

ISSN 2410-8758



Фундаментальная и прикладная климатология

Fundamental and
Applied Climatology

ТОМ 9 № 3

2023

Фундаментальная и прикладная климатология том 9 № 3 / 2023 г.

Federal Service
for Hydrometeorology
and Environmental
Monitoring (Roshydromet)

ISSN 2410-8758

FUNDAMENTAL AND APPLIED
CLIMATOLOGY

Volume 9 № 3

Moscow 2023

**ФУНДАМЕНТАЛЬНАЯ И ПРИКЛАДНАЯ
КЛИМАТОЛОГИЯ**

Том 9 № 3 2023 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 9 № 3

Москва 2023

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), В.М. Катцов (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), V.M. Kattsov (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

ИССЛЕДОВАНИЯ И ОБЗОРЫ

Вязилов Е.Д.

Развитие средств адаптации к экстремальным явлениям,
связанным с изменениями климата.....251

Гордов Е.П.

Цифровые двойники систем и процессов
как инструмент современной климатологии.....269

Павлова В.Н., Карачёнова А.А., Романенков В.А.

Оценка изменений агроклиматических ресурсов
в Центральной Азии и сопредельных областях России.....298

Толстых М.А.

Применение моделей прогноза погоды для моделирования
климата.....318

МОНИТОРИНГ КЛИМАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

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

Особенности температурного режима у поверхности
земного шара в 2022 году.....330

CONTENTS

STUDIES AND REVIEWS

Viazilov E.D.

Development of tools for adaptation to extreme events associated
with climate change.....251

Gordov E.P.

Digital twins of systems and processes as a mean
of modern climatology.....269

Pavlova V.N., Karachenkova A.A., Romanenkov V.A.

Assessment of changes in agro-climatic resources
in Central Asia and adjacent areas of Russia.....298

Tolstykh M.A.

Application of numerical weather prediction models
for climate modelling.....318

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 2022.....330

Развитие средств адаптации к экстремальным явлениям, связанным с изменениями климата

Е.Д. Вязилов

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

Адрес для переписки: vjaz@meteo.ru

Реферат. Гидрометеорологическое обеспечение (ГМО) на основе современных ИТ-достижений, направленное на развитие новой парадигмы ГМО, провозглашенной ВМО и связанной с прогнозом воздействий и выдачей рекомендаций для принятия решений, только развивается и имеет определенные барьеры. Недостаточна осведомленность руководителей о возможных воздействиях экстремальных явлений на деятельность предприятий и отсутствие формализованных сведений о воздействиях и рекомендаций для принятия решений. Существующие сайты с гидрометеорологической информацией ориентированы на самообслуживание. Огромные объемы информации требуют существенного повышения уровня автоматизации и ее использования. В статье рассмотрены комплексные предложения по цифровой трансформации ГМО руководителей предприятий. Предлагается:

- развивать интеграцию разнородных и распределенных данных;
- создавать сквозную технологию получения климатических обобщений, выявления трендов и экстремальных явлений на основе конвейерной технологии – от наблюдения до принятия решений;
- организовать автоматическое доведение штормовых предупреждений за счет использования базы данных локальных пороговых значений по уровням опасности для каждого предприятия и вида деятельности на нем для идентификации экстремальных явлений;
- прогнозировать воздействия экстремальных явлений,
- выдавать рекомендации;
- оптимизировать решения.

С помощью конвейерной технологии можно организовать непрерывное производство информационной продукции для ГМО.

Ключевые слова. Гидрометеорологическое обеспечение, персонализация доставки данных, прогноз воздействий, выдача рекомендаций, адаптация.

Development of tools for adaptation to extreme events associated with climate change

E.D. Viazilov

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

Correspondence address: *vjaz@meteo.ru*

Abstract. Hydrometeorological support (HMS) based on modern IT achievements, aimed at the development of the new HMS paradigm proclaimed by WMO and related to the impact forecast and the issuance of recommendations for decision-making is only developing and has certain barriers. There is insufficient awareness of enterprises heads about the possible impacts of extreme events on the activities of enterprises and the lack of formalized information about impacts and recommendations for decision-making. Existing web sites with hydrometeorological information are oriented towards self-service. Huge amounts of information require a significant increase in the level of automation of its use. The article for the first time considers comprehensive proposals for the digital transformation of HMS for enterprises leaders. It is proposed:

- develop the integration of heterogeneous and distributed data;
- create an end-to-end technology for obtaining climate generalizations, identifying trends and extreme events based on a pipeline technology - from observation to decision-making;
- to organize automatic storm Messages deliver by using a database of local threshold values for dangerous levels for each enterprise and type of activity on it;
- predict impacts extreme events;
- issue recommendations for decision-making;
- assess damage, calculate the cost of preventive actions and optimize decisions.

With the help of the pipeline technology, it is possible to organize the continuous production of information products for HMS.

Keywords. Hydrometeorological support, personalization of data delivery, impacts prediction, issuing recommendations, adaptation.

Введение

Для адаптации к экстремальным явлениям руководителям предприятий необходимо знать, как тенденции изменения климата на ближайшие десятилетия повлияют на стратегическое развитие промышленных районов, строительство крупных защитных сооружений; что может произойти под воздействиями экстремальных явлений и что надо делать, чтобы уменьшить или предотвратить эти воздействия. Развитие адаптации предприятий и населения с учетом дефицита сотрудников требует развития автономного персонализированного обслуживания. Гидрометеорологическое обеспечение (ГМО)

требует использования климатических обобщений, сверхдолгосрочных, долгосрочных и краткосрочных прогнозов, данных наблюдений, а также информации из других секторов, необходимой для принятия решений и касающейся управления предприятиями, экономики, финансов, социальной сферы.

Климатические показатели (повторяемость, вероятность явлений, аномалии от климатических значений) учитываются всегда при любом экстремальном явлении и даже в обычных условиях прогнозисты говорят «ситуация близка к климатической норме». Нельзя адаптировать предприятия к климатическим событиям, не повысив их осведомленность о проведении тактических и оперативных мероприятий в период возникновения экстремальных погодных явлений. Предупреждение, которое не доставлено или не понято, не может быть использовано. Большинство людей, переживших крупные стихийные бедствия, говорят, что видели штормовое предупреждение, но они не знали, что может произойти и что надо делать. Только комплексный подход на основе учета всех типов данных – климатических, прогностических и наблюдаемых – для каждого предприятия позволит правильно организовать проведение стратегических, тактических и оперативных мероприятий до, в период и после явления.

Руководители предприятий и органов государственного управления несут полную ответственность за все, что происходит на объекте. Если они не учтут увеличение вероятности наводнений и заранее не подготовятся к нему, то ущерб в период наводнений будет выше. Если не использовали прогностические и наблюдаемые данные для проведения тактических и оперативных мероприятий, то ущерб увеличится тоже.

В последнее десятилетие данные стали большими, распределенными и неоднородными, они не должны быть привязаны к конкретным программным средствам и численным моделям. Главная цель развития происходящей сейчас цифровой трансформации в области ГМО – это повышение эффективности бизнес-процессов предприятий, зависящих от происходящих экстремальных явлений.

Уже сейчас имеется значительное количество источников данных по различным сферам Земли, которые можно использовать для адаптации. Многие руководители предприятий еще недостаточно хорошо ориентируются в источниках гидрометеорологической информации, включая изменения климата. Доставка данных в цифровом виде одновременно наблюдаемых, прогностических данных и климатических обобщений пользователям в одном интерфейсе пока реализована только в отдельных системах, например, (Copernicus Open Access Hub, 2017; ЕСИМО, 2013).

Развитие ГМО руководителей различных отраслей должно строиться на современных ИТ-достижениях. Это интеграция данных; информационное производство для выявления трендов, экстремальных явлений, расчетов показателей (пожароопасности, ветроустойчивости, комфортности погоды и климата и других); подготовка цифровой продукции; получение климатических обобщений; организация автоматического доведения информации; прогнозирование возможных воздействий экстремальных явлений, получение реко-

мендаций для принятия решений. Необходимо организовать автономную сквозную систему обработки гидрометеорологических данных – «от наблюдения до принятия решений» (Allis at al., 2019; Вязилов, 2022).

Создание новых средств для работы с данными, таких, как регулярный обмен данными между системами ГМО и информационными системами предприятий; автоматическая доставка данных, когда это необходимо, – это ближайшее будущее. Руководителям предприятий необходима персонализированная оперативная доставка необходимых им климатических обобщений, прогностических и наблюдаемых данных, информации о возможных воздействиях экстремальных явлений на предприятия и население. Все это должно повысить осведомленность руководителей о складывающейся гидрометеорологической обстановке (Вязилов, Чуняев, 2015).

Перспективные методы использования гидрометеорологической информации руководителями предприятий

Сквозная обработка данных

Сегодня гидрометеорологам доступен огромный набор инструментов и технологий, которые могут использоваться для ГМО. Непрерывная интеграция данных создает определенные сложности при управлении запусками этих инструментов, отслеживании их работоспособности. Результаты работы каждого инструмента применяются другими программными компонентами, либо передаются пользователям. Это достаточно сложный процесс, который приводит к неэффективной схеме обработки данных. Возникает многократное дублирование данных не только в различных странах, но и даже в одной стране. Создаются похожие базы данных (БД), отличающиеся как по составу параметров, так и по периодам наблюдений, методам их обработки. В существующих схемах получение цифровой продукции еще не оформлено в виде сервисов сквозной схемы обработки данных.

При адаптации к экстремальным явлениям должны широко использоваться различные виды данных – результаты наблюдений, штормовые предупреждения, анализы, прогнозы различной заблаговременности, включая климатические обобщения различного пространственно-временного масштаба. Руководители используют эту информацию через экспертов. И только некоторые организации регулярно получают, загружают и включают данные в автоматизированные бизнес-процессы предприятия. Например, ПАО «ГАЗПРОМ», НК «РОСНЕФТЬ» имеют соответствующие подразделения, занимающиеся ГМО разведки и организации добычи нефти и газа. Сейчас они получают климатические обобщения в виде электронных пособий, прогностические данные в виде карт изолиний или текста для точки, наблюдаемые данные в виде карт значений параметров или таблицы с информерами для точки. Эти организации готовы к автоматизированному обслуживанию. У них есть собственные специалисты по интерпретации полученной информации. Климатические обобщения используются для прогнозов изменений кли-

мата и моделирования воздействий на предприятия в основном при строительстве крупных промышленных объектов или развитии новых районов добычи. Наступил момент, когда гидрометеорологическая информация должна быть включена в автоматизированные бизнес-процессы предприятий. Например, при планировании доставки продукции и материалов требуется выявление «окон погоды» для транспортировки особо опасных, или ценных, или крупногабаритных грузов. Затем на выбранный наиболее безопасный период доставки составляется долгосрочный прогноз погоды по маршруту транспортировки, уточняется период и принимается решение о дате отхода транспорта. После начала транспортировки производится оперативное обеспечение транспорта наблюдаемыми, прогностическими значениями параметров погоды и штормовыми предупреждениями.

Развитие сквозной обработки данных связано с использованием подключенной внешней инфраструктуры (4 ways ..., 2022), в состав которой могут входить автоматические метеорологические станции, автономные гидрологические комплексы и другие средства измерений (СИ) Росгидромета. Эти средства должны сочетать методы Интернет-вещей для автономного сбора данных, аналитики в режиме реального времени, выявления аномалий от климатических значений и использования их при принятии решений (Вязилов, 2016).

Интеграция данных подняла такие вопросы, как создание открытых наборов данных, стандартизация структур данных, включая единое именование атрибутов, использование общих классификаторов различных сущностей, развитие множества объектов метаданных (ЕСИМО, 2013), соответствие наборов данных и метаданных FAIR-принципам (FAIR Principles, 2018) – поискость, доступность, интероперабельность, повторное использование.

Имеющиеся в национальных гидрометеорологических службах вычислительные инфраструктуры создают необходимые основы использования гидрометеорологической информации для адаптации. Проблемой при этом является доказательство ценности гидрометеорологической информации для бизнес-процессов предприятий и отсутствие заинтересованности руководителей предприятий в повышении эффективности использования таких данных.

Отдельные предприятия уже переходят на данные, напрямую получаемые от существующих внешних и внутренних СИ, минуя государственные наблюдательные сети. Например, устанавливаются СИ в морских и речных портах, на буровых платформах, аэропортах, дорогах и других крупных производственных и инфраструктурных объектах. Это позволяет более оперативно получать информацию об экстремальных явлениях. Компьютеры должны обрабатывать данные от автоматических станций сразу после измерения и отправлять руководителям сведения о превышении пороговых значений или аномалиях от климатических значений.

Появление новых программных инструментов и платформ уменьшило объем разрабатываемого программного обеспечения. Но оно также породило новые трудности, связанные с организацией межмашинного взаимодействия между различными комплексами программ. Один инструмент должен подго-

товить данные, а другой их «подхватить» и продолжить обработку данных. Например, результаты интерполяции данных в пространстве должны использоваться геоинформационными системами для представления данных на карте в виде изолиний результатов анализов и прогнозов, выявления районов экстремальных явлений и прогноза их возможных воздействий на предприятия и население. Пополненные временные ряды, подвергаемые контролю и исключению пропусков за счет интерполяции значений во времени, должны передаваться в различные статистические пакеты для корреляционного, спектрального и других анализов. Результаты промежуточной обработки данных должны сохраняться, чтобы их можно было использовать в других комплексах программ. Стоимость хранения этих данных будет меньше, чем их повторная обработка. Чтобы их быстро найти, каждый из них должен иметь свои метаданные.

Время выполнения полной цепочки обработки данных различными инструментами от наблюдения до принятия решения иногда может составлять несколько часов. Руководитель не должен ждать окончания всех процессов обработки данных, он должен получать сразу после окончания соответствующего этапа их обработки. Например, после выявления экстремальных ситуаций на основе данных наблюдений нужно сразу отправлять сведения о них руководителям предприятий.

Для многих администраторов, эксплуатирующих сквозную схему обработки данных, очень трудно выяснить первопричину возникшей ошибки. У них не хватает информации, чтобы понять, несут ли они ответственность за эту ошибку. А проблема чаще всего связана с данными: почему новая порция данных не поступила, или поступила, но с опозданием, или поступила, но с ошибками, не в полном объеме. Сквозная схема потоковой обработки данных с помощью конвейера становится управляемой на основе информации о состоянии обработки на том или другом этапе, а это существенно повышает уровень автоматизации (Вязилов, 2022).

Для отслеживания работоспособности сквозной схемы (Viazilov et al., 2021; Вязилов, 2022) должны быть разработаны средства мониторинга работы аппаратно-программных средств, состояния обработки, получения и обслуживания цифровой информационной продукцией. Эти средства позволят администратору сквозной технологии видеть весь процесс обработки данных, управлять им и вмешиваться в этот процесс, если возникнет внештатная ситуация.

Благодаря сквозной схеме обработки данных и широкому использованию сервисов доступа к ним разработчикам больше не нужно будет вручную подключать новые инструменты к тем или иным данным. Система на основе метаданных определит, какими инструментами можно обработать те или иные создаваемые в процессе обработки наборы данных. Например, если данные измерены в одной точке, имеют регулярное временное разрешение и каждое значение имеет атрибут метаданных «Время измерения», то для этих данных можно строить графики временного хода изменений параметров; если имеются координаты местоположения, то можно подключать геоинформационную систему.

При этом необходимо описать в метаданных сведения об используемых, вычисляемых, смоделированных наборах данных; сервисах Application Programming Interface (API) для доступа к ним; источниках исходных данных (наблюдательных платформах, организациях, БД), экспертах по данным и других объектах метаданных. Схема информационных потоков данных должна быть понятна всем; обладать возможностью расширения, как по составу данных, так и методам их обработки; позволять оптимизировать информационные потоки. С помощью такой схемы станет понятно, какие показатели, на основе каких данных получаются. Если возникает новая задача (реализация сервиса, получение новой информационной продукции), то включить ее в схему обработки становится проще.

Когда схема информационных потоков готова, нужно уточнить показатели, которые можно получить с помощью расчетов, определить правила их расчета и контроля (область допустимых значений, экстремальные значения), назначить показатели, которые можно прогнозировать. При управлении бизнес-процессами предприятий, зависящими от гидрометеорологических условий, выиграют те, кто лучше понимает, что происходит в сквозной схеме обработки данных, что может получить руководитель на различных этапах обработки данных.

Единственный способ повысить актуальность данных для руководителя (уменьшить разницу между временем использованием данных и временем наблюдений) – это потреблять данные в виде потока, а не через запросы и ответы. При обмене данными используются решения по событийному управлению API сервисами для получения доступа к постоянно обновляемой информации. Если необходимо предоставлять руководителям потоки информации, нужно обеспечить, чтобы потребители API знали об изменениях в данных сразу после их поступления.

«Сервисы Representation State Transfer (REST) помогут расширить использование данных, создать новые цифровые продукты. Синхронный режим запроса-ответа REST API – это один из способов, с помощью которого предприятия могут (What is a REST API, 2000) организовать взаимодействие своих приложений с системой ГМО. К более современным вариантам обмена данными относятся протокол Web Socket (The Web Socket API, 2011) и язык запросов Graph QL (Aquery language for your API, 2015). Web Sockets обеспечивает двустороннюю потоковую связь между программными компонентами, позволяя передавать в реальном времени различные потоки информации. Язык запросов Graph QL дает доступ к данным на основе запросов к связанным объектам, позволяя пользователям перемещаться по данным.

Сквозная схема обработки данных уже более 10 лет используется в (ЕСИМО, 2013). Все процессы от загрузки до доставки и визуализации данных происходят автономно без вмешательства операторов и администраторов системы. Эту схему требуется нарастить новыми прикладными сервисами и различными типами моделей – от прогноза отдельных параметров в точке до прогноза воздействий. При этом широко используется Единый словарь параметров в области гидрометеорологии и морской деятельности, общие коды и

классификаторы, включающие более 550 международных, национальных, ведомственных и локальных классификаторов. Для повышения качества информационных ресурсов в системе реализована методика автоматизированной оценки каждого информационного ресурса принципам FAIR (FAIR Principles, 2018).

Персонализация обслуживания

Персонализация обслуживания – это не просто адресная рассылка сообщений, а участие поставщика данных в организации бизнес-процессов предприятий, на которые воздействуют экстремальные явления. Поэтому организации Росгидромета должны понимать уникальность потребностей руководителей предприятий. Поставщики данных должны выдавать информацию только тогда, когда опасные значения показателей прогнозируются или уже проявляются. А руководители должны использовать эти сообщения для адаптации своих бизнес-процессов к сложившимся гидрометеорологическим условиям.

Доставить наблюдаемые или прогностические данные это уже хорошо, но еще лучше иметь прогноз возможных воздействий. Не надо ждать достижения показателей экстремальных явлений пороговых значений, надо заранее готовиться к воздействиям на основе анализа трендов и сверхдолгосрочных прогнозов погоды и климата. Необходимо показать руководителям реальную пользу от использования данных об окружающей среде. Когда руководители освоят оперативную аналитику на основе гидрометеорологических данных, у них появится фундамент, на котором они смогут создавать новые цифровые продукты и предлагать эффективные решения. Для этого необходимо быть уверенным, что данные доступны и соответствуют требованиям руководителей по актуальности, оперативности доступа, качеству и полноте. Архитектура прикладного программного обеспечения для перспективного ГМО приведена на рис. 1.

Информационные сервисы для ГМО

Информационные сервисы для ГМО включают:

- доставку наблюдаемых, прогностических данных и климатических обобщений;
 - идентификацию экстремальных явлений по уровням опасности;
 - предоставление сведений о состоянии пунктов наблюдений;
 - получение информации о деятельности промышленных предприятий;
 - прогноз возможных воздействий экстремальных явлений на предприятия;
 - предоставление дополненной реальности для повышения осведомленности;
 - оценку возможного ущерба от экстремальных явлений;
 - выдачу рекомендаций для принятия решений;
 - расчет затрат на превентивные предприятия;
 - оптимизацию решений на основе сравнения ущерба и затрат.



Рисунок 1. Архитектура прикладного программного обеспечения системы ГМО

Figure 1. Software architecture for the hydrometeorological support system

Как увязать гидрометеорологическую информацию и сведения о воздействиях на объекты в единый поток?

Для идентификации экстремальных ситуаций необходимо создать БД локальных пороговых значений для различных объектов, видов деятельности, по трем уровням опасности для всех показателей. На основе потоков оперативных данных, поступающих по Глобальной системе телесвязи, с помощью БД локальных пороговых значений производится идентификация экстремальных явлений в потоках наблюдаемых и прогностических данных. Для каждой ситуации (до, в период и после явления), вида деятельности и уровня опасности дается прогноз возможных воздействий и список рекомендаций. При этом предлагается учитывать наблюдаемые, прогностические данные разной заблаговременности (от нескольких дней до нескольких лет) и климатические обобщения, например, в виде повторяемости явлений, которые рассматриваются как отдельные ситуации. Большинство специалистов климатологов считает увеличение количества и интенсивности экстремальных явлений как проявление изменений климата, поэтому в предложенную идею описания ситуаций для поддержки решений укладываются и климатические обобщения.

Для экстремальных явлений необходимо рассматривать их воздействия и проводить адаптационные мероприятия:

- до явления с использованием климатических данных, сверхдолгосрочных, долгосрочных и краткосрочных прогнозов в виде стратегических и тактических мероприятий;
- в момент явления – наукастинг прогнозы и наблюдаемые значения для выполнения оперативных мероприятий;
- после явления – наблюдаемые данные и краткосрочные прогнозы для проведения оперативных аварийно-спасательных мероприятий.

Сейчас потребители в зависимости от необходимости или наличия данных сами принимают решения, какой тип информации использовать – климатическую, или прогностическую, или наблюдаемую. Автоматизация ГМО должна помочь потребителям выбрать тот тип информации, который лучше использовать в зависимости от момента времени (задолго до, перед, в период или после явления), когда потребителю нужно принимать решение для бизнес-процессов, в которых ему нужно применить имеющиеся данные о гидрометеорологической обстановке.

Как провести адаптацию к экстремальным явлениям?

Интерпретацию климатических и других типов данных необходимо автоматизировать, т.е. выдавать не только цифровые значения показателей, карты пространственного распределения, графики тенденций, но и прогноз возможных воздействий, перечень рекомендаций, оценки ущербов, стоимость превентивных мероприятий. С помощью средств поддержки решений можно предсказать воздействия экстремальных явлений и предпринять меры защиты до их максимального проявления на каждом предприятии. В этом и заключается развитие новой парадигмы ГМО (Вязилов, 2022), что для каждого объекта делается отдельный прогноз возможных воздействий, а не общий прогноз для территории и всех объектов. Одно и то же экстремальное явление по-разному может отразиться на различных предприятиях. Предприятие, расположенное на низком берегу, больше подвергается наводнению, чем расположенное на некоторой высоте. Следовательно, уровни опасности и перечень рекомендаций для них будет разный. Пример описания воздействий и рекомендаций для ситуации, связанной с повышением уровня океана, представлен на рис. 2.

Любое предприятие имеет стратегические, тактические и оперативные задачи в своей деятельности. Эти задачи взаимосвязаны и требуют комплексного рассмотрения. При наводнениях на основе:

- климатической повторяемости надо решать стратегическую задачу по строительству, например, дамбы;
- долгосрочного прогноза – тактические задачи по подготовке резервов продовольствия, материалов, техники;
- краткосрочного прогноза – оперативные задачи по проведению превентивных мероприятий – эвакуация, обваловывание мешками с песком отдельных локальных объектов;
- наблюдаемых данных – расширение эвакуационных мероприятий, спасение;
- после явления – проведение аварийно-восстановительных, спасательных и др. мероприятий.

Могут появиться и другие ситуации, связанные со сверхкраткосрочными (наукастинг) или климатическими прогнозами. Поэтому только комплексное использование всех типов информации поможет эффективно адаптироваться предприятиям.

Причины: таяние ледников, повышение температуры воды.
Объект: окружающая среда, местные органы управления, население.
Показатели: повышение уровня Мирового океана ≈ 0.5 м выше критического; повышение среднегодового уровня океана ≈ 3 мм/год; вероятность $\approx 70\%$.
Уровень опасности: 2 (желтый).
Тип информации: климат.
Воздействия:
Природная среда:
Образует обширные морские заливы.
Повышает соленость эстуариев.
Изменяет характеристики рельефа побережья.
Увеличивает высоту приливов в устьях рек и заливах.
Приводит к потере больших площадей продуктивных земель.
Вызывает усиление нагонных явлений.
Усиливает штормовые явления и расширяет границы заплеска при волнении.
Население:
Разрушает кварталы жилых домов.
Увеличивает загрязнение источников пресной воды.
Повышает уровень грунтовых вод.
Вызывает эрозию береговой линии.
Эксплуатация предприятий:
Разрушает берегоукрепительные сооружения.
Увеличивает экономические потери в туристических отраслях.
Разрушает строение промышленной зоны.
Приведет к коллапсу действующей инфраструктуры.
Политическое воздействие:
Приведет к военным конфликтам сокращение пригодной для проживания человека территории.
Рекомендации:
Органы местного управления:
Перенести дома, дороги и водопроводы на более высокие участки.
Разработать проект береговых укреплений и восстановления пляжной зоны.
Предусмотреть строительство защитных сооружений.
Разработать программу инженерной защиты от оползневых, абразионных процессов берегов.
Не селить людей в зонах возможного затопления.
Рассмотреть вопрос о переселении населения.
Не строить ни каких сооружений на пологих берегах.
Ограничить объем выкачивания грунтовых вод.
Население:
Запретить строить дома в зонах возможного затопления.
Мигрировать в другие более безопасные районы.
Подготовить средства откачки воды.

Рисунок 2. Описание ситуации связанной с повышением уровня Мирового океана

Figure 2. Description of the situation associated with rising World ocean levels

Как учитывается масштаб объектов, для которых необходим учет гидрометеорологической информации?

В настоящее время создаются паспорта безопасности предприятий и органов местного самоуправления, рассматривается вопрос о создании климатических паспортов, в которых определяются экстремальные явления, проявляющиеся на территории расположения этих объектов. Именно зависимость этих объектов и видов деятельности на них будут определять необходимость учета тех или иных явлений. При строительстве крупных объектов (новых морских портов, газопроводов через водные акватории и т.п.) всегда проводится оценка воздействий на окружающую среду и

оценка воздействий экстремальных явлений на деятельность этих объектов. Примеры видов деятельности предприятий, зависящих от экстремальных явлений, представлены ниже (Вязилов, 2022).

Прогнозирование развития промышленного района:

- размещение промышленных и топливно-энергетических комплексов;
- планирование строительства линий электропередач;
- развитие транспортной инфраструктуры.

Перспективное планирование – организация территории (землепользование):

- прокладка транспортных мультимодальных коридоров и новых авто- и железнодорожных магистралей (Вязилов, 2022);
- строительство теплоэлектростанций и гидроэлектростанций;
- размещение курортов и рекреационных зон;
- разведка и разработка месторождений углеводородного сырья (нефти и газа);
- проектирование нефте- и газопроводов.

Инженерное проектирование:

- расчет теплопотребления строящихся зданий;
- оценка долговечности зданий в различных климатических зонах;
- проектирование систем отопления, вентиляции, кондиционирования, водопотребления;
- расчет тепловой, ветровой, снеговой, гололедной нагрузки на сооружения.

Строительное проектирование:

- организация жилой застройки – плотность застройки, ориентация зданий, протяженность и этажность жилых зданий и разрывы между ними (Вязилов, 2022);
- подготовка архитектурно-планировочных решений;
- посадка зданий и сооружений на местности.

Как убедить руководителя, что автоматизация поддержки решений уменьшит ущерб?

Если руководители будут знать оценки возможных ущербов, а также стоимость превентивных мероприятий для устранения возможных воздействий или уменьшения убытков, то они более осознанно будут принимать решения – например, на основе модели «Стоимость превентивных мероприятий/Ущерб <0.3 ».

Кроме того, для повышения осведомленности руководителей необходимы показ фотографий, видео о произошедших ранее экстремальных явлениях, а также создание средств дополненной реальности, показывающих возможное воздействие в виде анимации, например, для:

- наводнения – показ подтопления подвальных помещений и заливание первых этажей зданий в зависимости от уровня воды;
- сильного ветра, приводящего к падению отдельно стоящих деревьев на припаркованные рядом автомашины.

*Какие данные нужны для оценки ущерба и расчета стоимости
превентивных мероприятий?*

Оценка ущерба и расчет стоимости превентивных мероприятий просто невозможны без экономических показателей деятельности предприятия. Например, зная среднее количество простаивающих на предприятии сотрудников во время наводнения, среднюю зарплату, количество часов простоя, объем невыпущенной продукции, можно оценить ущерб от простоя предприятия. Для расчета трудозатрат на проведение эвакуации грузов нужно знать стоимость работ по подготовке, погрузке, перевозке и разгрузке перевозимых грузов. Для расчета таких экономических показателей необходимо иметь доступ к экономическим информационным системам предприятий или регулярно получать данные от них.

Как использовать данные сверхдолгосрочных прогнозов?

Для завоза грузов в арктические районы необходимо за полгода и более иметь прогноз сроков вскрытия припая отдельно в западной и восточной частях Арктики. Это позволит заранее завезти грузы в порты погрузки европейской территории России или Дальнего Востока. Для прогноза сроков вскрытия припая с такой заблаговременностью необходимы данные по расходам и аномалиям температуры воды в Фареро-Шетландском проливе, где проходит основной поток теплых атлантических вод, которые достигают арктических морей через 9-15 месяцев и влияют на таяние льда (Вязилов, 2022). Имея такой прогноз, можно больше завезти грузов без использования ледокольной проводки.

Можно ли найти нужные данные?

Чтобы получить нужные данные, необходимо использовать метаданные в виде описаний наборов, БД, а также источников данных. Наиболее известными базами метаданных являются системы Global Change Master Directory (<https://www.earthdata.nasa.gov/technology/global-change-master-directory-gcmd>) и European Directory of Marine Environmental Data (<https://www.bodc.ac.uk/resources/inventories/edmed/search/>). В России можно использовать систему (ЕСИМО, 2013), в рамках которой интегрировано более 2300 информационных ресурсов от 31 провайдера данных. Ресурсы представляют собой данные в точках в виде профилей данных по глубине или высоте, в узлах регулярной сетки, отражающие данные наблюдений, анализы, прогнозы, климатические обобщения, сведения об объектах морской деятельности (порты, суда, судостроительные предприятия, другие). Каждый ресурс имеет метаданные, которые создаются при первой загрузке, а далее обновляются в соответствии с регламентом получения информационного ресурса. При интеграции данных производится унификация имен атрибутов и приведение значений атрибутов в виде кодовых значений к стандартизированной форме. На основе метаданных организован поиск по тексту, атрибутивный поиск, поиск по карте. Результаты поиска представляются сначала в виде спи-

ска ресурсов, найденных по условиям поиска. После изучения метаданных пользователь выбирает необходимый ресурс и отправляет запрос на доступ к данным. Данные любого ресурса, несмотря на разнообразие структур, визуализируются в типовом интерфейсе в виде карты, графика, таблицы и их можно скачать на компьютер пользователя в формате CSV. Пользователь может подписаться на регулярное получение данных по электронной почте или доставку данных на ftp-сервер. Далее пользователь сам решает, как использовать полученные данные. Для отдельных информационных ресурсов при их объединении или обработке в отдельных от портала ЕСИМО приложениях осуществляется доступ к ним с использованием REST-сервисов. Эти средства можно использовать для обслуживания данными сервисов поддержки решений.

Правильно ли выбраны данные?

Одно из слабых мест при использовании гидрометеорологических данных руководителями предприятий – это поиск и выбор необходимых данных. Есть большие наборы надежных данных в узлах регулярной сетки в виде реанализов NCEP-DOEAMIP-II (Kanamitsu et al., 2002), ERA5 (Hersbach et al., 2020). Эти наборы данных созданы и регулярно пополняются при получении краткосрочных прогнозов погоды на 12-120 часов, прогнозов малой заблаговременности (до 10 суток), климатических обобщений (месяц конкретного года, год, месяц многолетних). Эти обобщения можно получить как на основе данных наблюдений в фиксированных пунктах наблюдений, так и на основе данных в узлах сетки.

Дискуссия

Важнейшая задача руководителя предприятия – сократить ущерб от экстремальных явлений. Для этого необходимо как можно быстрее выявить значения показателей экстремальных явлений и довести информацию о них до руководителей. Для этого администратор системы ГМО должен учитывать потребности конкретного предприятия и настраивать персонализированный информационный продукт, который руководитель предприятия может трансформировать для применения в конкретных бизнес-процессах. Руководители предприятий в разных отраслях должны получать необходимую информацию о воздействиях, рекомендации для принятия решений и быстро реагировать на возможные воздействия экстремальных явлений с учетом специфики рассматриваемого объекта.

Для принятия решений на основе идентифицированных показателей экстремальных явлений необходимо собрать сведения о воздействиях на предприятия. За счет этого дается прогноз возможных воздействий. Дополнительная информация из других источников (например, вместо наблюдаемых данных использовать данные из анализов и прогнозов в узлах сетки) может помочь руководителю более правильно оценить сложившуюся обстановку. При организации доведения данных до руководителей в режиме персонализи-

рованного обслуживания не нужно беспокоиться о том, где найти необходимые данные. Они будут приходить в зависимости от того, какие экстремальные явления наблюдаются в районе расположения предприятия.

«Программные платформы и сервисы для ГМО должны управляться на основе событий (превышение уровней опасности значений показателей экстремальных явлений для различных объектов), выявленных в наблюдаемых и прогностических» (Чуняев, 2015) данных. Это означает, что, когда данные или метаданные обновляются, другие приложения будут реагировать автоматически – выявлять ситуации, предупреждать руководителей о них, прогнозировать возможные воздействия экстремальных явлений на предприятия, выдавать рекомендации для принятия решений.

Заключение

Предлагается развитие: интеграции разнородных и распределенных данных о состоянии окружающей среды в виде наблюдаемых и прогностических данных, климатических обобщений; сквозной технологии обработки для получения информационной продукции в цифровом виде; персонализации ГМО за счет разработки БД локальных пороговых значений по уровням опасности для каждого предприятия и вида деятельности на нем. Возможна оптимизация решений на основе сравнения разности между ущербом и стоимостью превентивных мероприятий. Использование конвейерной технологии позволит организовать непрерывное производство цифровой гидрометеорологической продукции. При дефиците специалистов только создание сквозной технологии обработки гидрометеорологических данных от наблюдения до принятия решения на основе конвейера с использованием средств искусственного интеллекта может:

- уменьшить затраты на эксплуатацию системы ГМО;
- повысить производительность труда исследователей;
- быстро предоставить информацию (не только в цифровом виде, но и в виде текстов воздействий и рекомендаций), необходимую руководителю в период экстремальных явлений.

В работе представлены идеи реализации новой парадигмы ГМО, показан прогноз применения современных ИТ-достижений при ее реализации, рассмотрены возможности повышения осведомленности руководителей предприятий и различного уровня государственного управления за счет развития новых сервисов.

Перспективами развития ГМО является в дополнение к гидрометеорологической информации интеграция социальной, экономической, финансовой и другой информации, что позволит создать цифровой двойник для широкого применения моделирования воздействий экстремальных явлений на отдельные предприятия и применения широкого спектра других типов моделей.

За счет использования современных информационных технологий можно улучшить адаптацию предприятий к экстремальным явлениям и соответственно сократить ущерб.

Благодарности

Исследование проведено в рамках программы «Цифровой двойник Каспийского моря», осуществляемой в рамках деятельности МОК ЮНЕКО, связанной с Десятилетием наук об океане, в интересах устойчивого развития ООН (2021-2030 гг.).

Список литературы

Вязилов, Е.Д. (2016) Росгидромет как цифровое предприятие, Conference “Аналитика данных и управление доменами данных интенсивного использования” (ДАМДИД), 11-14 октября 2016, Ершово, Россия, с. 302-308.

Вязилов, Е.Д. (2022) *Цифровая трансформация гидрометеорологического обеспечения потребителей*. Том 2. Использование в различных отраслях, ВНИИГМИ-МЦД, Обнинск, Russia, 356 с.

Вязилов, Е.Д., Чуняев, Н.В. (2015) Использование смартфонов и планшетов для экстренного информационного обеспечения пользователей об опасных природных явлениях, *Труды ВНИИГМИ-МЦД*, вып. 179, с. 133-143.

ЕСИМО (2013). *Единая государственная система информации об обстановке в Мировом океане*, URL: <http://esimo.ru>, доступ: 04.01.2023.

Чуняев, Н.В. (2015) Информационная поддержка управления морской деятельностью в случае опасных природных явлений, В сб.: *Труды Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова*, вып. 578, с. 156-173, URL: <http://elibrary.ru/item.asp?id=24841001>.

Allis, E., Hewitt, C., Ndiaye, O., Hama, A., Fischer, A., Bucher, A., Shimp, A., Pulwarty, R., Mason, S., Brunet, M., Tapia, B. (2019) The Future of Climate Services, *Bulletin WMO*, vol. 68 (1), pp. 50-58.

4 Ways to make sure your connected-infrastructure technology program is ... well, connected (2022) URL: <https://www.stantec.com/en/ideas/4-ways-to-make-sure-your-connected-infrastructure-technology-program-is-well-connected>, accessed: 04.01.2023.

A query language for your API (2015) URL: <https://graphql.org/>, accessed: 04.01.2023.

Copernicus Open Access Hub (2017) URL: <https://scihub.copernicus.eu/>, accessed: 04.01.2023.

FAIR Principles (2018) URL: <https://www.go-fair.org/fair-principles/>, accessed: 04.01.2023.

Hersbach, H., Bill, B., Berrisford, P. and et al. (in all 43 authors) (2020) The ERA5 global reanalysis, *Quart. J. Royal Meteor. Soc.*, vol. 146, pp. 1999-2049.

Kanamitsu, M., Ebisuzaki, W., Woollen, J., Yang, S.-K., Hnilo, J.J., Fiorino, M., Potter, G.L. (2002) NCEP-DOE AMIP-II Reanalysis (R-2), *Bull. Amer.*

Meteor. Soc., vol. 83, pp. 1631-1643.

The Web Socket API (2011) URL: https://developer.mozilla.org/en-US/docs/Web/API/WebSockets_API, accessed: 04.01.2023.

Viazilov, E., Melnikov, D., Mikheev, A. (2021) On the development of a pipeline for processing hydrometeorological data. *Supplementary Proceedings of the XXIII International Conference on Data Analytics and Management in Data Intensive Domains* (DAMDID/RCDL 2021), URL: <http://ceur-ws.org/Vol-3036/paper08.pdf>, accessed: 04.01.2023.

What is a REST API? (2000) URL: <https://www.ibm.com/topics/rest-apis>, accessed: 04.01.2023.

References

Viazilov, E.D. (2016) Roshydromet kak tsifrovoye predpriyatie [Roshydromet as digital enterprise] *Conference «Data Analytics and Management in Data Intensive Domains» (DAMDID), October 11-14, Ershovo, Russia*, p. 302-308.

Viazilov, E.D. (2022) *Thifrovaya transformatsiya gidrometeorologicheskogo obespecheniya potrbiteley* [Digital transformation of hydrometeorological support-consumers] vol. 2. Ispol'zovanie v razlichnykh otraslyah. [Use in various industries], RIHMI-WDC, Obninsk, Russia, 356 p.

Viazilov, E.D., Chunyaev, N.V. (2015) Ispol'zovanie smartfonov i planshetov dlya srochnogo informatsionnogo obespecheniya potrbiteley ob opasnykh yavleniyakh [Use smartphones and tablets for urgent information support of users about disasters], *RIHMI-WDC proceeding*, issues 179, pp. 133-143.

ESIMO (2013) *Edinaya gosudarstvennaya sistema informatsii ob obstanovke v Mirovom okeane* [Unified State System of Information on the Situation in the World Ocean], URL: <http://esimo.ru>, accessed: 04.01.2023.

Chunyaev, N.V. (2015) Informatsionnoye obespecheniye upravleniya morskoy deyatel'nost'yu v sluchae opasnykh prirodnykh yavlenii [Information support of management of marine activities for disasters], *Proceedings of Voeykov A.I. Main Geophysical Observatory*, no. 578, pp. 156-173, URL: <http://elibrary.ru/item.asp?id=24841001>.

Allis, E., Hewitt, C., Ndiaye, O., Hama, A., Fischer, A., Bucher, A., Shimpf, A., Pulwarty, R., Mason, S., Brunet, M., Tapia, B. (2019) The Future of Climate Services, *Bulletin WMO*, vol. 68 (1), pp. 50-58.

4 Ways to make sure your connected-infrastructure technology program is ... well, connected (2022) URL: <https://www.stantec.com/en/ideas/4-ways-to-make-sure-your-connected-infrastructure-technology-program-is-well-connected>, accessed: 04.01.2023.

A query language for your API (2015) URL: <https://graphql.org/>, accessed: 04.01.2023.

Copernicus Open Access Hub (2017) URL: <https://scihub.copernicus.eu/>, accessed: 04.01.2023.

FAIR Principles (2018) URL: <https://www.go-fair.org/fair-principles/>, accessed: 04.01.2023.

Hersbach, H., Bill, B., Berrisford, P., and et al. (in all 43 authors) (2020) The ERA5 global reanalysis, *Quart. J. Royal Meteor. Soc.*, vol. 146, pp. 1999-2049.

