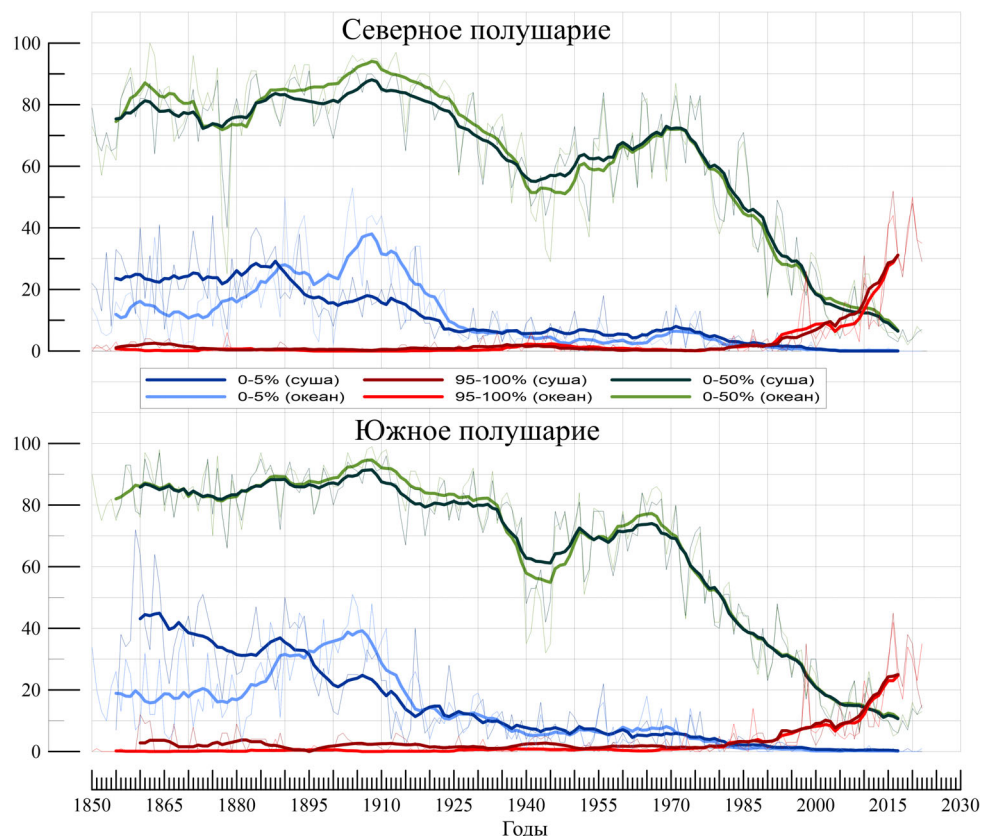


Рисунок 8. Доля площади Северного (вверху) и Южного (внизу) полушарий под аномалиями: 0-5%, 0-50%, 95-100%, в среднем за год (для суши и акваторий океанов)

Figure 8. Proportion of the area of the Northern (top) and Southern (bottom) hemispheres under annual anomalies: 0-5%, 0-50%, 95-100% (data SAT and SST were used)

На рис. 9 показано изменение самих значений процентилей температуры (5-, 50- и 95-го) за скользящие 100-летние периоды (с шагом 1 год), начиная с периода 1850-1949 гг. и заканчивая периодом 1923-2022 гг. (всего таких периодов 74).

Как видно, значение 50-го перцентиля таких столетних отрезков ряда уже с конца 50-х годов прошлого столетия увеличивалось монотонно, от -0.82°C до -0.52°C . После 1970-х и 2010-х годов заметно определенное ускорение этой тенденции (повышение скорости увеличения). 95-й перцентиль, в отличие от 50-го, вплоть до конца 1970-х сохранялся на уровне -0.52°C , после чего стал резко увеличиваться и к настоящему времени достиг отметки $+0.25^{\circ}\text{C}$. Наконец, 5-й перцентиль сохранялся неизменным еще дольше (до

начала 2000-х: -1.06°C) и к настоящему времени достиг -0.82°C . Таким образом, скачкообразные повышения температуры в 2009-2010 и 2015-2016 гг. проявляются в ходе всех процентилей, как, впрочем, и пауза 2000-х.

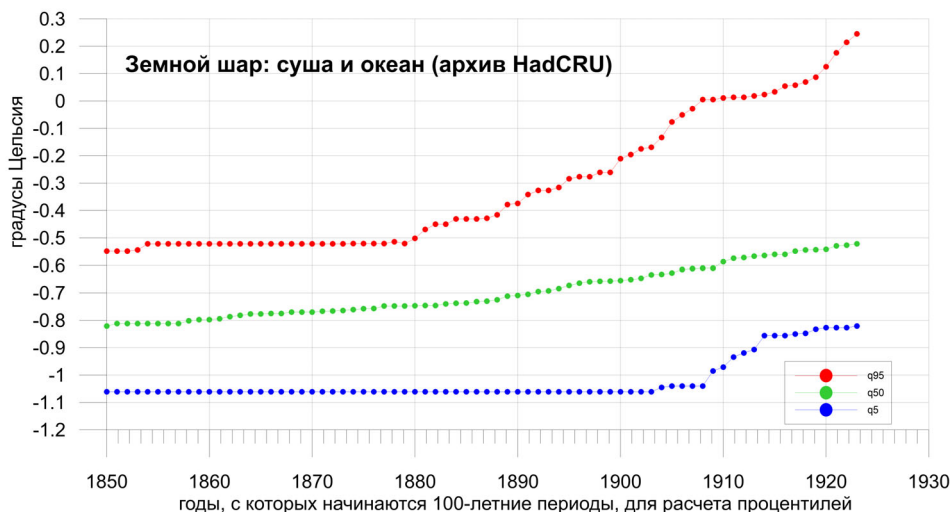


Рисунок 9. Изменение процентилей температуры (5, 50 и 95%) за скользящие 100-летние периоды (на оси абсцисс показаны конечные годы периодов оценивания).

Figure 9. Variation of temperature percentiles (5, 50, and 95%) over the moving 100-years periods (axis OX show ending years of estimation periods)

Уже из этих результатов можно заключить, что повышение температуры и, следовательно, повышение скользящих оценок процентилей, при использовании их фиксированных значений (как в данном исследовании), приводит к занижению числа точек под кривой распределения и, напротив, к увеличению их над кривой. Это, в свою очередь, означает снижение оценки площади под отрицательными аномалиями (градации «около нормы» и «экстремумы холода») и завышение ее под положительными (градация «экстремумы тепла»).

Хорошей иллюстрацией к этому выводу служит рис. 10, где представлен ход коэффициентов тренда площади под аномалиями трех введенных выше категорий за скользящие периоды длительностью 30, 50 и 70 лет с шагом 10 лет.

Расчет выполнен, по данным Hadley/CRU, для Северного и Южного полушарий: CRUTEM5 (SAT, суша) и HadSST4 (SST, море). Отметим, что наиболее общую картину изменений дают скользящие тренды с периодом 70 лет, а 30- и 50-летние тренды лишь уточняют некоторые детали для суши и океанов.

В целом картина соответствует ходу пространственно-осредненной температуры (рис. 5-6) и сформулированному выше выводу (рис.9). Особенно ярко это видно на последнем этапе резкого потепления и самых крупных последних рекордов, начиная с ~2010 г. Действительно, синие и зеленые кривые направлены вниз (тренд площади под отрицательными аномалиями отрицательный и усиливается), а красные кривые – вверх (тренд площади под экстремумами тепла положительный и также усиливается).