Kanamitsu, M., Ebisuzaki, W., Woollen, J., Yang, S.-K., Hnilo, J.J., Fiorino, M., Potter, G.L. (2002) NCEP-DOE AMIP-II Reanalysis (R-2), *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, vol. 83, pp. 1631-1643.

The Web Socket API (2011) URL: https://developer.mozilla.org/en-US/docs/Web/API/WebSockets_API, accessed: 04.01.2023.

Viazilov, E., Melnikov, D., Mikheev, A. (2021) On the development of a pipeline for processing hydrometeorological data. *Supplementary Proceedings of the XXIII International Conference on Data Analytics and Management in Data Intensive Domains (DAMDID/RCDL 2021)*, URL: <http://ceur-ws.org/Vol-3036/paper08.pdf>, accessed: 04.01.2023.

What is a REST API? (2000) URL: <https://www.ibm.com/topics/rest-apis>, accessed 04.01.2023.

Статья поступила в редакцию (Received): 11.05.2023.

Статья доработана после рецензирования (Revised): 08.08.2023.

Принята к публикации (Accepted): 12.08.2023.

Для цитирования / For citation:

Вязилов, Е.Д. (2023) Развитие средств адаптации к экстремальным явлениям, связанным с изменениями климата, *Фундаментальная и прикладная климатология*, т. 9, № 3, с. 251-268, doi:10.21513/2410-8758-2023-3-251-268.

Viazilov, E.D. (2023) Development of tools for adaptation to extreme events associated with climate change, *Fundamental and Applied Climatology*, vol. 9, no. 3, pp. 251-268, doi:10.21513/2410-8758-2023-3-251-268.

Цифровые двойники систем и процессов как инструмент современной климатологии

Е.П. Гордов^{1),2)}

¹⁾ Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН,
Россия, 634055, г. Томск, проспект Академический, 10/3

²⁾ Томский филиал, Федеральный научный центр
информационных и вычислительных технологий,
Россия, 634055, г. Томск, проспект Академический, 4

Адрес для переписки: gordov@scert.ru

Реферат. Развитие информационно-вычислительной инфраструктуры современной климатологии, инспирированное развитием средств наблюдений и совершенствованием моделей, приведшим к бурному росту объемов климатических данных наблюдений и моделирования, привело к непрерывному усвоению новых подходов и инструментов информационно-вычислительных технологий. Новый, перспективный для использования в климатологии и ее приложениях подход – это уже широко используемая в промышленности концепция «цифрового двойника» (далее – ЦД), в рамках которой реальный (физический) объект заменяется таким его цифровым отражением, с помощью которого можно оптимизировать производство и весь последующий жизненный цикл конкретного изделия или процесса. Поскольку в последнее время ЦД становится очень популярным и в науках об окружающей среде, и климате, а в посвященных его созданию и использованию проектах уже ставят вопрос о ЦД всей планеты, то основы этой концепции, технологические требования, равно как и ожидаемые результаты, включая и возможность получения ответов на актуальные вопросы современной климатологии: «Кто виноват?» и «Что делать?», заслуживают детального обсуждения. Ниже на основе исходных определений ЦД из инженерных наук и приложений будут очерчены его свойства в науках об окружающей среде и представлены основные проекты, направленные на создание и использование ЦД объектов, систем/процессов, представляющих интерес для современной климатологии. Такой анализ позволит не только создать ту основу, которая необходима для разработки таких ЦД, но и определить, что именно может быть получено в результате.

В целом, развитие ЦД может обеспечить следующий шаг в исследованиях окружающей среды, в частности, погоды и климата. Двойники помогут пользователям интерактивно исследовать возможные изменения климата и обеспечивать их необходимой для адаптации климатической информацией. Кроме того, они смогут помочь в создании научной основы для реализации программы использования экосистем, для компенсации промышленных выбросов парниковых газов, необходимой для перехода к «зеленой» эконо-

мике. Конечно, для достижения этой цели необходимо создавать ЦД для многих климатических процессов и участвующих в формировании климата физических и экологических систем.

Ключевые слова. Цифровой двойник, большие данные, виртуальная среда, изменения климата.

Digital twins of systems and processes as a mean of modern climatology

E.P. Gordov^{1),2)}

¹⁾ Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS,
10/3, Akademicheskii ave., Tomsk, 634055, Russian Federation

²⁾ Tomsk Branch of Federal Research Center for Information and Computational Technologies,
4, Akademicheskii ave., Tomsk, 634055, Russian Federation

Correspondence address: gordov@scert.ru

Abstract. Development of the information and computational infrastructure of modern climatology, inspired by the rapid growth in the volume of climate observation and modeling data due to the observational tools and models improvements, has led to the continuous assimilation of new approaches and tools of information and computational technologies. One of such new approaches, promising for use in climatology and its applications, is the concept of a “digital twin” (hereinafter – DT), which is already widely used in industry and business. In it a real (physical) object is replaced by its digital analogue, which can be used to optimize production and all the subsequent life cycle of a particular product or process. Quite recently, the DT has become very popular in the environmental and climate sciences, and in the projects dedicated to its creation and use, the question of the DT of the entire planet is already being raised. That is why basics of this concept, technological requirements, as well as the expected results, including the possibility of obtaining answers to topical questions of modern climatology: “Who is to blame?” and “What to do?” deserve detailed discussion. Below, based on the initial definitions of the DT from engineering sciences and applications, its properties in environmental sciences will be outlined and the main projects aimed at the creation and use of the DT objects, systems/processes of interest to modern climatology will be presented. Such an analysis will allow not only determine the basis that is necessary for the development of such DTs, but also outline what exactly might be obtained as a result.

All in all, the development of the DT could provide the next step in environmental research, in particular weather and climate. Twins will help users interactively explore possible climate change and provide them with the climate information they need to adapt. In addition, DTs will be able to help in creation of a scientific basis for the implementation of a program of using ecosystems to offset industrial emissions of greenhouse gases, necessary for the transition to a green

economy. Of course, to achieve this goal, it is necessary to create a DT for many climatic processes and the physical and ecological systems involved in climate formation.

Keywords. Digital twin, big data, virtual environment, climate change.

Введение

За последние десятилетия, по мере роста интереса исследователей и общества к изучению причин и последствий изменений климата, благодаря развитию инструментов локальных и дистанционных измерений характеристик окружающей среды, метеорологических и климатических моделей и поддерживающих их вычислительных ресурсов, резко увеличилась скорость накопления и объем климатических данных. По мере их трансформации в то, что сейчас принято называть «большие данные» (см., например, <https://www.bigdataschool.ru/> или <https://www.oracle.com/cis/big-data/what-is-big-data/>), развивалась и информационно-вычислительная инфраструктура поддержки климатических исследований (датчики, модели, сети, программные средства и вычислительные ресурсы). В процессе развития эта инфраструктура постоянно впитывала новые элементы, появляющиеся в ходе развития информационно-вычислительных технологий, являясь естественной областью для их использования, и, в свою очередь, оказывала стимулирующее обратное влияние на их развитие. На этом пути, по сути, уже произошло преобразование центров хранения климатических данных и обеспечения доступа к ним в центры поддержки удаленного анализа климатических данных, обеспечивающие пользователей необходимым для такого анализа инструментарием. Одним из примеров является Библиотека климатических данных Международного научно-исследовательского института по вопросам Климата и Общества (<https://iridl.ldeo.columbia.edu/>), позволяющая пользователю через обычный веб-браузер выполнять анализ больших архивов климатических данных. Следующим шагом по освоению таких новых, перспективных для использования в климатологии и ее приложениях продуктов развития информационно-вычислительных технологий является уже широко используемая в промышленности концепция «цифрового двойника» (далее – ЦД), в рамках которой реальный (физический) объект заменяется таким его цифровым отражением, с помощью которого можно оптимизировать производство и весь последующий жизненный цикл конкретного изделия или процесса. Так как в последнее время ЦД становится очень популярным и в науках об окружающей среде, и климате, а в посвященных его созданию и использованию проектах уже ставят вопрос о ЦД всей планеты, то основы этой концепции, технологические требования, равно как и ожидаемые результаты (среди которых и возможность получения ответов на актуальные вопросы современной климатологии: «Кто виноват?» и «Что делать?»), заслуживают детального обсуждения. Ниже, на основе исходных определений ЦД из инженерных наук и приложений, будут очерчены его свойства в науках об окружающей среде и представлены основные проекты, направленные на создание и использование ЦД

объектов, систем/процессов, представляющих интерес для современной климатологии. Помимо понимания той основы, которая необходима для разработки таких ЦД, этот анализ позволит понять, что именно может быть получено в результате развития этого направления. Заметим, что современная климатология уже стала междисциплинарной областью, объединившей практически все разделы наук об окружающей среде (более широко наук о Земле), значительная часть из которых используется при изучении формирования и динамики климата, и пересекающаяся с ней часть – при изучении откликов на климатические изменения. Поэтому в последующем тексте климатология и науки об окружающей среде будут использоваться как синонимы.

История и определения

Сама концепция ЦД как динамической виртуальной модели системы, процесса или услуги была предложена еще в 2002 году. Согласно одной из основополагающих работ ее автора (Grieves, 2014), ЦД состоит из физического объекта в реальном пространстве, виртуального объекта в виртуальном и связей, обеспечивающих поток данных из реального пространства в виртуальное и поток информации из виртуального пространства в реальное. Таким образом, ЦТ может рассматриваться как цифровая копия реального объекта и происходящих с ним процессов. Поведение физического объекта преобразуется в поведение виртуального, и оба объекта синхронизированы. Одним из характерных свойств ЦД является связь реального и виртуального объектов с помощью обмена данными в режиме реального времени, которая обеспечивает их синхронизацию. Конечно, в первую очередь, данные от различных датчиков, описывающие состояние физического объекта, поступают к виртуальному, но обратный поток информации также существует и его наличие является принципиально важным для инженерных промышленных приложений (Segovia, Garcia-Alfaro, 2022). В настоящее время ЦД, по сути, стал очередной версией инструмента для автоматизации различных процессов в промышленности, экономике и управлении. Предшествующие версии, такие, как некогда популярные автоматизированные системы управления (далее – АСУ) технологических процессов и территорий, не дали желаемого результата в силу отсутствия адекватных моделей, необходимых датчиков, программных средств и вычислительных ресурсов. Все эти инструменты появились в ходе так называемой четвертой промышленной революции, которую можно кратко определить как тотальную цифровизацию всех сторон жизни человека и общества.

Основная идея многих определений ЦД, которые представлены в литературе, – это синхронизированное многоцелевое моделирование физической системы или процесса, отображающее (с помощью использования исторических и текущих измерений) поведение ее физического двойника (реальной системы или процесса). Более обще ЦД определяется как постоянно меняющийся цифровой профиль объекта или процесса, позволяющий пользователю на основании анализа огромного объема исторических и актуальных данных, полученных в ходе измерений и моделирования целого ряда показателей объ-

екта или процесса в реальном мире, получить ответы на поставленные вопросы, дать ему возможность управлять как ходом, так и результатом процесса. Использование ЦД дает возможность осуществлять в реальном времени мониторинг систем и процессов, а также своевременный анализ данных для предотвращения проблем до их возникновения (так называемая предиктивная аналитика); позволяет планировать профилактический ремонт с целью сокращения и предотвращения простоев; планировать будущие обновления и осуществление новых разработок. Цифровой двойник становится точной и актуальной копией физической системы, которая также отражает эксплуатационный контекст физического оборудования. Наличие постоянной связи ЦД с физическим прототипом позволяет в динамике отслеживать производительность и данные о техническом обслуживании каждого физического аналога, выявлять и сообщать об отклонениях, а также планировать техническое обслуживание.

Можно согласиться с утверждением (Malik, Brem, 2020), что основа идеи о построении и использовании информационного (виртуального) ЦД далеко не нова и практически всегда использовалась для инженерного конструирования, строительства и понимания сложных физических систем. Ранее это был ЦД, существовавший лишь в воображении, и возможности его практического использования для описания функционирования систем или устройств были достаточно ограничены. В промышленности ситуация начала меняться с середины прошлого века, с появлением сначала двухмерного, а затем и трехмерного автоматизированного проектирования и построенного на их основе динамического вычислительного моделирования. В естественных науках появление компьютеров также привело к трансформации умозрительных моделей, подкрепленных подходящими математическими уравнениями, в численные модели, позволяющие с помощью вычислительных экспериментов анализировать временное поведение сложных систем. При этом о такой модели можно было забыть после получения результата (запуска производства). Появление концепции ЦД сделало моделирование, непрерывно использующее данные о поведении моделируемой (реальной) системы, базовой функциональностью информационно-вычислительных систем, описывающих жизненный цикл детали/устройства в производстве или временную (и/или пространственную) эволюцию сложной системы в науке. Использование ЦД в производстве позволяет вносить изменения в производство на основе сравнения вычисленных и «реальных» данных.

Согласно (Rasheed et al., 2019), главные технологические прорывы, приведшие к успешному использованию ЦД в различных областях, – это развитие Интернета вещей, обеспечивающее поступление данных от датчиков, машинное обучение и искусственный интеллект, обеспечивающие возможность глубокого анализа данных от датчиков и результатов моделирования, и появление графических процессоров, блоков тензорной обработки, равно как и облачных, и граничных вычислений. Конечно, в общем случае, ЦД опирается на комплекс цифровых технологий, которые используют подходы статистического анализа, машинного обучения, химии, физики, теории

управления, теории надежности, теории массового обслуживания, численного моделирования и оптимизации. Согласно отчету Oracle (Oracle. Digital Twins for IoT Applications ..., 2017), позитивы от использования ЦД включают: удаленный мониторинг и управление в режиме реального времени; сценарный анализ и оценку рисков; более эффективные системы поддержки решений; персонализацию продуктов и услуг: повышение информированности заинтересованных сторон.

Центральное место в ЦД занимает физическое моделирование меняющейся во времени системы/процесса, позволяющее на основе данных измерений, адекватной математической модели и глубокого анализа всех полученных данных прогнозировать поведение цифровой модели и, в случае необходимости, изменять сам физический объект/процесс. Конечно (Singh et al., 2021), термин ЦД относится к виртуальной копии или модели реального физического объекта, которые взаимосвязаны обменом данными в реальном или выбранном режиме времени. Цифровая модель может считаться версией ЦД, в которой обмен данными между физическим цифровым объектом производится вручную, т.е. изменения физического объекта не отражаются сразу в цифровом аналоге (и наоборот). Связь реального и виртуального объектов с помощью обмена данными в режиме реального времени, обеспечивающая их синхронизацию, является одним из характерных свойств ЦД. Несмотря на важность наличия обратного потока информации к виртуальному объекту, часто используется и такое понятие, как цифровая тень – такая версия ЦД, в которой данные о физическом объекте автоматически поступают к цифровому, в то время как обратное выполняется вручную. В этом случае изменения физического объекта сразу отображаются в цифровом. В ЦД же автоматически организуется двунаправленный поток данных и изменения в одном объекте меняют другой.

Конечно, ЦД является развитием численного моделирования, однако, используя Интернет вещей, они преодолевают его ограничения. Основное отличие цифровой модели от ЦД – это природа и направление потоков данных между физическим и виртуальным объектом. Цифровая модель является цифровой версией существующего объекта, полученной с помощью численной реализации его математической модели. Она не предусматривает автоматического обмена данными между ними и изменения состояния объекта после создания модели никак не влияют на модель, а значит и результаты моделирования. Если модель получает данные от физического объекта и усваивает их, то она актуализируется на основе поступающей новой информации и мы имеем дело с цифровой тенью. В ЦД поток данных автоматически синхронизирует цифровой объект с текущим состоянием физического, а цифровой объект посылает управляющую информацию физическому объекту. Таким образом, изменение состояния физического объекта автоматически ведет к изменениям цифрового и наоборот. Как правило, модель предсказывает поведение физического объекта на основе сделанных вначале предположений, в то время как ЦД использует данные о его текущем и прошлом поведении. Ясно, что опирающееся на первые принципы моделирование из-за необходимости использо-

вания различных предположений на пути от наблюдения и понимания процесса, математического описания его до решения полученных уравнений описывает лишь часть интересующего исследователя процесса. Его развитие, получившее название «опирающееся на данные моделирование» (Solomatine et al., 2009; Habib et al., 2021) основано на том предположении, что данные отражают как известную физику реальности, так и неизвестную. Популярность этого подхода выросла благодаря появлению недорогих датчиков, позволяющих регистрировать различные виды данных (текст, звук, изображение, включая и гиперспектральное, видео), современных вычислительных библиотек (tensorflow, torch, openAI) и недорогой вычислительной инфраструктуры (графические процессоры, блоки тензорной обработки, облачные и граничные вычисления). Некоторым преимуществом таких моделей является то обстоятельство, что они могут улучшаться по мере поступления новых данных. В то же время, они остаются «черным ящиком», что существенно ограничивает область их применения.

Цифровой двойник для наук об окружающей среде и сервисы, необходимые для его использования

На основе приведенных выше определений можно выделить те особенности ЦД, которые делают эту концепцию полезной и перспективной в науках об окружающей среде и, в частности, в климатологии, а также определить те сервисы, которые необходимы для его создания и использования. Физическими объектами в нашем случае являются экосистемы, окружающая среда выбранной территории (региона, страны), геосферы, вся планета Земля и/или происходящие в них процессы.

Хотя различные определения ЦД отражают специфику областей их использования (научные, промышленные, для стандартизации и пр.), общим является наличие в них цифровой реплики реального объекта (Hartmann, Van der Auweraet, 2020). Благодаря связи между реальным и виртуальным миром, обеспеченной потоками данных и информации, виртуальный объект существует одновременно с реальным. Так как виртуальный цифровой объект может быть оторван от реального, его можно изменять не меняя реального. Здесь сразу открывается возможность: используя основанные на данных модели, получать такие знания об объекте, которые было бы невозможно извлечь только из традиционных физико-математических моделей, использующих наблюдения.

Также конечная цель, обозначенная в таких определениях ЦД, как динамическое представление реального объекта/процесса, которое отражает его состояния и поведение в процессе жизненного цикла и может быть использовано для мониторинга, моделирования и анализа его текущих и будущих состояний и для вмешательств в них, или виртуальное представление физического объекта или процесса, реализованное через данные и моделирование, позволяющее осуществлять в реальном времени мониторинг и прогнозирование его поведения и создающее основу для улучшенного принятия решений (Ariesen-Verschuur et al., 2022), может принадлежать любой задаче из нашей области.

Ясно, что необходимые для создания и использования ЦД технологии, включающие в себя основанное на физике математическое моделирование систем и процессов, использующее данные моделирования, инструменты больших данных, вычислительные ресурсы, сети и платформы, а также взаимодействие человека и машины уже стали неотъемлемой частью климатологии (Гордов и др., 2018). То же можно сказать и об играющей важную роль в работе ЦД использовании различных способов усвоения данных, подтягивающих результаты вычислительного моделирования к данным наблюдений и о требовании того, что ЦД должен позволять делать соответствующие предсказания (прогнозы) с необходимым уровнем информации в подходящее время.

Основным отличием того, что подразумевается в концепции ЦД в представленных в литературе примерах разработки ЦД для климатологии от исходной версии, является отсутствие требования о наличии передачи в реальном масштабе времени информации от виртуального образа к реальному объекту/процессу. Эта важная для инженерных приложений возможность вмешательств «на ходу» практически нереализуема в нашей области. К счастью или к несчастью, но мы не можем управлять объектами/процессами в ней. Наверное, единственным исключением здесь являются искусственно контролируемые экосистемы типа теплиц. Поэтому здесь не всегда является важным отличие ЦД от цифровой тени и даже тогда, когда для анализа используются только данные наблюдений, речь идет о ЦД. Ведь цифровая тень – система связей и зависимостей, описывающих поведение реального объекта, содержащихся в данных, получаемых с реального объекта и/или от его моделей. Конечно, цифровая тень способна предсказать поведение реального объекта только в тех условиях, в которых осуществлялся сбор данных и для которых строилась описывающая его модель, но не позволяет моделировать ситуации, в которых реальный объект не эксплуатировался. Однако, именно такая ситуация характерна для задач климатологии.

Некоторые общие характеристики ЦД для окружающей среды приведены в отчете Национального океанографического центра Великобритании (ncc.ac.uk) (Siddorn et al., 2022). В частности, здесь также обсуждается отличие трех основных подходов, активно используемых и развиваемых в климатологии. В первую очередь, это цифровая модель – содержащее информацию представление системы, которое может использовать методы работы с данными и/или получение знаний на основе полученных с его помощью данных. Хотя она может опираться на наблюдения, непрерывное автоматическое освоение, вызванное изменениями в реальном мире в ней не используется. Примером может быть климатическое моделирование или использующая наблюдения климатология с координатной сеткой.

Следующий подход – это цифровая тень, т.е. цифровая модель, интегрирующая информацию от ее физического оригинала. Наиболее известный пример – прогноз погоды, в процессе подготовки которого информация от физического оригинала усваивается моделью в режиме реального времени, однако обратного влияния прогноза на погоду нет.

Достаточно редкий пока вариант, полностью соответствующий каноническому определению ЦД – это цифровая модель с двусторонним потоком информации в режиме реального или правильно выбранного времени. Хотя такие ситуации характерны лишь для инженерных приложений, адаптационные мероприятия можно рассматривать как обратную связь ЦД с реальностью. Например, вызванные неблагоприятным прогнозом изменения в реальном мире, произведенные в правильное время, необходимо учитывать при подготовке нового прогноза.

В этом отчете также сформулированы основные требования к структуре управления потоками информации в ЦД для окружающей среды. С точки зрения структуры управления потоками информации, обеспечивающей полноценное использование результатов, получаемых с помощью ЦД, все три версии ЦД одинаковы. Действительно, если глобальная модель земной системы прогоняется с усвоением наблюдений в реальном времени (цифровая тень) и она создана так, чтобы ее результаты были стандартизованы и переданы другой группе, то можно получить, например, климатологию экстремальных порывов ветра в городе (цифровая модель). Эта цифровая тень может быть также использована для получения в реальном времени вероятностного прогноза, например, для сельского хозяйства, адаптирующегося на этой основе (ЦД). Необходимыми элементами ЦД, которые должны быть связаны структурой управления потоками информации, являются: данные от системы наблюдения за физическим объектом; данные из других источников (архивы, другие ЦД и др.); платформа, обеспечивающая как хранение и доступ к данным, так и необходимые вычислительные возможности; аналитический уровень, преобразующий данные наблюдений в понятные знания (с помощью использующих сценарии прогнозных моделей и/или искусственного интеллекта, определяющих возможности и их последствия); и уровень, обеспечивающий интерактивность (интерфейс, связывающий ЦД, данные и пользователя). Ясно, что в последнем случае, взаимодействие с пользователем предусматривает визуализацию, задаваемые пользователем преобразования результатов, возможность использования научных инструментов анализа результатов. Следует добавить, что интуитивно понятный интерфейс пользователя, равно как и его опыт, является ключевым для реализации потенциала ЦД. Для создания цифрового инструмента, обеспечивающего пользователя информацией для действий, необходимо понимание потребностей пользователя. Это могут быть и ГИС-слои, допускающие использование в экспертных системах, и простые предупреждения об угрозах. Собственно, структура управления потоками информации для ЦД должна адекватно определять все стороны, процессы, информацию и технологии для поддержки развития и использования информационно-вычислительной (кибер-физической) инфраструктуры, включающей и ЦД.

Конечно, уже само определение ЦД как постоянно меняющегося цифрового профиля физического объекта или процесса, предоставляющего накопленные исторические, и актуальные данные измерений и моделирования для анализа и прогноза поведения или отклика на изменение внешних условий

является многообещающим для общих и конкретных задач наук об окружающей среде. А обязательный в рамках ЦД анализ накопленных и поступающих данных может дать не только информацию о состоянии экологического объекта или процесса и прогноз его поведения и взаимодействия с другими системами, но открывает и перспективную возможность управления поведением объекта и процессами его взаимодействия с другими системами. Однако, то обстоятельство, что интегрированная в цифровой двойник модель должна иметь адекватную, использующую технологии Интернета вещей, систему усвоения актуальных данных измерений, уровень которой не уступает системам, используемым в современных моделях прогноза погоды, а оперативный анализ результатов прогнозного моделирования может потребовать привлечения нейронных сетей, несколько умеряет энтузиазм разработчиков. Кроме того, распространение этого подхода на нетехнические системы, такие, как экосистемы или окружающая среда выбранной территории, далеко не очевидно. Ведь модель объекта и его эволюции (процесса) играет существенную роль в эффективности ЦД, но экосистемы/территории являются сложными системами, а для них такую модель, которая позволит получить ответы на все возникающие у исследователя или практика вопросы, построить практически нельзя. Поэтому существенным элементом создания необходимого ЦД является выбор таких моделей экосистемы и процессов, происходящих в ней и с ее участием, использование которых позволит получить ответы на ключевые вопросы. Необходима также такая вычислительная система, которая объединяет цифровые двойники и их реальные прототипы и позволяет собирать данные и обмениваться ими. Конечно, сам по себе цифровой двойник экосистемы/территории не дает возможности получить ответы на интересующие нас вопросы. Для этого необходимо создание цифровой платформы (гибкой программной инфраструктуры) сопровождения цифрового двойника экосистемы/территории, которая, используя смежные «сквозные» цифровые технологии искусственного интеллекта, больших данных, распределенных реестров и другие современные подходы информационных технологий, позволяет реализовать необходимые сервисы. В первую очередь к ним относятся: сервис, обеспечивающий доступ к вычислительным мощностям, функционирующий по модели «on demand»; сервис, предоставляющий доступ к цифровому профилю объекта, платформенные технологии управления процессами моделирования и данными (Simulation Process & Data Management, SPDM), а также вычислительными ресурсами (Simulation Process, Data and Resources Management, SPDRM). Ясно, что ведущиеся исследования приводят к тому, что модели экосистем и процессов постоянно уточняются, поэтому в такой платформе должна быть обеспечена возможность уточнения и даже замены используемых моделей.

Важность исследований и разработок в этом направлении определяется их ожидаемой ролью в разработке ставших актуальными стратегий адаптации к изменениям климата. Так, в новой стратегии ЕС по адаптации к изменению климата (ЕС, 2021) утверждается, что цифровые технологии, в частности, ЦД, должны обеспечивать научную основу для принятия решений на основе

оценки рисков от прошлых, настоящих и возможных в будущем последствий. ЦД, являющиеся виртуальными представлениями физических систем Земли, отражают их поведение и могут использоваться для адаптации к изменениям климата в нескольких направлениях (Rigon et al., 2022). В частности, это виртуальные модели зданий, городов, других систем, которые могут выявить потенциальную уязвимость к экстремальным погодным явлениям или другому воздействию, вызванному изменениями климата. Они также могут использоваться для проверки эффективности адаптационных стратегий в почти реальных ситуациях.

Существующие ЦД и перспективы

Метеорология

Как уже упоминалось выше, метеорология является одной из важных для применения ЦД областей. В частности, многие метеорологические организации в мире интенсивно используют ЦД, не всегда называя их так. Они используют цифровые модели территории (поверхность, растительность, здания), математические модели и большие данные, поступающие от многочисленных источников, чтобы создать численный прогноз погоды, результаты которого затем доводятся до потребителя (Lazo et al., 2011; Bauer et al., 2015; Ronda et al., 2017). Кроме того, в этой области развиты наиболее совершенные методы усвоения, почти в реальном масштабе времени, больших данных хорошо распараллеленными моделями, организовано хорошо документированное архивирование данных и обеспечение доступа к ним. Одно из важных приложений таких ЦД – использование близкого к реальному времени прогноза для уточнения сценариев систем поддержки решений (Benjamin et al., 2016). Еще одно из применений концепции ЦД – использование вычислительных моделей для тестирования новых измерительных устройств до их создания или развертывания. В этом случае роль реальности выполняют системы симулирования наблюдательных экспериментов (observing system simulation experiment (OSSE)). Они позволяют имитировать процедуры, используемые при анализе различных наблюдений (спутниковых, баллонных, наземных и др.) для уточнения состояний атмосферы, океана или поверхности (Errico et al., 2013; Privé et al., 2013; James, Benjamin, 2017; Hoffman, Atlas, 2016). Конечно, в метеорологии существует еще много направлений, в которых развитие идей ЦД может оказаться полезным, примеры которых можно найти в следующих работах (Price et al., 2018; Nipen et al., 2019; Wang et al., 2008; Вязилов, 2022).

Экосистемы и окружающая среда территории

Почва

Одним из перспективных приложений подхода к «цифровизации» экосистем является разработка ЦД микробиома почвы для оценки потоков парниковых газов в условиях глобальных изменений (Mukhtar et al., 2022). Чтобы такие ЦД были чем-то большим, чем просто большой набор данных, они

должны количественно воспроизводить динамику микробных популяций в ходе сложных биогеохимических процессов, происходящих в почве. Метаболизм микробов является большим источником основных парниковых газов и этот подход, помимо получения количественных оценок для потоков в современных и сценарных условиях, открывает возможность и для управления ими, и/или плодородием почвы.

Лес

Несколько проектов, направленных на создание ЦД такой климатически важной экосистемы, как лес, уже реализуется. В частности, в недавней работе (Buonocore et al., 2022) предложен подход к разработке ЦД леса, который должен использовать как технические новинки сбора информации на уровне деревьев, так и такие, уже устоявшиеся технологии мониторинга состояния лесов, как дистанционное зондирование. Предлагается интегрировать как мониторинг характеристик состояния отдельных деревьев и соответствующей окружающей среды, так и мониторинг характеристик состояния леса. Для создания ЦД предлагается измерять (хотя бы раз в час) и записывать 15 наборов переменных из двух групп: для дерева и для леса. В частности, для дерева это ИК температура листьев, спектральные компоненты света, радиальный рост, рост корней, потоки соков, летучие органические вещества, механическая устойчивость дерева. Для почвы, на которой растет дерево, это ее микробиология, влажность, питательные вещества, и дыхание. Кроме того, предлагается измерять метеорологические характеристики окружающего пространства: температуру воздуха, характеристики качества воздуха, влажность, скорость ветра. Этот набор данных позволит моделировать физические и биофизические процессы, происходящие как с деревом, так и вблизи него, такие как генерация биогенных летучих органических компонент, фенология дерева, рост биомассы, транспирация и устойчивость дерева. По сути, это даст описание виртуального дерева в виртуальном лесу и позволит, в частности, понять физиологические отклики дерева на засуху и гибель лесов при быстрых изменениях климата. Также предлагается измерять характеристики обмена энергией между атмосферой и поверхностью, смены режимов погоды, гидрологический режим бассейна, характеристики травоядной биоты, управления состоянием леса и др., используя для этого как технологии зондирования и мачты для измерения потоков газов и энергии, так и полевые работы по отслеживанию конкуренции деревьев и последствий работ по управлению лесом. Все это должно дать опирающуюся на данные систему, интегрирующую эко-физиологические процессы на уровне дерева с данными по структуре и динамике леса, которая позволит понять, как отклики леса на изменения климата, так и его роль в этих изменениях.

Менее амбициозный проект по созданию прототипа цифрового двойника локального участка леса, как элемента системы климатического мониторинга представлен в работе (Канев и др., 2022). Здесь, на первом этапе планируется создание сначала цифровой модели лесного участка (описывающего его структуру, функционал и эволюцию), а затем и собственно цифро-

вого двойника состоящего из цифровой модели и информационных связей с локальным участком леса. В основе цифрового моделирования локального участка леса лежит использование технологий наземного и воздушного лазерного сканирования с применением беспилотных летательных аппаратов с установленными лазерными сканерами. В результате такой съемки формируется облако точек, описывающих взаимное расположение объектов на участке сканирования и их форму. Сопоставив полученную трехмерную структуру лесного участка с видеорядом съемки можно полностью воссоздать отснятый участок с помощью технологий моделирования. В конечном счете, это позволит автоматизировать таксацию лесного участка, промоделировать различные сценарии развития лесных насаждений до 100 лет при разных способах ведения лесного хозяйства и провести анализ поглотительной способности углерода на период до 50 лет. Регулярное сканирование лесных участков позволит наблюдать их развитие и уточнять цифровой двойник, а также отслеживать процессы, не учтенные в цифровой модели лесного участка (например, незаконные вырубки). Таким образом, цифровой двойник локального участка леса позволяет получать автоматизированную оценку запасов древесины, проводить сценарное моделирование динамики лесных массивов для повышения качества эксплуатации лесного хозяйства, анализировать и обосновывать выбор стратегии ведения лесного хозяйства и лесопользования в эксплуатационных и защитных лесах РФ с позиций их климаторегулирующих функций.

Болото

Работы по созданию прототипа ЦД такой климатически существенной экосистемы как болото и платформы его сопровождения для использования в рамках создаваемой в России единой национальной системы мониторинга климатически активных веществ, в том числе и парниковых газов (https://www.economy.gov.ru/material/news/v_rossii_poyavitsya_nacionalnaya_sistema_monitoringa_klimaticheskii_aktivnyh_veshchestv.html) начаты в ИМКЭС СО РАН. Основной задачей здесь является получение количественных оценок потоков и пулов углерода болотными экосистемами таежной зоны Западной Сибири и их динамики в меняющихся климатических условиях. Необходимым этапом работы для формирования ЦД болота, в первую очередь, является «оцифровка» всех доступных результатов наблюдений объекта (картирование, геоботанические описания, характеристики почвы, запасы торфа, гидрология, и т.п.) и организация оцифрованных данных и имеющихся (уже цифровых) доступных данных инструментальных наблюдений и моделирования (измерения и моделирование гидрометеорологических характеристик, потоков парниковых газов и т.п.) в реляционные базы данных, обеспечивающие централизованный сбор, хранение, поиск, выборку данных и метаданных собранных характеристик объекта. Переход от исходного формата файлов данных к универсальному SQL интерфейсу обеспечивает основу автоматизированного обновления и унифицированной комплексной обработки данных разных источников. Следующим, и ключевым этапом, является

подбор, разработка и валидация математических моделей высокого уровня адекватности для основных процессов формирования потоков парниковых газов. В качестве таких моделей выбраны модификация модели поверхности суши ИВМ РАН – МГУ, позволяющая, по заданному атмосферному форсингу, вычислять локальные и площадные гидротермические характеристики почвы, включая потоки тепла и влаги (Богомолов и др., 2020), и эмпирическая модель, позволяющая определять потоки парниковых газов по заданным или измеряемым микрометеорологическим характеристикам (Dyukarev, 2017; Dyukarev et al., 2019; Дюкарев, 2020). Использование модели поверхности суши в цифровом двойнике болота носит вспомогательный характер, т.к. ее функция здесь – это вычисление гидротермодинамических характеристик, влияющих на потоки парниковых газов, и результаты выполняемых измерений используются только для ее валидации и коррекции результатов моделирования. Основной моделью цифрового двойника, которая работает на основе потоковых данных камерных и пульсационных измерений, является эмпирическая модель потоков. Наличие этих моделей, их валидация на ключевых участках позволит не только восстанавливать пропуски в результатах прямых измерений характеристик потоков, но и осуществить переход к получению количественных оценок для рассматриваемой территории. Следующим этапом, необходимым для решения поставленных задач и создания, в конечном счете, прототипа распределенной информационной системы мониторинга и комплексного анализа пулов и потоков парниковых газов болотных экосистем на основе цифрового двойника, является разработка необходимых сервисов и создание гибкой программной инфраструктуры цифровой платформы сопровождения цифрового двойника экосистемы. К числу таких сервисов относятся сервисы пополнения баз данных, запуска моделей, архивации и анализа результатов вычислений, в частности, вычисления потоков парниковых газов для заданных интервалов времени (30 минут, сутки, декада, месяц, вегетационный сезон и год) на ключевых участках и на выбранной территории. Существенную роль также играют сервисы, обеспечивающие визуализацию полученных результатов на выбранной картографической основе и доступ к ним различных групп пользователей. Платформа не только должна объединить все разработанные сервисы, но и обеспечить возможность ее эффективного использования различными группам пользователей, в частности, опытным и начинающим исследователям, и лицам, принимающим решения. Функциональность платформы должна позволять получение достоверных количественных оценок пулов и потоков углерода в наземных экосистемах южно-таежной подзоны Западной Сибири и их отклика на происходящие изменения климата. Следует добавить, что использование в качестве форсинга результатов климатического моделирования открывает возможность применения прототипа для анализа откликов потоков на реализацию того или иного сценария изменения климата. Для разработки платформы планируется использовать подходы и инструменты, созданные в процессе разработки прототипа цифровой исследовательской и образовательной платформы (виртуальной исследовательской среды) анализа и прогнозирования процессов,

идущих в окружающей среде региона под влиянием глобальных изменений веб-ГИС Климат (Гордов и др., 2022) (<http://climate.scert.ru/>). Это, в частности, сервисы, предоставляющие доступ к климатическим и метеорологическим компонентам цифрового профиля объекта окружающей среды, обеспечивающие прослеживаемость изменения ее характеристик, сервис, обеспечивающий доступ к вычислительным мощностям, функционирующий по модели «on demand» и позволяющий пользователю выполнять вычисления, необходимые для анализа выбранных характеристик объекта, с помощью проверенных алгоритмов, сервис, позволяющий разработчику быстро включать в вычислительный конвейер новые элементы и добавлять новые архивы геопривязанных данных, а также, платформенные технологии управления процессами моделирования и данными, и вычислительными ресурсами.

Сельское хозяйство

Еще одной областью, в которой активно идет развитие ЦД, является сельское хозяйство (Nasirahmadi, Hensel, 2022). Здесь направления их применения включают почву, ирригацию, роботизацию на полях и фермах, и т.д. Компонентами ЦД являются физические системы (сложная и меняющаяся окружающая среда, сами объекты или устройства (растения, почвы, животные, механизмы), датчики (собирающие и передающие информацию о нем, модели (отражающие меняющиеся свойства физических объектов) и, конечно же, анализирующие собранную информацию платформы. Эти платформы не только готовят информацию для управления процессами или системами, но и могут передавать ее физическим объектам, управляя их поведением. Такие системы уже следят с помощью оптических датчиков за состоянием растительности и выявляют ее заболевания, за погодой и почвой, определяющими урожайность, за влажностью и температурой в зернохранилищах, обеспечивают пищевую цепочку и контролируют содержание аммиака на фермах и управляют движением техники.

Хотя сельскохозяйственные ЦД находятся еще на ранней стадии развития, уже ясно, что их можно использовать для выбора действий в сложных потоках работ, автоматизированного анализа собранных данных, определения состава и возможностей почв, моделирования урожайности, агрометеорологического прогноза и оценки стрессов, вызванных инвазивными сорняками и насекомыми, качеством почвы, ее загрязнениями и другими факторами (MentorMate, 2020). Работы по развитию цифрового земледелия, опирающегося на моделирование в рамках ЦД всей цепочки производства сельскохозяйственной продукции и ее элементов, начаты и в России (Кирюшин и др., 2018). Ясно, что благодаря ЦД можно сделать земледелие в целом более эффективным.

Водные ресурсы

Проекты создания ЦД водных ресурсов выходят за рамки отдельных систем и относятся уже к территориям и происходящим на них процессам. Так, в (Henriksen et al., 2023) представлен проект разрабатываемого в Дании гидрологического ЦД, который, оперируя на основе спутниковой информа-

ции, сетей датчиков уровня воды, влажности, и гидрологических моделей, обеспечивающих прогноз, сможет помочь в уменьшении рисков для населения, промышленности и инфраструктуры. В частности, ЦД отражает аномалии влажности и засушливости территории и в реальном масштабе времени или в прогнозном режиме (5-10 суток) обеспечивает предупреждения о рисках наводнений или засухи. Кроме того, этот ЦД позволит определять уязвимые районы и инфраструктуру. Планируется проводить синхронизацию ЦД с реальностью раз в сутки, что вполне достаточно как в случае наводнений, так и для управления рисками от наводнений и засух.

В рамках программы «Приоритет 2030» создан консорциум для реализации нового федерального проекта «Цифровой Обь-Иртышский бассейн», который, по словам его организаторов (<https://www.spbstu.ru/media/news/partnership/polytech-digital-model-ob-Irtysh-basin/>), станет первым в стране цифровым двойником бассейна рек. Ожидается многокомпонентный результат создания цифровой модели речной системы: от решения актуальных технологических, экологических и социально-экономических задач на территории Обь-Иртышского бассейна до разработки основы для создания в стране отрасли экологического машиностроения. Следует добавить, что несколько иная точка зрения на эффективность и целесообразность создания ЦД для гидрологии изложена в недавней публикации (Данилов-Данильян, 2019). В рамках этой же программы начато выполнение проекта «Цифровой двойник геосистемы приморской территории» (<https://ibss-ras.ru/News-IBSS/1774/>).

Глобальные проекты

В климатологию ЦД естественно вошли вместе с большими данными. В первую очередь это произошло в центрах климатических данных, в которых собираются большие массивы результатов измерений и моделирования, необходимые как для понимания процессов, происходящих в атмосфере, океане и на поверхности Земли, так и для подготовки начальных условий для их прогнозирования. Согласно (Nativi et al., 2021) у новой парадигмы извлечения готового к использованию знания из потоков данных есть три компонента: коллекции больших данных (агрегированные и концептуализированные цифровые отпечатки), генерация глубокого понимания на их основе (с помощью аналитики больших данных), интерпретация этого понимания и генерация готового к использованию знания (достигаемого с помощью специализированных платформ, взаимодействующих с пользователями и обеспечивающих их персонализированными услугами). Использование этой парадигмы в изучении глобальных изменений климата и устойчивого развития, являющегося прикладной целью климатических исследований, привело к появлению новой модели научных исследований (Guo et al., 2020), которая характеризуется не только взаимодействием между различными областями науки (естественные, социальные и гуманитарные науки), но и к трансдисциплинарному обмену знаниями и его совместному порождению. Эта модель, иногда называемая большие данные о Земле, нацелена на

получение информации из больших данных и обеспечение знанием ученых, инженеров и лиц, принимающих решения. Сейчас ЦД развиваются в рамках нескольких научных и инженерных сообществ: наблюдений Земли (Nativi et al., 2020), космических агентств (ESA Digital Twin Earth Challenge, 2020), исследователей климата (World Climate Research Programme, 2020), океанографов (European Commission, 2020), цифровой Земли (Van Genderen et al., 2020), и метеорологов, нацеленных на уменьшение рисков от природных катастроф (Australian Government Bureau of Meteorology, 2020). Несмотря на определенные различия в подходах этих сообществ, ЦД Земли определяется, как цифровая реплика компонент системы Земля, ее структуры, процессов и явлений, получаемая в результате слияния цифрового моделирования и массива наблюдений в реальном мире (потоков данных от локальных, дистанционных и синтезированных наблюдений). Конечно, ЦД Земли должен включать цифровую симуляционную модель, которая меняется и осовременивается в соответствии с ее физическим оригиналом. Эти ЦД претендуют на роль инструмента, который даст основу для понимания происходящих и возможных в будущем изменений климата и позволит выбрать такие отклики общества на них, которые обеспечат устойчивое развитие человечества. Считается, что именно с их помощью можно получить ответы на основные вопросы современной климатологии; Что происходит с климатом (что будет?); Причины происходящего (кто виноват?); Последствия для общества и окружающей среды (позитивы и негативы); Как остановить/замедлить изменения климата? и Как адаптироваться к ним (что делать?)? ЦД Земли должен позволить пользователю с помощью разработанных программных средств пройти всю цепочку анализа от прошлого или настоящего к возможному для выбранных сценариев развития будущему, откликов на возможные изменения, и получить количественные результаты в необходимом масштабе и понятном формате (визуализация).

На создание цифровых двойников природных и климатических систем и процессов и поддерживающих их использование платформ в мире уже направлено несколько крупных проектов. Наиболее масштабной и перспективной выглядит рассчитанная на 10 лет инициатива Европейского Союза DestinE (Destination Earth, 2020) по созданию цифрового двойника нашей планеты (Bauer et al., 2021), который должен дать основу для перехода к «зеленой» экономике. В ее рамках будет создана цифровая модель Земли высокого (до 1 км для Европы) горизонтального разрешения, которая станет основой для мониторинга и прогноза естественных и антропогенных процессов. Базирующиеся на непрерывных наблюдениях, моделировании и высокопроизводительных расчетах цифровые двойники (два первых: «Погодные и геофизические экстремальные явления» и «Адаптация к климатическим изменениям»), дадут пользователям высококачественную информацию, сервисы, модели, сценарии, прогнозы и инструменты визуализации возможных в будущем явлений и их последствий. Высокоточное представление цифровой версии Земли станет возможным благодаря использованию новой климатической модели и огромному вычислительному потенциалу специально соз-

даваемого суперкомпьютера. Пространственное разрешение, запланированное в проекте DestinE, будет огромным шагом вперед относительно текущего уровня компьютерного моделирования. Для сравнения, действующая климатическая модель Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды имеет пространственное разрешение около 9 км.

Считается, что использование ЦД Земли поможет предвидеть, отслеживать и лучше понимать ключевые явления и процессы, происходящие с планетой. Например, метеорологи смогут не просто прогнозировать стихийные бедствия, но и рассчитывать возможные последствия, а также способы их предотвращения с высокой точностью и детализацией. Климатологов эта модель заинтересует в плане возможности более детального прогнозирования изменений погоды на десятилетия вперед. В целом, данные DestinE могут существенно улучшить понимание процессов, происходящих в системе Земля. Существенным фактором является и то, что пользователи смогут получить доступ не только к результатам, но и к инструментам, т.к. планируется создание такой открытой и гибкой программной инфраструктуры, которая даст возможность и пользователям–неспециалистам вмешиваться в поток вычислений и получать ответы на свои конкретные запросы. Таким образом, представители научного сообщества, бизнеса, образовательных организаций, фермеры или студенты смогут использовать DestinE для решения своих задач, которые требуют использования надежных данных о Земле и ее различных характеристиках, не только актуальных или специально созданных в данный момент, но и возможных в будущем. Конечно, создаваемая в рамках проекта цифровая модель Земли высокого горизонтального разрешения, станет основой для мониторинга и прогноза естественных и антропогенных процессов.

Работы по созданию ЦД Земли начаты не только в Европе. Так NVIDIA анонсировала свои планы о работах в этом направлении. На первом этапе компания намерена создать суперкомпьютер Earth-2 (<https://blogs.nvidia.com/blog/2021/11/12/earth-2-supercomputer/>) для поддержки климатического моделирования сверхвысокого разрешения. Поставлена цель достигнуть необходимого для учета роли облаков в тепловом балансе разрешения в метрах. Считается, что такой суперкомпьютер вместе с адекватной моделью создаст основу для ЦД Земли.

Также, недавно в США была представлена (<https://www.llnl.gov/news/updated-exascale-system-earth-simulations>) вторая версия проекта Energy Exascale Earth System Model (E3SM), по мнению разработчиков представляющая собой цифровой двойник Земли для моделирования климата. Модель E3SMv2 позволяет уменьшить сетку региональной модели в районе Северной Америки до 25 км со 100 км на остальной карте мира, что в разы повышает детальность прогнозов для территории США.

Помимо работ по созданию ЦД всей Земли, значительные усилия принимаются по разработке и применению ЦД океана. Эти работы ведутся в рамках специального проекта DITTO (Digital twin of the Ocean, <https://ditto-oceandecade.org/>) одной из глобальных программ ООН «Десятилетие науки об

Океане для устойчивого развития» (2021-2031). На сайте этого проекта можно найти детальную информацию как о ЦД для океанографии и ее приложений, так и о выполняемых в рамках проекта работах (<https://ditto-oceandecade.org/author/ditto>).

Считается, что DITTO позволит пользователям и партнерам создавать сценарии развития, связанные с океаном, для решения таких вопросов, как энергетика, добыча полезных ископаемых, рыболовство и туризм. Цифровые двойники помогут количественно оценить экологические изменения и ожидаемые выгоды. DITTO позволит специалистам в области океана, включая научных пользователей, создавать свои собственные локальные или тематические цифровые двойники "своих океанских проблем", используя разработанные стандартные рабочие процессы.

В рамках этой программы ИО РАН осуществляется проект создания ЦД Каспийского моря (The Caspian Sea Digital Twin (CasSeaDi) – Ocean Decade). Его целью является создание "Центра данных Каспийского моря", который будет включать обновленный архив спутниковых, океанографических, гидрометеорологических, гидродинамических моделей, данных атмосферных реанализов, результатов региональных прогнозов изменения климата, электронных атласов, электронной библиотеки публикаций по Каспийскому морю. База данных позволит оценить антропогенные нагрузки на окружающую среду Каспийского моря, происходящие изменения климата, экстремальные погодные и климатические явления, влияние изменения климата на природные и социально-экономические системы, дать количественную основу для разработки стратегии и механизмов адаптации Каспийского моря к изменению климата.

Заключение

Как показывает предшествующий анализ, для успешного создания и использования ЦД необходимо четыре ключевых элемента поддержки: сам физический объект или процесс, обширное хранилище данных (иногда называемое озером данных), заполненное всеми видами данных и информацией для создания и постоянного обновления ЦД, сам ЦД, включающий модели с доступом к данным, анализ и необходимое для функционирования инструментов систем поддержки решений понимание, а также сами инструменты систем поддержки решений, включающие визуализацию и приспособленные к нуждам пользователей интерфейсы. Конечной целью ЦД является поддержка решений и обеспечение своевременных вмешательств, приводящих к лучшему результату. Хотя ЦД часто путают с прогнозными моделями, они отличаются направленностью на генерацию дополнительной информации о возможных решениях, способных в свою очередь изменять и физический объект. ЦД не только обеспечивает прогнозную информацию, но и отвечает на вопрос «что, если».

ЦД для природных объектов и территорий окружающей среды, в отличие от их инженерных аналогов, скорее ориентированы не на конечный продукт (изделие, устройство), а на создание научно-обоснованных подходов. Это

обстоятельство позволяет использовать физико-математические модели, лишь частично отражающие объект и его поведение. Объект или процесс, конечно, фиксируется с помощью наблюдений (мониторинга), данные которого поступают в исследовательскую инфраструктуру и дают исследователям новые идеи. Это знание затем используется в моделях (таких как модели климата или видов), численные результаты которых проверяются на соответствие наблюдениям. Только на следующем этапе можно включить в рассмотрение влияние человека и оценить (и предсказать) как антропогенный фактор ее меняет.

Современный уровень информационно-вычислительных технологий (модели, вычислительные ресурсы, усвоение данных, виртуальная исследовательская среда с облачными хранилищами и вычислениями, Интернет вещей и машинное обучение) уже дает необходимую основу для создания ЦД и платформ их сопровождения для экосистем (леса, поля, луга, пашни, болота, водоемы и т.д.), территорий, климатической системы Земли и ее подсистем и процессов, происходящих в них. Именно эти информационно-вычислительные платформы, использующие ЦД систем и процессов, могут вывести климатологию на новый уровень, как понимания и прогноза хода климатических процессов, так и практических приложений этого знания. В частности, этот путь может дать научную основу для адаптации к климатическим изменениям, решению задачи мониторинга и контроля обмена парниковыми газами экосистем и атмосферы и, в конечном счете, управления вкладом земной поверхности в баланс углерода. На такой научной основе можно реализовать программы использования экосистем для компенсации промышленных выбросов парниковых газов, необходимые для перехода к «зеленой» экономике.

Суммируя, можно сказать, что ЦД формирует новую парадигму в исследованиях окружающей среды, в частности, погоды и климата. Двойники помогут интерактивно исследовать возможное будущее климата и обеспечат пользователей необходимой климатической информацией. Конечно, для достижения этой цели необходимо создавать ЦД для многих климатических процессов и участвующих в формировании климата физических и экологических систем.

Появление нового инструмента, интегрирующего современные модели процессов и участвующих в них систем, данные измерений, новые средства анализа получаемых больших массивов данных моделирования и мониторинга, визуализации его результатов и доведения их до заинтересованных сторон открывает специалистам новые возможности. В частности, приведенные выше примеры создания и использования ЦД климатических систем и процессов, позволяют уточнить их роль в формировании локального, регионального и глобального климата, его режимов и динамики. Ясно, что появление ЦД для новых процессов и систем позволит уточнить понимание их роли в этом. Большое значение имеет и открывающаяся на основе использования соответствующих ЦД возможность уточнения последствий различных адаптационных мероприятий. Кроме того, обеспечиваемая ЦД возможность выполнения климатического анализа не только специалистами в области моделирования и/или статистики, существенно расширяет круг пользователей, что несомненно при-

ведет к появлению новых результатов и, как следствие, к более глубокому пониманию процессов формирования и динамики климата.

Работа выполнена в рамках тем FWNW-2021-0006 и FWRG-2021-0004.

Список литературы

Богомолов, В.Ю., Дюкарев, Е.А., Степаненко, В.М. (2020) Моделирование температурного и влажностного режима болотных и минеральных почв в модели деятельного слоя с учетом изменения термодинамических свойств почвы по глубине, *Сборник трудов ENVIROMIS-2020*, Томск, ЦНТИ, с. 93-96.

Вязилов, Е.Д. (2022) Цифровой двойник для окружающей среды, *Сборник трудов ENVIROMIS-2022*, Томск, ЦНТИ, с. 323-326.

Гордов, Е.П., Окладников, И.Г., Титов, А.Г., Воропай, Н.Н., Рязанова, А.А., Лыкосов, В.Н. (2018) Развитие информационно-вычислительной инфраструктуры для современной климатологии, *Метеорология и гидрология*, № 11, с. 20-30.

Гордов, Е.П., Гордова, Ю.Е., Окладников, И.Г., Рязанова, А.А., Титов, А.Г. (2022) Веб-ГИС платформа «Климат» для исследования климатических процессов и откликов на них: потенциал и перспективы, *Оптика атмосферы и океана*, т. 35, № 02, с. 132-135, doi: 10.15372/AOO20220208.

Данилов-Данильян, В.И. (2019) Экология, гидрология, цифровизация, цифровые двойники и азбучные истины методологии моделирования, *Научные проблемы оздоровления российских рек и пути их решения*, Сборник научных трудов, Москва, Студия Ф1, с. 497-450.

Дюкарев, Е.А. (2020) Моделирование сезонного хода углеродного обмена в болотных экосистемах, *Экология. Экономика. Информатика. Серия: Системный анализ и моделирование экономических и экологических систем*, т. 1, № 5, с. 56-61.

Канев, А.И., Якубов, А.Р., Чумаченко, С.И., Терехов, В.И. (2022) Создание прототипа цифрового двойника локального участка леса, как элемента системы климатического мониторинга, *Сборник докладов ENVIROMIS-2022*, Томск, ЦНТИ, с. 424-425.

Кирюшин, В.И., Иванов, А.И., Козубенко, И.С., Савин, И.Ю. (2018) Цифровое земледелие, *Вестник российской сельскохозяйственной науки*, № 5, с. 3-5.

Ariesen-Verschuur, N., Verdouw, C., Tekinerdogan, B. (2022) Digital Twins in greenhouse horticulture: A review, *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 199, 107183.

Australian Government Bureau of Meteorology (2020) *A Land of Storms, Floods and Bushfires: Seamless and Integrated Forecasting*, Australian Government: Canberra, Australian, 2020.

Bauer, P., Stevens, B., Hazeleger, W. (2021) A digital twin of Earth for the green transition, *Nature Climate Change*, vol. 11, pp. 80-83, available at: <https://doi.org/10.1038/s41558-021-00986-y>.

Bauer, P., Thorpe, A., Brunet, G. (2015) The quiet revolution of numerical weather prediction, *Nature*, vol. 525, no. 7567, p. 47.

Benjamin, S.G., Weygandt, S.S., Brown, J.M., Hu, M., Alexander, C.R., Smirnova, T.G., Olson, J.B., James, E.P., Dowell, D.C., Grell, G.A. et al. (2016) A North American hourly assimilation and model forecast cycle: The rapid refresh, *Monthly Weather Review*, vol. 144, no. 4, pp. 1669-1694.

Buonocore, L., Yates, J., Valentini, R. (2022) A Proposal for a Forest Digital Twin Framework and Its Perspectives, *Forests*, vol. 13, no. 4, p. 498, available at: <https://doi.org/10.3390/f13040498>.

Dyukarev, E., Godovnikov, E., Karpov, D., Kurakov, S., Lapshina, E., Filippov, I., Filippova, N., Zarov, E. (2019) Net Ecosystem Exchange, Gross Primary Production And Ecosystem Respiration In Ridge-Hollow Complex At Mukhrino Bog, *Geography, Environment, Sustainability*, vol. 12, no. 2, pp. 227-244, doi:10.24057/2071-9388-2018-77.

Dyukarev, E.A. (2017) Partitioning of net ecosystem exchange using chamber measurements data from bare soil and vegetated sites, *Agricultural and Forest Meteorology*, vol. 239, pp. 236-248, doi:10.1016/j.agrformet.2017.03.011.

EC (2021) *EU Strategy on Adaptation to Climate Change. COM/2021/82 Final*, available at: <https://eur-lex.europa.eu/legalcontent/EN/TXT/?uri=COM:2021:82:FIN> (accessed on 1 December 2022).

Errico, R.M., Yang, R., Priv'e, N.C., Tai, K.-S., Todling, R., Sienkiewicz, M. E., Guo, J. (2013) Development and validation of observing system simulation experiments at NASA's Global Modeling and Assimilation Office, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, vol. 139, no. 674, pp. 1162-1178.

ESA Digital Twin Earth Challenge (2020) Available at: <https://copernicus-masters.com/prize/esa-challenge/> (accessed on 1 January 2021).

European Commission (2020) *A Transparent & Accessible Ocean: Towards a Digital Twin of the Ocean*, Available at: https://ec.europa.eu/info/sites/info/files/research_and_innovation/green_deal/gdc_stakeholder_engagement_topic_09-3_digital_ocean.pdf (accessed on 2 January 2020).

European Commission-DG CNECT (2020), *Destination Earth (DestinE)*, Available at: <https://ec.europa.eu/digital-single-market/en/destination-earth-destine> (accessed on 2 January 2021).

Grieves, M. (2014) *Digital Twin: Manufacturing Excellence through Virtual Factory Replication*, White Paper, Melbourne, FL, USA, Florida Institute of Technology, pp. 1-7.

Guo, H., Nativi, S., Liang, D., Craglia, M., Wang, L., Schade, S., Corban, C., He, G., Pesaresi, M., Li, J. et al. (2020) Big Earth Data science: An information

framework for a sustainable planet, *International Journal of Digital Earth*, vol. 13, pp. 743-767.

Habib, M.K., Ayankoso, S.A., Nagata, F. (2021) Data-Driven Modeling: Concept, Techniques, Challenges and a Case Study, *IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA)*, Takamatsu, Japan, pp. 1000-1007, doi:10.1109/ICMA52036.2021.9512658.

Hartmann, D., Van der Auweraer, H. (2020) *Digital Twins*, 2001.09747v1 [cs.CY].

Henriksen, H.J., Schneider, R., Koch, J., Ondracek, M., Troldborg, L., Seidenfaden, I.K., Kragh, S.J., Bøgh, E., Stisen, S. (2023) A New Digital Twin for Climate Change Adaptation, Water Management, and Disaster Risk Reduction (HIP Digital), *Water*, vol. 15, p. 25, available at: <https://doi.org/10.3390/w15010025>.

Hoffman, R.N., Atlas, R. (2016) Future observing system simulation experiments, *Bulletin of the American Meteorological Society*, vol. 97, no. 9, pp. 1601-1616.

James, E.P., Benjamin, S.G. (2017) Observation system experiments with the hourly updating rapid refresh model using GSI hybrid ensemble-variational data assimilation, *Monthly Weather Review*, vol. 145, no. 8, pp. 2897-2918.

Lazo, J.K., Lawson, M., Larsen, P.H., Waldman, D.M. (2011) US economic sensitivity to weather variability, *Bulletin of the American Meteorological Society*, vol. 92, no. 6, pp. 709-720.

Malik, A.A., Brem, A. (2020) *Man, machine and work in a digital twin setup: a case study*, pre-print, arXiv, 2006.08760 [cs.CY].

MentorMate (2020) The Future of Farming: 7 Ways A Digital Twin Can Be Applied to Agriculture. available at: <https://medium.com/@MentorMate/the-future-of-farming-7-ways-a-digital-twin-can-be-applied-to-agriculture-595a1750c453> (accessed on 12 October 2020).

Mukhtar, H., Wunderlich, R.F., Lin, Y.-P. (2022) Digital Twins of the Soil Microbiome for Climate Mitigation, *Environments*, vol. 9, no. 34, available at: <https://doi.org/10.3390/environments9030034>.

Nasirahmadi, A., Hensel, O. (2022) Toward the Next Generation of Digitalization in Agriculture Based on Digital Twin Paradigm, *Sensors*, vol. 22, p. 498, available at: <https://doi.org/10.3390/s22020498>.

Nativi, S., Delipetrev, B., Craglia, M. (2020) *Destination Earth: Survey on Digital Twins Technologies and Activities, in the Green Deal Area*, Luxembourg, European Commission.

Nativi, S., Mazzetti, P., Craglia, M. (2021) Digital Ecosystems for Developing Digital Twins of the Earth: The Destination Earth Case, *Remote Sensing*, vol. 13, p. 2119, available at: <https://doi.org/10.3390/rs13112119>.

Nipen, T., Seierstad, I., Lussana, C., Kristiansen, J. (2019) *Private observations improve MET Norway's operational weather forecasts*, The 99th Annual Meeting of the American Meteorological Society, American Meteorological Society, Phoenix, 6-10 January 2019.

Oracle. *Digital Twins for IoT Applications: A Comprehensive Approach to Implementing IoT Digital Twins*, available at: <http://www.oracle.com/us/solutions/internetofthings/digital-twins-for-iot-apps-wp-3491953.pdf>.

Price, C., Maor, R., Shachaf, H. (2018) Using smartphones for monitoring atmospheric tides, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, vol. 174, pp. 1-4.

Priv'e, N., Errico, R., Tai, K.-S. (2013) Validation of the forecast skill of the Global Modeling and Assimilation Office observing system simulation experiment, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, vol. 139, no. 674, pp. 1354-1363.

Rasheed, A., San, O., Kvamsdal, T. (2019) *Digital Twin: Values, Challenges and Enablers*, arXiv:1910.01719v1 [eess.SP].

Rigon, R., Formetta, G., Bancheri, M., Tubini, N., D'Amato, C., David, O., Massari, C. (2022) HESS Opinions: Participatory Digital Earth Twin Hydrology systems (DARTHS) for everyone: A blueprint for hydrologists, *Hydrology and Earth System Science*, vol. 26, pp. 4773-4800.

Ronda, R., Steeneveld, G., Heusinkveld, B., Attema, J., Holtslag, A. (2017) Urban finescale forecasting reveals weather conditions with unprecedented detail, *Bulletin of the American Meteorological Society*, vol. 98, no. 12, pp. 2675-2688.

Segovia, M., Garcia-Alfaro, J. (2022) Design, Modeling and Implementation of Digital Twins, *Sensors*, vol. 22(14), p. 5396.

Siddorn, J., Blair, G., Boot, D., Buck, J., Kingdon, A., Kloker, A., Kokkinaki, A., Moncoiffe, G., Blyth, E., Fry, M., Heaven, R., Lewis, E., Marchant, B., Napier, B., Pascoe, C., Passmore, J., Pepler, S., Townsend, P., Watkins, J. (2022) An Information Management Framework for Environmental Digital Twins (IMFe), *National Oceanography Center*, 23 p., available at: <https://zenodo.org/record/7004351#.Y1A3ai-228U>.

Singh, M., Fuenmayor, E., Hinchy, E.P., Qiao, Y., Murray, N., Devine, D. (2021) Digital Twin: Origin to Future, *Applied System Innovation*, vol. 4, no. 36, available at: <https://doi.org/10.3390/asi4020036>.

Solomatine, D., See, L., Abrahart, R. (2009) Data-Driven Modelling: Concepts, Approaches and Experiences, in: Abrahart, R.J., See, L.M., Solomatine, D.P. (eds), *Practical Hydroinformatics. Water Science and Technology Library*, Berlin, Heidelberg, Springer, vol. 68, available at: https://doi.org/10.1007/978-3-540-79881-1_2.

Van Genderen, J., Goodchild, M.F., Guo, H., Yang, C., Nativi, S., Wang, L., Wang, C. (2020) *Digital Earth Challenges and Future Trends*, Manual of Digital Earth, Singapore, Springer, pp. 811-827.

Wang, X., Barker, D.M., Snyder, C., Hamill, T.M. (2008) A hybrid ETKF–3DVAR data assimilation scheme for the WRF model. Part I: Observing system simulation experiment, *Monthly Weather Review*, vol. 136, no. 12, pp. 5116-5131.

World Climate Research Programme (2020) Report of the 41st Session of the Joint Scientific Committee, Geneva, Switzerland, WMO.

References

Bogomolov, V.Yu., Dyukarev, E.A., Stepanenko, V.M. (2020) Modelirovanie temperaturnogo i vlazhnostnogo rezhima bolotnyh i mineral'nyh pochv v modeli deyatel'nogo sloya s uchetom izmeneniya termodinamicheskikh svoystv pochvy po glubine [Modeling temperature and humidity conditions of mineral soils in the active layer model, taking into account changes in the thermodynamic properties of the soil in depth], *Sbornik trudov ENVIROMIS-2020* [Collection of proceedings ENVIROMIS-2020], CNTI, Tomsk, Russia, pp. 93-96.

Vyazilov, E.D. (2022) Cifrovoj dvojn timer dlya okruzhayushchej sredy [Digital twin for environment], *Sbornik trudov ENVIROMIS-2022*, [Collection of proceedings ENVIROMIS-2022], CNTI, Tomsk, Russia, pp. 323-326.

Gordov, E.P., Okladnikov, I.G., Titov, A.G., Voropaj, N.N., Ryazanova, A.A., Lykosov, V.N. (2018) Razvitie informacionno-vychislitel'noj infrastruktury dlya sovremennoj klimatologii [Development of Information-computational Infrastructure for Modern Climatology], *Meteorologiya i Gidrologiya*, no. 11, pp. 20-30.

Gordov, E.P., Gordova, Yu.E., Okladnikov, I.G., Ryazanova, A.A., Titov, A.G. (2022) Veb-GIS platforma «Klimat» dlya issledovaniya klimaticheskikh processov i otklikov na nih: potencial i perspektivy [Climate web GIS platform for research of climate processes and responses to them: Potential and prospects], *Optika atmosfery i okeana*, vol. 35, no. 02, pp. 132-135, doi: 10.15372/AOO20220208.

Danilov-Danil'yan, V.I. (2019) Ekologiya, gidrologiya, cifrovizaciya, cifrovyje dvojn timer i azbuchnye istiny metodologii modelirovaniya [Ecology, hydrology, digitalization, digital twins and elementary truths of modeling methodology], *Nauchnye problemy ozdorovleniya rossijskikh rek i puti ih resheniya* [Scientific problems of the improvement of Russian rivers and ways to solve them], *Sbornik nauchnyh trudov* [Collection of scientific papers], Studio F1, Moscow, Russia, pp. 497-450.

Dyukarev, E.A. (2020) Modelirovanie sezonnogo hoda uglerodnogo obmena v bolotnyh ekosistemah [Modeling the seasonal course of carbon exchange in bog ecosystems], *Ekologiya. Ekonomika. Informatika. Seriya: Sistemnyj analiz i modelirovanie ekonomicheskikh i ekologicheskikh sistem*, vol. 1, no. 5, pp. 56-61.

Kanev, A.I., Yakubov, A.R., Chumachenko, S.I., Terekhov, V.I. (2022) Sozdanie prototipa cifrovogo dvojn timer lokal'nogo uchastka lesa, kak elementa sistemy klimaticheskogo monitoringa [Creation of a prototype of a digital twin of a local forest area as an element of a climate monitoring system], *Sbornik dokladov*

ENVIROMIS-2022 [Collection of proceedings ENVIROMIS-2022], CNTI, Tomsk, Russia, pp. 424-425.

Kiryushin, V.I., Ivanov, A.I., Kozubenko, I. S., Savin, I.Yu. (2018) Cifrovoe zemledelie [Digital farming], *Vestnik Rossijskoj sel'skohozyajstvennoj nauki*, no. 5, pp. 3-5.

Ariesen-Verschuur, N., Verdouw, C., Tekinerdogan, B. (2022) Digital Twins in greenhouse horticulture: A review, *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 199, 107183.

Australian Government Bureau of Meteorology (2020) *A Land of Storms, Floods and Bushfires: Seamless and Integrated Forecasting*, Australian Government: Canberra, Australian, 2020.

Bauer, P., Stevens, B., Hazeleger, W. (2021) A digital twin of Earth for the green transition, *Nature Climate Change*, vol. 11, pp. 80-83, available at: <https://doi.org/10.1038/s41558-021-00986-y>.

Bauer, P., Thorpe, A., Brunet, G. (2015) The quiet revolution of numerical weather prediction, *Nature*, vol. 525, no. 7567, p. 47.

Benjamin, S.G., Weygandt, S.S., Brown, J.M., Hu, M., Alexander, C.R., Smirnova, T.G., Olson, J.B., James, E.P., Dowell, D.C., Grell, G.A. et al. (2016) A North American hourly assimilation and model forecast cycle: The rapid refresh, *Monthly Weather Review*, vol. 144, no. 4, pp. 1669-1694.

Buonocore, L., Yates, J., Valentini, R. (2022) A Proposal for a Forest Digital Twin Framework and Its Perspectives, *Forests*, vol. 13, no. 4, p. 498, available at: <https://doi.org/10.3390/f13040498>.

Dyukarev, E., Godovnikov, E., Karpov, D., Kurakov, S., Lapshina, E., Filippov, I., Filippova, N., Zarov, E. (2019) Net Ecosystem Exchange, Gross Primary Production And Ecosystem Respiration In Ridge-Hollow Complex At Mukhrino Bog, *Geography, Environment, Sustainability*, vol. 12, no. 2, pp. 227-244, doi:10.24057/2071-9388-2018-77.

Dyukarev, E.A. (2017) Partitioning of net ecosystem exchange using chamber measurements data from bare soil and vegetated sites, *Agricultural and Forest Meteorology*, vol. 239, pp. 236-248, doi:10.1016/j.agrformet.2017.03.011.

EC (2021) *EU Strategy on Adaptation to Climate Change. COM/2021/82 Final*, available at: <https://eur-lex.europa.eu/legalcontent/EN/TXT/?uri=COM:2021:82:FIN> (accessed on 1 December 2022).

Errico, R.M., Yang, R., Priv'e, N.C., Tai, K.-S., Todling, R., Sienkiewicz, M. E., Guo, J. (2013) Development and validation of observing system simulation experiments at NASA's Global Modeling and Assimilation Office, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, vol. 139, no. 674, pp. 1162-1178.

ESA Digital Twin Earth Challenge (2020) Available at: <https://copernicus-masters.com/prize/esa-challenge/> (accessed on 1 January 2021).

European Commission (2020) *A Transparent & Accessible Ocean: Towards a Digital Twin of the Ocean*, Available at: https://ec.europa.eu/info/sites/info/files/research_and_innovation/green_deal/gdc_stakeholder_engagement_topic_09-3_digital_ocean.pdf (accessed on 2 January 2020).

European Commission-DG CNECT (2020), *Destination Earth (DestinE)*, Available at: <https://ec.europa.eu/digital-single-market/en/destination-earth-destine> (accessed on 2 January 2021).

Grieves, M. (2014) *Digital Twin: Manufacturing Excellence through Virtual Factory Replication*, White Paper, Melbourne, FL, USA, Florida Institute of Technology, pp. 1-7.

Guo, H., Nativi, S., Liang, D., Craglia, M., Wang, L., Schade, S., Corban, C., He, G., Pesaresi, M., Li, J. et al. (2020) Big Earth Data science: An information framework for a sustainable planet, *International Journal of Digital Earth*, vol. 13, pp. 743-767.

Habib, M.K., Ayankoso, S.A., Nagata, F. (2021) Data-Driven Modeling: Concept, Techniques, Challenges and a Case Study, *IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA)*, Takamatsu, Japan, pp. 1000-1007, doi:10.1109/ICMA52036.2021.9512658.

Hartmann, D., Van der Auweraer, H. (2020) *Digital Twins*, 2001.09747v1 [cs.CY].

Henriksen, H.J., Schneider, R., Koch, J., Ondracek, M., Troldborg, L., Seidenfaden, I.K., Kragh, S.J., Bøgh, E., Stisen, S. (2023) A New Digital Twin for Climate Change Adaptation, Water Management, and Disaster Risk Reduction (HIP Digital), *Water*, vol. 15, p. 25, available at: <https://doi.org/10.3390/w15010025>.

Hoffman, R.N., Atlas, R. (2016) Future observing system simulation experiments, *Bulletin of the American Meteorological Society*, vol. 97, no. 9, pp. 1601-1616.

James, E.P., Benjamin, S.G. (2017) Observation system experiments with the hourly updating rapid refresh model using GSI hybrid ensemble-variational data assimilation, *Monthly Weather Review*, vol. 145, no. 8, pp. 2897-2918.

Lazo, J.K., Lawson, M., Larsen, P.H., Waldman, D.M. (2011) US economic sensitivity to weather variability, *Bulletin of the American Meteorological Society*, vol. 92, no. 6, pp. 709-720.

Malik, A.A., Brem, A. (2020) *Man, machine and work in a digital twin setup: a case study*, pre-print, arXiv, 2006.08760 [cs.CY].

MentorMate (2020) The Future of Farming: 7 Ways A Digital Twin Can Be Applied to Agriculture. available at: <https://medium.com/@MentorMate/the-future-of-farming-7-ways-a-digital-twin-can-be-applied-to-agriculture-595a1750c453> (accessed on 12 October 2020).

Mukhtar, H., Wunderlich, R.F., Lin, Y.-P. (2022) Digital Twins of the Soil Microbiome for Climate Mitigation, *Environments*, vol. 9, no. 34, available at: <https://doi.org/10.3390/environments9030034>.

Nasirahmadi, A., Hensel, O. (2022) Toward the Next Generation of Digitalization in Agriculture Based on Digital Twin Paradigm, *Sensors*, vol. 22, p. 498, available at: <https://doi.org/10.3390/s22020498>.

Nativi, S., Delipetrev, B., Craglia, M. (2020) *Destination Earth: Survey on Digital Twins Technologies and Activities, in the Green Deal Area*, Luxembourg, European Commission.

Nativi, S., Mazzetti, P., Craglia, M. (2021) Digital Ecosystems for Developing Digital Twins of the Earth: The Destination Earth Case, *Remote Sensing*, vol. 13, p. 2119, available at: <https://doi.org/10.3390/rs13112119>.

Nipen, T., Seierstad, I., Lussana, C., Kristiansen, J. (2019) *Private observations improve MET Norway's operational weather forecasts*, The 99th Annual Meeting of the American Meteorological Society, American Meteorological Society, Phoenix, 6-10 January 2019.

Oracle. *Digital Twins for IoT Applications: A Comprehensive Approach to Implementing IoT Digital Twins*, available at: <http://www.oracle.com/us/solutions/internetofthings/digital-twins-for-iot-apps-wp-3491953.pdf>.

Price, C., Maor, R., Shachaf, H. (2018) Using smartphones for monitoring atmospheric tides, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, vol. 174, pp. 1-4.

Priv'e, N., Errico, R., Tai, K.-S. (2013) Validation of the forecast skill of the Global Modeling and Assimilation Office observing system simulation experiment, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, vol. 139, no. 674, pp. 1354-1363.

Rasheed, A., San, O., Kvamsdal, T. (2019) *Digital Twin: Values, Challenges and Enablers*, arXiv:1910.01719v1 [eess.SP].

Rigon, R., Formetta, G., Bancheri, M., Tubini, N., D'Amato, C., David, O., Massari, C. (2022) HESS Opinions: Participatory Digital Earth Twin Hydrology systems (DARTHS) for everyone: A blueprint for hydrologists, *Hydrology and Earth System Science*, vol. 26, pp. 4773-4800.

Ronda, R., Steeneveld, G., Heusinkveld, B., Attema, J., Holtslag, A. (2017) Urban finescale forecasting reveals weather conditions with unprecedented detail, *Bulletin of the American Meteorological Society*, vol. 98, no. 12, pp. 2675-2688.

Segovia, M., Garcia-Alfaro, J. (2022) Design, Modeling and Implementation of Digital Twins, *Sensors*, vol. 22(14), p. 5396.

Siddorn, J., Blair, G., Boot, D., Buck, J., Kingdon, A., Kloker, A., Kokkinaki, A., Moncoiffe, G., Blyth, E., Fry, M., Heaven, R., Lewis, E., Marchant, B., Napier, B., Pascoe, C., Passmore, J., Pepler, S., Townsend, P., Watkins, J. (2022) An

Information Management Framework for Environmental Digital Twins (IMFe), *National Oceanography Center*, 23 p., available at: <https://zenodo.org/record/7004351#.Y1A3ai-228U>).

Singh, M., Fuenmayor, E., Hinchy, E.P., Qiao, Y., Murray, N., Devine, D. (2021) Digital Twin: Origin to Future, *Applied System Innovation*, vol. 4, no. 36, available at: <https://doi.org/10.3390/asi4020036>.

Solomatine, D., See, L., Abrahart, R. (2009) Data-Driven Modelling: Concepts, Approaches and Experiences, in: Abrahart, R.J., See, L.M., Solomatine, D.P. (eds), *Practical Hydroinformatics. Water Science and Technology Library*, Berlin, Heidelberg, Springer, vol. 68, available at: https://doi.org/10.1007/978-3-540-79881-1_2.

Van Genderen, J., Goodchild, M.F., Guo, H., Yang, C., Nativi, S., Wang, L., Wang, C. (2020) *Digital Earth Challenges and Future Trends*, Manual of Digital Earth, Singapore, Springer, pp. 811-827.

Wang, X., Barker, D.M., Snyder, C., Hamill, T.M. (2008) A hybrid ETKF–3DVAR data assimilation scheme for the WRF model. Part I: Observing system simulation experiment, *Monthly Weather Review*, vol. 136, no. 12, pp. 5116-5131.

World Climate Research Programme (2020) Report of the 41st Session of the Joint Scientific Committee, Geneva, Switzerland, WMO.

Поступила в редакцию: 11.03.2023.

Доработана после рецензирования: 15.05.2023.

Принята к публикации: 20.05.2023.

Для цитирования / For citation:

Гордов, Е.П. (2023) Цифровые двойники систем и процессов как инструмент современной климатологии, *Фундаментальная и прикладная климатология*, т. 9, № 3, с. 269-297, doi:10.21513/2410-8758-2023-3-269-297.

Gordov, E.P. (2023) Digital twins of systems and processes as an instrument of modern climatology, *Fundamental and Applied Climatology*, vol. 9, no. 3, pp. 269-297, doi:10.21513/2410-8758-2023-3-269-297.

Оценка изменений агроклиматических ресурсов в Центральной Азии и сопредельных областях России

В.Н. Павлова^{1),2)}, А.А. Карачёнова¹⁾, В.А. Романенков²⁾*

¹⁾ Всероссийский научно-исследовательский институт сельскохозяйственной метеорологии,
Россия, 249038, Калужская обл., г. Обнинск, пр. Ленина, д. 82

²⁾ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Аграрный центр,
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1

* Адрес для переписки: vnp2003@bk.ru

Реферат. Представлены результаты сравнительного анализа показателей агроклиматических ресурсов в Центральной Азии и граничащих с ней областях РФ за период 1961-2020 гг. Используются данные о температуре приземного воздуха и суммах осадков месячного разрешения с 1961 по 2020 г. 21 метеорологической станции России и 32 – на территории Казахстана, Кыргызстана, Таджикистана, Туркменистана и Узбекистана. Показано, что при повсеместном росте термических ресурсов в макрорегионе изменения режима осадков разнонаправлены по знаку и значительно варьируют по величине. Наблюдаются значимые тенденции к иссушению в западных областях и рост осадков летнего периода (незначимый) в восточных. Тенденция к увеличению количества выпадающих осадков отмечается в весенний период на всей исследуемой территории, что частично компенсирует негативное воздействие летнего потепления. Показано, что на фоне умеренного потепления на исследуемой территории наблюдается невысокий рост фактической урожайности яровой пшеницы от 1.5 до 3.6 ц/га от периода 1991-2000 к 2011-2020 гг., за исключением Оренбургской области, где тренд урожайности яровой пшеницы слабо отрицательный. Наиболее динамичные темпы роста урожайности (более 3.0 ц/га) в основных зернопроизводящих областях РФ – Алтайском крае, Омской и Курганской областях. Наблюдаемое изменение агроклиматических ресурсов в Северном Казахстане и сопредельных областях РФ не носит экстремального характера, и агроклиматический потенциал территории остается значительным.

Ключевые слова. Изменение климата, тепло- и влагообеспеченность, Центральная Азия, урожайность, яровая пшеница.

Assessment of changes in agro-climatic resources in Central Asia and adjacent areas of Russia

V.N. Pavlova^{1),2)}, A.A. Karachenkova¹⁾, V.A. Romanenkov²⁾*

¹⁾ All-Russian Institute of Agricultural Meteorology,
82, Lenina pr., 249038, Obninsk, Kaluga Region, Russian Federation

²⁾ Lomonosov Moscow State University, Eurasian Center for Food Security,
1, Leninskiye Gory, 119991, Moscow, Russian Federation

* Correspondence address: vnp2003@bk.ru

Abstract. The results of a comparison analysis of agro-climatic resources indicators in Central Asia and the Russian Federation's bordering regions for the period 1961-2020 are provided. From 1961 to 2020, data on surface air temperature and precipitation at 32 meteorological stations in Kazakhstan, Kyrgyzstan, Tajikistan, Turkmenistan, and Uzbekistan as well as 21 stations in Russia were used. It is shown that changes in the precipitation regime are multidirectional in sign and vary greatly in magnitude against the background of a general increase in thermal resources in the macroregion. Significant drying trends are observed in the western regions and an increase in summer precipitation (not significant) in the eastern regions. A tendency towards an increase in the amount of precipitation is noted in the spring period throughout the study area, which helps offset summer warming's negative effects. With the exception of the Orenburg region, where the spring wheat yield trend is slightly negative, it is demonstrated that, despite the study area's moderate warming, the actual spring wheat yield increased slightly from 1.5 to 3.6 dt ha⁻¹ from the years 1991 to 2000 to 2011 to 2020. The Russian Federation's primary grain-producing regions, the Altai Krai, Omsk, and Kurgan Regions, have the most dynamic yield growth rates (more than 3.0 dt ha⁻¹). The observed change in agro-climatic resources in Northern Kazakhstan and adjacent regions of the Russian Federation is not extreme, and the area's significant agro-climatic potential has persisted.