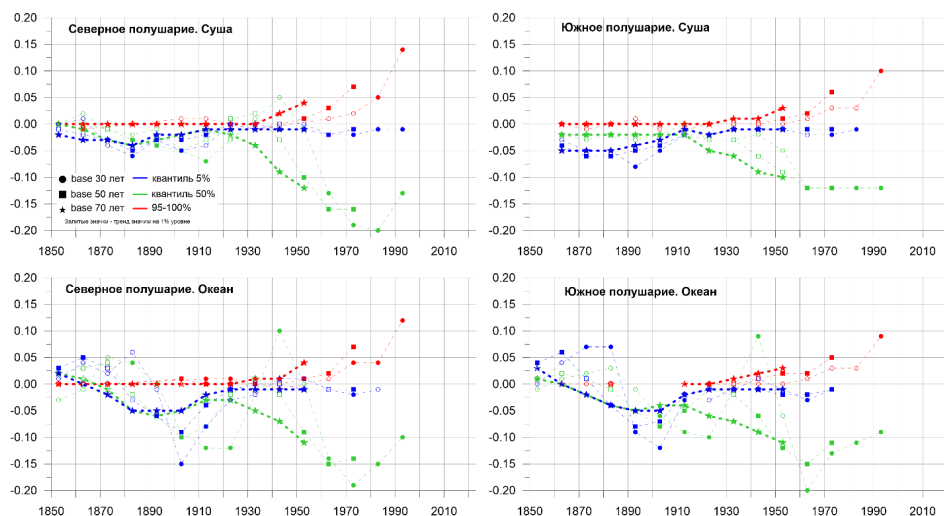


Рисунок 10. Скользящие тренды площади под аномалиями трех категорий с периодами оценивания 30, 50, 70 лет и с шагом 10 лет (см. разъяснения в тексте)
Figure 10. Moving trends of the area under three anomaly categories with estimation periods of 30, 50 and 70 years and with a step of decade (see explanation in the text)

Закключение

1. В соответствии с полученными оценками 2023 год был самым теплым в истории наблюдений (с 1850 года) по всем четырем наборам данных и трем глобальным территориям: Земной шар, Северное и Южное полушарии. В целом по Земному шару и за 2023 год глобальная аномалия температуры составила: $+0.533^{\circ}\text{C}$ (HadCRUT5, суша+море), $+0.738^{\circ}\text{C}$ (T3288, суша), $+0.729^{\circ}\text{C}$ (CRUTEM5, суша) и $+0.469^{\circ}\text{C}$ (HadSST4, море). Базовый период при расчете аномалий: 1991-2020 гг.

2. В 2023 г. превышение глобальной температуры над «доиндустриальным уровнем» по линии тренда составило, по тем же данным, 1.20°C , 1.45°C , 1.42°C , 1.09°C , соответственно. Для сравнения, соответствующие значения в экстремальном 2016 году были: 1.04°C , 1.22°C , 1.19°C , 0.97°C .

3. В 2023 г. на территории Земного шара, попрежнему, доминируют положительные аномалии: на них приходится около 90% всех данных (87% станций / 89% боксов). Около 50% этих данных оказались выше 95-го процентиля (5%-е экстремумы тепла) и более 15% стали для своих пунктов рекордными (абсолютные максимумы).

4. Практически во всех крупных регионах мира (континенты, океаны, широтные зоны), как и глобально (Земной шар, полушария), экстремально теплые условия сохранялись в течение всего года (вероятность не превышения оставалась не ниже 85%). Единственное исключение: Антарктический пояс (включая Антарктиду) плюс Австралия, где вероятность не превышения сезонных аномалий опускалась в первом полугодии до 19-20%. Однако, начи-

ная с июня, подавляющее большинство рассмотренных регионов каждый месяц и сезон обновляли свои температурные рекорды.