Keywords. Climate change, water availability, thermal resources, Central Asia, yield, spring wheat.

Введение

Наблюдаемые тенденции урожайности зерновых культур и их связь с климатическими и экономическими факторами указывают на возрастание значимости для устойчивого функционирования агросферы как динамики климатических проявлений, так и агротехнологий.

Анализ последствий прогнозируемых изменений климата в Центральной и Восточной Европе с использованием комплекса статистических и динамических моделей показывает, что повышение глобальной средней температуры на 1°C приведет к 4-6% снижению урожайности пшеницы при неизменной посевной площади и отсутствии принципиального улучшения в агротехнологиях (Jacobs et al., 2019). Поэтому адаптация к изменению климата и повышенная способность адаптироваться к засухам стали главными приоритетами европейского сельского хозяйства. Территории, где проявляется континентальность климата, потенциально более подвержены снижению урожайности пшеницы, чем более влажные климатические зоны, в которых ожидается рост междугодовой изменчивости урожайности зерновых. В целом, влиянием агроклиматических факторов объясняется от 12 до 67%

изменчивости урожайности пшеницы, что является статистически значимым для 90% посевных площадей пшеницы в Европе за период с 1993 по 2017 г. (Pinke et al., 2022). Последствия изменения климата в разных отраслях экономики, в том числе в сельском хозяйстве, вызывают беспокойство правительства, о чем свидетельствует принятие Национального плана адаптации к изменениям климата (Доклад о климатических рисках ..., 2017; Национальный план ..., 2019; Третий оценочный доклад ..., 2022).

В данной работе рассматриваются изменения агроклиматических ресурсов регионов Центральной Азии (далее – ЦА) и граничащих с Республикой Казахстан областей РФ. Центральная Азия, как геополитическое пространство, включающее территории Казахстана, Кыргызстана, Таджикистана, Туркменистана и Узбекистана, возникла в 1991 г. после распада СССР. С позиции географической науки ЦА – это более обширная территория, включающая помимо вышеназванных государств также Монголию, западную часть Китая (Синьцзян) и Афганистан (Звягельская, 2009). Глубокоматериковое положение ЦА и незащищенность ее с севера обуславливают большую сухость климата: сухое, безоблачное и жаркое лето сменяется относительно влажной зимой, иногда с сильными морозами, в особенности на севере (Алпатыев и др., 1976).

Россия и Казахстан в ближайшие десятилетия, как ожидается, останутся крупными игроками на мировом рынке зерна, обеспечивая существенный вклад в удовлетворение ожидаемого спроса на зерно (FAOSTAT, 2022). Агроклиматические условия для ведения сельского хозяйства в степной зоне юга Урала и Западной Сибири, а также северного Казахстана по большей части очень жесткие с чрезвычайно холодной зимой, частыми засухами и зачастую неблагоприятными условиями в период уборки урожая. Весенне-летние засухи представляют главный стрессовый фактор и явились основной причиной рекордно низких урожаев в 2010 и 2012 г. (USDA-FAS, 2022).

Цель данной работы – оценить тенденции изменений показателей термического и влажностного режимов в ЦА, включающей территории Казахстана, Таджикистана, Кыргызстана, Узбекистана и Туркменистана, и дать сравнительную оценку тенденций изменений урожайности яровой пшеницы в Казахстане и сопредельных областях России в условиях современного изменения климата.

Материалы и методы

Использованы данные о температуре приземного воздуха и суммах осадков месячного разрешения с 1961 по 2020 г. из подмножества базы данных «Климат» (ФГБУ «ИГКЭ») на сети 21 метеостанции (далее – МС) России и 32 МС на территории Казахстана, Кыргызстана, Таджикистана, Туркменистана и Узбекистана. Картограмма расположения МС представлена на рис. 1. Также привлечена информация Росстата по урожайности яровой пшеницы и данные справочников под общим названием «Агроклиматические ресурсы» (Справочник Агроклиматические ресурсы ..., 1973-1977).

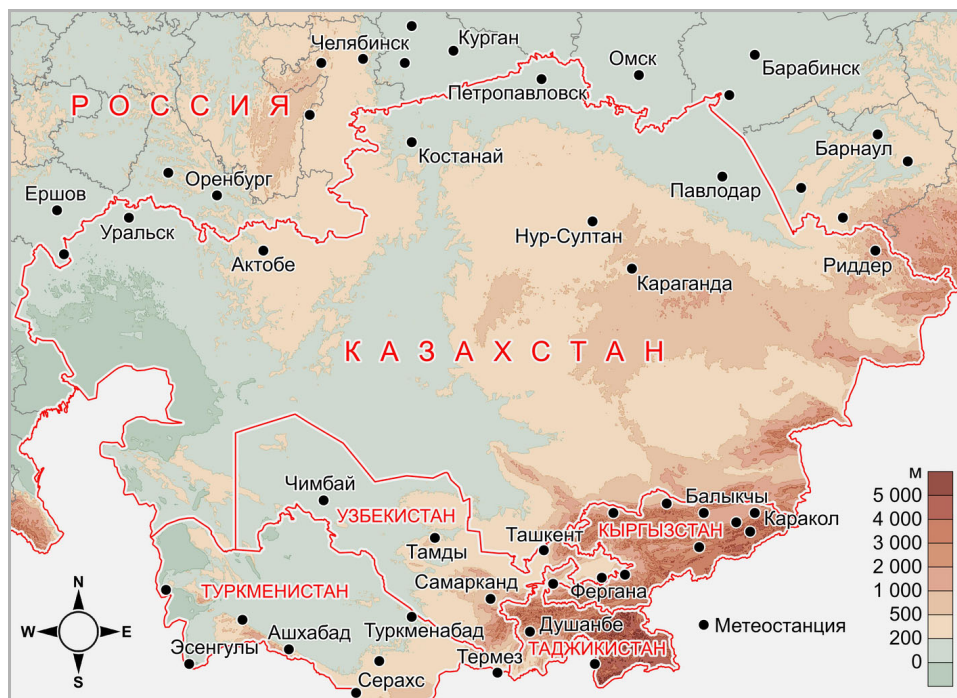


Рисунок 1. Картограмма размещения метеостанций на территории юга Урала, средней Сибири и Центральной Азии

Figure 1. Map of the location of meteorological stations in the south of the Urals and Central Siberia and Central Asia

В работе использована технология мониторинга климата и агроклиматических ресурсов на основе моделирования в имитационной системе «Климат-Почва-Урожай» (далее – КПУ), представляющей собой набор программных модулей для моделирования динамики и роста сельскохозяйственных культур (Сиротенко, 1981; Сиротенко, 1991; Pavlova et al., 2020). Входная информация имитационной системы КПУ – данные сетевых метеорологических и агрометеорологических наблюдений, а также данные о водно-физических свойствах почвы и уровне ее плодородия. Выходные характеристики – более 30 агроклиматических и биоклиматических показателей. На основе системы рассчитываются ежегодные оценки тенденций изменения, изменчивости и экстремальности агроклиматических показателей (индексов) и показателей продуктивности в заданных точках на основе данных станционных наблюдений с последующим картографированием (визуализацией) результатов расчетов в ГИС QGIS.

Данные мониторинга изменений агроклиматических ресурсов в земледельческой зоне России, полученные на основе этой технологии, публикуются в ежегодных Докладах об особенностях климата на территории РФ (Доклад об особенностях климата ..., 2023).

В данной работе исследуются тренды показателей теплообеспеченности – суммы среднесуточных значений температуры воздуха за период с темпера-

турой выше 10°C (как основного агроклиматического показателя), его продолжительность и средняя температура по сезонам года. В качестве показателя влагообеспеченности используется гидротермический коэффициент Селянинова (далее – ГТК), рассчитанный за вегетационный период, и количество осадков по сезонам года. Оценка уровня статистической значимости осуществляется по t -критерию Стьюдента.

Результаты

Теплообеспеченность периода активной вегетации сельскохозяйственных культур растет повсеместно на всей территории ЦА. Оценки линейного тренда суммы активных температур воздуха ($T>10^{\circ}\text{C}$) показывают, что самая высокая скорость роста этого показателя наблюдается на территории Туркменистана и Узбекистана и составляет около $130^{\circ}\text{C}/10$ лет. В Таджикистане и Кыргызстане оценки колеблются в диапазоне от ~ 30 до $80^{\circ}\text{C}/10$ лет. На фоне роста температуры наблюдается положительная тенденция к росту продолжительности вегетационного периода ($T>5^{\circ}\text{C}$) и периода активной вегетации ($T>10^{\circ}\text{C}$), максимально – в Туркменистане (от 2 до 5 сут./10 лет) (рис. 2). Скорость роста средней температуры календарной весны – самая высокая по сравнению с другими сезонами года на всей территории ЦА и составляет от 0.4 до $0.8^{\circ}\text{C}/10$ лет. С меньшей скоростью растет средняя летняя и зимняя температура – от 0.1 до $0.3^{\circ}\text{C}/10$ лет (рис. 3).

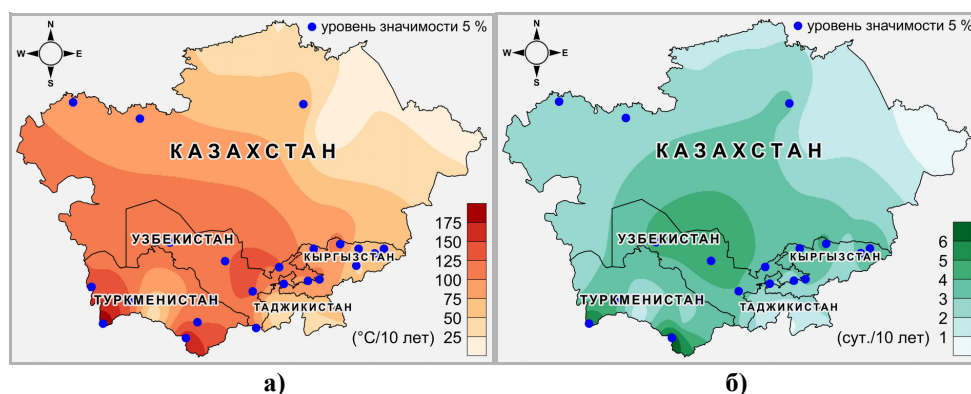


Рисунок 2. Оценки скорости изменения суммы активных температур выше 10°C ($^{\circ}\text{C}/10$ лет, а) и продолжительности периода с температурой выше 10°C (сут./10 лет, б) за период 1976-2020 гг. в Казахстане, Кыргызстане, Таджикистане, Туркменистане и Узбекистане. Точками отмечены станции, на которых тренды показателя статистически значимы на 5% уровне (по критерию Стьюдента)

Figure 2. Estimates of the rate of change in the sum of active temperatures $>10^{\circ}\text{C}$ ($^{\circ}\text{C}$ per 10 years, а) and the duration of the period with temperatures $>10^{\circ}\text{C}$ (days per 10 years, б) for the period 1976-2020 in Kazakhstan, Kyrgyzstan, Tajikistan, Turkmenistan and Uzbekistan. The dots mark the stations at which the indicator trends are significantly different based on a Student's t -test ($P<0.05$)

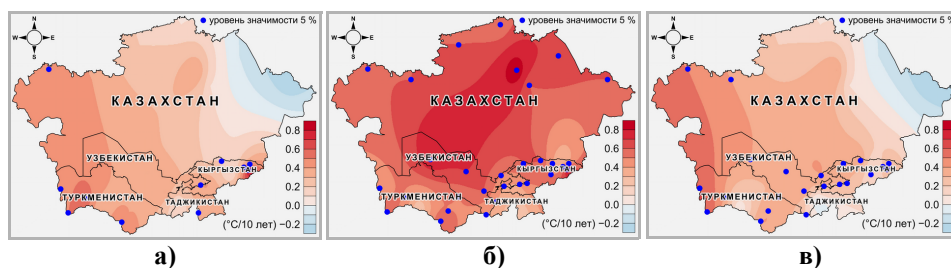


Рисунок 3. Оценки скорости изменения средней температуры воздуха (в °C/10 лет) зимой (а), весной (б) и летом (в) за период 1976-2020 гг. в Казахстане, Кыргызстане, Таджикистане, Туркменистане и Узбекистане
Точками отмечены станции, на которых тренды показателя статистически значимы на 5% уровне (по критерию Стьюдента)

Figure 3. Estimates of the rate of change in mean air temperature (in °C per 10 years) in winter (a), spring (б), and summer (в) for the period 1976-2020 in Kazakhstan, Kyrgyzstan, Tajikistan, Turkmenistan and Uzbekistan
The dots mark the stations at which the indicator trends are significantly different based on a Student's t-test ($P < 0.05$)

Тенденции количества выпадающих осадков на территории ЦА рассчитывались по отдельным сезонам года (зима, весна, лето, осень). На рис. 4 представлено пространственное распределение этого показателя для трех сезонов, наиболее важных для оценки агроклиматических условий при возделывании зерновых культур. Можно видеть, что оценки коэффициентов линейного тренда осадков различаются по знаку и величине в силу их значительной изменчивости.



Рисунок 4. Оценки скорости изменения (коэффициент линейного тренда, % за десятилетие) сумм осадков зимой (а), весной (б) и летом (в) за период 1976-2020 гг. в Казахстане, Кыргызстане, Таджикистане, Туркменистане и Узбекистане
Точками отмечены станции, на которых тренды показателя статистически значимы на 5% уровне (по критерию Стьюдента)

Figure 4. Estimates of the rate of change (linear trend coefficient, % per 10 years) of total precipitation in winter (a), spring (б), and summer (в) for the period 1976-2020 in Kazakhstan, Kyrgyzstan, Tajikistan, Turkmenistan and Uzbekistan
The dots mark the stations at which the indicator trends are significantly different based on a Student's t-test ($P < 0.05$)

В Кыргызстане наибольшее количество осадков (~290 мм) выпадает за весенний и летний период на восточном побережье Иссык-Кульской котло-

вины (МС Каракол). За последние десятилетия здесь наблюдается некоторый рост суммы осадков во все сезоны года со скоростью от 3 до 5% за десятилетие. Согласно полученным оценкам, тренд ГТК по территории колеблется от -0.07 (МС Бишкек) до +0.02 (МС Тамга) (статистически незначимый). Таким образом, на фоне роста температуры воздуха, соотношение тепла и влаги остается практически неизменным. В наиболее засушливом районе Кыргызстана, западной части Иссык-Кульской котловины (МС Балыкчы), годовое количество осадков увеличивается со скоростью ~6% за 10 лет. Скорость роста осадков весной составляет около 10% за десятилетний период.

В северных районах Таджикистана количество весенних осадков увеличивается. В районе Душанбе, где в течение весенних месяцев выпадает более 300 мм осадков, отмечается высокая скорость их роста – на 8-10% за десятилетие. Статистически значимые тенденции в летних осадках не выявляются.

В Туркменистане на всей территории наблюдаются отрицательные тренды осадков во все сезоны года. Максимальные отрицательные статистически значимые тренды за год в районе МС Эсенгулы (-12%). Темпы снижения зимних и весенних осадков колеблются по территории с минимумом от -9 до -13% (МС Серахс, Эсенгулы).

В самых засушливых районах Узбекистана тренды осадков либо практически отсутствуют (МС Чимбай), либо наблюдается тенденция к их понижению (МС Тамды). В районе МС Тамды уменьшение количества выпадающих осадков отмечается во все сезоны от 10 до 21%, а годовое количество – на 12%. На большей части территории республики (МС Фергана, Самарканд, Термез, Ташкент) скорость изменения годовых сумм колеблется от -2 до +2% за 10 лет, т.е. практически неизменна.

Тенденции изменения термических и влажностных ресурсов на территории России и Казахстана

Скорости изменения основных агроклиматических показателей (оценки коэффициентов линейного тренда) на территории Республики Казахстан (северные и центральные области) и граничащих с ней областей РФ (Саратовская, Оренбургская, Челябинская, Курганская, Омская, Новосибирская области и Алтайский край) за период потепления 1976-2020 гг. представлены в табл. 1 и 2.

Скорость роста сумм температур воздуха выше 10°C в пределах рассматриваемых областей России, за исключением Оренбургской и Саратовской областей, не превышает 60°C за 10 лет (при среднем по России – 90°C за 10 лет). Скорость роста средней температуры лета также невелика и находится на уровне 0.1-0.2°C/10 лет. В зимний период заметного повышения средней температуры воздуха не наблюдалось в Омской и Новосибирской областях, а также в Алтайском крае (табл. 1).

В Казахстане, на северо-западе, в зимний период и в январе, самом холодном месяце года, наблюдается падение температуры воздуха. Температура летнего периода имеет статистически значимый положительный тренд

только в самых западных областях (МС Уральск, Актобе), а также в южных областях (МС Нур-Султан). На юго-востоке республики (МС Риддер, Павлодар, Караганда) в летние и осенние месяцы температурные тренды либо слабо отрицательные, либо слабо положительные (незначимые). Рост теплообеспеченности сельскохозяйственных культур, выраженный суммой температур выше 5 и 10°C, незначительный – диапазон изменений коэффициента линейного тренда колеблется от 15 до 46°C за десятилетие. Исключение составляют восток и юг территории, где положительная тенденция изменения этих показателей составляет от ~70 до 90°C/10 лет (табл. 1).

Таблица 1. Оценки коэффициента линейного тренда b ($y=b \cdot x+c$) показателей термического режима за период 1976-2020 гг.

Table 1. Estimates of the linear trend coefficient b ($y=b \cdot x+c$) of thermal regime indicators for the period 1976-2020

Область или край (Россия); метеостанция (Казахстан)	Средняя температура воздуха (T), °C/10 лет				Сумма температур выше 10°C, °C/10 лет	Продолжительность периода T>10°C, сут./10 лет
	зима	весна	лето	осень		
Россия						
Саратовская	0.5*	0.5*	0.6*	0.5*	103*	2.6*
Оренбургская	0.5	0.5*	0.4*	0.6*	84*	2.3*
Челябинская	0.2	0.4*	0.2	0.4	48*	2.4
Курганская	0.3	0.5*	0.2	0.5	57*	2.7*
Омская	0.1	0.7*	0.1	0.4	39*	2.2
Новосибирская	0.0	0.7*	0.1	0.3	37*	2.2
Алтайский	-0.1	0.7*	0.2	0.2	36*	1.4
Казахстан						
Петропавловск	0.1	0.5*	0.1	0.4*	25	1.7
Костанай	0.2	0.6*	0.2	0.5*	46	1.9
Уральск	0.5*	0.6*	0.5*	0.4*	90*	2.2*
Актобе	0.4	0.6*	0.4*	0.4*	84*	2.3*
Риддер	-0.3	0.6*	-0.3	-0.1	15	0.0
Павлодар	-0.1	0.7*	-0.1	0.2	25	1.8
Караганда	0.1	0.6*	0.1	0.1	3	1.1
Нур-Султан	0.4	0.9*	0.4	0.4*	72*	3.3*

Примечание. * – 5% уровень статистической значимости.

Увеличение суммарного количества осадков в весенний период (от 3 до 9 мм за десятилетие) отмечается на всей рассматриваемой территории России. Слабая положительная тенденция к росту летних осадков проявляется в Челябинской, Омской и Новосибирской областях. Напротив, в Саратовской и Оренбургской областях сохраняется статистически значимая тенденция к иссушению территории в весенне-летний период и в целом за год. Самый высокий относи-

тельный рост количества осадков, выпадающих весной, (10% и более) наблюдается в Оренбургской и Курганской областях, а самый низкий (5% и менее) в Челябинской и Новосибирской областях и Алтайском крае. При этом годовое количество осадков меняется незначительно, от -3 до +2% (табл. 2).

Таблица 2. Оценки коэффициента линейного тренда b ($y=b \cdot x+c$) показателей увлаженности за период 1976-2020 гг.

Table 2. Estimates of the linear trend coefficient b ($y=b \cdot x+c$) of moisture indicators for the period 1976-2020

Область или край (Россия); метеостанция (Казахстан)	Сумма осадков, ед./10 лет										ГТК за период вегетации, ед./10 лет
	зима		весна		лето		осень		год		
	мм	%	мм	%	мм	%	мм	%	мм	%	
Россия											
Саратовская	-1.0	-1	5.2	6	-13.5	-10	-4.2	-4	-13.6	-3	-0.07
Оренбургская	-1.2	-2	8.9	13	-7.9*	-7	-3.0*	-3	-3.2	-1	-0.03
Челябинская	-1.4	-2	3.7	4	0.9	0	-3.3	-3	-0.1	0	-0.01
Курганская	-0.1	0	7.4*	10	-4.6	-3	-2.3	-2	0.5	0	-0.03
Омская	1.8	3	7.2*	9	1.6	1	-0.4	0	10.2	2	0.00
Новосибирская	2.4	5	2.3	4	1.3	1	-0.3	0	5.6	2	0.00
Алтайский	1.9	2	5.0	5	-1.8	-1	6.4*	5	11.4	2	-0.01
Казахстан											
Петропавловск	-2.0	-4	6.7*	10	0.1	0	-2.3	-3	2.6	1	0.00
Костанай	0.1	0	9.6*	15	-1.6	-1	0.9	1	9.0	3	0.00
Уральск	-2.3	-3	6.8*	11	-7.2	-7	-3.9	-4	-6.7	-2	0.00
Актобе	0.2	0	2.0	3	-7.8	-9	-5.9*	-7	-11.5	-4	-0.10
Риддер	6.1*	12	7.6	5	-4.1	-2	-5.0	-3	4.5	1	-0.10
Павлодар	0.0	0	1.9	4	9.1	9	0.4	1	11.4	4	0.00
Караганда	5.8*	9	5.1	7	12.6*	11	2.8	3	26.4*	8	0.00
Нур-Султан	5.1*	10	3.9	6	6.1	5	1.9	3	17.1*	5	0.00

Примечание. * – 5% уровень статистической значимости.

На территории Казахстана большая часть годового количества осадков выпадает в теплый период года. В целом за вегетационный период их пространственное распределение оказывается неравномерным. В основных зернопроизводящих регионах Казахстана тенденции осадков различаются по знаку и величине во все сезоны в силу значительной изменчивости этого показателя. Статистически значимые оценки составляют 20% от общего числа рассчитанных оценок. Самая высокая скорость увеличения количества выпадающих осадков отмечается весной – от 3% в Актобе до 15% в Костанайе (табл. 2, рис. 4). В летний период высокие отрицательные тренды сумм осадков отмечаются по данным МС Уральск и Актобе (~7%/10 лет). Тренд годовых осадков положительный в Нур-Султане и Караганде и составляет от 17 до

26 мм за 10 лет. При этом его максимальная величина (относительно среднего) в Караганде составляет 8%, а минимальная отрицательная на северо-западе Казахстана, в Уральске и Актобе, – от -2 до -4%.

Урожайность яровой пшеницы

Для анализа динамики урожайности яровой пшеницы за последние три десятилетия в табл. 3 представлены результаты статистического анализа рядов урожайности, Y , (по данным Росстата) за период с 1991 по 2020 г. по отдельным областям России и Акмолинской области – одной из основных зернопроизводящих областей Казахстана.

Таблица 3. Статистические характеристики рядов фактической урожайности яровой пшеницы по областям России и в Акмолинской области Казахстана за 1991-2020 гг.

Table 3. Statistical characteristics of actual spring wheat yield for 1991-2020 time-series in the regions of Russia and in the Akmola Region of Kazakhstan

Область, край	Y_{mean} , ц/га	Y_{min} , ц/га	Y_{max} , ц/га	Процентиль, ц/га		σ , ц/га	D , %	b , ц/га/10 лет
				10	90			
Россия								
Саратовская	9.5	1.5	17.1	3.6	15.1	4.2	44	2.0
Оренбургская	7.9	1.5	14.1	3.8	12.1	3.1	39	−0.4
Челябинская	10.6	3.0	17.5	4.6	15.9	3.9	37	0.7
Курганская	10.5	5.7	15.5	6.8	13.7	2.7	25	2.0
Омская	13.3	7.2	18.4	9.8	17.4	2.9	22	1.5
Новосибир- ская	13.2	7.3	19.2	8.5	16.5	3.0	23	1.6
Алтайский	12.5	6.9	20.8	7.8	16.4	3.5	28	1.6
Казахстан								
Акмолинская	10.4	3.8	16.2	6.5	13.9	2.9	28	1.0

Примечание. Y_{mean} – среднее, Y_{min} – минимальное значение, Y_{max} – максимальное значение, σ – среднее квадратическое отклонение, V – коэффициент вариации, b – коэффициент линейного тренда, D – дисперсия.

Средняя фактическая урожайность яровой пшеницы за период с 1991 по 2020 г. колеблется в достаточно узком диапазоне: от 7.9 ц/га в Оренбургской области до 13.3 ц/га в Омской области. Урожайность в Акмолинской области Казахстана (10.4 ц/га) на уровне среднего по сопредельным областям России. Верхняя и нижняя граница 90-го перцентиля выборки урожаев яровой пшеницы в Акмолинской области составляет от 6.5 до 13.9 ц/га, т.е. в экстремальные неблагоприятные по погодным условиям годы урожайность опускается до 6.5 ц/га и ниже, а в благоприятные – поднимается до 13.9 ц/га и выше. Междугодичная изменчивость урожаев или дисперсия, D , за последние 30 лет в Саратовской, Оренбургской и Челябинской областях высокая составляет от 37 до 44%. При этом максимум дисперсии отмечается в Саратовской области (44%).

К зоне умеренно устойчивых урожаев относятся Новосибирская, Омская и Курганская области и Алтайский край, где вариации урожайности по годам значительно ниже и изменяются в диапазоне 22-28%. Однако изменчивость урожаев в пределах отдельных районов на территории этих областей может оказаться значительно выше. Оценки коэффициента линейного тренда урожайности яровой пшеницы, b , за период 1991-2020 гг. положительные, за исключением Оренбургской области, но статистически незначимые.

Наблюдается статистически значимая корреляционная связь между урожайностью в Акмолинской области и Оренбургской, Челябинской и Курганской областями (табл. 4). Соответствующие коэффициенты корреляции достаточно высокие и составляют от 0.49 до 0.67. В то же время не обнаруживается корреляционной связи урожайности в этой области и зоной умеренно-устойчивой урожайности – Алтайским краем и Новосибирской областью. Парные коэффициенты корреляции рядов урожайности в Алтайском крае, Омской и Новосибирской областях изменяются в диапазоне от 0.59 до 0.79 при 0.01% уровне статистической значимости. В самой засушливой зоне, охватывающей Саратовскую, Оренбургскую, Челябинскую и Курганскую области, парные коэффициенты корреляции статистически значимы на 1-5% уровне, а самая тесная корреляционная связь – между урожайностью Челябинской и Курганской областей ($r^{**}=0.82$).

Таблица 4. Корреляционная матрица средней по области урожайности яровой пшеницы в Акмолинской области Казахстана и сопредельных областях России за период 1991-2020 гг.

Table 4. Correlation matrix of the regional average spring wheat yield in the Akmola Region of Kazakhstan and adjacent regions of Russia for the period 1991-2020

Область, край		1	2	3	4	5	6	7	8
Саратовская	1	1.00	0.50*	0.43*	0.50*	0.31	0.02	0.14	0.33
Оренбургская	2		1.00	0.72*	0.52*	0.49*	-0.04	0.19	0.21
Челябинская	3			1.00	0.82*	0.67*	0.16	0.25	0.47*
Курганская	4				1.00	0.61*	0.32	0.52*	0.59*
Акмолинская	5					1.00	0.33	0.33	0.61*
Алтайский	6						1.00	0.79*	0.59*
Новосибирская	7							1.00	0.68*
Омская	8								1.00

Примечание. * – 5% уровень статистической значимости.

В табл. 5 представлена урожайность яровой пшеницы (по данным Росстата), осредненная по отдельным десятилетиям с 1991 по 2020 г. Рассчитанные оценки коэффициента линейного тренда урожайности яровой пшеницы на территории отдельных областей России и Акмолинской области Казахстана для климатического периода 1961-1990 гг. и нового климатического периода 1991-2020 гг. приведены в табл. 6.

Таблица 5. Урожайность яровой пшеницы в Акмолинской области Казахстана и сопредельных областях России по десятилетиям с 1991 по 2020 г.

Table 5. Yields of spring wheat in the Akmola Region of Kazakhstan and the adjacent regions of Russia by decades from 1991 to 2020

Область, край	Урожайность за период (гг.), ц/га			Приращение, ц/га	
	1991-2000 (Y_I)	2001-2010 (Y_{II})	2011-2020 (Y_{III})	$\Delta_I = Y_{III} - Y_{II}$	$\Delta_2 = Y_{III} - Y_I$
Россия					
Саратовская	9.5	10.1	11.4	1.3	1.9
Оренбургская	8.4	7.6	7.8	-0.8	-0.6
Челябинская	9.7	10.9	11.2	0.3	1.5
Курганская	10.5	12.4	13.8	1.9	3.3
Омская	11.0	14.1	14.6	0.5	3.6
Новосибирская	11.5	14.2	14.3	0.1	2.8
Алтайский	8.4	11.5	11.5	0.0	3.1
Казахстан					
Акмолинская	9.1	10.3	11.5	1.2	2.4

Таблица 6. Оценка линейной скорости изменения урожайности яровой пшеницы (b , ц/га/10 лет) за периоды 1961-1990 и 1991-2020 гг. на территории областей России и Акмолинской области Казахстана

Table 6. Estimation of the linear rate of change in the yield of spring wheat (b , dt ha⁻¹ per 10 years) for the periods 1961-1990 and 1991-2020 on the territory of the regions of Russia and the Akmola Region of Kazakhstan

Область, край	b , ц/га/10 лет		D , %	
	1961-1990 гг.	1991-2020 гг.	1961-1990 гг.	1991-2020 гг.
Россия				
Саратовская	▲	2.0*	—	19
Оренбургская	▼	▲ ▼	—	—
Челябинская	▲ ▼	▲ ▼	—	—
Курганская	▲ ▼	2.0*	—	25
Омская	0.1*	1.5*	39	20
Новосибирская	1.3*	1.6*	23	24
Алтайский	▲	1.6*	—	28
Казахстан				
Акмолинская	—	▲	—	—

Примечание. * – тренд статистически значимый на 5% уровне; ▲ – положительный тренд, незначимый; ▼ – отрицательный тренд, незначимый; ▲ ▼ – нет тренда; D , % – вклад тренда в суммарную дисперсию (приведены только статистически значимые величины); «—» – нет данных.

Обсуждение

На рассматриваемой территории ЦА потепление сопровождается снижением количества выпадающих осадков, увеличивая дефицит увлажненности. В Таджикистане, Кыргызстане, Узбекистане и Туркменистане, где

сельское хозяйство зависит от орошения, условия увлажнения не улучшаются, что еще больше сокращает потенциальные возможности пахотных земель в этих регионах. К положительным тенденциям в изменении агроклиматических условий в первую очередь относится рост весенних осадков (рис. 4). Наблюдается слабая тенденция к росту и летних осадков в восточных регионах ЦА. Однако, с точки зрения продовольственной безопасности регион остается в напряженных агроклиматических условиях.

Северо-западная, самая засушливая часть территории России и Северного Казахстана (Саратовская, Оренбургская, Уральская и Актыбинская области), за последние три десятилетия охвачена более заметным повышением температуры летнего периода, чем центральная и восточная части (Омская и Новосибирская области, Алтайский край, Петропавловская и Павлодарская области). Рост термических ресурсов (сумма активных температур воздуха) в восточной части исследуемой территории невелик и не превышает 50°C за десятилетие. Минимальный рост термических ресурсов, $<25^{\circ}\text{C}$ за десятилетие, незначимый, отмечается в северо-восточной части Казахстана.

На территории сельскохозяйственных районов России, граничащих с Казахстаном, за исключением Оренбургской и Саратовской областей, заметного роста теплообеспеченности не наблюдается. По этой причине расширение посевов озимых культур на этой территории может быть не всегда оправданным. Средняя весенняя температура растет повсеместно со статистически значимой скоростью от 0.4 до $0.7^{\circ}\text{C}/10$ лет.

В Казахстане наблюдаются сравнительно невысокие темпы потепления относительно степной зоны Урала и Западной Сибири и даже отмечается некоторый спад зимней температуры. Ранжирование по скорости роста средней температуры воздуха по сезонам года показывает, что скорость ее роста максимальна весной и минимальна летом. Полученные оценки скорости изменения показателей термических ресурсов в целом согласуются с оценками, данными в работах (Байшолоанов и др., 2015; Байшолоанов и др., 2022).

Тенденция к иссушению наблюдается в степной зоне России и Казахстана преимущественно в летний период. Высокие отрицательные скорости изменения ГТК, характеризующего соотношение тепла и влаги, отмечаются в восточных областях России (Саратовская и Оренбургская области) и в Курганской области и составляют от -0.03 до -0.07 ед./10 лет. В силу значительной изменчивости показателей влагообеспеченности наблюдаются отдельные локальные точки как их роста, так и падения. Но заметного снижения влагообеспеченности сельскохозяйственных культур на большей части рассматриваемой территории России и Казахстана не отмечается. Положительным фактором для сельского хозяйства стало увеличение (статистически значимое) количества весенних осадков на территории России и Казахстана.

Тенденции изменений агроклиматических ресурсов в комплексе определяют обусловленную климатом составляющую продуктивности сельского хозяйства. Основные агроклиматические показатели по рангу их значимости для формирования урожайности включают увлажненность, теплообеспеченность территории, термические условия холодного периода и континенталь-

ность климата. Как показано выше, наблюдаемые изменения климата ведут к изменению этих связанных между собой факторов.

По оценкам агентства «Казах-Зерно», основное зерновое производство в Республике Казахстан сосредоточено в трех северных регионах – Северо-Казахстанской, Акмолинской и Костанайской областях, в совокупности обеспечивающих около 70% валового сбора зерновых. Климатические условия Северного Казахстана позволяют возделывать высококачественное зерно мягких и твердых сортов пшеницы, хотя имеют место частые проявления ранневесенней засухи и высокого увлажнения при пониженных температурах воздуха в период налива и созревания зерна (Агроклиматические ресурсы ..., 2017).

В России области, граничащие с Казахстаном, также являются основными районами возделывания яровой пшеницы. В степной и сухостепной зоне южного и среднего Урала, степной зоне Сибири, в Оренбургской и Саратовской областях из-за недостаточного увлажнения средние урожаи относительно невысокие, однако зерно содержит много белка и клейковины. Сорта твердой пшеницы, выращиваемые в этой зоне, обладают высокими товарными качествами и высоко ценятся на рынке зерна.

В Алтайском крае, Омской и Новосибирской областях, занимающих по рангу посевных площадей яровой пшеницы первые три позиции (~1100-2200 тыс. га), средняя урожайность яровой пшеницы за период 1991-2020 гг. близка к средней урожайности по России (~12-14 ц/га). Максимальная урожайность, зафиксированная в регионе, невысокая – от ~14 до 21 ц/га, принимая во внимание, что на плодородных землях с достаточным увлажнением урожайность яровой пшеницы может подниматься до 40-45 ц/га.

В агроклиматическом отношении территория Нижней Волги, южного Урала и Сибири, а также Северного Казахстана относится к зоне неустойчивых урожаев яровой пшеницы, обусловленных большой изменчивостью гидротермического режима и высокой повторяемостью засух. За последние десятилетия в Саратовской и Оренбургской областях повторяемость засух, как главного фактора риска при возделывании яровой пшеницы, высокая и в отдельных районах достигает 70-80% в (~7-8 случаев за 10 лет) (Национальный доклад ..., 2021).

Можно выделить два квазиоднородных региона с высоким коэффициентом кросскорреляции (табл. 4). Первый регион – это умеренно-устойчивая зона, включающая три самые крупные зерновые области: Алтайский край, Омскую и Новосибирскую области (табл. 4, заливка зеленым цветом). Второй регион – самая засушливая зона, зона неустойчивых урожаев, включая Саратовскую, Оренбургскую, Челябинскую и Курганскую области (табл. 4, заливка желтым цветом). Достаточно высокая пространственно-временная зависимость рядов урожайности в трех основных зернопроизводящих областях может свидетельствовать о существующем риске значительного недобора урожая одновременно в засушливые годы и его негативном влиянии на валовый сбор яровой пшеницы по России в целом.

Анализ показывает, что на западе региона, в Челябинской и Саратовской областях, темпы роста фактической урожайности от периода 1991-2000 к

2011-2020 гг. невысокие (1.9-2.4 ц/га/10 лет) или не отмечаются вовсе (Оренбургская область). В регионе с высокой концентрацией посевов (Алтайский край, Омская и Новосибирская области) темпы роста выше и составляют 2.8-3.6 ц/га. Акмолинская область по темпу роста фактической урожайности занимает промежуточное место – 2.4 ц/га за тридцатилетний период. Обращает на себя внимание факт замедления прироста средней по десятилетиям фактической урожайности на граничащей с ЦА территории России от десятилетия 2001-2010 к 2011-2020 гг. и увеличение числа случаев с приращением урожайности не выше 0.5 ц/га (табл. 5).

На территории областей России к самым неурожайным относятся 1991, 1998 и 2012 г. В эти годы фактическая урожайность не превышала 6-7 ц/га, а в Оренбургской и Саратовской областях фактическая урожайность была ниже нормы высева семян (~1.5 ц/га). В Акмолинской области Казахстана крупные недоборы урожая зафиксированы в 1991, 1998 и 2010 г., когда урожайность составляла 6.2, 3.8 и 6.3 ц/га, соответственно.

Анализ тенденций изменений урожайности яровой пшеницы на рассматриваемой территории указывает на смену знака тенденции и ее величины от периода 1961-1990 к 1991-2020 гг.

В период 1961-1990 гг. в рядах урожайности на западе региона (Оренбургская, Саратовская и Челябинская области) наблюдались либо отрицательные, либо близкие к нулю коэффициенты линейного тренда (в табл. 6 обозначение ▲ ▼). Но в восточных областях, Новосибирской и Омской, статистически значимо проявляются положительные тренды – 1.3 и 0.1 ц/га/10 лет соответственно. От достаточно низкого уровня урожайности яровой пшеницы в 60-70-х годах Новосибирская область «подтянулась» до уровня урожайности Омской области за последнее десятилетие.

За период 1991-2020 гг. знак тенденции изменений фактической урожайности в умеренно устойчивой зоне урожайности (Алтайский край, Омская и Новосибирская области) и в засушливой Саратовской области сменился на положительный. Скорость роста урожайности, b , здесь составляет от 1.5 до 2.0 ц/га или от 5 до 6% за 10 лет. Таким образом, в граничащих с Казахстаном областях России наблюдается устойчивый рост урожайности яровой пшеницы. Как показал агроклиматический анализ, приведенный выше, улучшения агрометеорологических условий на этой территории не выявлено и можно сделать обоснованное предположение о росте урожайности за этот период только за счет усовершенствования агротехнологий.

Заключение

Сравнительная оценка тенденций изменений агроклиматических ресурсов в регионе Центральной Азии и граничащих с ней областях России показывает, что эти тенденции имеют одинаковую направленность по показателям теплообеспеченности, но различаются по знакам и величине по показателям влагообеспеченности, что связано со значительной изменчивостью и орографическими условиями территории. В Таджикистане, Кыргызстане, Узбекистане и Туркменистане, где сельское хозяйство зависит от орошения, условия

увлажненности вегетационного периода не улучшаются, за исключением весны, что еще больше сокращает потенциальные возможности пахотных земель в этих регионах.

Скорость роста теплообеспеченности на территории областей России и Северного Казахстана составляет менее $50^{\circ}\text{C}/10$ лет, что практически в два раза меньше, чем по России в среднем (около $90^{\circ}\text{C}/10$ лет) (Доклад об особенностях климата ..., 2023).

Увеличение количества осадков, выпадающих в весенний период вегетации в этом регионе, может сглаживать отрицательное воздействие летнего потепления на яровые зерновые культуры.

Урожайность яровой пшеницы повышается практически на всей территории российских областей, граничащих с Казахстаном, и Акмолинской области, и наиболее динамичные темпы ее роста характерны для периода последних десятилетий. Приращение урожайности, за исключением Оренбургской и Челябинской областей, оценивается величиной от 1.5 до 2.0 ц/га/10 лет. Урожайность в Акмолинской области также имеет тенденцию к росту (~ 1.0 ц/га/10 лет).

Оценки изменений агроклиматических ресурсов в Северном Казахстане и сопредельных областях России не носят экстремального характера, чем и отличаются, например, от центральных и южных районов Европейской части России. Потенциал этой территории, особенно восточных областей, для выращивания зерновых культур остается значительным при современном изменении климата. Поэтому развитие агротехнологий, включающее увеличение и оптимизацию доз минеральных удобрений, введение новых засухоустойчивых стресс-толерантных сортов пшеницы, ввод в практику влагосберегающих технологий и другие агротехнические приемы, в целом снижает риски возделывания зерновых культур и позволяет реализовать агроклиматический потенциал этих территорий в условиях современного изменения климата.

Список литературы

Агроклиматические ресурсы Северо-Казахстанской области: научно-прикладной справочник (2017) Под ред. С.С. Байшоланова, Астана, 125 с.

Алпатыев, А.М., Архангельский, А.М., Подоплелов, Н.Я., Степанов, А.Я. (1976) *Физическая география СССР (азиатская часть)*, М., Высшая школа, 360 с.

Байшоланов, С.С., Акшалов, К.А., Ауесханов, Д., Баймуканова, О. (2022) Связь урожайности яровой пшеницы с агрометеорологическими показателями на территории Северо-Казахстанской области Республики Казахстан, *Гидрометеорологические исследования и прогнозы*, № 4 (386), с. 130-146.

Байшоланов, С.С., Мусатаева, Г.Б., Павлова, В.Н., Муканов, Е.Н., Чернов, Д.А., Жакиева, А.Р. (2015) Оценка агроклиматических ресурсов Северо-Казахстанской области, *Вестник КазНУ. Серия географическая*, № 2 (41), с. 151-159.

Доклад о климатических рисках на территории Российской Федерации (2017) СПб, 106 с.

Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2022 год (2023) М., 104 с.

Звягельская, И.Д. (2009) *Становление государств Центральной Азии. Политические процессы*, М., Аспект Пресс, 208 с.

Национальный доклад «Глобальный климат и почвенный покров России: проявления засухи, меры предупреждения, борьбы, ликвидация последствий и адаптационные мероприятия (сельское и лесное хозяйство)». Том 3 (2021) Под ред. Р.С.-Х. Эдельгериева, М., ООО «Издательство МБА», 700 с.

Национальный план мероприятий первого этапа адаптации к изменениям климата на период до 2022 года, утвержденный распоряжением Правительства Российской Федерации от 25 декабря 2019 г. № 3183-р.

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

Сиротенко, О.Д. (1991) *Имитационная система Климат-Урожай, Метеорология и гидрология*, № 4, с. 67-73.

Справочник Агроклиматические ресурсы Джизакской и Самаркандской областей Узбекской ССР (1977) Л., Гидрометеиздат, 217 с.

Справочник Агроклиматические ресурсы Казахской ССР (1974) Л., Гидрометеиздат, 167 с.

Справочник Агроклиматические ресурсы Наманганской, Андижанской, Ферганской областей Узбекской ССР (1977) Л., Гидрометеиздат, 196 с.

Справочник Агроклиматические ресурсы Ошской области Киргизской ССР (1975) Л., Гидрометеиздат, 215 с.

Справочник Агроклиматические ресурсы районов республиканского подчинения, Иссык-Кульской и Нарынской областей Киргизской ССР (1973) Л., Гидрометеиздат, 240 с.

Справочник Агроклиматические ресурсы Таджикской ССР (1975) Л., Гидрометеиздат, 216 с.

Справочник Агроклиматические ресурсы Ташкентской и Сырдарьинской областей Узбекской ССР (1974) Л., Гидрометеиздат, 206 с.

Справочник Агроклиматические ресурсы Туркменской ССР (1974) Л., Гидрометеиздат, 244 с.

Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Общее резюме (2022) СПб., Научные технологии, 124 с.

FAOSTAT (2022) FAOSTAT Data, Food and Agriculture Organization of the United Nations, available at: <http://www.fao.org/faostat> (accessed 10.08.2023).

Jacobs, C., Berglund, M., Kurnik, B., Dworak, T., Marras, S., Mereu, V., Michetti, M. (2019) Climate change adaptation in the agriculture sector in Europe, *EEA Report*, no. 4, 112 p.

Pavlova, V.N., Karachenkova, A.A., Varcheva, S.E., Sinitsyn, N.M. (2020) Assessment Approach of the Spatial Wheat Cultivation Risk for the Main Cereal Cropping Regions of Russia, in: Mirschel, W., Terleev, V., Wenkel, K.-O. (eds) *Landscape Modelling and Decision Support. Innovations in Landscape Research*, Springer, Cham, pp. 363-382.

Pinke, Z., Decsi, B., Jámbo, A., Kardos, M.K., Kern, Z., Kozma, Z., Ács, T. (2022) Climate change and modernization drive structural realignments in European grain production, *Scientific Reports*, no. 12:7374.

USDA-FAS (2022) *Grain: World Markets and Trade*, U.S. Department of Agriculture Foreign Agricultural Service, available at: <https://usda.library.cornell.edu/concern/publications/zs25x844t?locale=en> (accessed 10.08.2023).

References

Agroklimaticheskiye resursy Severo-Kazakhstanskoy oblasti: nauchno-prikladnoy spravochnik [Agro-climatic resources of the North Kazakhstan region: scientific and applied reference book] (2017) In S.S. Baysholanov (ed.), Astana, Kazakhstan, 125 p.

Alpat'yev, A.M., Arkhangel'skiy, A.M., Podoplelov, N.Ya., Stepanov, A.Ya. (1976) *Fizicheskaya geografiya SSSR (aziatskaya chast')* [Physical geography of the USSR (Asian part)], Moscow, Russia, 360 p.

Baysholanov, S.S., Akshalov, K.A., Auyeskhonov, D., Baymukanova, O. (2022) Svyaz' urozhaynosti yarovoy pshenitsy s agrometeorologicheskimi pokazatelyami na territorii Severo-Kazakhstanskoy oblasti Respubliki Kazakhstan [Relationship between spring wheat productivity and agrometeorological indicators on the territory of the North Kazakhstan region of the Republic of Kazakhstan], *Gidrometeorologicheskiye issledovaniya i prognozy*, no. 4 (386), pp. 130-146.

Baysholanov, S.S., Musatayeva, G.B., Pavlova, V.N., Mukanov, Ye.N., Chernov, D.A., Zhakiyeva, A.R. (2015) Otsenka agroklimaticheskikh resursov Severo-Kazakhstanskoy oblasti [Evaluation of agro-climatic resources of the North Kazakhstan region], *Vestnik KazNU. Seriya geograficheskaya*, no. 2 (41), pp. 151-159.

Doklad o klimaticheskikh riskakh na territorii Rossiyskoy Federatsii [Report on climate risks in the territory of the Russian Federation] (2017) St. Petersburg, Russia, 106 p.

Doklad ob osobennostyakh klimata na territorii Rossiyskoy Federatsii za 2022 god [Report on climate features in the territory of the Russian Federation for 2022] (2023) Moscow, Russia, 104 p.

Zvyagel'skaya, I.D. (2009) *Stanovleniye gosudarstv Tsentral'noy Azii. Politicheskiye protsessy* [Formation of the states of Central Asia. Political processes], Moscow, Russia, 208 p.

Natsional'nyy doklad «Global'nyy klimat i pochvennyy pokrov Rossii: proyavleniya zasukhi, mery preduprezhdeniya, bor'by, likvidatsiya posledstviy i adaptatsionnyye meropriyatiya (sel'skoye i lesnoye khozyaystvo)». Tom 3 [National report "Global climate and soil cover in Russia: manifestations of drought, prevention measures, control, elimination of consequences and adaptation measures (agriculture and forestry)". Vol. 3] (2021) In R.S.-Kh. Edel'geriyev (ed.), Moscow, Russia, 700 p.

Natsional'nyy plan meropriyatiy pervogo etapa adaptatsii k izmeneniyam klimata na period do 2022 goda, utverzhennyy rasporyazheniyem Pravitel'stva Rossiyskoy Federatsii ot 25 dekabrya 2019 g. № 3183-r [National action plan for the first stage of adaptation to climate change for the period up to 2022, approved by the Decree of the Government of the Russian Federation dated December 25, 2019, no. 3183-r].

Sirotenko, O.D. (1981) *Matematicheskoe modelirovanie vodno-teplovogo rezhima i produktivnosti agroekosistem* [Mathematical modeling of water-heat regime and productivity of agroecosystems], Gidrometeoizdat, Leningrad, Russia, 167 p.

Sirotenko, O.D. (1991) Imitatsionnaya sistema Klimat-Urozhay [Simulation system "Climate-Harvest"], *Meteorologiya i gidrologiya*, no. 4, pp. 67-73.

Spravochnik Agroklimaticheskoye resursy Dzhizakskoy i Samarkandskoy oblastey Uzbekskoy SSR [Reference book of Agro-climatic resources of Jizzakh and Samarkand regions of the Uzbek SSR] (1977) Gidrometeoizdat, Leningrad, Russia, 217 p.

Spravochnik Agroklimaticheskoye resursy Kazakhskoy SSR [Reference book of Agro-climatic resources of the Kazakh SSR] (1974) Gidrometeoizdat, Leningrad, Russia, 167 p.

Spravochnik Agroklimaticheskoye resursy Namanganskoy, Andizhanskoy, Ferganskoy oblastey Uzbekskoy SSR [Reference book of Agro-climatic resources of Namangan, Andijan, Fergana regions of the Uzbek SSR] (1977) Gidrometeoizdat, Leningrad, Russia, 196 p.

Spravochnik Agroklimaticheskoye resursy Oshskoy oblasti Kirgizskoy SSR [Reference book of Agro-climatic resources of the Osh region of the Kirghiz SSR] (1975) Gidrometeoizdat, Leningrad, Russia, 215 p.

Spravochnik Agroklimaticheskoye resursy rayonov respublikanskogo podchineniya, Issyk-Kul'skoy i Narynskoy oblastey Kirgizskoy SSR [Reference book of Agro-climatic resources of the regions of republican subordination, Issyk-Kul and Naryn regions of the Kirghiz SSR] (1973) Gidrometeoizdat, Leningrad, Russia, 240 p.

Spravochnik Agroklimaticheskoye resursy Tadzhikskoy SSR [Reference book of Agro-climatic resources of the Tajik SSR] (1975) Gidrometeoizdat, Leningrad, Russia, 216 p.

Spravochnik Agroklimaticheskoye resursy Tashkentskoy i Syrdar'inskoy oblastey Uzbekskoy SSR [Reference book of Agro-climatic resources of the Tashkent and Syrdarya regions of the Uzbek SSR] (1974) Gidrometeoizdat, Leningrad, Russia, 206 p.

Spravochnik Agroklimaticheskoye resursy Turkmen'skoy SSR [Reference book of Agro-climatic resources of the Turkmen SSR] (1974) Gidrometeoizdat, Leningrad, Russia, 244 p.

Tretij otsenochnyj doklad ob izmeneniyakh klimata i ikh posledstviyakh na territorii Rossijskoj Federatsii. Obshee resyume [Third assessment report on climate change and its consequences on the territory of the Russian Federation. General Summary] (2022) St. Petersburg, Russia, 124 p.

FAOSTAT (2022) FAOSTAT Data, Food and Agriculture Organization of the United Nations, available at: <http://www.fao.org/faostat> (accessed 10.08.2023).

Jacobs, C., Berglund, M., Kurnik, B., Dworak, T., Marras, S., Mereu, V., Michetti, M. (2019) Climate change adaptation in the agriculture sector in Europe, *EEA Report*, no. 4, 112 p.

Pavlova, V.N., Karachenkova, A.A., Varcheva, S.E., Sinitsyn, N.M. (2020) Assessment Approach of the Spatial Wheat Cultivation Risk for the Main Cereal Cropping Regions of Russia, in: Mirschel, W., Terleev, V., Wenkel, K.-O. (eds) *Landscape Modelling and Decision Support. Innovations in Landscape Research*, Springer, Cham, pp. 363-382.

Pinke, Z., Decsi, B., Jámbor, A., Kardos, M.K., Kern, Z., Kozma, Z., Ács, T. (2022) Climate change and modernization drive structural realignments in European grain production, *Scientific Reports*, no. 12:7374.

USDA-FAS (2022) *Grain: World Markets and Trade*, U.S. Department of Agriculture Foreign Agricultural Service, available at: <https://usda.library.cornell.edu/concern/publications/zs25x844t?locale=en> (accessed 10.08.2023).

Поступила в редакцию: 16.05.2023.

Доработана после рецензирования: 05.07.2023.

Принята к публикации: 12.08.2023.

Для цитирования / For citation:

Павлова, В.Н., Карачёнова, А.А., Романенков, В.А. (2023) Оценка изменений агроклиматических ресурсов в Центральной Азии и сопредельных областях России, *Фундаментальная и прикладная климатология*, т. 9, № 3, с. 298-317, doi:10.21513/2410-8758-2023-3-298-317.

Pavlova, V.N., Karachenkova, A.A., Romanenkov, V.A. (2023) Assessment of changes in agro-climatic resources in Central Asia and adjacent areas of Russia, *Fundamental and Applied Climatology*, vol. 9, no. 3, pp. 298-317, doi:10.21513/2410-8758-2023-3-298-317.

Применение моделей прогноза погоды для моделирования климата

М.А. Толстых^{1),2)}

¹⁾ Институт вычислительной математики им. Г.И. Марчука РАН,
Россия, 119991, Москва, ул. Губкина, 8

²⁾ Гидрометцентр России,
Россия, 123376, Москва, Б. Предтеченский пер., 13, стр. 1

Адрес для переписки: *m.tolstykh@inm.ras.ru*

Реферат. Рассматривается концепция бесшовных моделей атмосферы, предназначенных как для численного прогноза погоды, так и моделирования изменений климата. Она состоит в том, что в атмосфере не существует искусственных временных границ, разделяющих синоптические, сезонные и межгодовые масштабы. В силу нелинейности атмосферы процессы всех пространственных и временных масштабов взаимодействуют между собой. Таким образом, модель атмосферы, ориентированная на воспроизведение каких-либо явлений, должна адекватно воспроизводить явления всех временных масштабов. Говорить о бесшовных моделях атмосферы как об универсальных моделях, работающих при любых возможных шагах сетки, неверно. Одна и та же модель не может применяться при шаге сетки около 1-2 км и 50-80 км, так как в первом случае процессы образования конвективных осадков в основном описываются явным образом, а во втором случае глубокая конвекция является процессом подсеточного масштаба, который надо представить параметрически.

В статье приводится обзор реализаций многомасштабных моделей на примере некоторых зарубежных (объединенная модель Метеофиса Великобритании и европейская модель ЕС Earth 3) и отечественной модели общей циркуляции атмосферы ПЛАВ. Приводится пример модификации параметризации глубокой конвекции, разработанной для климатической версии модели ПЛАВ, использование которой позволило существенно уменьшить ошибки среднесрочного прогноза в тропиках. Применение одной и той же модели атмосферы для численного прогноза погоды и для вероятностного прогноза крупномасштабных аномалий погоды на месяц и сезон, для воспроизведения современного климата (в составе модели Земной системы) вполне возможно и дает хорошие результаты. Дальнейшее применение концепции бесшовного прогноза все больше основано на моделях Земной системы, включающих в себя также модели Мирового океана, морского льда, малых газовых составляющих и др. Важной задачей является и развитие систем усвоения данных наблюдений для таких совместных моделей.

Ключевые слова. Бесшовный прогноз, модели общей циркуляции атмосферы.

Application of numerical weather prediction models for climate modelling

M.A. Tolstykh^{1),2)}

¹⁾Marchuk Institute of Numerical Mathematics of the Russian Academy of Sciences,
8, Gubkina str., 119991, Moscow, Russian Federation

²⁾Hydrometcentre of Russia,
13/1, B. Predtechensky lane, 123376, Moscow, Russian Federation

Correspondence address: *m.tolstykh@inm.ras.ru*

Abstract. The concept of seamless prediction atmospheric models designed both for numerical weather forecasting and climate change modeling is considered. It consists in the fact that there are no artificial time boundaries in the atmosphere that separate synoptic, seasonal and interannual scales. Due to the nonlinearity of the atmosphere, the processes of all spatial and time scales interact with each other. Thus, an atmospheric model focused on reproducing any phenomena must adequately reproduce phenomena of all time scales. It is wrong to talk about seamless atmosphere models as universal models that function at any possible mesh sizes. The same model cannot be used at the horizontal resolution of about 1-2 km and 50-80 km, since the processes of convective precipitation formation are mainly described explicitly in the first case while the deep convection is a sub-grid scale process that has to be parametrized in the second case.

The article provides an overview of the implementations of multiscale models with the example of some foreign (the unified model (UM) of the UK MetOffice and the European model EC Earth 3) and Russian SL-AV atmosphere general circulation model. An example of a modification to the deep convection parameterization developed for the climatic version of the SL-AV model is given that significantly reduced the errors of the medium-range forecast in the tropics. The use of the same atmosphere model for numerical weather prediction, for probabilistic forecast of large-scale weather anomalies at monthly and seasonal scale, and for the reproduction of the modern climate (as a part of the Earth system model) is quite possible and gives good results. The further application of the seamless prediction concept is increasingly based on the Earth system models, including also the global ocean model, sea ice model, small gas components model, etc. An important task is the development of systems for assimilating observational data for such coupled models.

Keywords. Seamless prediction, atmosphere general circulation models.

Введение

Современный подход к решению задачи воспроизведения и прогнозирования состояния атмосферы, опирается на широкое использование математических моделей. Модели используют разбиение атмосферы на трехмерные

элементы (чаще всего, параллелепипеды). Эти модели состоят из блоков, один из которых, т.н. динамическое ядро, предназначен для решения системы дискретных уравнений гидротермодинамики атмосферы в каждом элементе. Второй блок включает в себя набор параметрических описаний процессов подсеточного масштаба, например, приземного пограничного слоя, глубокой конвекции, и др. Исторически проблема моделирования атмосферы разделилась на две слабосвязанных между собой задачи: прогноз погоды на срок от нескольких часов до десятка дней и воспроизведение климата (и его изменений) на временных масштабах от нескольких лет и больше.

С начала 70-х годов прошлого века, когда появились первые модели общей циркуляции атмосферы, модели атмосферы, предназначенные для прогноза погоды и для моделирования климата, развивались в основном независимо. Во главу угла развития моделей прогноза погоды было поставлено повышение пространственной детализации моделей, усложнение параметрического описания «быстрых» процессов (например, планетарный пограничный слой, глубокая конвекция). При развитии моделей климата больше внимания уделялось описанию «медленных» атмосферных процессов, например, солнечной и тепловой радиации, а также развитию моделей сред, участвующих в формировании климата (океан, морской лед, биосфера, малые газовые составляющие и т.д.).

Несмотря на то, что моделируется одна и та же среда – атмосфера, большинство математических моделей климата даже сейчас не могут дать удовлетворительный прогноз погоды на несколько дней. Это выявилось еще в середине 2000-х годов при анализе результатов проекта СМIP3. Справедливо и обратное: модели прогноза погоды очень часто воспроизводят современный климат со значительными ошибками.

В 2005 году была выдвинута концепция многомасштабной модели атмосферы (или бесшовного прогноза) (Shukla, 2009). Она состоит в том, что в атмосфере не существует искусственных временных границ, разделяющих синоптические, сезонные и межгодовые масштабы. В силу нелинейности атмосферы процессы всех пространственных и временных масштабов взаимодействуют между собой. Таким образом, модель атмосферы, ориентированная на воспроизведение каких-либо явлений, должна адекватно воспроизводить явления всех временных масштабов. Например, известно, что внутренние колебания системы атмосфера-океан климатического масштаба – Эль-Ниньо-Южное колебание, Северо-Атлантическое колебание – оказывают заметное влияние на частоту, интенсивность и траектории тропических и внетропических циклонов. Мезомасштабные процессы в атмосфере, в свою очередь, влияют на процессы климатического масштаба.

Постепенный рост вычислительных ресурсов привел к тому, что модели прогноза погоды стали все чаще включать в себя элементы, ранее характерные лишь для моделей климата (например, описания аэрозолей и связанных с ними процессов). Модели климата, по мере роста доступных вычислительных ресурсов и, следовательно, разрешения, в свою очередь, потребовали описания ряда процессов на уровне, который ранее требовался лишь в моде-

лях прогноза погоды. Подробный обзор концепции бесшовного прогноза, перспектив ее развития и ее обоснование был приведен в (Hoskins, 2013). Отметим, что сегодня видно, что автор этой работы правильно разглядел большой потенциал этой концепции. Затем словосочетание «бесшовный прогноз» стало лозунгом Всемирной программы исследования погоды Всемирной метеорологической организации (WMO, 2015).

В силу популярности, словосочетание «бесшовный прогноз» стали понимать слишком буквально. Некоторые ученые стали говорить о бесшовных моделях атмосферы, как об универсальных моделях, работающих при любых возможных на сегодня шагах сетки. Отметим, что авторы идеи бесшовного прогноза такого не говорили, скорее, имелось в виду, что модель среднесрочного прогноза погоды может использоваться для моделирования изменений климата и наоборот. Но одна и та же модель не может применяться при шаге сетки около 1-2 км и 50-80 км, так как в первом случае процессы образования конвективных осадков в основном описываются явным образом, а во втором случае глубокая конвекция (характерный размер конвективных ячеек от нескольких сотен метров до первых километров) является процессом подсеточного масштаба, который надо представить параметрически. Моделирование циркуляции атмосферы с шагом сетки в 1 км, безусловно, означает формулировку модели на основе негидростатических уравнений, в то время как при шаге сетки 7 км и грубее, характерном в настоящее время для моделей среднесрочного прогноза, можно использовать традиционное приближение гидростатики. Также процессы торможения гравитационных волн орографического происхождения при шаге сетки порядка 1 км описываются явно. В ряде случаев одна и та же модель, например (Walter et al., 2019), применяет различные описания одного и того же процесса в зависимости от задачи – прогноза либо моделирования климата.

Важным преимуществом единой модели для воспроизведения климата и численного прогноза погоды является возможность объединения усилий обычно немногочисленных специалистов разного профиля для ее поддержки и дальнейшего развития.

Зарубежный опыт

Разработка и применение одной и той же модели атмосферы для прогноза погоды и моделирования изменений климата восходит к началу 1990-х годов. В метеослужбе Великобритании и центре Гадлея была разработана унифицированная модель атмосферы, Unified Model (UM) (Walters et al., 2019). В частности, никакие усовершенствования в модели прогноза погоды не принимались до тех пор, пока модельный «климат» в эксперименте по протоколу AMIP становился как минимум не хуже, чем в исходной версии модели. Согласно протоколу AMIP, моделируется состояние атмосферы в период с 1979 по 1996 при заданной эволюции температуры поверхности океана, концентрации морского льда и др. Фактически модель МетОфиса стала первой моделью бесшовного прогноза.

В последнее десятилетие модель численного прогноза погоды Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды (ЕЦСПП) в версии для долгосрочного прогноза активно продвигается как инструмент для исследований климата. Для этого была создана ее условно свободно распространяемая версия OpenIFS, доступная европейским университетам. На основе OpenIFS создана полная модель Земной системы EC-Earth. В настоящее время существует уже версия EC-Earth3 (Döscher et al., 2022), которая участвовала во многих экспериментах по программе международного эксперимента по сравнению моделей климата CMIP6. Эта модель развивается и широко применяется во многих университетах Западной Европы.

Отметим, что ранее в рамках проекта CMIP существовал подпроект TransposeAMIP (Williams et al., 2019), в рамках которого модели климата пытались рассчитывать прогноз погоды с заблаговременностью пять дней, а результаты прогнозов использовались для уточнения воспроизведения процессов в тропической атмосфере в моделях климата.

Отечественный опыт

В Институте вычислительной математики им. Г.И. Марчука РАН с 1997 года развивается глобальная модель атмосферы ПЛАВ (ПолуЛагранжева, основанная на уравнении Абсолютной завихренности) (Толстых и др., 2017). Глобальная модель атмосферы ПЛАВ применяется в Гидрометцентре России для оперативного среднесрочного и долгосрочного прогнозов. Как и все модели общей циркуляции атмосферы, модель включает блок решения уравнений гидротермодинамики атмосферы (в данном случае в гидростатическом приближении) и блок параметризаций процессов подсеточного масштаба. Динамический блок модели основан на оригинальной формулировке в терминах вертикального компонента абсолютной завихренности и горизонтальной дивергенции, применяет ряд оригинальных вычислительных алгоритмов, подробное описание приводится в (Tolstykh et al., 2017). Блок параметризаций включает в себя алгоритмы описания процессов, разработанные в консорциуме по мезомасштабному прогнозу погоды ALADIN/LACE (Termonia et al., 2018), свободно распространяемые коды для расчета коротко- и длинноволновой радиации, модель многослойной почвы ИВМ РАН-НИВЦ МГУ (Володин, Лыкосов, 1998), а также некоторые параметризации, разработанные в ИВМ РАН.

Подробное описание модели ПЛАВ приводится в (Толстых и др., 2017). Изначально модель разрабатывалась как модель среднесрочного (с заблаговременностью до 5-10 дней) прогноза погоды. Однако уже в 2005 году началось опытное применение модели в расчетах долгосрочных прогнозов погоды с заблаговременностью до 4 месяцев. Этот опыт оказался по тем временам вполне успешным в части прогнозов во внетропической части Северного полушария (Тросников и др., 2005). По мере развития модели, в результате усилий по усовершенствованию динамического блока и описания процессов подсеточного масштаба (Толстых и др., 2015), все время возрастал времен-

ной масштаб атмосферных явлений, успешно воспроизводимых моделью ПЛАВ (Фадеев и др., 2019). Так, в результате работ как по повышению вертикального разрешения модели ПЛАВ, так и включению в модель параметрического учета торможения гравитационных волн неорографического характера, с 2018 года модель ПЛАВ успешно воспроизводит квазидвухлетнее колебание зонального компонента скорости ветра в стратосфере (Шашкин и др., 2019). Это внутреннее колебание атмосферы является одним из предикторов долгосрочного прогноза, см., например, (Kidston et al., 2015). Отметим, что отнюдь не все глобальные модели прогноза погоды воспроизводят это явление, в том числе, как выяснилось, его пока не воспроизводят некоторые модели, изначально настроенные лишь на среднесрочный прогноз погоды. Различные применения модели ПЛАВ проиллюстрированы на рис. 1.

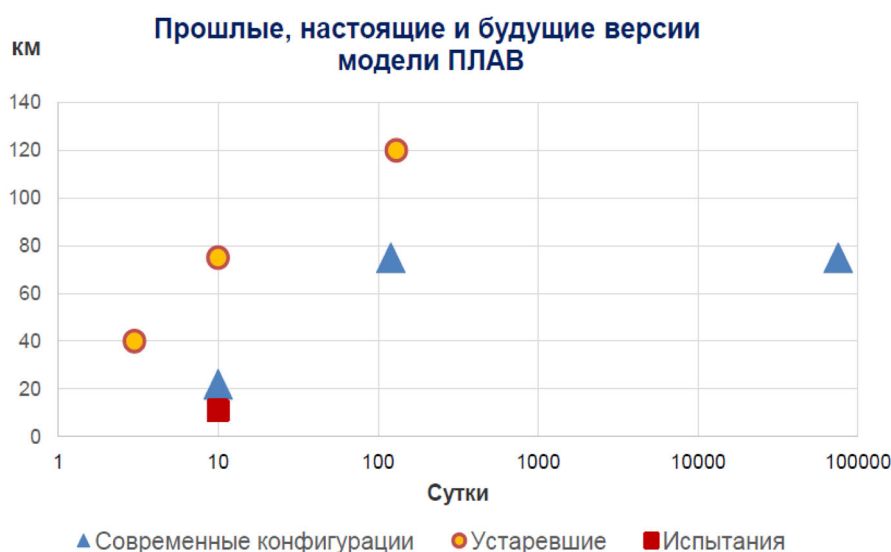


Рисунок 1. Различные конфигурации модели ПЛАВ

По оси абсцисс – продолжительность моделирования (максимальная заблаговременность прогноза), сутки. По оси ординат – характерный шаг сетки по горизонтали, км

Figure 1. Various configuration of SL-AV models

On the x-axis – duration of modeling (maximum advance forecast), day. On the ordinate axis – characteristic horizontal resolution of space grid, km

В последние годы удалось добиться существенного прогресса в качестве воспроизведения современного климата моделью ПЛАВ (Шашкин и др., 2023). В частности, для климатической версии была разработана и внедрена важная модификация расчета вертикального переноса импульса в процессе глубокой конвекции. Это усовершенствование позволило устранить т.н. «раздвоение» внутритропической зоны конвергенции и добиться хорошего совпадения среднегодового поля осадков с наблюдениями в версии модели горизонтальным разрешением около 75 км. Эта же модификация была затем применена в новой версии модели ПЛАВ для среднесрочного прогноза, имеющей горизонтальное разрешение вблизи экватора 11 км, что позволило существенно снизить ошибки прогноза в тропиках, в частности, практически

свести к нулю среднюю ошибку прогноза температуры на уровне 500 гПа (данные по прогнозам с заблаговременностями от 24 до 120 часов за период оперативных испытаний этой версии модели с 01 октября 2022 г по 15 апреля 2023 г.). Данный пример лишь подтверждает мировой опыт развития моделей атмосферы.

Дискуссия

Постепенно происходит стирание границ между моделями численного прогноза, ранее применявшимися только для прогноза на 7-10 дней, и моделями климата, которые предназначены для воспроизведения климата и его изменений. Представляется, что применение одной и той же модели атмосферы для численного прогноза погоды, для вероятностного прогноза крупномасштабных аномалий погоды на месяц и сезон, а также для воспроизведения современного климата вполне возможно и дает хорошие результаты. Можно утверждать, что такое взаимообогащение моделей повышает способность моделей к воспроизведению атмосферных процессов всех масштабов. Тому пример опыт ряда ведущих мировых прогностических центров, например, МетОфиса Великобритании, успешно применяющего одну и ту же модель для всех вышеупомянутых приложений. Имеется и пример в отечественной практике. В то же время, модели прогноза и климата имеют разные метрики ошибок, и для достижения наилучшего результата в ряде случаев необходимо применять разные описания процессов подсеточного масштаба в зависимости от приложения.

Важно заметить, что для долгосрочного прогноза и тем более моделирования современного климата модель атмосферы должна работать в составе модели Земной системы. Такие модели включают в себя также модели Мирового океана, морского льда, малых газовых составляющих и др. В настоящее время уже почти все оперативные системы долгосрочного прогноза в мире (кроме Бразилии и России) основаны на совместных моделях, как минимум, атмосферы, океана и морского льда (WMO LC LRF MME, 2023). Заметной тенденцией последних лет является все более частое применение совместных моделей атмосферы и других сред в среднесрочном и даже краткосрочном прогнозе погоды (WGNE, 2022). В частности, совместная модель атмосферы, океана и морского льда с 2020 года применяется оперативно в ЕЦСПП, а с 2022 года аналогичная модель применяется в МетОфисе Великобритании. При этом прогностическая система ЕЦСПП включает в себя также и описание эволюции малых газовых составляющих, таких, как озон, метан, углекислый газ, а также аэрозолей. Во многом качество прогноза такой системы определяет система усвоения данных, которая теперь должна усваивать данные наблюдений во всех моделируемых средах. Разработка совместной системы усвоения является весьма трудоемкой и вычислительно емкой задачей. Дополнительной сложностью здесь являются разные характерные времена процессов и частота наблюдений в различных средах. Поэтому часто применяют отдельные системы усвоения для каждой из сред. В настоящее

время системы усвоения данных наблюдений в океане работают в оперативном режиме в ряде зарубежных центров, также в рамках европейского консорциума Коперникус работает система усвоения данных наблюдений за рядом малых газовых составляющих.

Благодарности

Исследование выполнено в Гидрометцентре России за счет гранта РНФ 21-17-00254 (<https://rscf.ru/project/21-17-00254/>).

Список литературы

Володин, Е.М., Лыкосов, В.Н. (1998) Параметризация процессов тепло- и влагообмена в системе растительность – почва для моделирования общей циркуляции атмосферы. 1. Описание и расчеты с использованием локальных данных, *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*, т. 34, № 4, с. 453-465.

Тросников, И.В., Казначеева, В.Д., Киктев, Д.Б., Толстых, М.А. (2005) Оценка потенциальной предсказуемости метеорологических величин при динамическом сезонном моделировании циркуляции атмосферы на основе полулагранжевой модели SL-AV, *Метеорология и гидрология*, № 12, с. 5-17.

Толстых, М.А., Желен, Ж.Ф., Володин, Е.М., Богословский, Н.Н., Вильфанд, Р.М., Киктев, Д.Б., Красюк, Т.В., Кострыкин, С.В., Мизяк, В.Г., Фадеев, Р.Ю., Шашкин, В.В., Шляева, А.В., Эзау, И.Н., Юрова, А.Ю. (2015) Разработка многомасштабной версии глобальной модели атмосферы ПЛАВ, *Метеорология и гидрология*, № 6, с. 25-35.

Толстых, М.А., Шашкин, В.В., Фадеев, Р.Ю., Шляева, А.В., Мизяк, В.Г., Рогутов, В.С., Богословский, Н.Н., Гойман, Г.С., Махнорылова, С.В., Юрова, А.Ю. (2017) Система моделирования атмосферы для бесшовного прогноза, рец. д.ф.-м.н. А.В. Старченко, М., Триада ЛТД, 166 с., ISBN 978-5-9908623-3-3.

Фадеев, Р.Ю., Толстых, М.А., Володин, Е.М. (2019) Климатическая версия модели атмосферы ПЛАВ: разработка и первые результаты, *Метеорология и гидрология*, № 1, с. 22-35.

Шашкин, В.В., Толстых, М.А., Володин, Е.М. (2019) Моделирование циркуляции стратосферы полуланранжевой моделью атмосферы ПЛАВ, *Метеорология и гидрология*, № 1, с. 5-21.

Шашкин, В.В., Фадеев, Р.Ю., Толстых, М.А., Криволуцкий, А.А, Банин, М.В. (2023) Воспроизведение процессов в стратосфере моделью общей циркуляции атмосферы ПЛАВ072L96, *Метеорология и гидрология*, № 6, в печати.

Döscher, R., Acosta, M., Alessandri, A., Anthoni, P., Arneth A., Arsouze, T., Bergmann, T., Bernadello, R., Bousetta, S., Caron, L.-P., Carver, G., Castrillo, M., Catalano, F., Cvijanovic, I., Davini, P., Dekker, E., Doblas-Reyes, F., Docquier, D.,

Echevarria, P., Zhang, Qi. (2022) The EC-Earth3 Earth System Model for the Climate Model Intercomparison Project 6, *Geosci. Model Devel.*, vol. 15, pp. 2973-3020.

Hoskins, B.J. (2013) The potential for skill across the range of the seamless weather-climate prediction problem: a stimulus for our science, *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.*, vol. 139, pp. 573-584, doi:10.1002/qj.1991.

Kidston, J., Scaife, A., Hardiman, S., Mitchell, D., Butchart, N., Baldwin, M., Gray, L. (2015) Stratospheric influence on tropospheric jet streams, storm tracks and surface weather, *Nature Geosci.*, vol. 8, pp. 433-440.

WMO (2015) *Seamless prediction of the Earth system: from minutes to months*, WMO, Geneva, No. 1156, 471 p., ISBN: 978-92-63-11156-2.

Shukla, J. (2009) *Seamless Prediction of Weather and Climate: A New Paradigm for Modeling and Prediction Research*, NOAA Climate Test Bed Joint Seminar Series, NCEP, Maryland, 8 p., available at: https://www.nws.noaa.gov/ost/climate/STIP/FY09CTBSeminars/shukla_021009.htm (accessed 12 May 2023).

Termonia, P., Fischer, C., Bazile, E., Bouyssel, F., Brožková, R., Bénard, P., Bochenek, B., Degrauwe, D., Derková, M., El Khatib, R., Hamdi, R., Mašek, J., Pottier, P., Pristov, N., Seity, Y., Smolíková, P., Španiel, O., Tudor, M., Wang, Y., Wittmann, C., Joly, A. (2018) The ALADIN System and its canonical model configurations AROME CY41T1 and ALARO CY40T1, *Geosci. Model Dev.*, vol. 11, pp. 257-281, doi: 10.5194/gmd-11-257-2018.

Walters, D., Baran, A.J., Boutle, I., Brooks, M., Earnshaw, P., Edwards, J., Furtado, K., Hill, P., Lock, A., Manners, J., Morcrette, C., Mulcahy, J., Sanchez, C., Smith, C., Stratton, R., Tennant, W., Tomassini, L., Van Weverberg, K., Vosper, S., Willett, M., Browse, J., Bushell, A., Carslaw, K., Dalvi, M., Essery, R., Gedney, N., Hardiman, S., Johnson, B., Johnson, C., Jones, A., Jones, C., Mann, G., Milton, S., Rumbold, H., Sellar, A., Ujiie, M., Whittall, M., Williams, K., Zerroukat, M. (2019) The Met Office Unified Model Global Atmosphere 7.0/7.1 and JULES Global Land 7.0 configurations, *Geosci. Model Dev.*, vol. 12, pp. 1909-1963, doi 10.5194/gmd-12-1909-2019.

WGNE *Overview of Plans of NWP Centre's with Global Forecasting Systems* (2022) Available at https://wgne.net/wp-content/uploads/2022/11/wgne_table_2022_v2.xls (accessed 12 May 2023).

Williams, K.D., Bodas-Salcedo, A., Déqué, M., Fermepin, S., Medeiros, B., Watanabe, M., Jakob, C., Klein, S.A., Senior, C.A., Williamson, D.L. (2019) The Transpose-AMIP II experiment and its application to the understanding of Southern Ocean cloud biases in climate models, *J. Climate*, vol. 26, pp. 3258-3274, doi: 10.1175/JCLI-D-12-00429.1.

WMO LRF MME (WMO Lead Center for Long Range Forecasts Multi-Model Ensemble) (2023) *Seasonal->System Configuration Information*, available at <https://wmo.org/contents2/index> (accessed 12 May 2023).

References

- Volodin, E.M., Lykosov, V.N. (1998) Parametrizaciya processov teplo- i vlagoobmena v sisteme rastitel'nost' – pochva dlya modelirovaniya obshchej cirkulyacii atmosfery. 1. Opisanie i raschety s ispol'zovaniem lokal'nyh dannyh [Parameterization of Heat and Moisture Processes in Soil-Vegetation System. 1. Description and Calculations Using Local Observational Data], *Izvestiya RAN. Fizika atmosfery i okeana*, vol. 34, no. 4, pp. 453-465.
- Trosnikov, I.V., Kaznacheeva, V.D., Kiktev, D.B., Tolstyh, M.A. (2005) Ocenka potencial'noj predskazuemosti meteorologicheskikh velichin pri dinamicheskom sezonnom modelirovanii cirkulyacii atmosfery na osnove polulagranzhevoj modeli SL-AV [Estimation of the potential predictability of meteorological quantities in dynamic seasonal modeling of atmospheric circulation based on the semi-Lagrangian SL-AV model], *Meteorologiya i gidrologiya*, no. 12, pp. 5-17.
- Tolstyh, M.A., Zhelen, Zh.F., Volodin, E.M., Bogoslovskij, N.N., Vil'fand, R.M., Kiktev, D.B., Krasnyuk, T.V., Kostykin, S.V., Mizyak, V.G., Fadeev, R.Yu., Shashkin, V.V., Shlyayeva, A.V., Ezau, I.N., Yurova, A.Yu. (2015) Razrabotka mnogomasshtabnoj versii global'noj modeli atmosfery PLAV [Development of the Multiscale Version of the SL-AV Global Atmosphere Model], *Meteorologiya i gidrologiya*, no. 6, vol. 25-35.
- Tolstyh, M.A., Shashkin, V.V., Fadeev, R.Yu., Shlyayeva, A.V., Mizyak, V.G., Rogutov, V.S., Bogoslovskij, N.N., Gojman, G.S., Mahnorylova, S.V., Yurova, A.Yu. (2017) *Sistema modelirovaniya atmosfery dlya besshovnogo prognoza* [Atmosphere modeling system for seamless prediction], in A.V. Starchenko (ed.), Triada, Moscow, Russia, 166 p., ISBN 978-5-9908623-3-3.
- Fadeev, R.Yu., Tolstyh, M.A., Volodin, E.M. (2019) Klimaticheskaya versiya modeli atmosfery PLAV: razrabotka i pervye rezul'taty [Climate Version of the SL-AV Atmosphere Model: Development and First Results], *Meteorologiya i gidrologiya*, no. 1, pp. 22-35.
- Shashkin, V.V., Tolstyh, M.A., Volodin, E.M. (2019) Modelirovanie cirkulyacii stratosfery polulangranzhevoj model'yu atmosfery PLAV [Modelling of the Stratosphere Circulation Using SL-AV Semi-Lagrangian Model], *Meteorologiya i gidrologiya*, no. 1, pp. 5-21.
- Shashkin, V.V., Fadeev, R.Yu., Tolstyh, M.A., Krivoluckij, A.A., Banin, M.V. (2023) Vosпроизведение processov v stratosfere model'yu obshchej cirkulyacii atmosfery PLAV072L96 [Reproduction of processes in the stratosphere by the general circulation model of the atmosphere PLAV072L96], *Meteorologiya i gidrologiya*, no. 6, in press.
- Döscher, R., Acosta, M., Alessandri, A., Anthoni, P., Arneth A., Arsouze, T., Bergmann, T., Bernadello, R., Bousetta, S., Caron, L.-P., Carver, G., Castrillo, M., Catalano, F., Cvijanovic, I., Davini, P., Dekker, E., Doblas-Reyes, F., Docquier, D., Echevarria, P., Zhang, Qi. (2022) The EC-Earth3 Earth System Model for the Climate Model Intercomparison Project 6, *Geosci. Model Devel.*, vol. 15, pp. 2973-3020.

Hoskins, B.J. (2013) The potential for skill across the range of the seamless weather-climate prediction problem: a stimulus for our science, *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.*, vol. 139, pp. 573-584, doi:10.1002/qj.1991.

Kidston, J., Scaife, A., Hardiman, S., Mitchell, D., Butchart, N., Baldwin, M., Gray, L. (2015) Stratospheric influence on tropospheric jet streams, storm tracks and surface weather, *Nature Geosci.*, vol. 8, pp. 433-440.

WMO (2015) *Seamless prediction of the Earth system: from minutes to months*, WMO, Geneva, No. 1156, 471 p., ISBN: 978-92-63-11156-2.