5. Локальные оценки линейного тренда (1976-2023 гг.) уверенно подтверждают тенденцию потепления – 97% всех коэффициентов тренда положительны. Наибольшая интенсивность потепления отмечается в Арктическом поясе (65-90N) и на территории Европы, где средняя по территории региона скорость потепления равна 0.563°C/10 лет и 0.498°C/10 лет, соответственно.

6. Современное глобальное потепление протекает особенно активно на континентах Северного полушария в холодный период года. При этом в феврале-апреле усиление потепления обеспечивает Евразия, а в ноябре-декабре – Северная Америка.

7. За период современного глобального потепления (1976-2023 гг.) среднегодовая глобальная температура увеличилась (по линии тренда) на 0.925°C. За это время при использовании фиксированных значений процентилей с базовым периодом 1911-2022 гг. площадь под аномалиями «ниже нормы» ($F \leq 50\%$) уменьшилась с 70-80 до 10-20% всей территории (на суше и акваториях океанов). За тот же период площадь под 5-м процентилем (экстремумы холода) уменьшилась с 15-20% практически до нуля, а над 95-м процентилем (экстремумы тепла) – напротив, увеличилась с нуля до 20-30%. В 2023 и 2016 гг. (2 самых теплых года) площадь 5%-х экстремумов тепла в обоих полушариях подскочила до 45-50% всей территории Земного шара.

8. В целом по Земному шару и за год современное приповерхностное потепление 1976-2023 гг. на суше протекает вдвое активнее, чем на поверхности океанов, в Северном полушарии вдвое интенсивнее, чем в Южном, и ускорилось в сравнении с последним столетием в Северном полушарии в 2.1-2.3 раза (над сушей и на поверхности океанов). В Южном полушарии над сушей коэффициент ускорения существенно ниже (1.6), а на акваториях океанов ускорения практически не произошло.

Благодарности

За поддержку, оказанную в подготовке разных разделов этой работы, авторы выражают благодарность проекту «Мониторинг глобального климата и климата Российской Федерации и ее регионов, включая Арктику. Развитие и модернизация технологий мониторинга». План научно-исследовательских и технологических работ НИУ Росгидромета на 2020-2024 гг., НИР 3.2.

Список литературы

Груза, Г.В., Ранькова, Э.Я., Рочева, Э.В., Самохина, О.Ф. (2016) Климатические особенности температурного режима у поверхности земли в 2015 г., *Фундаментальная и прикладная климатология*, № 1, с. 104-136.

Груза, Г.В., Ранькова, Э.Я., Рочева, Э.В., Самохина, О.Ф. (2017а) Особенности температурных аномалий у поверхности земного шара в 2016 году, *Фундаментальная и прикладная климатология*, № 1, с. 124-146.

Груза, Г.В., Ранькова, Э.Я., Рочева, Э.В. (2017б) Методика «Мониторинг изменений климата земного шара: приземная температура» и результаты ее испытания, *Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов*, № 44, с. 3-11.

Груза, Г.В., Ранькова, Э.Я., Рочева, Э.В., Самохина, О.Ф., Корнева, И.А., Алешина, М.А. (2018) Особенности температурного режима у поверхности Земного шара в 2017 г., *Фундаментальная и прикладная климатология*, № 1, с. 112-136.

Груза, Г.В., Ранькова, Э.Я., Корнева, И.А., Самохина, О.Ф., Щенин, М.В. (2019) Особенности температурного режима у поверхности Земного шара в 2018 году, *Фундаментальная и прикладная климатология*, № 1, с. 97-127.

Груза, Г.В., Ранькова, Э.Я., Корнева, И.А., Самохина, О.Ф., Антипина, У.И. (2020) Особенности температурного режима у поверхности Земного шара в 2019 году, *Фундаментальная и прикладная климатология*, № 1, с. 89-122.

Груза, Г.В., Ранькова, Э.Я., Самохина, О.Ф. (2021) Особенности температурного режима у поверхности Земного шара в 2020 г., *Фундаментальная и прикладная климатология*, т. 7, № 2, с. 28-58, doi:10.21513/2410-8758-2021-2-28-58.