Shukla, J. (2009) *Seamless Prediction of Weather and Climate: A New Paradigm for Modeling and Prediction Research*, NOAA Climate Test Bed Joint Seminar Series, NCEP, Maryland, 8 p., Available at: https://www.nws.noaa.gov/ost/climate/STIP/FY09CTBSeminars/shukla_021009.htm (accessed 12 May 2023).

Termonia, P., Fischer, C., Bazile, E., Bouyssel, F., Brožková, R., Bénard, P., Bochenek, B., Degrauwe, D., Derková, M., El Khatib, R., Hamdi, R., Mašek, J., Pottier, P., Pristov, N., Seity, Y., Smolíková, P., Španiel, O., Tudor, M., Wang, Y., Wittmann, C., Joly, A. (2018) The ALADIN System and its canonical model configurations AROME CY41T1 and ALARO CY40T1, *Geosci. Model Dev.*, vol. 11, pp. 257-281, doi: 10.5194/gmd-11-257-2018.

Walters, D., Baran, A.J., Boutle, I., Brooks, M., Earnshaw, P., Edwards, J., Furtado, K., Hill, P., Lock, A., Manners, J., Morcrette, C., Mulcahy, J., Sanchez, C., Smith, C., Stratton, R., Tennant, W., Tomassini, L., Van Weverberg, K., Vosper, S., Willett, M., Browse, J., Bushell, A., Carslaw, K., Dalvi, M., Essery, R., Gedney, N., Hardiman, S., Johnson, B., Johnson, C., Jones, A., Jones, C., Mann, G., Milton, S., Rumbold, H., Sellar, A., Ujiie, M., Whittall, M., Williams, K., Zerroukat, M. (2019) The Met Office Unified Model Global Atmosphere 7.0/7.1 and JULES Global Land 7.0 configurations, *Geosci. Model Dev.*, vol. 12, pp. 1909-1963, doi 10.5194/gmd-12-1909-2019.

WGNE Overview of Plans of NWP Centre's with Global Forecasting Systems (2022) Available at https://wgne.net/wp-content/uploads/2022/11/wgne_table_2022_v2.xls (accessed 12 May 2023).

Williams, K.D., Bodas-Salcedo, A., Déqué, M., Fermepin, S., Medeiros, B., Watanabe, M., Jakob, C., Klein, S.A., Senior, C.A., Williamson, D.L. (2019) The Transpose-AMIP II experiment and its application to the understanding of Southern Ocean cloud biases in climate models, *J. Climate*, vol. 26, pp. 3258-3274, doi: 10.1175/JCLI-D-12-00429.1.

WMO LRF MME (WMO Lead Center for Long Range Forecasts Multi-Model Ensemble) (2023) *Seasonal->System Configuration Information*, available at <https://wmo.org/contents2/index> (accessed 12 May 2023).

Статья поступила в редакцию (Received): 28.04.2023.

Статья доработана после рецензирования (Revised): 15.05.2023.

Принята к публикации (Accepted): 20.05.2023.

Для цитирования / For citation:

Толстых, М.А. (2023) Применение моделей прогноза погоды для моделирования климата, *Фундаментальная и прикладная климатология*, т. 9, № 3, с. 318-329, doi:10.21513/2410-8758-2023-3-318-329.

Tolstykh, M.A. (2023) Application of numerical weather prediction models for climate modelling, *Fundamental and Applied Climatology*, vol. 9, no. 3, pp. 318-329, doi:10.21513/2410-8758-2023-3-318-329.

Особенности температурного режима у поверхности земного шара в 2022 году

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

Институт глобального климата и экологии имени академика Ю.А. Израэля,
РФ, 107258, г. Москва, ул. Глебовская, д. 206

*Адрес для переписки: firankova@gmail.com

Реферат. Рассматривается состояние температурного режима у поверхности Земного шара в 2022 году и его изменчивость в течение 1901-2022 гг. По данным станционных инструментальных наблюдений анализируются основные температурные аномалии 2022 года (базовый период 1991-2020 гг.) и их тренды. Показано, что в целом по Земному шару 2022 год был шестым среди самых теплых лет по данным «суша+море» (массив HadCRUT5), по данным «суша» (массивы T3288/ CRUTEM5) – шестым/седьмым, по данным «море» (массив HadSST4) – пятым.

На территории Земного шара, с учетом (массив HadCRUT5) и без учета (массив T3288) океанов положительные аномалии температуры составляли более 70% всех локальных данных; из них ~30% оказались выше 95-го перцентиля (5%-е экстремумы тепла), в том числе ~10% стали для своих пунктов рекордными (абсолютные максимумы). Такая ситуация сложилась, в основном, за счет северных частей Тихого и Атлантического океанов (2022 год в этих регионах был рекордно теплым) и Евразии (второй самый теплый год в истории наблюдений).

Отрицательные аномалии (~20% всех данных) также наблюдались и на суше, и на акваториях океанов. На суше – это Австралия (12% станций зафиксировали 5%-е экстремумы холода), центральные районы Северной Америки, Юго-Восточная Азия, Южная Америка (кроме центра), юг и центр Африки. На акваториях океанов отрицательные аномалии наблюдались в тропических широтах Тихого и Индийского океанов.

Оценки линейного тренда 1976-2022 гг. уверенно подтверждают продолжающуюся тенденцию потепления: положительные тренды составляют около 97% всех локальных оценок. Наибольшая интенсивность потепления отмечается, в среднем, по Арктическому широтному поясу (0.57°C/10 лет) и на территории Европы (0.49°C/10 лет).

Период после 1995 г. (и особенно четко – после 2000-го) можно определить как устойчивый экстремально теплый период. Так, после 2000 г. был лишь один случай (январь-февраль 2008 г.), когда вероятность превышения среднемесячных значений глобальной температуры оказалась ниже 70%.

Ключевые слова. Климат, мониторинг климата, изменение климата, приземная температура, линейный тренд, глобальное потепление.

Features of the surface temperature regime over the globe in 2022

E.Ya. Rankova^{}, O.F. Samokhina, U.I. Antipina, V.D. Smirnov*

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

^{*}Correspondence address: *firankova@gmail.com*

Abstract. The state of the temperature regime near the surface of the Earth in 2022 and its variability during 1901-2022 are considered. Based on the data of station instrumental observations, the main temperature anomalies in 2022 (base period 1991-2020) and their trends are analyzed.

It is shown that, in general, 2022 was the sixth warmest year on the globe according to the “land + sea” data (HadCRUT5 array); according to “land” data (T3288/CRUTEM5 arrays), sixth/seventh; according to the “sea” data (HadSST4 array), it ranks fifth.

On the territory of the globe (according to HadCRUT5 and T3288 data), positive temperature anomalies accounted for more than 70% of all local data, of which ~30% were above the 95th percentile (5% heat extremes), including ~10% of steel for of their points by record (absolute maximums). This situation has developed mainly due to the northern parts of the Pacific and Atlantic oceans (2022 was a record year in these regions) and Eurasia (the second warmest on record).

Negative anomalies (~20% of all data) were observed both on land and in the oceans. On land, these are Australia (12% of stations recorded 5% cold extremes), central regions of North America, Southeast Asia, South America (except for the center), south and center of Africa. In the oceans, negative anomalies were observed in the tropical latitudes of the Pacific and Indian oceans.

Linear trend estimates 1976-2022 confidently confirm the warming trend: positive trends account for about 97% of all local estimates. The highest intensity of warming is observed on average in the Arctic latitudinal belt (0.57°C/10) and in Europe (0.49°C/10).

The period after 1995 (and especially clearly after 2000) can be defined as a stable extremely warm period. Thus, after 2000 there was only one case (January-February 2008) when the probability of not exceeding the average monthly values of the global temperature turned out to be below 70%.

Keywords. Climate, climate monitoring, climate change, surface temperature, linear trend, global warming.

Введение

Статья продолжает серию ежегодных публикаций (Груза и др., 2016; Груза и др., 2017(6); Груза и др., 2019; Груза и др., 2020; Груза и др., 2021) о

современном состоянии температурного режима Земного шара (приземная температура) на основе данных регулярного мониторинга климата в ФГБУ «ИГКЭ» (ЦМКП, 2016; Груза и др., 2017а).

Всемирная Метеорологическая Организация (ВМО) обобщает данные ведущих мировых научных центров и национальных гидрометеослужб (НГМС) в пресс-релизах и ежегодных сообщениях о состоянии климата. Оценка ВМО основана на шести наборах данных о глобальной температуре, включающих наблюдения HadCRUT5 (1850-2022), NOAAGlobalTemp (1880-2022) и NASAGISTEMP (1880-2022), реанализы ERA5 (1979-2022), JRA-55 (1958-2022) и анализы группы Berkeley Earth (1850-2022).

По предварительному отчету ВМО о состоянии глобального климата в 2022 г. (WMO, 2022а,б), все наборы данных наблюдений (HadCRUT5, NOAAGlobalTemp и NASAGISTEMP) ставят 2022 год на шестое место среди самых теплых лет, а все анализы (Berkeley Earth, ERA и JRA-55) – на пятое место. Авторы отчета связывают это с охлаждающим влиянием Ла-Нинья, продолжающимся в течение трех лет (2020-2022) и в последние два года удерживающим глобальные температуры на относительно «низком» уровне (в отличие от 2016 г., когда установлению рекордных температур способствовало произошедшее в тот год исключительно мощное Эль-Ниньо). Такое «тройное падение» Ла-Нинья случалось всего три раза за последние 50 лет.

В многочисленных публикациях о состоянии климата и климатических экстремумах 2022 г. (WMO, 2022а,б,в, 2023; Berkeley, 2023; Hausfather, 2023; Wyrn, 2020) приведен обширный обзор осуществившихся в 2022 г. глобальных и региональных экстремумов, характеризующих важные переломные моменты в ходе современных изменений климата и имеющих, как правило, серьезные глобальные последствия. В их числе названы: ослабление АМОС (атлантическая меридиональная опрокидывающая циркуляция), таяние полярных ледяных щитов в Гренландии и Антарктиде, уменьшение площади арктического ледяного покрова, значительное повышение уровня моря, мощные волны тепла, жестокие засухи, наводнения и др. Некоторые из этих экстремумов воспроизведены ниже.

С 1980-х годов каждое последующее десятилетие было теплее предыдущего.

2022 год стал восьмым годом подряд (2015-2022 гг.), когда годовые глобальные температуры были выше базового доиндустриального уровня 1850-1900, по крайней мере, на 1°C. Среднее последнего 10-летия (2013-2022) выше его уже на 1.14°C (1.02-1.27). Ожидается, что эти тенденции сохранятся.

С 1993 года, за прошедшие 30 лет, глобальный средний уровень моря повышался примерно на 3.4 ± 0.3 мм в год. В период с 1993-2002 по 2013-2022 годы этот показатель удвоился, а уровень моря повысился примерно на 5 мм в период с января 2021 года по август 2022 года. В Арктике, в течение большей части 2022 г., площадь морского льда была ниже нормы 1981-2010 гг. В сентябре 2022 г. его протяженность составила 4.7 млн км², что ниже нормы на 1.54 млн км². В Антарктике, 25 февраля 2022 г., площадь антарктического морского льда упала до нового абсолютного минимума 1.92 млн км², который ниже нормы почти на 1.0 млн км². В остальное время года она постоянно была ниже нормы, с рекордными минимумами в июне и июле.

В соответствии с (WMO, 2022в, 2023), по крайней мере, один год из следующих пяти лет с вероятностью 93% будет теплее самого теплого в прошлом 2016 года. Вероятность того, что среднее значение температуры предстоящей пятилетки (2022-2026) будет выше, чем за последние пять лет (2017-2021), также составляет 93%. Вероятность того, что глобальная температура достигнет порогового значения «на 1.5°C выше доиндустриального уровня 1850-1900» уже в следующие пять лет, составляет 50%.

Кроме глобальных рекордов, 2022 год стал экстремальным в различных районах Земного шара. На Африканском Роге зафиксирована смертоносная затяжная засуха (самая продолжительная за последние сорок лет); в августе были затоплены обширные территории Пакистана; в Китае, Европе, Северной и Южной Америке наблюдались рекордные по силе волны тепла и засухи. Португалия установила новый национальный температурный рекорд июля в 47.0°C, а в Великобритании впервые за всю историю наблюдений температура превысила 40°C.

В 2022 году от экстремальных волн тепла, засухи и разрушительных наводнений пострадали миллионы людей, а ущерб составил миллиарды долларов. В конце декабря сильные штормы затронули обширные территории Северной Америки: сильные ветры, обильные снегопады и низкие температуры стали причиной масштабных разрушений на востоке; а сильные дожди, горный снег и наводнение затронули районы на западе (WMO, 2023).

Концентрации трех основных парниковых газов: двуокиси углерода (CO₂), метана (CH₄) и закиси азота (NO₂) в 2021 году достигли рекордно высокого уровня. Выбросы метана, которые в 25 раз мощнее, чем углекислый газ, вызывающий глобальное потепление, увеличиваются самыми быстрыми темпами за всю историю (WMO, 2023).

В Шестом докладе МГЭИК (IPCC, 2022, 2023) разработаны концепции риска, которые являются основой для понимания все более серьезного и часто необратимого воздействия изменения климата на экосистемы, биоразнообразие и человеческие системы.

В предлагаемой статье приводятся основные фактографические данные об аномалиях и экстремумах приповерхностной температуры в 2022 г. и обновленные оценки климатических трендов, полученные авторами в рамках действующей системы климатического мониторинга в ФГБУ «ИГКЭ». Рассматриваются как локальные оценки, так и их обобщения для Земного шара, полушарий и крупных регионов (континенты, океаны, широтные пояса).

Полная информация доступна на Web-сайтах (ИГКЭ, 2022), где можно найти все выпуски сезонных бюллетеней и годовых обзоров ИГКЭ за время функционирования системы мониторинга глобального климата GCCM (с 2015 года).

Данные

Как и в предыдущих публикациях данной серии, (Груза и др., 2017(б); Груза и др., 2019; Груза и др., 2020; Груза и др., 2021), результаты получены в рамках дей-

ствующей в ИГКЭ технологии мониторинга глобального климата по разделу «Приземная температура». Соответственно, все оценки получены по данным наблюдений за приземной температурой из двух источников – ИГКЭ и Hadley/CRU.

Данные ИГКЭ (массив T3288) 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 (<http://www.igce.ru/performance/publishing>). Массив пополняется в квазиреальном времени оперативными данными с каналов связи ГСТ (сводки КЛИМАТ), после надлежащей процедуры контроля и верификации (ЦМКП, 2016). В 2020 году, в связи с существенным сокращением объема поступающих с каналов связи оперативных климатических наблюдений, выполнена модификация массива, которая состоит, главным образом, в активном использовании станционных данных СИНОП для контроля и заполнения пропусков в данных КЛИМАТ.

Данные Hadley/CRU – это признанные мировым научным сообществом данные Метеослужбы Великобритании (MetOfficeHadley Centre, UK) и Университета Восточной Англии (CRUUEA, UK) о приповерхностной температуре на глобальной сети 5-градусных боксов (значения относятся к центрам боксов и условно рассматриваются здесь как «локальные»). Комплект содержит три категории данных: CRUTEM5 (только суша, версия 5.0.1.0), HadSST4 (только море, версия 4.0.1.0) и HadCRUT5 (суша+море, версия 5.0.1.0). 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>).

Глобальные временные ряды CRUTEM5 играют в данном исследовании особую роль как реальная, апробированная и признанная мировым сообществом, альтернатива рядам, рассчитанным по методике ИГКЭ по массиву T3288. Сопоставление одноименных временных рядов CRUTEM5 и T3288 (рис. 1), полученных в разных центрах по единым станционным наблюдениям (сводки КЛИМАТ), но с использованием разных наборов станций и разных методик обработки, дает представление о масштабе неопределенности результирующих оценок и, в определенной мере, о репрезентативности сравниваемых наборов данных.

Ежемесячно обновленные (и продленные на месяц) данные Hadley/CRU считываются с сайта источника и используются в технологии мониторинга без корректировки. Из них реально используются сеточные поля объединенных данных HadCRUT5 (суша+море) и глобально осредненные временные ряды для всех трех категорий данных.

Следует отметить, что базовым массивом для оценки температурных условий *на суше* (локальных, региональных, глобальных) служит массив станционных данных T3288 (ИГКЭ), а сеточный массив HadCRUT5 (Hadley/CRU) используется для создания *глобальной картины над сушей и океанами* (включая локальные и региональные оценки на территории всех рассматриваемых регионов с учетом океанов). Все полушарные и глобальные оценки параллельно приводятся еще и по временным рядам Hadley/CRU.

Дополнительно отметим, что результаты сравнения рядов обновляются и публикуются в каждом бюллетене для соответствующего временного интервала. Оценки по состоянию на конец 2021 г. опубликованы в предыдущей статье авторов (Ранькова и др., 2022), а на конец 2022 г. – в последнем годовом обзоре ИГКЭ (ИГКЭ, 2022). В частности, в соответствии с последними оценками, для любой из трех территорий (Земной шар, Северное и Южное полушария) среднее различие рядов T3288 и CRUTEM5 за последние 100 лет (1923-2022 гг.) колеблется в интервале от -0.003 до $+0.048^{\circ}\text{C}$. Стандартное отклонение различий за этот период (0.026 - 0.050°C) на порядок ниже стандартного отклонения самих рядов (0.258 - 0.514°C). Индивидуальные различия (в отдельные годы) после 1976 г. не превышают 0.09°C . При этом во всех случаях ряды характеризуются высокой корреляцией (выше 0.99) и исключительно низким различием трендов (до $\pm 0.012^{\circ}\text{C}/10$ лет). Таким образом, результаты сравнения рядов свидетельствуют об их близости (особенно со второй половины XX столетия) и о репрезентативности массива T3288. Следовательно, различия между полученными по ним оценками наблюдаемых изменений климата можно рассматривать как нижнюю границу их неопределенности.

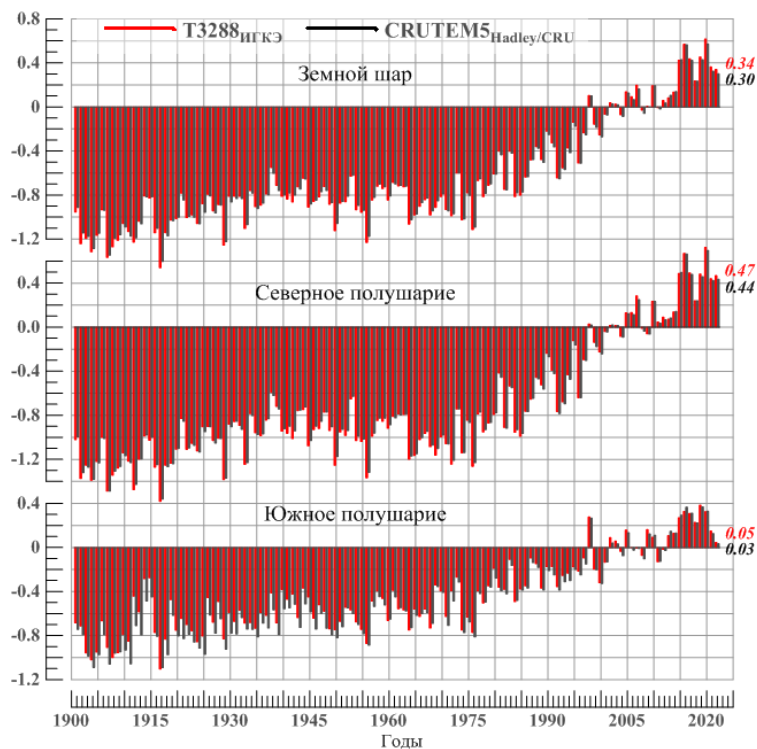


Рисунок 1. Временные ряды пространственно осредненных годовых аномалий температуры приземного воздуха над сушей Земного шара, Северного и Южного полушарий ($^{\circ}\text{C}$)
Использованы глобальные временные ряды T3288 (ИГКЭ) и CRUTEM5 (Hadley/CRU), 1901-2022 гг. Справа приведены числовые значения среднегодовых аномалий в 2022 г. (базовый период 1991-2020)

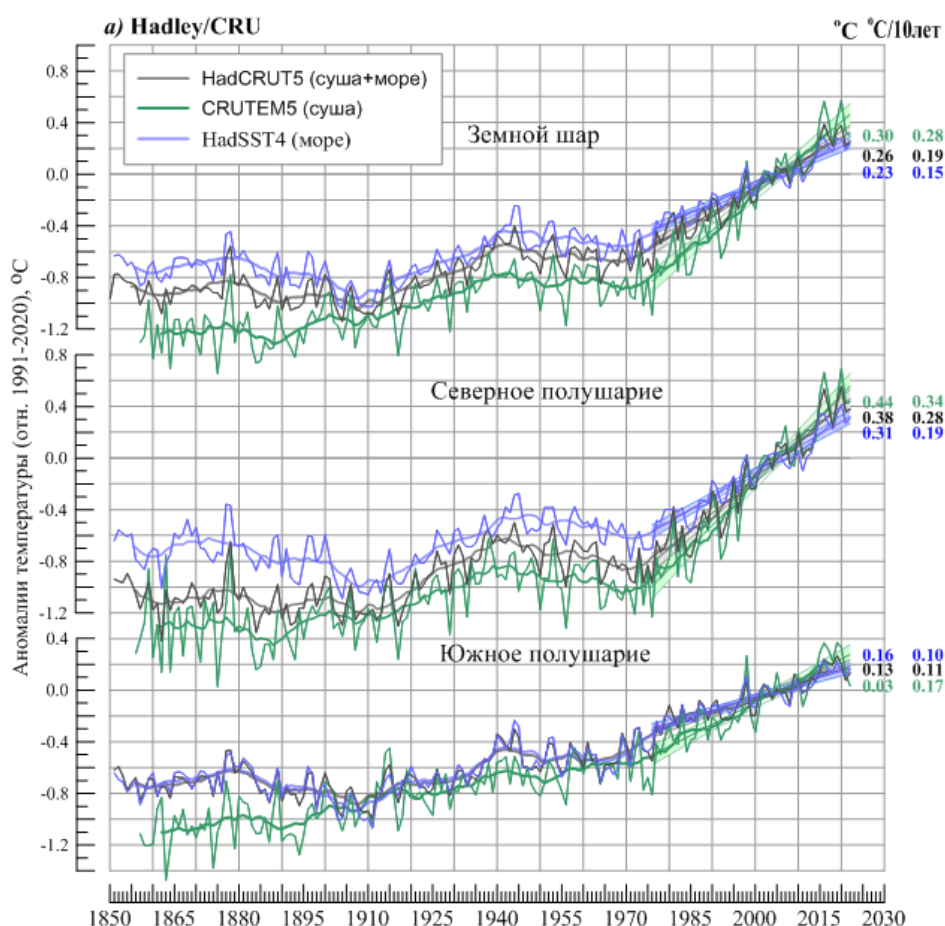
Figure 1. Time series of spatially averaged annual anomalies of surface air temperature over the land of the globe, Northern and Southern hemispheres ($^{\circ}\text{C}$)
The global time series T3288 (IGCE) and CRUTEM5 (Hadley/CRU), 1901-2022 are used.
On the right are the numerical values of the mean annual anomalies in 2022 (base period 1991-2020)

Результаты

1. 2022 год – шестой среди самых теплых лет XX-XXI столетий

В целом по Земному шару, 2022 год стал шестым среди самых теплых лет по данным «суша+море» (массив HadCRUT5: аномалия $+0.257^{\circ}\text{C}$) и также шестым по данным «суша» (массив T3288: 0.363°C); по данным «суша» (массив CRUTEM5: $+0.301^{\circ}\text{C}$) – седьмым, по данным «море» (массив HadSST4: $+0.235^{\circ}\text{C}$) – пятым. В Северном полушарии, по всем наборам данных, 2022 год стал также шестым (одно исключение: по данным «море» массива HadSST4 ранг равен 5). В Южном полушарии, в целом данные «суша+море», год занял седьмое место среди самых теплых лет, по данным «море» – четвертое (массив HadSST4), а по данным «суша» – лишь 15/16 (массивы CRUTEM5/T3288).

Ход аномалий в каждом из рассматриваемых временных рядов (3 территории*4 набора данных) приведен на рис. 2.



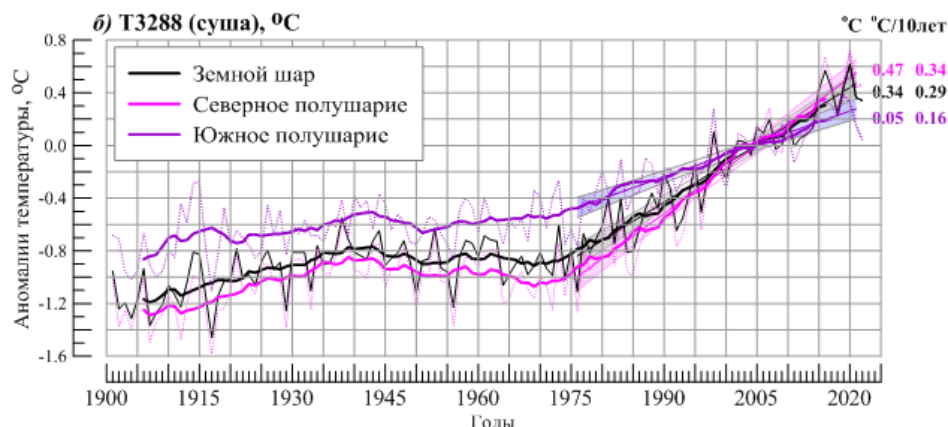


Рисунок 2. Временные ряды среднегодовых аномалий приземной температуры, осредненных по территории Земного шара, Северного и Южного полушарий по данным:

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

Для всех рядов показан ход 11-летних скользящих средних и линейный тренд за 1976-2022 гг. с 95% доверительным интервалом. Справа приведены числовые значения среднегодовых аномалий в 2022 г. и значения коэффициентов линейного тренда за 1976-2022 гг. (°C/10 лет)

Figure 2. Time series of mean annual surface temperature anomalies averaged over the territory of the Earth, Northern and Southern hemispheres according to:

a) HadCRUT5 (land + sea, black curves), CRUTEM5 (land, green curves), HadSST4 (sea, blue curves); original Hadley/CRU series used; b) T3288 (land); the data and the technique of spatial averaging of the IGCE were used

All series show the progress of the 11-year moving averages and the linear trend for 1976-2022 with 95% confidence interval. On the right are the numerical values of the mean annual anomalies in 2022 and the values of the linear trend coefficients for 1976-2022. (°C/10 years)

Числовые данные о шести самых теплых годах XX-XXI столетий для каждой из трех глобальных территорий и каждого из всех четырех наборов данных, включая пространственно-осредненные значения среднегодовых аномалий и их ранги, приведены в табл. 1. Если ранг 2022 года больше шести, его оценки приведены в дополнительной, седьмой, строке каждого раздела таблицы.

2. Географические и сезонные особенности распределения аномалий приземной температуры в 2022 году

В настоящем разделе представлены данные об аномалиях температуры в 2022 году для года в целом, каждого сезона и отдельных месяцев. Анализируются глобальные поля локальных аномалий (рис. 3, 4) и их обобщения для крупных регионов в виде частотных распределений аномалий по их знаку и интенсивности (табл. 2) и пространственно осредненных значений аномалий для каждого региона (табл. 3). В качестве регионов рассматриваются: земной шар, северное и южное полушария, континенты, океаны и основные широтные пояса.

Таблица 1. Шесть самых теплых лет по данным разных источников, в среднем по территории Земного шара (ЗШ), Северного (СП) и Южного (ЮП) полушарий: средняя за год аномалия температуры VT и год наблюдения

Table 1. Six warmest years according to different sources, averaged over the territory of the Globe (WS), Northern (NH), and Southern (S) hemispheres: yearly average temperature anomaly VT and year of observation

Ранг	ЗШ		СП		ЮП	
	VT, °C	Год	VT, °C	Год	VT, °C	Год
HadCRUT5 (Hadley/CRU, суша+море)						
1	0.389	2016	0.557	2020	0,269	2019
2	0.379	2020	0.537	2016	0.241	2016
3	0.347	2019	0.425	2019	0.205	2017
4	0.301	2017	0.412	2015	0.200	2020
5	0.281	2015	0.397	2017	0.196	2018
6	0.257	2022	0.380	2022	0.150	2015
					0.134 (7)	2022
T3288 (ИГКЭ, суша)						
1	0.617	2020	0.724	2020	0.384	2019
2	0.570	2016	0.670	2016	0.328	2016
3	0.454	2019	0.492	2017	0.325	2020
4	0.438	2017	0.488	2015	0.310	2017
5	0.425	2015	0.482	2019	0.277	1998
6	0.363	2022	0.468	2022	0.271	2015
					0.046 (16)	2022
CRUTEM5 (Hadley/CRU, суша)						
1	0.573	2020	0.696	2020	0.370	2019
2	0.565	2016	0.664	2016	0.366	2016
3	0.429	2019	0.497	2015	0.329	2020
4	0.429	2015	0.480	2017	0.312	2017
5	0.424	2017	0.459	2019	0.293	2015
6	0.325	2021	0.435	2022	0.267	1998
	0.301 (7)	2022			0.034 (15)	2022
HadSST4 (Hadley/CRU, море)						
1	0.281	2016	0.415	2020	0.230	2016
2	0.278	2019	0.346	2015	0.219	2019
3	0.271	2020	0.342	2019	0.186	2015
4	0.262	2015	0.341	2016	0.163	2022
5	0.235	2022	0.308	2022	0.154	2017
6	0.206	2017	0.270	2021	0.140	2020

Примечание. Если ранг 2022 года больше шести, то оценки 2022 г. указаны в дополнительной, седьмой строке соответствующего раздела (в скобках)

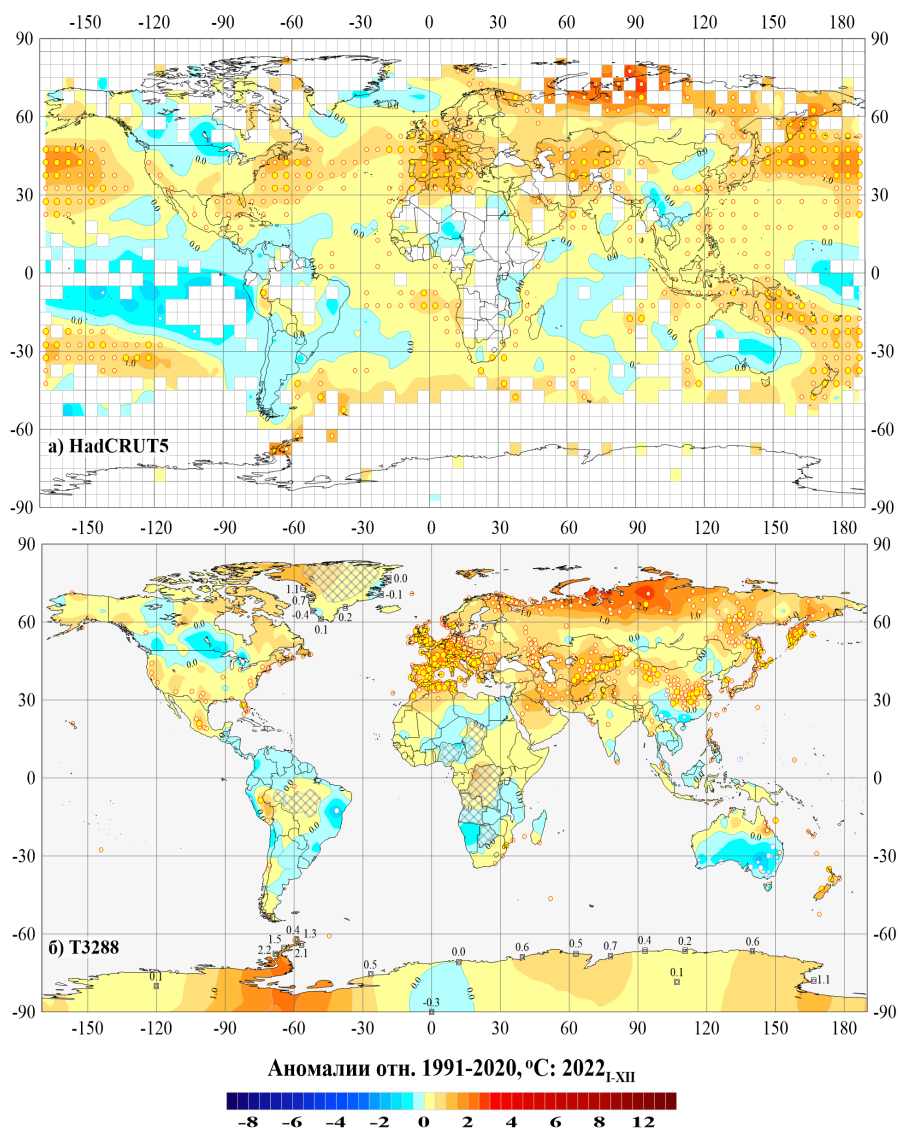


Рисунок 3. Пространственное распределение среднегодовых аномалий приземной температуры на территории Земного шара в 2022 г. (°C): а) по сеточным данным HadCRUT5 (суша+море. Hadley/CRU); б) по станционным данным T3288 (только суша. ИГКЭ)
Аномалии приведены в отклонениях от средних за 1991-2020 гг. Кругами белого (минимумы) и желтого (максимумы) цвета указано положение боксов/станций с рекордными значениями аномалий. Значками меньшего размера указано положение 5%-х экстремумов того же знака.
Числовые значения аномалий на территории Антарктиды и Гренландии показаны непосредственно в точках расположения станций. Пустыми боксами (а) и штриховкой (б) показаны области отсутствия наблюдений

Figure 3. Spatial distribution of mean annual anomalies at the surface temperature on the territory of the Earth in 2022 (°C): а) according to HadCRUT5 grid data (land + sea. Hadley/CRU); б) according to station data T3288 (land only. IGKE)

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 anomalies in the territory of Antarctica and Greenland are shown directly at the points of location of the stations. Empty boxes (a) and shading (b) show the areas of absence of observations

В соответствии со среднегодовыми оценками (рис. 3, табл. 2, 3). в 2022 г. на территории Земного шара положительные аномалии температуры составляли более 70% всех локальных данных, из которых ~30% оказались выше 95-го процентиля (5%-е экстремумы тепла), в том числе ~10% стали для своих пунктов рекордно высокими (абсолютные максимумы). Такая ситуация сложилась, в основном, за счет северных частей Тихого и Атлантического океанов и Евразии, где, соответственно, 59%, 47% и 38% локальных значений температуры были выше 95-го процентиля, а 2022 год, в среднем по территории каждого из этих регионов, оказался первым, либо вторым самым теплым годом в истории наблюдений. В результате, севернее 25-й параллели (25N), по данным на полной сетке (массив HadCRUT5), выше климатической нормы 1991-2020 гг. оказались более 87% всех данных, из них более половины – 5%-е экстремумы тепла. Подобные экстремумы отмечены также на более 46% наземных станций Арктики (массив T3288).

Таблица 2. Частотные распределения среднегодовых локальных аномалий на территории Земного шара в 2022 г. по данным массивов T3288 и HadCRUT5
(все значения приведены в процентах от NN)

Table 2. Frequency distributions of average annual local anomalies on the territory of the Earth in 2022 according to the data of the T3288 and HadCRUT5 arrays
(all values are given as a percentage of NN)

Регион	NN-число боксов/станций	Число значений в каждой категории (в % от NN)						
		Аномалии (отн. 1991-2020 гг.)		5%-е экстремумы холода/тепла		Абсолютные экстремумы		
		V < 0		X ≤ P ₀₅	X ≥ P ₉₅	X = min	X = max	
1	2	3	4	5	6	7	8	9
HadCRUT5 (суша+море)								
ЗШ	1504	20.7	7.7	71.5	0.3	32.2	-	10.3
СП	904	15.2	7.3	77.5	-	36.2	-	10.7
ЮП	600	29.2	8.3	62.5	0.7	26.3	-	9.7
АО. 15-70N	131	9.9	6.9	83.2	-	46.6	-	14.5
ТО. 20-65N	147	4.1	2.0	93.9	-	58.5	-	25.2
Широтные пояса	65-90N	83	15.7	2.4	81.9	-	27.7	2
	25-65N	522	8.4	3.3	88.3	-	45.6	17.6
	25S-25N	580	31.0	11.9	57.1	0.7	25.3	5.5
	65-25S	306	24.2	8.8	67.0	-	24.5	9.2
	90-65S	13	7.7	7.7	84.6	-	15	8

Продолжение таблицы 2

1	2	3	4	5	6	7	8	9
<i>T3288 (только суша)</i>								
ЗШ	2510	20.5	5.9	73.6	1.0	28.0	0.4	7.8
СП	2117	15.6	5.1	79.3	0.2	31.4	0.1	8.8
ЮП	394	46.7	10.2	43.1	5.3	9.6	1.8	2.0
С. Америка	432	29.4	8.8	61.8	-	10.0	-	0.5
Евразия	1470	10.2	3.3	86.5	0.3	38.4	0.1	11.4
Ю. Америка	141	49.6	12.8	37.6	2.1	3.5	0.7	0.7
Африка	133	26.3	10.5	63.2	-	22.6	-	12.8
Австралия	138	67.4	5.8	26.8	12.3	5.1	4.3	0.7
Антарктида	18	5.6	5.6	88.9	-	38.9	-	11.1
Европа	526	0.6	0.4	99.0	-	54.8	-	19.2
Азия	953	15.4	4.9	79.6	0.4	29.5	0.2	6.9
Арктика (суша)	149	4.0	2.0	94.0	-	46.3	-	1.3

Условные обозначения. 1. $V < 0$, $V = 0$, $V > 0$ – категории аномалий;
2. P05, P95 – 5-я и 95-я процентиля
3. *min*, *max* – абсолютные экстремумы: наименьшее и наибольшее значения с 1911 г.

Таблица 3. Пространственно-осредненные значения аномалий приземной температуры в регионах Земного шара в 2022 г. (°C) и их вероятности непревышения (в среднем за год и в каждом из сезонов)

Table 3. Spatially averaged values of surface anomalies temperatures in the regions of the globe in 2022 (°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%
1		2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
<i>HadCRUT5 (суша+море)</i>											
Земной шар		0.26	95.5	0.22	95.5	0.25	96.4	0.30	98.2	0.25	95.5
Северное полушарие		0.38	95.5	0.33	95.5	0.38	96.4	0.41	97.3	0.41	96.4
Южное полушарие		0.13	94.6	0.11	94.6	0.12	92.8	0.20	98.2	0.10	89.2
Атлантика (15-70N)		0.39	100	0.45	100	0.26	99.1	0.25	93.6	0.58	100
Тихий океан (20-65N)		0.69	100	0.41	100	0.57	100	0.84	100	0.81	100
Широтные пояса	65-90N	0.76	96.4	0.10	79.1	0.91	91.8	0.54	95.5	0.48	88.2
	25-65N	0.59	99.1	0.50	97.3	0.50	98.2	0.75	100	0.71	100
	25S-25N	0.07	90	0.09	90	0.07	91.8	0.02	86.4	-0.03	85.5
	65-25S	0.28	99.1	0.30	100	0.20	98.2	0.24	100	0.27	100
	90-65S	0.67	97.4	-0.05	54.7	0.61	82.1	1.54	96.1	0.71	90.9

Продолжение таблицы 3

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
<i>T3288 (суша)</i>										
Земной шар	0.34	94.6	0.32	95.5	0.38	96.4	0.43	98.2	0.34	95.5
Северное полушарие	0.47	95.5	0.40	94.6	0.50	96.4	0.57	100	0.50	96.4
Южное полушарие	0.05	86.5	0.14	91	0.12	90.1	0.11	91	-0.05	82
Северная Америка	0.19	88.2	-0.51	66.4	0.18	82.7	0.78	100	0.63	96.4
Евразия	0.69	99.1	0.88	96.4	0.78	96.4	0.70	100	0.58	97.3
Южная Америка	-0.04	83.6	0.19	91.8	-0.43	40.9	0.06	83.6	-0.09	80
Африка	0.15	90	0.16	88.2	0.07	87.3	0.24	92.7	0.21	91.8
Австралия	-0.34	60	-0.03	72.7	0.70	90.9	-0.46	55.5	-1.09	23.6
Антарктида	0.46	89.6	-0.29	36.4	0.73	83.1	1.12	89.6	0.25	75.3
Европа	0.94	99.1	1.40	95.5	-0.28	74.5	1.59	100	0.81	92.7
Азия	0.63	98.2	0.71	92.7	1.09	99.1	0.48	98.2	0.52	95.5
Арктика (суша)	1.05	96.4	0.28	84.5	1.24	93.6	0.89	98.2	0.82	91.8
<i>CRUTEM5 (суша)</i>										
Земной шар	0.30	94.6	0.32	94.6	0.32	96.4	0.40	98.2	0.30	95.5
Северное полушарие	0.44	95.5	0.43	95.5	0.44	96.4	0.55	99.1	0.48	97.3
Южное полушарие	0.03	87.4	0.09	89.2	0.09	88.3	0.09	90.1	-0.06	82

- Условные обозначения.** 1. $vT, ^\circ\text{C}$ – наблюдаемая аномалия в 2022 году (базовый период 1991–2020 гг.);
2. $F\%$ – значение эмпирической функции распределения
 $F = \text{prob}(X \leq vT_{2022})$ по данным за 1911–2022 гг. (вероятность превышения)
3. Красным шрифтом выделены абсолютные максимумы (наибольшие из всех значений ряда за 1911–2022 гг.), синим – отрицательные аномалии.