ИГКЭ (2023) *Мониторинг изменений климата Земного шара*, URL: <http://www.igce.ru/climate change>.

Ранькова, Э.Я., Самохина, О.Ф., Антипина, У.И. (2022) Особенности температурного режима у поверхности Земного шара в 2021 году, *Фундаментальная и прикладная климатология*, т. 8, № 2, с. 258-290, doi: 10.21513/2410-8758-2022-2-258-290.

Ранькова, Э.Я., Самохина, О.Ф., Антипина, У.И., Смирнов, В.Д. (2023) Особенности температурного режима у поверхности Земного шара в 2022 году, *Фундаментальная и прикладная климатология*, т. 9, № 3, с. 330-368, doi:10.21513/2410-8758-2023-3-330-368.

Парижское соглашение в рамках Рамочной конвенции ООН об изменении климата (2015) URL: https://unfccc.int/files/meetings/paris_nov_2015/application/pdf/paris_agreement_russian_.pdf.

ЦМКП (2016) *Решение Центральной методической комиссии по гидрометеорологическим и гелиогеофизическим прогнозам от 20 декабря 2016 г.*, URL: <http://method.meteorf.rum>.

JMA (2023) *Global temperature for 2023 to be the highest since 1891(Preliminary)*, URL: https://ds.data.jma.go.jp/tcc/data/news/press_20231222.pdf.

NASA (2024) *NASA Analysis Confirms 2023 as Warmest Year on Record*, URL: <https://www.nasa.gov/news-release/nasa-analysis-confirms-2023-as-warmest-year-on-record>.

The Copernicus Climate Change Service (C3S) (2023) *Global Climate Highlights*, URL: <https://climate.copernicus.eu/global-climate-highlights-2023>.

NOAANCEI National Centers for Environmental Information (2024a) *Assessing the Global Climate in 2023, retrieved on April 15, 2021*, URL: from <https://www.ncei.noaa.gov/news/global-climate-202312>.

NOAANCEI National Centers for Environmental Information (2024b) *Monthly Global Climate Report for Annual 2023, published online January 2024, retrieved on February 9, 2024*, URL: <https://www.ncei.noaa.gov/access/monitoring/monthly-report/global/202313>.

WMO (2023a) *2023 shatters climate records, with major impacts*, Press Release retrieved on February 9, 2024, URL: <https://wmo.int/news/media-centre/2023-shatters-climate-records-major-impacts>.

WMO (2023b) *WMO confirms that 2023 smashes global temperature record*, Press Release retrieved on February 9, 2024, URL: <https://wmo.int/news/media-centre/wmo-confirms-2023-smashes-global-temperature-record>.

References

Gruza, G.V., Rankova, E.Ya., Rocheva, E.V., Samokhina, O.F. (2016) Osobennosti temperaturnykh anomalii u poverkhnosti zemnogo shara v 2015 godu [Climatic features of the temperature regime at the Earth's surface in 2015], *Fundamental and Applied Climatology*, no. 1, pp. 104-136.

Gruza G.V., Rankova, E.Ya., Rocheva, E.V., Samokhina, O.F. (2017a) Osobennosti temperaturnykh anomalii u poverkhnosti zemnogo shara v 2016 godu [Features of temperature anomalies near the surface of the globe in 2016], *Fundamental and Applied Climatology*, no. 1, pp. 124-146.

Gruza, G.V., Rankova, E.Ya., Roch'eva, E.V. 2017(b) Methodology "Monitoring of climate changes of the globe: surface temperature" and the results of its testing [Metodika «Monitoring izmeneniy klimata zemnogo shara: prizemnaya temperatura» i rezultaty eye ispytaniya], *Results of testing of new and improved technologies, models and methods of hydrometeorological forecasts*, 2017, no. 44, pp. 3-11.