Отрицательные среднегодовые аномалии (около 20% всех данных) также наблюдались и на суше, и на акваториях океанов (табл. 2, 3). На суше северного полушария – это около 30% станций Северной Америки (центральные районы) и Юго-Восточной Азии; на суше южного – более 67% станций Австралии, 50% станций Южной Америки и 26% станций Африки. Особо выделяется Австралия, где 12% станций зафиксировали 5%-е экстремумы холода (среднегодовые значения аномалий ниже 5-го перцентиля), из которых 4% обновили локальные абсолютные минимумы. На акваториях океанов отрицательные аномалии наблюдались в тропических широтах Тихого и Индийского океанов.

Дополнительно отметим, что 94.6% локальных 5%-х экстремумов тепла на станциях (в среднем за год) наблюдались в Северном полушарии, на суше и в океанах, остальные 5.4% – в Южном полушарии, преимущественно на

континентах. В свою очередь, локальные 5%-е экстремумы холода отмечались, в основном, на континентах Южного полушария (83%), в Австралии и Южной Америке.

Более полное представление о температурных аномалиях 2022 года дают *сезонные глобальные поля аномалий* (рис. 4) и региональные оценки для каждого месяца (табл. 4, 5).

Таблица 4. Пространственно-осредненные значения среднемесячных аномалий приземной температуры в 2022 г. в целом по Земному шару и полушариям

Table 4. Spatially averaged values of monthly mean surface temperature anomalies in 2022 for the whole globe and hemispheres

Регион	Месяцы 2022 г.												Год I-XII
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	
<i>HadCRUT5 (суша+море)</i>													
ЗШ	0.235 6	0.177 9	0.301 5	0.198 7	0.253 5	0.343 1	0.261 5	0.310 3	0.274 6	0.377 3	0.105 13	0.253 6	0.257 6
СП	0.379 6	0.270 5.5	0.479 5	0.305 8	0.352 5	0.429 5	0.350 5	0.459 2	0.440 5	0.523 3	0.260 10	0.320 9	0.380 6
ЮП	0.090 10	0.084 9	0.123 9	0.092 8	0.154 10	0.257 1	0.171 5	0.161 5.5	0.108 9.5	0.231 7	-0.050 18	0.186 7	0.134 7
<i>T3288 (суша)</i>													
ЗШ	0.397 7	0.173 11	0.501 5	0.380 4	0.257 10	0.386 6	0.436 3	0.458 2	0.401 5	0.448 4	0.172 14	0.070 17	0.342 7
СП	0.505 7	0.275 10	0.648 6	0.470 6	0.354 7	0.593 2	0.525 2	0.580 2	0.511 5	0.612 1	0.369 10	0.096 18	0.468 6
ЮП	0.140 12	-0.068 21	0.152 11	0.172 12	0.030 19	-0.102 23	0.224 6.5	0.159 9	0.134 11	0.049 17	-0.304 47	0.006 21	0.046 16
<i>CRUTEM5 (суша)</i>													
ЗШ	0.36 7	0.182 10	0.389 6	0.331 6.5	0.248 10	0.377 6	0.392 5	0.424 2	0.331 7	0.400 4	0.158 14	0.020 16	0.301 7
СП	0.462 7	0.325 9	0.532 7	0.427 6	0.364 6	0.604 2	0.487 3	0.560 2	0.464 5	0.593 1	0.367 10	0.033 18	0.435 6
ЮП	0.169 8	-0.104 22	0.103 10	0.138 11	0.016 16	-0.077 18	0.203 8	0.151 8	0.065 13.5	0.013 18	-0.261 28	-0.004 19	0.034 15
<i>HadSST4 (море)</i>													
ЗШ	0.249 3	0.196 5	0.196 5	0.183 6	0.204 6	0.261 2	0.205 7	0.25 35	0.249 5	0.250 6	0.244 5	0.330 2	0.235 5
СП	0.280 3	0.209 5	0.222 4	0.214 7	0.275 5	0.329 4	0.324 5	0.392 4	0.412 5	0.334 6	0.3225 5	0.381 2	0.308 5
ЮП	0.217 4	0.183 6	0.174 6	0.154 7	0.136 7	0.194 2	0.093 8	0.116 9	0.079 9	0.165 6	0.162 6	0.277 5	0.163 4

Примечание. Во второй строке каждой ячейки приведены ранги в соответствующих упорядоченных по убыванию временных рядах (1911-2022 гг.). Красным шрифтом показаны значения с рангами 1, 2 и 3. Абсолютные максимумы (ранг 1) выделены жирным шрифтом.

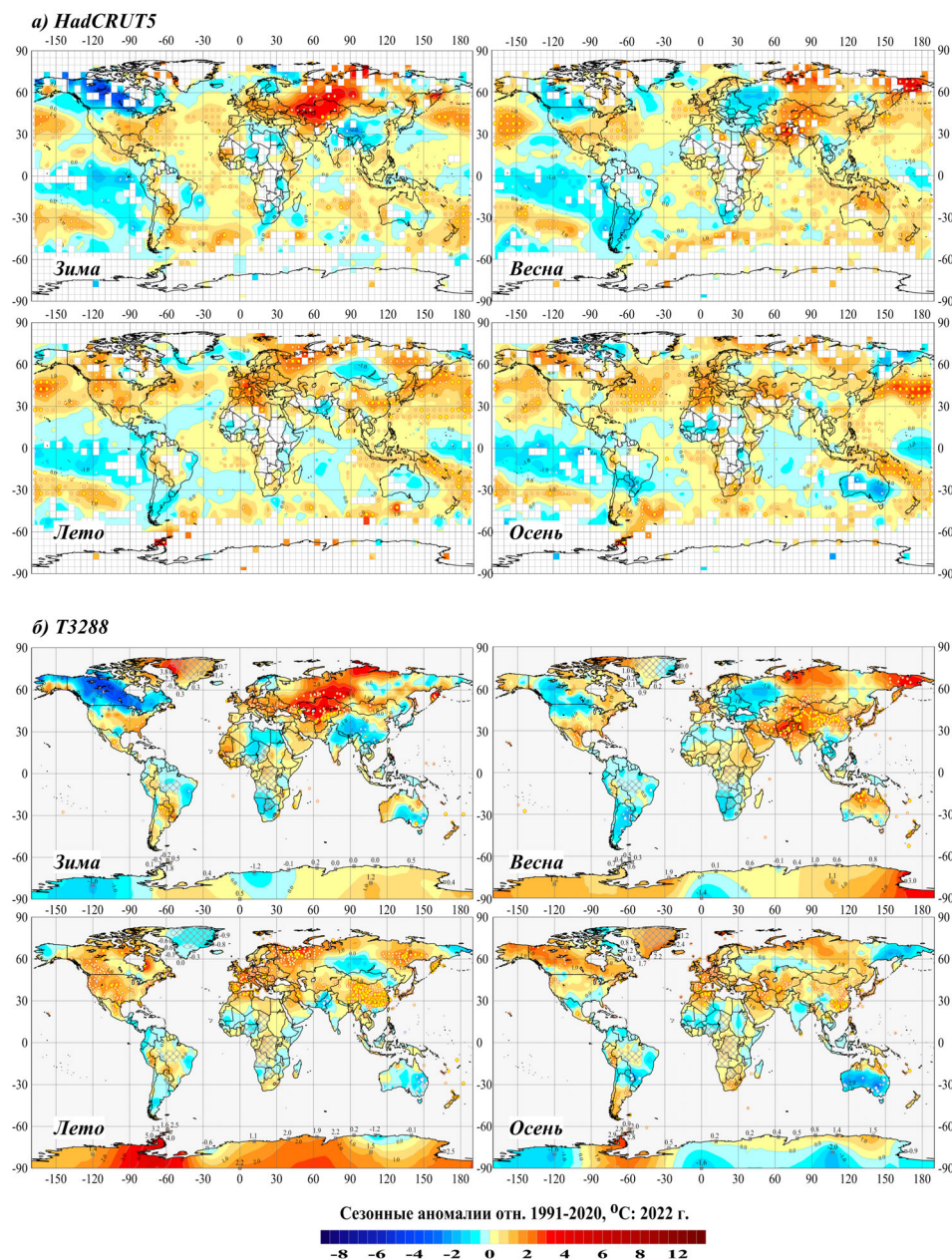


Рисунок 4. См. рисунок 3, но для сезонных аномалий

Figure 4. See Figure 3, but for seasonal anomalies

Зимний сезон (2021_{XII}-2022_I) (рис. 4) в целом по Земному шару, оказался на пятом-седьмом месте среди наиболее теплых зимних сезонов с начала 1900-х гг. (по разным наборам данных: суша, море, суша+море).

Основные особенности сезона: с одной стороны – экстремально теплые условия на поверхности океанов (в северных частях Атлантического и Тихого океанов и умеренных широтах южных акваторий Тихого, Атлантического и

Индийского океанов), с другой – области отрицательных аномалий практически на всех континентах Земного шара (в Северной и Южной Америках, Евразии, Африке, Австралии и Антарктиде). В Евразии локализация положительных и отрицательных аномалий менялась в течение сезона: в декабре – тепло в центре, холодно – на севере и юге; в январе и феврале – тепло на севере, холодно – на юге

Таблица 5. Пространственно-осредненные значения аномалий приземной температуры в 2022 г. и их ранги для крупных регионов Земного шара (за каждый месяц года и в среднем за год)

Table 5. Spatially averaged values of surface temperature anomalies in 2022 and their ranks for large regions of the globe (for each month of the year and on average for the year)

Регион		Месяцы 2022 г.												Год I-XII
		I	III II	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII		
HadCRUT5 (суша+море)														
АО.15-70 N		0.41 1	0.42 2	0.19 3	0.18 6	0.42 1	0.25 8	0.85 17	0.43 3	0.6 1	0.63 1	0.48 1	0.43 1	0.39 1
ТО. 20-60N		0.39 3	0.43 2	0.54 1	0.53 1	0.66 2	0.69 2	0.89 1	0.94 1	0.87 1	0.89 1	0.69 2	0.68 1	0.69 1
Широтные пояса	65-90N	0.91	0.65	1.42	0.39	0.92	0.60	0.36	0.54	0.27	1.22	0.03	1.29	0.76
	25-65N	0.46 5	0.41 9	0.44 7	0.51 3	0.55 1	0.75 1	0.69 1	0.82 1	0.80 1	0.82 1	0.53 6	0.23 12	0.59 2
	25S-25N	0.16 8	0.03 16	0.14 9	0.09 9	-0.00 15	0.06 11	-0.02 17	0.04 14	-0.01 17	-0.03 19	-0.04 17	0.05 13	0.07 12
	65-25S	0.34 2	0.28 2	0.22 5	0.23 3	0.19 5	0.18 3	0.31 1	0.21 3	0.16 5	0.29 1	0.33 1	0.47 1	0.28 2
	90-65S	-0.20 53	-0.04 36	0.75 4	-0.28 47	1.28 17	1.94 1	1.16 14	1.33 11	1.09 15	2.05 2	-0.77 57	-0.18 49	0.67 3
T3288 (суша)														
С. Америка		-0.68 52	-1.34 62	0.58 17	-0.53 52	0.43 9	0.60 4	0.79 2	0.97 1	1.17 1	1.06 4	-0.35 49	-0.66 55	0.19 14
Евразия		1.24 5	1.03 7	0.80 9	1.09 2	0.45 8	0.86 2	0.54 3	0.70 2	0.39 10	0.77 4	0.59 10	-0.11 32	0.69 2
Ю. Америка		0.35 9	-0.02 31	-0.49 67	-0.08 34	-0.74 89	-0.67 75	0.93 6	-0.07 29	-0.18 34	-0.11 28	0.03 18	0.30 4	-0.04 19
Африка		-0.10 35	-0.03 26	-0.21 24	0.16 11	0.26 10	0.29 8	0.24 13	0.11 14	0.36 7	0.35 6	-0.10 25	0.76 4	0.15 12
Австралия		0.08 25	-0.65 75	0.96 6	0.84 7	0.22 26	-0.38 57	-1.20 94	0.02 30	-0.37 35	-0.78 63	-2.01 107	-0.90 91	-0.34 45
Антарктида		-1.04 69	0.33 20	0.85 12	0.01 39	1.32 17	1.03 17	1.44 13	0.91 12	0.99 11	0.74 10	-0.99 63	-0.11 39	0.45 9
Европа		1.14 17	3.61 6	-0.28 32	-0.05 31	-0.51 48	1.26 2	0.96 3	2.54 1	-0.47 59	1.88 1	0.99 19	0.32 36	0.94 2
Азия		1.25 5	0.30 17	1.14 9	1.38 1	0.76 3	0.76 2	0.47 2	0.20 12	0.61 5	0.49 9	0.46 14	-0.25 37	0.63 3
Арктика. суша		1.4 13	0.74 23	1.85 8	0.47 18	1.42 4	0.74 7	0.81 3	1.15 1	0.41 13	2.05 4	-0.02 29	1.18 13	1.05 5

Примечание. См. примечание к табл. 4

Весна (рис. 4) в среднем по территории Земного шара и Северного полушария стала пятым самым теплым весенним сезоном по данным HadCRUT5 (суша+море) и T3288/CRUTEM5 (только суша). По тем же данным в Южном полушарии она была лишь на 9 и 12/14 местах, а по температуре поверхности океана (HadSST4, только море) заняла седьмую строку в списке наиболее теплых весенних сезонов на акваториях Северного полушария и шестую – на акваториях Южного полушария и Мирового океана в целом.

Основная особенность сезона – наличие значительных (по охвату территории и интенсивности) отрицательных аномалий, наряду с положительными. При этом практически на всей территории Земного шара, в крупных регионах, положительные сезонные аномалии составляют примерно 60-70% всех наблюдений, в полярных областях – до 80-90%. Исключением является Южная Америка, где соотношение обратное (80% – доля отрицательных аномалий).

Наиболее крупная из областей положительных аномалий охватывает большую часть Азии и прилегающие акватории в северной части Тихого океана. Крупная область отрицательных аномалий в Южной Америке включает 80% наземных станций континента и прилегающие акватории Тихого океана. Отрицательные аномалии отмечались также в Центральной и Восточной Европе (40% всех станций Европы), на севере Африки (32%) и в Северной Америке (37%).

Локализация аномалий от месяца к месяцу менялась незначительно. В основном менялась площадь распространения и интенсивность аномалий. Самые теплые месяцы: в Азии – апрель, в северной части Тихого океана – март и апрель, в Атлантике – май.

Летний сезон 2022 года (рис. 4) в среднем за сезон и по территории стал третьим самым теплым летним сезоном в истории наблюдений в целом по Земному шару и четвертым – в Северном полушарии (данные HadCRUT5, «суша+море»). Рекордно теплым он стал для суши Северного полушария по данным T3288, по данным CRUTEM5 – вторым (аномалии, соответственно, равны $+0.570^{\circ}\text{C}$ и $+0.568^{\circ}\text{C}$). Рекордные сезонные аномалии зафиксированы также в целом по Северной Америке (0.78°C) и по Евразии (0.70°C).

Положительные сезонные аномалии составили 63/72% всех данных (по данным HadCRUT5/T3288), отрицательные – 32/25%. Особо выделяется Австралия: 67.3% станций с температурой ниже нормы и среди них – 16.7% ниже 5-го процентиля (5%-е экстремумы холода). Экстремально теплые условия в северных частях Тихого и Атлантического океанов, в южном Умеренном широтном поясе 25-65S и в Антарктиде сохранялись на протяжении всего сезона, как и отрицательные аномалии в Австралии, Южной Америке, в Западной и Восточной Африке.

В Евразии конфигурация аномалий, напротив, менялась от месяца к месяцу. Наиболее интенсивные очаги тепла сформировались в Европе и Западной Сибири, а очаги холода с единичными 5%-ми экстремумами – в Азии.

Осенний сезон (рис. 4) в целом для Земного шара стал шестым самым теплым (с 1911г.) по данным HadCRUT5 (суша+море) и T3288, CRUTEM5 (только суша), но пятым – по данным HadSST4 (только море). При этом в

Северном полушарии контрастов между температурными условиями на континентах и океанах не обнаружено (сезон по всем наборам данных оказался на четвертом-пятом месте), тогда как в Южном полушарии температура осеннего сезона на поверхности океанов – седьмая величина в ранжированном по убыванию ряду наблюдений, а на суше – лишь 21-я (по обоим одноименным источникам, T3288 и CRUTEM5).

На территории Земного шара преобладали положительные аномалии – на них приходится около 65/70% всех локальных данных (HadCRUT5/T3288). Наиболее теплыми месяцами, в среднем по Земному шару, были сентябрь ($+0.27^{\circ}\text{C}$, ранг 5) и октябрь ($+0.38^{\circ}\text{C}$, ранг 2). В ряде регионов установлены новые региональные рекорды среднемесячной температуры, в том числе: северные части Атлантики и Тихого океана, северный и южный Умеренные широтные пояса (массив HadCRUT5), Европа, Северная Америка и Северное полушарие (массив T3288).

Отрицательные аномалии наблюдались в этом сезоне сразу на нескольких континентах, в целом за сезон и во все месяцы. В ноябре (самый прохладный месяц в сезоне) на каждом континенте наблюдались огромные области с отрицательными аномалиями температуры. Однако, поскольку они рассчитаны относительно среднего за 1991-2020 гг. (самое теплое 30-летие в рядах), судить о степени их экстремальности лучше по значениям в вероятностной шкале F. По-видимому, в данном сезоне действительно холодными можно считать региональные температурные условия лишь в Австралии, в целом за сезон ($V=1.09^{\circ}\text{C}$, $F=0.24$) и в ноябре ($V=2.01^{\circ}\text{C}$; $F=0.04$), когда вероятность превышения существенно ниже 50%.

Локализация наиболее крупных аномалий, положительных и отрицательных, от месяца к месяцу менялась, в основном, на континентах (особенно заметно – в Евразии, в Северной Америке и Антарктиде, где их интенсивность и площадь охвата изменялись очень существенно). На акваториях океанов локализация аномалий менялась незначительно.

Декабрь 2022 года. В упорядоченном по убыванию временном ряду декабрьских температур, осредненных в целом по Земному шару (данные HadCRUT5), декабрь 2022 г. занял 6-е место, аномалия $+0.253^{\circ}\text{C}$.

Наиболее теплые условия сложились в океанах. Аномалия, в среднем по акваториям океанов (данные HadSST4), составила $+0.330^{\circ}\text{C}$ (ранг 2) за счет рекордно теплых условий в северных частях Тихого и Атлантического океанов и в Южном Умеренном широтном поясе (аномалии, соответственно: $+0.429$, $+0.683$, $+0.470^{\circ}\text{C}$; ранг 1).

Весьма заметные области 5%-х экстремумов обоих знаков сформировались и на континентах: Северная и Южная Америка, Евразия, Африка. В качестве областей положительных аномалий следует назвать три больших очага тепла, охватывающих северо-восточную территорию Северной Америки (включая Канадский архипелаг), Средиземноморье (включает южную территорию Европы, север Африки и Малой Азии) и территорию на северо-востоке Евразии (от Новой Земли до Охотского моря) плюс многочисленные локальные экстремумы на юге Южной Америки.

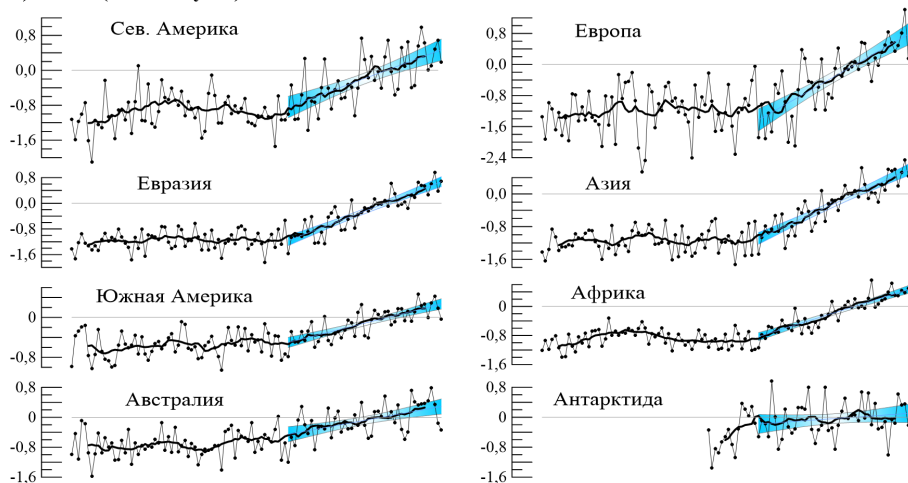
Области отрицательных аномалий (с 5%-ми экстремумами холода) сформировались на материковой части Северной Америки, в Скандинавии, в Центральной и Юго-восточной Азии, на востоке Южной Америки, на юге Африки, в Австралии, в Восточной Антарктиде.

3. Тенденции многолетних изменений приземной температуры в крупных регионах мира

Современные тенденции в изменении приземной температуры в крупных регионах земного шара анализируются здесь по данным о регионально осредненных аномалиях для Земного шара и полушарий в целом, а также для каждого из континентов, основных широтных поясов и северных океанов – Атлантического и Тихого. Оценки получены индивидуально для каждого месяца, сезона и года в целом за весь период наблюдений. Для континентов ряды получены по станционным данным T3288 (с 1901 г.), а для широтных поясов и океанов – по сеточным данным HadCRUT5 (с 1850 г.). Глобальные временные ряды (рис. 2) и ряды для перечисленных крупных регионов (рис. 5) приведены для среднегодовых аномалий, а числовые оценки линейных трендов за 1976-2022 гг. – для года в целом и для каждого сезона (табл. 6,7).

Оценки тренда, глобального и в среднем по территории крупных регионов (табл. 6), 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 всех рассмотренных крупных регионов, кроме Южной полярной области. В Антарктическом поясе (и в Антарктиде) оценки указывают на статистически значимое потепление только осенью, тогда как в остальные сезоны они статистически не значимы даже на 10%-м уровне, а в Антарктическом поясе тренды статистически не значимы на 10%-м уровне весной и летом. Зимой и весной в этих регионах оценки указывают еще и на тенденцию к похолоданию.

а) T3288 (только суша)



б) HadCRUT5 (суша+море)

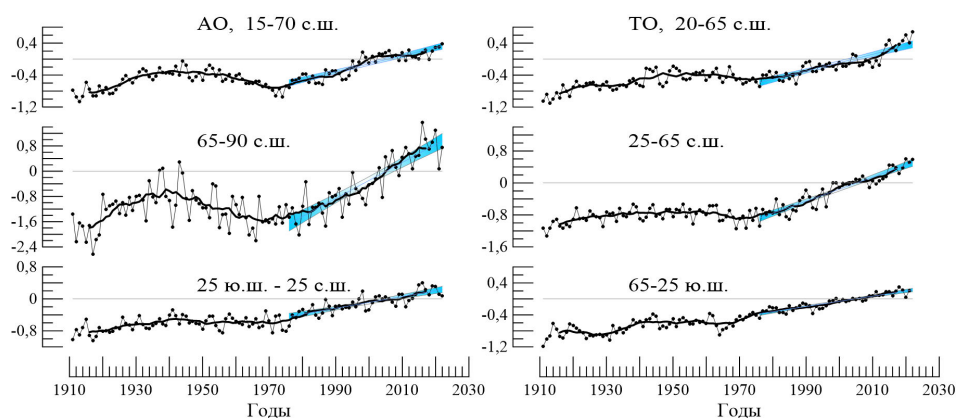


Рисунок 5. Временные ряды пространственно-осредненных среднегодовых аномалий приповерхностной температуры: а) для континентов, б) для северных частей Атлантического и Тихого океанов и основных широтных поясов земного шара

Расчеты пространственно-осредненных аномалий выполнены по методике ИГКЭ по данным: а) T3288 (для континентов); б) HadCRUT5 (для океанов и широтных поясов) Аномалии приведены в отклонениях от средних за 1990-2020 гг. Сглаженные кривые получены 11-летним скользящим осреднением. Показан линейный тренд за 1976-2022 гг. с 95%-м доверительным интервалом (голубая заливка)

Figure 5. Time series of spatially averaged annual anomalies surface temperature: а) for continents, б) for the northern parts of the Atlantic and Pacific oceans and the main latitudinal belts of the globe

Calculations of spatially averaged anomalies were performed using the IGKE method according to the following data: а) T3288 (for continents); б) HadCRUT5 (for oceans and latitudinal belts) Anomalies are given in deviations from the average for 1990-2020. The smoothed curves are obtained by 11-year moving average. A linear trend is shown for 1976-2022. with 95% confidence interval (blue shading)

Таблица 6. Коэффициенты линейного тренда (1976-2022 гг., °C/10 лет) пространственно-осредненных аномалий приземной температуры для Земного шара, полушарий и крупных регионов мира (в целом за год и по сезонам)

Table 6. Linear trend coefficients (1976-2022, °C/10 years) of spatially averaged surface temperature anomalies for the Earth, hemispheres and large regions of the world (for a year as a whole and for seasons)

Регион	Год	Зима	Весна	Лето	Осень
HadCRUT5 (суша+море)					
Земной шар	0.193	0.183	0.197	0.186	0.208
Северное полушарие	0.276	0.267	0.284	0.263	0.293
Южное полушарие	0.109	0.098	0.109	0.109	0.122
Атлантика (15-70N)	0.200	0.202	0.177	0.205	0.229
Тихий океан (20-65N)	0.208	0.160	0.175	0.256	0.238
Арктический пояс (65-90N)	0.569	0.542	0.640	0.436	0.607

Регион	Год	Зима	Весна	Лето	Осень
Умеренный пояс СП (25-65N)	0.300	0.272	0.301	0.325	0.309
Тропики (25S-25N)	0.146	0.145	0.149	0.149	0.143
Умеренный пояс ЮП (65-25S)	0.129	0.107	0.124	0.114	0.109
Антарктический пояс (90-65S)	*0.108	# -0.058	-0.002	0.177	0.295
T3288 (суша)					
Земной шар	0.286	0.282	0.299	0.270	0.298
Северное полушарие	0.340	0.340	0.370	0.315	0.343
Южное полушарие	0.160	0.151	0.135	0.166	0.193
Северная Америка	0.285	0.374	0.160	0.284	0.336
Евразия	0.399	0.350	0.512	0.375	0.369
Южная Америка	0.168	0.162	0.118	0.157	0.216
Африка	0.288	0.258	0.331	0.279	0.289
Австралия	0.162	0.142	0.133	0.150	0.228
Антарктида	0.062	-0.042	-0.017	0.089	0.212
Европа	0.490	0.555	0.417	0.537	0.449
Азия	0.373	0.293	0.537	0.328	0.345
Арктика (суша)	0.645	0.592	0.764	0.441	0.786

Примечание. Оценки статистически значимые на 1% уровне ($\alpha \leq 1\%$), приведены без выделения. Символом (*) выделены оценки с 5%-м уровнем значимости: $1\% < \alpha \leq 5\%$, символом (**) выделены оценки с 10%-м уровнем значимости: $5\% < \alpha \leq 10\%$. Затенены значения, не значимые даже на 10%-м уровне (высокая вероятность «ложного» тренда) т.е. высокая вероятность отсутствия ненулевого тренда любого знака).

Регион наиболее интенсивного потепления¹⁾ – Арктический широтный пояс. Здесь по данным на всей территории (HadCRUT5, суша+море) тренд составляет в среднем за год $+0.569^{\circ}\text{C}/10$ лет, в отдельные сезоны – до $+0.640^{\circ}\text{C}/10$ лет (весна); по наземным данным (T3288, только суша) – за год $+0.645^{\circ}\text{C}/10$ лет, сезонные до $+0.786^{\circ}\text{C}/10$ лет (зима).

Из континентов выделяется Евразия – тренд в среднем за год $0.399^{\circ}\text{C}/10$ лет, $+0.512^{\circ}\text{C}/10$ лет (весна). В Европе наиболее интенсивно потепление зимних сезонов ($0.555^{\circ}\text{C}/10$ лет), в Азии – весенних ($0.537^{\circ}\text{C}/10$ лет). Наименее выражено потепление на континентах Южного полушария: в Антарктиде ($0.062^{\circ}\text{C}/10$ лет), Австралии ($0.162^{\circ}\text{C}/10$ лет) и Южной Америке ($0.168^{\circ}\text{C}/10$ лет).

¹⁾Для каждого выделенного региона приводятся коэффициенты тренда в $^{\circ}\text{C}/10$ лет, в среднем за год и максимальный из сезонных (с указанием сезона).

Таблица 7. Коэффициенты линейного тренда (1976-2022 гг., °C/10 лет) пространственно-осредненных аномалий приземной температуры для Земного шара, полушарий и крупных регионов мира (для каждого календарного месяца)

Table 7. Linear trend coefficients (1976-2022, °C/10 years) of spatially averaged surface temperature anomalies for the globe, hemispheres and large regions of the world (for each calendar month)

Регион		Месяцы											
		<i>I</i>	<i>II</i>	<i>III</i>	<i>IV</i>	<i>V</i>	<i>VI</i>	<i>VII</i>	<i>VIII</i>	<i>IX</i>	<i>X</i>	<i>XI</i>	<i>XII</i>
<i>HadCRUT5 (суша+море)</i>													
Земной шар		0.178	0.183	0.211	0.198	0.181	0.180	0.180	0.198	0.192	0.224	0.207	0.179
С. полушарие		0.258	0.269	0.310	0.288	0.254	0.257	0.257	0.274	0.268	0.308	0.302	0.267
Ю. полушарие		0.098	0.098	0.112	0.108	0.107	0.104	0.103	0.122	0.115	0.140	0.113	0.091
АО.15-70N		0.203	0.194	0.165	0.185	0.179	0.181	0.191	0.242	0.234	0.244	0.207	0.209
ТО. 20-60N		0.147	0.156	0.152	0.166	0.206	0.227	0.271	0.272	0.255	0.238	0.222	0.189
Широтные пояса	65-90N	0.456	0.572	0.690	0.728	0.503	0.493	0.385	0.418	0.420	0.726	0.702	0.635
	25-65N	0.278	0.281	0.352	0.279	0.272	0.306	0.323	0.345	0.324	0.319	0.284	0.252
	25S-25N	0.140	0.140	0.145	0.156	0.144	0.148	0.147	0.151	0.147	0.145	0.138	0.134
	65-25S	0.111	0.109	0.121	0.129	0.114	0.116	0.110	0.111	0.098	0.114	0.107	0.105
	90-25S	#-0.069	-0.049	-0.033	-0.081	0.134	0.026	0.153	*0.354	#0.303	0.399	0.186	-0.061
<i>T3288 (суша)</i>													
Земной шар		0.288	0.283	0.349	0.294	0.248	0.276	0.264	0.267	0.287	0.316	0.291	0.260
С. полушарие		0.343	0.351	0.438	0.358	0.308	0.324	0.307	0.312	0.315	0.365	0.349	0.309
Ю.полушарие		0.163	0.127	0.142	0.150	0.111	0.165	0.167	0.161	0.222	0.203	0.157	0.147
С. Америка		0.530	0.107	0.232	0.072	*0.170	0.300	0.274	0.278	0.350	0.327	0.3331	0.463
Евразия		0.3171	0.489	0.650	0.502	0.382	0.392	0.351	0.381	0.333	0.416	0.358	*0.223
Ю.Америка		0.180	0.142	*0.123	0.165	0.064	0.170	*0.129	0.169	0.289	0.188	0.179	0.158
Африка		0.221	0.260	0.324	0.314	0.327	0.312	0.288	0.229	0.252	0.292	0.316	0.295
Австралия		0.237	0.04752	0.145	0.210	0.037	0.105	0.232	0.105	0.280	0.290	0.123	0.103
Антарктида		-0.074	0.002	0.018	-0.117	0.070	-0.142	0.165	#0.261	0.219	0.258	*0.153	-0.074
Европа		*0.511	*0.664	*0.416	0.479	0.350	0.467	0.525	0.612	0.398	0.460	0.487	*0.517
Азия		*0.263	0.438	0.708	0.515	0.389	0.367	0.303	0.315	0.313	0.401	0.324	0.146
Арктика (суша)		0.537	0.575	0.817	0.881	0.589	0.566	0.349	0.407	0.448	1.008	0.892	0.721

Примечание. См. примечание к табл. 6.

Вывод о потеплении осенних сезонов в Антарктическом поясе (90-65 S) становится менее уверенным, если учесть, что оценки статистически значимы на 1%-м уровне только в среднем за осенний сезон и в октябре-ноябре, а в сентябре критический уровень значимости составляет лишь 8%.

Аналогично, в среднем по территории Антарктиды осенний тренд значим на 1%-м уровне, тренд в октябре-ноябре – на 5%-м, а в сентябре – только на 16%-м. Обращают внимание и оценки тренда для Европы в зимние месяцы: при высоких значениях коэффициентов тренда они статистически значимы только на 5%-м уровне (не значимы на 1%-м). Это, по-видимому, может говорить о высокой межгодовой изменчивости температурного режима в этом регионе.

Сезонные особенности трендов в рассматриваемых регионах более четко видны из табл. 7, где для всех календарных месяцев (январь-декабрь) приведены числовые значения коэффициентов тренда за 1976-2022 гг. для трех глобальных территорий и всех перечисленных выше крупных регионов.

Средняя скорость потепления в Южном полушарии (табл. 6) во все сезоны ниже, чем в Северном, различия особенно заметны на суше. На континентах Северного полушария современное глобальное потепление протекает особенно активно в холодный период года. По-видимому, Евразия обеспечивает усиление потепления в феврале-апреле, а Северная Америка – в декабре-январе (табл. 7).

В большинстве регионов (табл. 6, 7) тренды положительны. Тенденция к похолоданию получена только для Антарктического материка в декабре, январе, апреле и июне; при этом для всех месяцев (кроме осенних: август-ноябрь) коэффициенты тренда статистически незначимы даже на 10%-м уровне. В Австралии незначимые на 10%-м уровне тренды получены для марта, мая, июня, августа, ноября и декабря.

Из широтных зон особо выделяется Арктический пояс (65-90N) – во все месяцы (кроме июля) значение тренда выше $0.4^{\circ}\text{C}/10$ лет, наибольшее потепление наблюдается в марте-апреле и в октябре-ноябре ($0.7\text{-}0.8^{\circ}\text{C}/10$ лет).

В Арктическом (65-90N) и Антарктическом (90-65S) поясах наибольшая интенсивность потепления наблюдается в зимне-весенний период (с учетом календаря полушарий).

В широтных зонах 65-25S (умеренный пояс Южного полушария) и 25S-25N (тропики) сезонный ход коэффициентов тренда проявляется очень слабо.

4. Географические особенности современных изменений климата. 1976-2022 гг.

Рассматриваются пространственные распределения локальных оценок температурных трендов на территории Земного шара, в среднем за год (рис. 6) и за каждый сезон (рис. 7).

Для года в целом дополнительно приведены частотные распределения локальных оценок по крупным регионам земного шара, в зависимости от интенсивности тренда и его статистической значимости (табл. 8). Эти данные существенно дополняют и уточняют представленные выше региональные оценки (табл. 6, 7). Анализ выполнен по данным наблюдений на 2426 станциях (массив T3288) и в центрах 1430 боксов (массив HadCRUT5), для которых временные ряды охватывают не менее 35 лет наблюдений (включая последний).

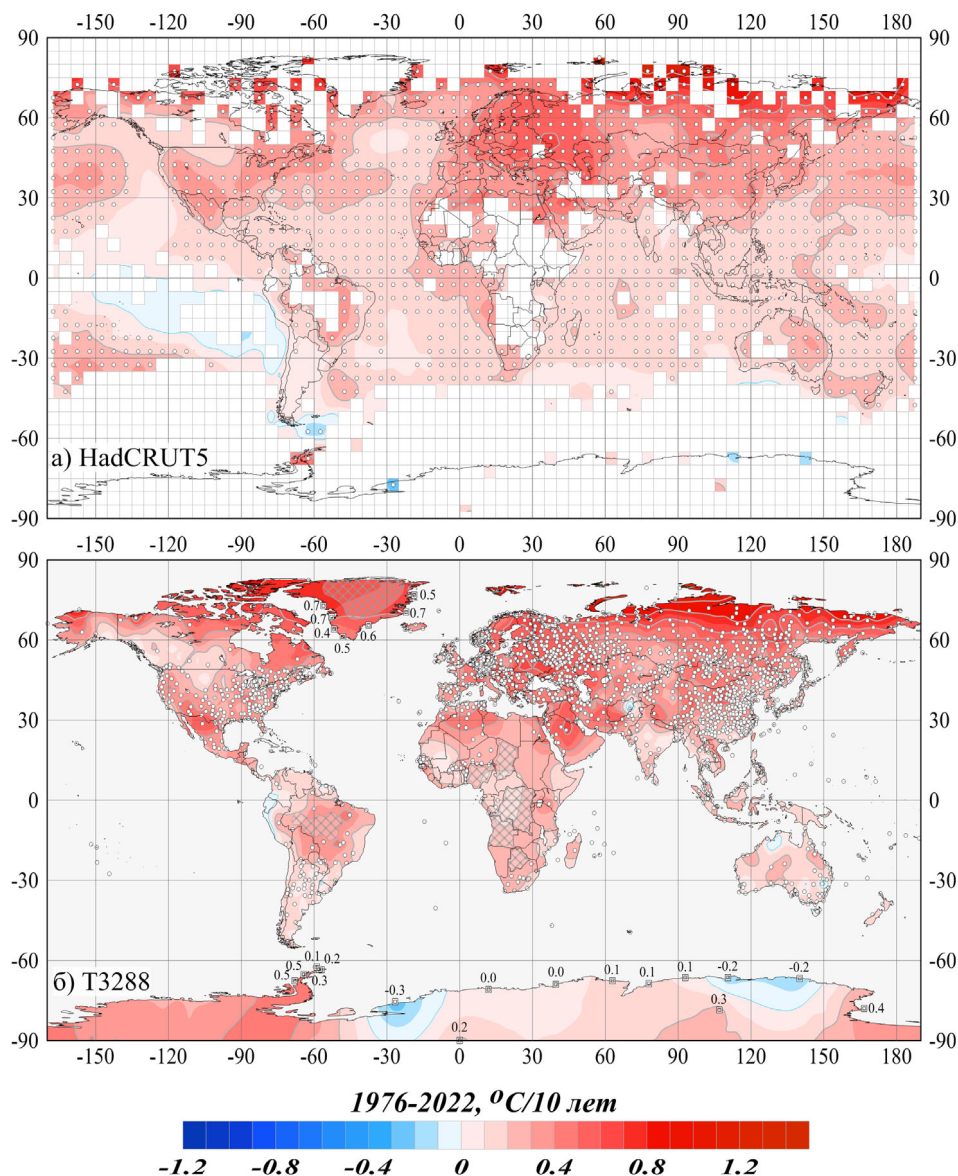


Рисунок 6. Пространственное распределение коэффициентов линейного тренда среднегодовой температуры у поверхности Земного шара. 1976-2022 гг. (°C/10 лет)
Использованы данные: а) HadCRUT5 – сеточные данные Hadley/CRU. UK (суша+море); б) T3288 – станционные данные ИГКЭ (только суша). Пустыми боксами (а) и штриховкой (б) показаны области отсутствия наблюдений. Для станций Антарктиды и Гренландии приведены числовые значения коэффициентов тренда. Белыми кружками выделены боксы/станции, для которых тренд статистически значим на 1%-м уровне

Figure 6. Spatial distribution of the coefficients of the linear trend of the average annual temperature near the surface of the Earth. 1976-2022 (°C/10 years)
Data used: a) HadCRUT5 – Hadley/CRU grid data. UK (land + sea); b) T3288 – station data of IGKE (on land only). Empty boxes (a) and shading (b) show the areas of absence of observations. Numerical values of the trend coefficients are given for the stations of Antarctica and Greenland. White circles indicate boxes/stations for which the trend is statistically significant at the 1% level

В соответствии со среднегодовыми оценками (рис. 6, табл. 8) почти на всей территории земного шара наблюдается **тенденция к потеплению** – положительные тренды составляют около 97% всех локальных оценок (с учетом и без учета океанов). Область наиболее интенсивного потепления – Арктика: все оценки тренда положительны; 98.7% из них статистически значимы на 5%-м уровне. На суше, вдоль побережья Северного Ледовитого океана практически всюду тренд достигает 0.6-0.8°C/10лет и более.

Из континентов, как и по региональным оценкам (табл. 8), выделяется Европа, где 99.8% данных указывают на потепление, притом 99.6% статистически значимы на 5%-м уровне. В Восточной Европе скорость потепления достигает +0.7-0.8°C/10 лет, в целом за год линейный тренд составил 0.49°C / 10 лет. Близкая ситуация в Азии (0.37°C / 10 лет) и, как результат, в Евразии в целом (0.40°C/10 лет). Большая часть океанической поверхности в Северном полушарии и тропическом поясе (кроме восточного сектора Тихого океана у побережья Южной Америки) также характеризуется статистически значимыми на 1%-м уровне трендами к потеплению. Потепление также отмечается в Северной Атлантике и на севере Тихого океана (до 0.3-0.4°C/10 лет, рис. 6).