Gruza, G.V., Rankova, E.Ya., Rocheva, E.V., Samokhina, O.F., Korneva, I.A., Alyoshina, M.A. (2018) Osobennosti temperaturnogo rezhima u poverkhnosti Zemnogo shara v 2017 g. [Features of the temperature regime at the surface of the Globe in 2017], *Fundamental and Applied Climatology*, no. 1, pp. 112-136.

Gruza G.V., Rankova, E.Ya., Korneva I.A., Samokhina O.F., Shchenin M.V. (2019) Osobennosti temperaturnogo rezhima u poverkhnosti Zemnogo shara v 2018 g. [Features of the temperature regime at the surface of the globe in 2018], *Fundamental and Applied Climatology*, no. 1, pp. 97-127.

Gruza G.V., Rankova, E.Ya., Korneva, I.A., Samokhina, O.F., Antipina, U.I. (2020) Osobennosti temperaturnogo rezhima u poverkhnosti Zemnogo shara v

2019 g. [Features of the temperature regime at the surface of the globe in 2019], *Fundamental and Applied Climatology*, no. 1, pp. 89-122.

Gruza, G.V., Rankova, E.Ya., Samokhina, O.F. (2021) Osobennosti temperaturnogo rezhima u poverkhnosti Zemnogo shara v 2020 g. [Features of the temperature regime at the surface of the Globe in 2020], *Fundamental and Applied Climatology*, vol. 7, no. 2, pp. 28-58, doi:10.21513/2410-8758-2021-2-28-58.

IGCE (2023b) *Monitoring izmeneniy klimata Zemnogo shara* [Monitoring of global climate change], URL: <http://www.igce.ru/climatechange>.

Rankova, E.Ya., Samokhina, O.F., Antipina, U.I. (2022) Osobennosti temperaturnogo rezhima u poverkhnosti Zemnogo shara v 2021 g. [Features of the temperature regime at the surface of the Globe in 2021], *Fundamental and Applied Climatology*, vol. 8, no. 2, pp. 258-290, doi: 10.21513/2410-8758-2022-2-258-290.

Rankova, E.Ya., Samokhina, O.F., Antipina, U.I. Smirnov, V.D. (2023) Osobennosti temperaturnogo rezhima u poverkhnosti Zemnogo shara v 2022 g. [Features of the temperature regime at the surface of the globe in 2022], *Fundamental and Applied Climatology*, vol. 9, no. 3, pp. 330-368, doi:10.21513/2410-8758-2023-3-330-368.

Parizhskoye soglasheniye v ramkakh Ramochnoy konventsii OON ob izmenenii klimata [The Paris Agreement under the UNFC on Climate Change] (2015) URL: https://unfccc.int/files/meetings/paris_nov_2015/application/pdf/paris_agreement_russian_.pdf.

CMCP (2016) *Resheniye Tsentralnoy metodicheskoy komissii po gidrometeorologicheskim i geliogeofizicheskim prognozam ot 20 dekabrya 2016 g.* [Decision of the Central Methodological Commission on Hydrometeorological and Heliogeophysical Forecasts dated December 20, 2016], URL <http://method.meteorf.ru>.

JMA (2023) *Global temperature for 2023 to be the highest since 1891 (Preliminary)*, URL: https://ds.data.jma.go.jp/tcc/data/news/press_20231222.pdf.

NASA (2024) *NASA Analysis Confirms 2023 as Warmest Year on Record*, URL: <https://www.nasa.gov/news-release/nasa-analysis-confirms-2023-as-warmest-year-on-record>.

The Copernicus Climate Change Service (C3S) (2023) Global Climate Highlights, URL: <https://climate.copernicus.eu/global-climate-highlights-2023>.

NOAANCEI National Centers for Environmental Information (2024a) *Assessing the Global Climate in 2023, retrieved on April 15, 2021*, URL: <https://www.ncei.noaa.gov/news/global-climate-202312>

NOAANCEI National Centers for Environmental Information (2024b) *Monthly Global Climate Report for Annual 2023, published online January 2024, retrieved on February 9, 2024*, URL: <https://www.ncei.noaa.gov/access/monitoring/monthly-report/global/202313>.

WMO (2023a) *2023 shatters climate records, with major impacts*, Press Release retrieved on February 9, 2024, URL: <https://wmo.int/news/media-centre/2023-shatters-climate-records-major-impacts>.

WMO (2023b) *WMO confirms that 2023 smashes global temperature record*, Press Release retrieved on February 9, 2024, URL: <https://wmo.int/news/media-centre/wmo-confirms-2023-smashes-global-temperature-record>.

Статья поступила в редакцию (Received): 04.03.2024.

Статья доработана после рецензирования (Revised): 26.03.2024.

Принята к публикации (Accepted): 16.04.2024.

Для цитирования / For citation:

Ранькова, Э.Я., Самохина, О.Ф., Антипина, У.И., Смирнов, В.Д. (2024) Особенности температурного режима у поверхности Земного шара в 2023 году, *Фундаментальная и прикладная климатология*, т. 10, № 2, с. 288-323, doi:10.21513/2410-8758-2024-2-288-323.

Rankova, E.Ya., Samokhina, O.F., Antipina, U.I., Smirnov, V.D. (2024) Features of the surface temperature regime over the Globe in 2023, *Fundamental and Applied Climatology*, vol. 10, no. 2, pp. 288-323, doi:10.21513/2410-8758-2024-2-288-323.

ФУНДАМЕНТАЛЬНАЯ И ПРИКЛАДНАЯ КЛИМАТОЛОГИЯ

Полное библиографическое описание всех статей журнала представлено в Научной электронной библиотеке **elibrary.ru** с целью формирования Российского индекса научного цитирования (**РИНЦ**).

Журнал входит в **ПЕРЕЧЕНЬ ВАК** рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук.

Все публикуемые статьи рецензируются. В среднем период рассмотрения статей при однократном рецензировании составляет 4 месяца.

Осуществляется анонимное рецензирование одним-двумя рецензентами как из числа членов редколлегии журнала, так и внешними рецензентами. Все публикуемые статьи проходят проверку на плагиат с помощью <https://www.antiplagiat.ru/>, результаты которой документируются и хранятся в архиве.

Редакция журнала «Фундаментальная и прикладная климатология» признает обязательными для соблюдения авторами, рецензентами, членами редколлегии и сотрудниками редакции требования «**Кодекса этики научных публикаций**», разработанного и утвержденного Комитетом по этике научных публикаций, а также заявляет об отсутствии злоупотреблений служебным положением в деятельности редакции.

Публикация в журнале бесплатная.

веб-страница: <https://fa-climatology.ru>.

FUNDAMENTAL AND APPLIED CLIMATOLOGY

Full bibliographic description of all articles published in the journal is presented in the Scientific Electronic Library (elibrary.ru) for the formation of the Russian Science Citation Index (RSCI).

The journal is included into the List of Peer-reviewed Scientific Journals (compiled by Supreme Qualification Council), where basic scientific results of PhD and DSc dissertations must be published.

All papers submitted are peer-reviewed. The average review period for a single review is 4 months.

Anonymous review is carried out by one or two reviewers from among the members of the Editorial Board of the journal, as well as by external reviewers. All published articles are checked for plagiarism using <https://www.antiplagiat.ru/>, the results of which are documented and stored in the archive.

The Editorial Office of "Fundamental and applied climatology" finds it obligatory for authors, reviewers, editorial board members and editorial staff to meet requirements of the "Code of Ethics for Scientific Publications", developed and approved by the Committee on Scientific Publications Ethics as well as declares no conflicts of interest in the activities of the Editorial Board.

Publication in the journal is free of charge.

web-page: <https://fa-climatology.ru>.