Таблица 8. Частотное распределение локальных оценок тренда (1976-2022) по категориям коэффициента линейного тренда b и уровня значимости α (все оценки представлены в процентах относительно NN)

Table 8. Frequency distribution of local trend estimates (1976-2022) by categories of linear trend coefficient b and significance level α (all estimates are presented as a percentage relative to NN)

Регион		NN	$b < 0$					$b = 0$ всего	$b > 0$		
			всего $\alpha \leq 0.05$		$\alpha \geq 0.1$				$\alpha \leq 0.05$	$\alpha \geq 0.1$	$\alpha \geq 0.1$
1		2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
HadCRUT5 (суша+море)											
Земной шар		1430	3.1		0.4		2.4	0.5	96.4	86.2	8.1
С. полушарие		897	0.2		-		0.2	0.1	99.7	91.8	5.9
Ю. полушарие		533	7.9		1.1		6.0	1.1	91.0	76.7	11.8
Атлантика.15-70N		130	-		-		-	-	100.0	95.4	3.1
Тихий океан.20-65N		146	-		-		-	-	100.0	100.0	-
Широтные пояса	65-90N	80	-		-		-	-	100.0	97.5	1.3
	25-65N	520	-		-		-	-	100.0	93.7	4.6
	25S-25N	578	4.5		0.3		4.0	0.3	95.2	84.9	8.5
	65-25S	240	6.3		0.8		4.6	1.7	92.1	71.3	16.3
	90-65S	12	25.0		16.7		-	8.3	66.7	41.7	25.0
T3288 (только суша)											
Земной шар		2426	2.9		0.7		2.1	0.3	96.7	86.8	7.4
С. полушарие		2070	1.3		0.3		1.0	0.2	98.6	90.5	5.7
Ю. полушарие		357	12.6		2.8		9.0	1.1	86.3	65.3	17.1

Продолжение таблицы 8

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
С. Америка	418	2.2	0.5	1.7	0.5	97.4	72.2	17.9		
Евразия	1458	0.7	0.1	0.5	0.1	99.2	96.1	2.3		
Ю. Америка	126	15.1	3.2	11.9	0.8	84.1	64.3	15.9		
Африка	104	1.9	1.0	1.0	1.0	97.1	89.4	6.7		
Австралия	129	16.3	3.1	11.6	1.6	82.2	55.8	21.7		
Антарктида	17	17.6	11.8	-	-	82.4	47.1	23.5		
Европа	523	-	-	-	0.2	99.8	99.6	-		
Азия	944	1.1	0.2	0.8	0.1	98.8	94.2	3.5		
Арктика (суша)	147	-	-	-	-	100.0	98.6	0.7		

Примечание. Оценки получены по данным о тренде среднегодовой температуры, осредненной по территории рассматриваемого региона, NN – общее количество станций/боксов в регионе

Тенденция к похолоданию территории земного шара (по среднегодовым оценкам) отмечена на 3.1% боксов (2.9% станций). из них с уровнем значимости $\alpha \leq 0.05$ всего 0.4% (0.7%). Согласно станционным данным (Т3288, только суша), в полярном и умеренном широтном поясе, как уже отмечено выше, не обнаружено ни одной станции с тенденцией к похолоданию. На территории континентов таких станций 15 (табл. 7) – шесть в Северном полушарии и десять в Южном полушарии. Практически все остальные станционные оценки, указывающие на тенденцию к похолоданию, не достигают и $0.1^\circ\text{C}/10$ лет и статистически не значимы. На акваториях океанов слабый отрицательный тренд зафиксирован в Тихом океане у побережья Южной Америки (до $-0.1^\circ\text{C}/10$ лет) и на юго-западе Атлантики (до $0.3^\circ\text{C}/10$ лет у берегов Огненной Земли).

Пространственные распределения сезонных оценок тренда (рис.7) позволяют несколько уточнить сформулированные выше положения для отдельных сезонов.

Зима (рис. 7). В географическом распределении трендов для зимнего сезона, в среднем за сезон и для каждого месяца, преобладает тенденция к потеплению. Наиболее интенсивное потепление (более $1.0^\circ\text{C}/10$ лет, $\alpha = 1\%$) – в Гренландии, на западе США, в Скандинавии, в Восточной Европе, в Юго-Восточной Азии. В декабре значительный положительный тренд фиксируется на северо-востоке Евразии, в январе – в Якутии и на Дальнем Востоке (значим на 1% уровне), в феврале – на западе и в центре АЧР. Тренд к похолоданию просматривается только в небольших областях Антарктиды, в центре Евразии и в восточной части Тихого океана (у побережья Южной Америки). В месяцах сезона, на всех континентах выделяются области отрицательного тренда. Наиболее значительные из них – в Северной Америке (до $-1^\circ\text{C}/10$ лет в феврале) и в центре Азиатского континента (до $-0.8^\circ\text{C}/10$ лет – в декабре и январе). На акваториях океанов в каждом из зимних месяцев сохраняются особенности сезонного распределения.

Весна (рис. 7). Положительные статистически значимые тренды отмечаются практически на всей территории Евразии (до $+1.6^{\circ}\text{C}/10$ лет на севере Красноярского края), за исключением севера Восточно-Европейской равнины и Индии. Обширная область с тенденцией к похолоданию выделяется в Северной Америке (апрель-май) и в Антарктиде (март-апрель), но обе они статистически не значимы.

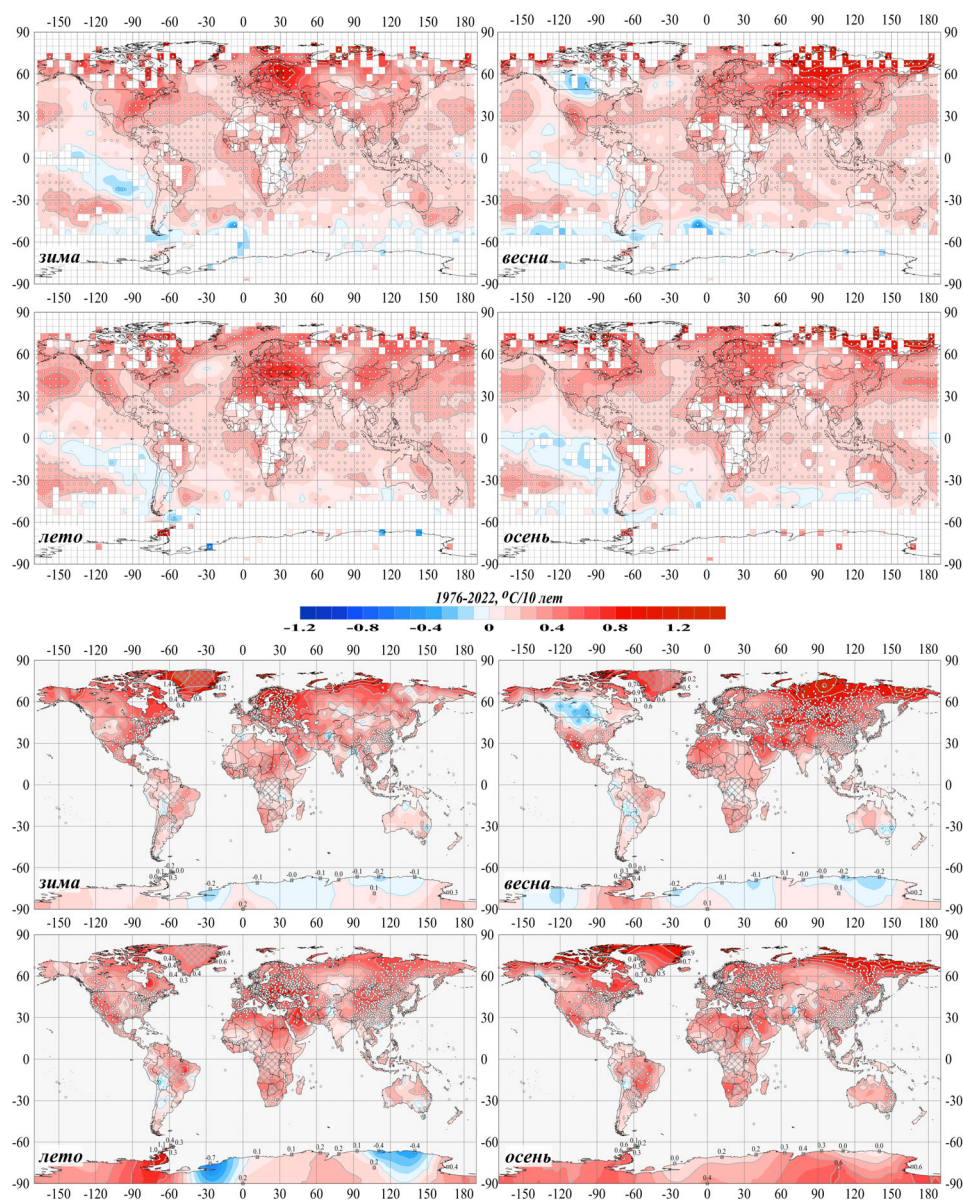


Рисунок 7. См. рис. 6, но для сезонных аномалий температуры

Figure 7. See fig. 6, but for seasonal temperature anomalies

Лето (рис. 7). Как и в другие сезоны, летом преобладает тенденция к потеплению. Высокая интенсивность потепления во все месяцы сезона отмечается в Европе (до $+0.9^{\circ}\text{C}/10$ лет, в среднем по региону наибольшая в августе: $0.612^{\circ}\text{C}/10$ лет), Малой и Передней Азии, Монголии (до $0.8^{\circ}\text{C}/10$ лет), Антарктиде (до $1.1^{\circ}\text{C}/10$ лет на Антарктическом полуострове), на территории США, а также в июне на Средне-Сибирской низменности и севере Среднесибирского плоскогорья (до $+1.4^{\circ}\text{C}/10$ лет). Статистически значимая тенденция к похолоданию отмечена в Аргентине (в июле), в центре Азии (в июне-июле), в Боливии (во все месяцы сезона).

Осень (рис. 7). Практически в каждом месяце интенсивное потепление отмечается в Арктике (в октябре до $+2.3^{\circ}\text{C}/10$ лет), на территории Европы (в октябре до $0.8^{\circ}\text{C}/10$ лет), а также в Юго-Восточной Азии и на территории США (в сентябре-октябре).

Слабые отрицательные тренды (до $0.5^{\circ}\text{C}/10$ лет, статистически не значимы) отмечены в Антарктиде (в сентябре на Земле Уилкса) и на океанах Южного полушария, а также на территории Канады и США (в октябре), в Сибири и Центральной Азии (в ноябре). На сезонной карте им соответствуют области с практически нулевым трендом.

Выводы

1. В целом по Земному шару 2022 год стал шестым среди самых теплых лет по данным «суша+море» (массив HadCRUT5: аномалия $+0.257^{\circ}\text{C}$); по данным «суша» (массивы T3288/ CRUTEM5: $0.363/0.301^{\circ}\text{C}$) – шестым/седьмым; по данным «море» (массив HadSST4: 0.235°C) – пятым.

2. Рекордно теплыми в истории наблюдений остаются 2016 и 2020 гг. с очень близкими значениями глобальной температуры ($+0.389^{\circ}\text{C}$ и $+0.379^{\circ}\text{C}$).

3. Положительные аномалии температуры составляли более 70% всех локальных данных, с учетом (массив HadCRUT5) и без учета (массив T3288) океанов. Из них ~30% оказались выше 95-го перцентиля (5%-е экстремумы тепла), в том числе ~10% стали для своих пунктов новыми рекордами. Такая ситуация сложилась, в основном, за счет северных частей Тихого и Атлантического океанов (2022 год в этих регионах был рекордно теплым) и Евразии (второй самый теплый год в истории наблюдений). Отрицательные аномалии (~20% всех данных) также наблюдались и на суше, и на акваториях океанов. На суше – это Австралия (12% станций зафиксировали 5%-е экстремумы холода), центральные районы Северной Америки, Юго-Восточная Азия. Южная Америка (кроме центра), юг и центр Африки. На акваториях океанов отрицательные аномалии наблюдались в тропических широтах Тихого и Индийского океанов.

4. Из сезонов выделяется теплое лето: в целом по Земному шару (массив HadCRUT5) оно было третьим среди наиболее теплых (сезонная аномалия $+0.30^{\circ}\text{C}$), а на суше Северного полушария (массив T3288) – рекордно теплым ($+0.57^{\circ}\text{C}$). Рекордные летние аномалии зафиксированы также в целом по Северной Америке ($+0.78^{\circ}\text{C}$) и по Евразии ($+0.70^{\circ}\text{C}$). Из глобальных темпера-

тур (Земной шар, полушария) новые месячные рекорды установлены лишь в июне, в среднем по Земному шару ($+0.34^{\circ}\text{C}$) и по Южному полушарию ($+0.25^{\circ}\text{C}$).

5. Локальные оценки линейного тренда за 1976-2022 гг. уверенно подтверждают тенденцию потепления: 97% всех коэффициентов тренда – положительны. Согласно станционным данным (массив T3288, только суша), в полярном и умеренном широтном поясе ни одной станции с тенденцией к похолоданию не обнаружено.

6. Наибольшая интенсивность потепления по региональным оценкам, в среднем за год и во все сезоны, отмечается в Арктическом широтном поясе. Здесь, с учетом океанов (массив HadCRUT5) годовой тренд составил $+0.57^{\circ}\text{C}/10$ лет, сезонный – до $+0.64^{\circ}\text{C}/10$ (весна); на суше Арктики, без учета океанов (массив T3288), оценки выше: $+0.65^{\circ}\text{C}/10$ лет за год и до $+0.79^{\circ}\text{C}/10$ лет (осень). В среднем по территории Европы тренд составил $+0.49^{\circ}\text{C}/10$ лет в среднем за год и до $+0.56^{\circ}\text{C}/10$ лет (зима).

7. В соответствии с региональными оценками тренда для каждого календарного месяца, абсолютным лидером быстрого потепления также является регион «суша Арктики». Здесь средняя скорость потепления, оцененная по станционным данным T3288 за 1976-2022 гг., максимальна в октябре ($+1.00^{\circ}\text{C}/10$ лет), в ноябре ($+0.892^{\circ}\text{C}/10$ лет) и в апреле ($+0.881^{\circ}\text{C}/10$ лет).

Обсуждение

1. Средняя скорость потепления в факторных подгруппах

В данном разделе анализируются временные ряды двух величин, пространственно-осредненных по территории каждого полушария: SAT – температура приземного воздуха; и SST – температура поверхностного слоя воды. Для каждой из этих переменных из комплекта данных Hadley/CRU извлекаются по два полушарных ряда ($\text{SAT}_{\text{СП}}$, $\text{SAT}_{\text{ЮП}}$, $\text{SST}_{\text{СП}}$, $\text{SST}_{\text{ЮП}}$), которые используются без какой-либо корректировки (массивы данных CRUTEM5.0.1.0 и HadSST4.0.1.0). Для температуры приземного воздуха SAT параллельно рассматриваются ряды, рассчитанные по данным станционных наблюдений ИГКЭ (массив T3288, методика осреднения ИГКЭ). Все данные выражены в отклонениях от климатической нормы 1991-2020 гг. Разрешение рядов – один месяц.

В качестве факторов, определяющих разбиение данных на исследуемые подгруппы, рассматриваются: поверхность (суша/море), регион (Северное/Южное полушария) и период оценивания (период с 1976 г./последнее 100-летие).

В табл. 6 представлены оценки линейных трендов рассматриваемых глобальных рядов для всех факторных подгрупп, а ниже (табл. 9) – рассчитываемые по ним показатели k_1 - k_3 , сравнивающие интенсивность (скорость) потепления в сравниваемых подгруппах через отношение соответствующих коэффициентов тренда b .

Таблица 9. Сравнение средней скорости глобального потепления у поверхности Земного шара в разных группах данных, в среднем за год (жирным шрифтом) и для каждого сезона (сверху вниз: зима-весна-лето-осень)

Table 9. Comparison of the average rate of global warming near the surface of the globe in different data groups, on average per year (bold) and for each season (from top to bottom: winter-spring-summer-autumn)

	Показатель	1976-2022						1923-2022							
		ЗШ		СП		ЮП		ЗШ		СП		ЮП			
k ₁	$b_{T3288} / b_{HadSST4}$	2.1	2.2	1.8	2.1	1.7	1.5	1.6	1.9	1.7	2.4	1.1	1.0		
			2.1		2.2		1.1		1.8		2.2		1.0		
			1.7		1.4		1.7		1.3		1.2		1.1		
			2.0		1.6		2.2		1.2		1.2		1.2		
	$b_{CRUTEM5} / b_{HadSST4}$	2.0	2.2	1.8	2.1	1.8	1.6	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		1.5		2.3		1.3		1.2		1.3		
k ₂	$b_{СП} / b_{ЮП}$	1976-2022						1923-2022							
		T3288		CRUTEM		HadSST		T3288		CRUTEM		HadSST			
		2.1	2.3	2.0	2.2	2.1	1.6	1.6	2.0	1.4	1.7	1.0	0.8		
			2.7		2.5		1.4		2.0		1.7		0.9		
			1.9		1.8		2.3		1.3		1.1		1.2		
			1.8		1.7		2.4		1.1		1.0		1.1		
		k ₃	$b_{1976-2022} / b_{1923-2022}$	СП						ЮП					
				T3288		CRUTEM		HadSST		T3288		CRUTEM		HadSST	
2.3	1.9			2.4	2.1	2.2	2.2	1.7	1.7	1.6	1.6	1.1	1.1		
	2.0				2.1		2.1		1.5		1.4		1.3		
	2.6				2.6		2.3		1.8		1.7		1.2		
	3.2				3.0		2.4		1.9		1.8		1.0		

В частности, коэффициент $k_1 = b_{SAT}/b_{SST}$ сравнивает среднюю скорость потепления на территории суши и акваториях океанов; коэффициент $k_2 = b_{СП}/b_{ЮП}$ – скорость потепления в Северном и Южном полушариях; коэффициент $k_3 = b_{1976-2022}/b_{1919-2022}$ – скорость современного потепления (1976-2022) и потепления последнего столетия (1923-2022 гг.). Эти показатели количественно уточняют выводы, основанные на визуальном сопоставлении глобальных временных рядов (рис. 3) и оценок трендов (табл. 6).

Из этих оценок видно:

- При глобальном рассмотрении (в целом по всей территории Земного шара и за год, безотносительно к сезонам) современное приповерхностное потепление на суше протекает вдвое активнее, чем на поверхности океанов ($k_1=2.0-2.1$), в Северном полушарии вдвое интенсивнее, чем в Южном ($k_2=2.0-2.1$), и в Северном полушарии, на континентах и океанах, более чем вдвое ускорилось в сравнении со 100-летним ($k_3=2.2-2.4$). В Южном полушарии на поверхности океанов

ускорения практически не произошло ($k_3=1.1$), а над сушей оно значительно слабее, чем в Северном ($k_3=1.6$).

- Детально проследить, как меняются введенные показатели от сезона к сезону, можно по табл. 9. Здесь отметим лишь одно важное наблюдение: *на 100-летнем временном интервале в зимне-весеннем периоде потепление поверхности океанов активнее протекает не в Северном, а в Южном полушарии ($k_2=0.8-0.9$)*. Напомним, что сезоны во всем тексте указаны по календарю Северного полушария.

В заключение сравним значения показателей k_1 - k_3 по их состоянию на конец 2018 и 2022 гг. (табл. 10). Можно видеть, что контраст "континенты/океаны" (k_1) в последние 4 года сохраняется практически на одном уровне 1.7-1.8, но в северном полушарии разрыв в скорости потепления поверхности суши и океана уменьшается, а в южном – растет. Контраст между полушариями «Северное/Южное» (k_2) также сохраняется на уровне около 2.0 (северное полушарие теплеет в 2 раза быстрее южного), но с тенденцией к его увеличению на акваториях океанов.

Что касается показателя k_3 , то скорость современного потепления по-прежнему больше столетнего, особенно в Северном полушарии и на суше Южного (в 1.5-2.5 раза). Однако, судя по оценкам 2018 г., этот показатель со временем убывает, и уже сейчас в океанах Южного полушария ускорение потепления практически не просматривается ($k_3= 1.05$).

Таблица 10. Сравнение показателей k_1 - k_3 по данным Hadley/CRU (массивы CRUTEM5 (SAT) и HadSST4 (SST))

Table 10. Comparison of indicators k_1 - k_3 according to Hadley/CRU data (CRUTEM5 (SAT) and HadSST4 (SST) arrays)

Конечный год	k_1		k_2		k_3			
	СП	ЮП	SAT	SST	SAT. СП	SAT. ЮП	SST. СП	SST. ЮП
2018	1.82	1.73	2.02	1.93	2.67	1.80	2.98	1.39
2022	1.76	1.84	2.00	2.09	2.35	1.58	2.21	1.05

2. Зональные и меридиональные разрезы и их изменение во времени

Представленные ниже **зональные разрезы** (рис. 8) позволяют проследить изменение режима температуры в трех широтных поясах: умеренные широты южного полушария (40-60° ю.ш.), приэкваториальные широты ($\pm 5^\circ$ по обе стороны от экватора) и умеренные широты северного полушария (40-60° с.ш.) за последние 8 лет. Используются данные о приповерхностной температуре в центрах 5-градусных боксов (массив HadCRUT5, Hadley/CRU). Рассматриваются аномалии температуры относительно базового периода 1991-2020 гг.

Каждый из зональных разрезов построен как меридиональный профиль средних в соответствующем широтном поясе. Другими словами, осредняются значения аномалий температуры в боксах, расположенных внутри указанного широтного пояса вдоль каждого меридиана (от 177.5 з.д. до 177.5 в.д. с шагом

5°). Широтные пояса выбраны как интересные для анализа и наиболее обеспеченные данными. Диаграмма построена в форме «мозаики», когда каждая ячейка координатной сетки закрашивается в соответствии со значением аномалии (см. легенду). Можно видеть, что все 3 фрагмента различны по масштабу изменчивости, как во времени, так и в пространстве.

В умеренных широтах ЮП (в широтном поясе 60-40S) диаграмма имеет мелкомасштабную временную структуру (то есть продолжительных крупных аномалий обоих знаков не наблюдалось), в которой явно прослеживаются «наклонные траектории», как если бы значения со временем «перемещались» с запада на восток.

Такая структура, по-видимому, может создаваться преобладающими в этих широтах западными ветрами и Антарктическим циркумполярным течением, которое формируется под влиянием этих ветров (холодное поверхностное течение, известное как течение Западных ветров). В 2022 году в Тихом океане преобладали отрицательные аномалии температуры, в Атлантическом и Индийском океанах – положительные аномалии, которые при этом наблюдаются около двух лет.

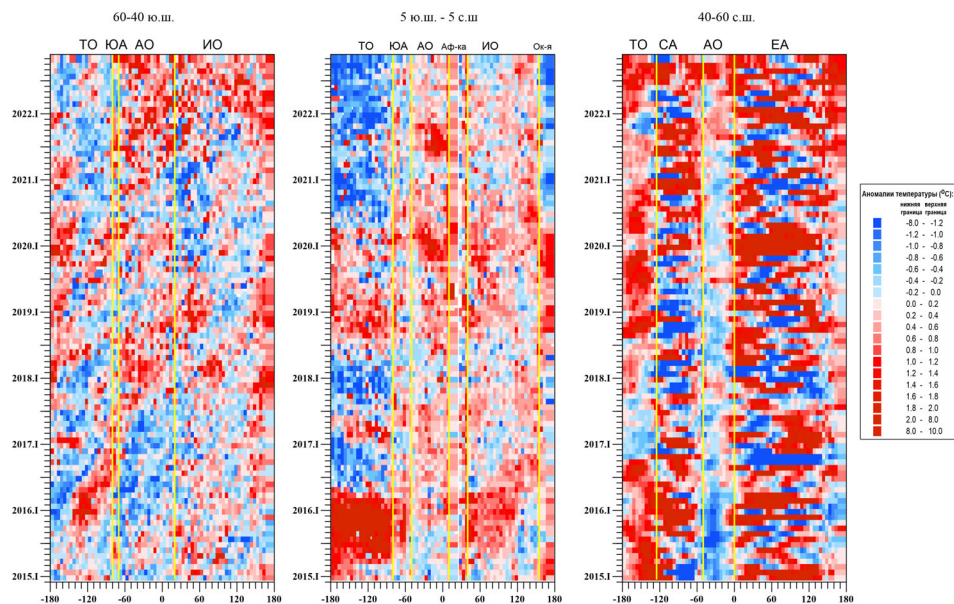


Рисунок 8. Изменение с долготой (по горизонтали) и во времени (по вертикали), с января 2015 г. по декабрь 2022 г., меридиональных профилей аномалий приповерхностной температуры, осредненных внутри избранных широтных поясов. а) 40-60° ю.ш., б) 5° ю.ш.-5° с.ш., в) 40-60° с.ш.

Использованы данные Hadley/CRU (массив HadCRUT5. суша+море)

Базовый период для расчета аномалий: 1991-2020 гг.

Figure 8. Longitude (horizontal) and time (vertical) variation from January 2015 to December 2022 of meridional surface temperature anomaly profiles averaged within selected latitudinal belts. а) 40-60°, б) 5°-5°, с) 40-60°

Hadley/CRU data were used (HadCRUT5 array. land + sea)

Base period for calculating anomalies: 1991-2020

Более крупные по охвату и долгоживущие области отрицательных и положительных аномалий наблюдаются в экваториальном поясе (широтный пояс 5S-5N), в районах Эль-Ниньо/Ла-Нинья в Тихом океане. На рисунке четко просматривается Эль-Ниньо 2015-2016 гг., одно из самых сильных за последние

десятилетия, и наиболее сильные эпизоды Ла-Нинья в 2017-2018 гг. и Ла-Нинья с начала 2020 года. Атлантический океан с середины 2018 года был преимущественно теплым, очень теплыми были два периода: конец 2019 – начало 2020 и середина 2021 года (аномалии более $+2^{\circ}\text{C}$). Следует отметить, что в период тихоокеанского Эль-Ниньо, в Индийском океане также преобладали положительные аномалии. «Наклонные траектории» аномалий обоих знаков с запада на восток прослеживаются, но не так сильно, как в умеренных широтах ЮП.

В умеренном поясе северного полушария (широтный пояс 40-60N) на акваториях океанов интенсивность аномалий (следовательно, и масштаб изменчивости) меньше (особенно заметно в Атлантическом океане), а «время жизни» аномалий больше. В Атлантическом океане до середины 2021 года преобладали месяцы с отрицательными аномалиями температуры, а затем, до конца 2022 г. – с положительными (пять из них в 2022 году – рекордные). В Тихом океане преобладали положительные аномалии температуры. В 2022 г. в семи из двенадцати месяцев были побиты месячные рекорды, а ранг остальных пяти был не выше трех. И лишь в двух случаях рассматриваемого 8-летнего периода в Тихом океане аномалии температуры были отрицательные – это с октября 2016 до октября 2017 и конец 2021 г.

Аномалии на континентах существенно более интенсивны, менее устойчивы и часто имеют большую протяженность в пространстве (иногда охватывали всю Северную Америку или всю Евразию).

Меридиональные разрезы (рис. 9), напротив, изображают изменение во времени зональных профилей, полученных осреднением данных вдоль всего широтного круга. В тропических широтах зональные профили указывают на заметное понижение температуры в 2013 г., скачкообразное повышение в 2015-2017 гг. (сильнейшее за последние десятилетия Эль-Ниньо) и затем – понижение в первой половине 2018 г. и с начала 2020 года (эпизоды Ла-Нинья). В умеренных широтах выделяются периоды значительного потепления и среди них – аномалии выше $+2^{\circ}\text{C}$ продолжительностью более года (середина 2015 – конец 2016 и конец 2019 – конец 2020). Крупные отрицательные аномалии в умеренных широтах наблюдались зимой 2012/13, 2013/14, 2016/17, 2017/18, 2020/21 и в декабре 2021 г.

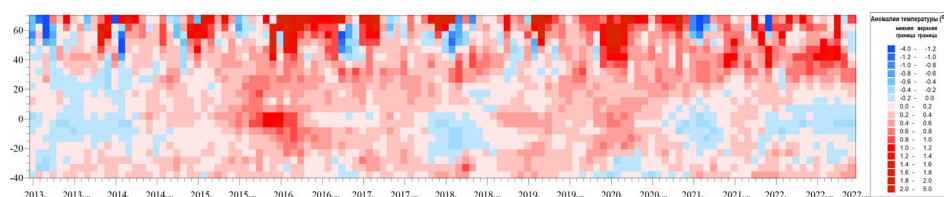


Рисунок 9. Изменение во времени зональных профилей аномалий приповерхностной температуры с дискретностью месяц (январь 2013 – декабрь 2022)

Использованы данные Hadley/CRU (массив HadCRUT5. суша+мре). Базовый период для расчета аномалий: 1991-2020 гг.

Figure 9. Change in time of zonal profiles of surface temperature anomalies with monthly discreteness (January 2013 – December 2022)

Hadley/CRU data (HadCRUT5 array. land + sea) were used. Base period for calculating anomalies: 1991-2020

3. Функция распределения как эффективный способ выявления экстремальных аномалий в метеорологических данных месячного разрешения

Пример такого использования функции распределения приведен на рис. 10, где на верхних фрагментах изображены ряды для глобальных территорий: Земной шар, Северное и Южное полушария, а на нижних – ряды для северных частей Тихого и Атлантического океанов (массив HadCRUT5 и глобальные ряды HadSST4). Кривые на этом рисунке представляют не ход температуры (или ее аномалий) в каждый момент времени, а ее эмпирическую функцию распределения или эмпирические «вероятности не превышения» $F_m = \text{Prob}(x_m \leq X_{ym})$, где каждое значение ряда X_{ym} заменено частотой его не превышения среди данных того же месяца на всем периоде наблюдений 1911-2022 гг. (аналог ранга в упорядоченном по возрастанию временном ряду). Здесь функция распределения использована как способ нормирования данных, при котором **исключается не только сезонный ход средних, но и сезонные различия в масштабах изменчивости.**

Переход к эмпирической функции распределения (наряду с анализом «погодичных» временных рядов) – эффективный прием нормирования метеорологических данных для исключения сезонного хода и выявления крупных аномалий во временных рядах месячного разрешения. При таком представлении временного ряда более четко видны крупные аномалии, их даты и продолжительность, а также наличие тренда и даже его форма. При отсутствии тренда (случайная выборка) переход к вероятностям не превышения приводит к беспорядочным колебаниям вокруг горизонтали « $p=1/N$ » (все значения равновероятны).

В данном случае (рис. 10) вероятности не превышения оценивались для всех лет каждого фиксированного месяца по полной выборке данных для этого месяца за 1911-2022 гг. (так называемый «многолетний месяц»). Напомним, что ось абсцисс соответствует шкале времени (с шагом месяца), а ось ординат – функции распределения $F_m = \text{Prob}(x_m \leq X_{ym})$, т.е. значениям вероятности не превышения. Значение $F_m=0$ соответствует осуществлению рекордно холодного месяца, а $F_m=1$, напротив, рекордно теплого месяца среди одноименных месяцев всех остальных лет (и до, и после текущего года).

Первый фрагмент (рис. 10а) отражает ход глобальной температуры Земного шара (массив HadCRUT5, суша+море) в течение 2010-2022 гг. Четко видна «пауза» в потеплении после 2010 г. и два многомесячных рекорда – в 2015-2016 и 2019-2020, в течение которых на рисунке все точки прижаты к верхнему уровню шкалы ($F_m=1$ – месяцы рекордно теплые), а между которыми вероятность $F_m \geq 0.9$ (глобальная температура не опускалась ниже 90-го процентиля).

На втором фрагменте (рис. 10б) четко видно, что обеспечивает этот экстремальный режим глобальная температура на поверхности Мирового океана (SST, синяя кривая) скорее, чем на поверхности континентов (SAT, зеленая кривая).

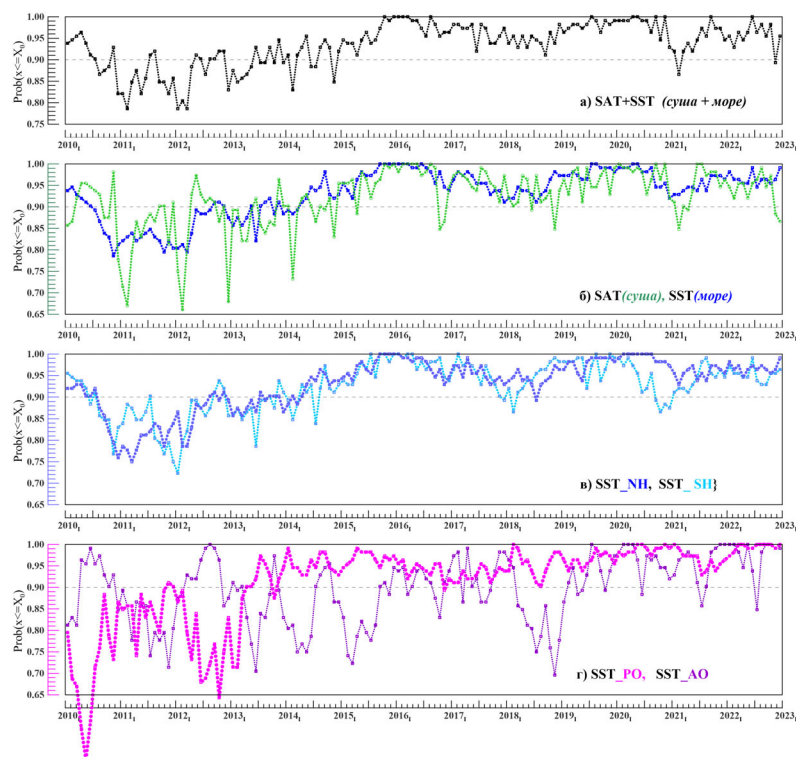


Рисунок 10. Ход вероятностей непревышения месячных аномалий глобальной приповерхностной температуры Земного шара и ее составляющих (январь 2010 – декабрь 2022): а) Глобальная температура: Земной шар (HadCRUT5, суша+море); б) Глобальная температура воздуха над сушей SAT (CRUTEM5, только суша) и воды на поверхности океанов и морей SST (HadSST4, только море); в) Температура воды SST, осредненная по акваториям Северного и Южного полушарий (HadSST4, только море); г) Температура воды SST на акваториях северных частей Тихого (20-65N) и Атлантического (15-70N) океанов (массив HadCRUT5, расчет ИГКЭ)
В первых трех фрагментах (а, б, в) используются оригинальные глобальные временные ряды Hadley/CRU (HadCRUT5, CRUTEM5, HadSST4), в последнем (г) – ряды, рассчитанные по данным Hadley/CRU (массив HadCRUT5) и методике пространственного осреднения ИГКЭ.

Figure 10. Probability of not exceeding monthly anomalies global surface temperature of the Earth and its components (January 2010 – December 2022): a) Global temperature: Earth (HadCRUT5, land + sea); b) Global air temperature over land SAT (CRUTEM5, land only) and water at the surface of oceans and seas SST (HadSST4, sea only); c) SST water temperature averaged over the Northern and Southern hemispheres (HadSST4, sea only); d) SST water temperature in the northern parts of the Pacific (20-65N) and Atlantic (15-70N) oceans (HadCRUT5 array, IGCE calculation)
The first three fragments (a, b, c) use the original Hadley/CRU global time series (HadCRUT5, CRUTEM5, HadSST4), the last one (d) uses the series, calculated using the Hadley/CRU data (HadCRUT5 array) and the IGKE spatial averaging technique. The non-exceedance probabilities are calculated using the IGKE method

Далее, средняя температура поверхности океанов SST в Северном полушарии (рис. 10в), по существу, повторила весь рекордно теплый период для Мирового океана в целом (рис. 10б), хотя до 2017 г. вклад океанов Южного полушария (рис. 10г) может оказаться близким.

Наконец, последний фрагмент (рис. 10г) сравнивает ход вероятностей непревышения для двух океанов северного полушария – Тихого и Атлантического. Характер колебаний во временном ряду для Тихоокеанского региона очень близок к анализируемому ряду для океанов всего Северного полушария. В результате, в северном Тихом океане экстремально высокий уровень температуры сохраняется уже с июня 2014 г. и пока не завершился. На текущий момент в Тихом океане во все месяцы 2022 года наблюдалась температура не ниже 99-перцентиля (все 12 месяцев имели ранг не выше третьего).

Представляется, что выявленная чрезвычайно длительная аномалия в северном Тихом океане должна быть связана с другими глобальными экстремумами и явлениями. Природу этой аномалии и этой связи, по-видимому, необходимо исследовать более тщательно, уделив также больше внимания океанам Южного полушария (хотя и менее уверенно).

Благодарности

За поддержку, оказанную разным разделам этой работы, авторы выражают благодарность проектам:

– «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. (2017б) Особенности температурных аномалий у поверхности земного шара в 2016 году, *Фундаментальная и прикладная климатология*, № 1, с. 124-146.

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, doi:10.21513/2410-8758-2021-2-26-56.

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., Рочева, Э.В. (2017а) 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. (2016) Климатические особенности температурного режима у поверхности земли в 2015 г., *Фундаментальная и прикладная климатология*, № 1, с. 104-136.

ИГКЭ (2022) *Мониторинг изменений климата Земного шара*, Электронный ресурс, URL: <http://www.igce.ru/performance/publishing>.

Ранькова, Э.Я., Самохина, О.Ф., Антипина, У.И. (2022) Особенности температурного режима у поверхности Земного шара в 2021, *Фундаментальная и прикладная климатология*, Т. 8, № 2, с. 258-290.

ЦМКП. (2016) *Решение Центральной методической комиссии по гидрометеорологическим и гелиогеофизическим прогнозам от 20 декабря 2016 г.* Электронный ресурс, URL: <http://method.meteorf.rum>.

Berkeley, Earth (2023) *Global Temperature Report for 2022, Posted on January 12, 2023 by Robert Rohde*, <https://berkeleyearth.org/global>.

Byrne, Michael (2020) *Why does land warm up faster than the oceans?* Guest post: Why does land warm up faster than the oceans? (carbonbrief.org).

Hausefather, Zeke (2023) *State of the climate. How the world warmed in 2022*, <https://www.carbonbrief.org/state-of-the-climate-how-the-world-warmed-in-2022/>.

IPCC (2022) *IPCC Sixth Assessment Report, Climate Change 2022, Impacts, Adaptation and Vulnerability*, <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/>.

IPCC (2023) *Carbon Brief's definitive guide to the entire IPCC sixth assessment cycle*, https://www.carbonbrief.org/wp-content/uploads/2023/03/IPC_1435-tn1-1550x804.jpeg.

WMO (2022a) *Provisional State of Climate in 2022. Eight warmest years record with less surprise in climate change impacts*, Press Release, no. 06112022.

WMO (2022b) *State of Climate in 2022, Extreme events and major impacts*, Press Release, no. 1201202312.

WMO (2022b) *United in Science. We are heading in the wrong direction*, Press Release, no.13092022.

WMO (2023) *State of the Global Climate in 2022*, WMO, no. 1316, ISBN 978-92-63-11316-0.

References

Gruza, G.V., Ran'kova, E.Ya., Rocheva, E.V., Samokhina, O.F (2017b) *Osobennosti temperaturnykh anomalii u poverkhnosti zemnogo shara v 2016 godu* [Features of temperature anomalies near the surface of the globe in 2016], *Fundamental'naya i prikladnaya klimatologiya*, no 1, pp. 124-146.

Gruza, G.V., Ran'kova, E.Ya., Samokhina, O.F. (2021) *Osobennosti temperaturnogo rezhima u poverkhnosti Zemnogo shara v 2020 godu* [Features of

the temperature regime near the surface of the Earth in 2020], *Fundamental'naya i prikladnaya klimatologiya*, no. 2, pp. 26-56, doi:10.21513/2410-8758-2021-2- 26-56.

Gruza, G.V., Ran'kova, E.Ya., Korneva, I.A., Samokhina, O.F., Shchenin, M.V. (2019) Osobennosti temperaturnogo rezhima u poverkhnosti zemnogo shara v 2018 godu [Features of the temperature regime near the surface of the globe in 2018], *Fundamental'naya i prikladnaya klimatologiya*, no. 1, pp. 97-127.

Gruza, G.V., Ran'kova, E.Ya., Korneva, I.A., Samokhina, O.F., Antipina, U.I. (2020) Osobennosti temperaturnogo rezhima u poverkhnosti zemnogo shara v 2019 godu, *Fundamental'naya i prikladnaya klimatologiya*, no. 1, pp. 89-122.

Gruza, G.V., Rankova, E.Ya., Rocheva, E.V., (2017a) Metodika «Monitoring izmenenij klimata Zemnogo shara: prizemnaya temperatura» i rezul'taty ee ispytaniya [Methodology "Monitoring of changes in the global climate: surface temperature" and the results of its testing], *Rezul'taty ispytaniya novyh i usovershenstvovannyh tekhnologij, modelej i metodov gidrometeorologicheskikh prognozov*, no. 44, pp. 3-11.

Gruza, G.V., Ran'kova, E.YA., Rocheva, E.V., Samokhina, O.F. (2016) Klimaticheskiye osobennosti temperaturnogo rezhima u poverkhnosti zemli v 2015 g., [Climatic features of the temperature regime near the earth's surface in 2015], *Fundamental'naya i prikladnaya klimatologiya*, no. 1, pp. 104-136.

IGCE (2022) *Monitoring izmenenij klimata Zemnogo shara* [Global Climate change monitoring], available at: <http://www.igce.ru/performance/publishing>.

Ran'kova, E.YA, Samokhina, O.F., Antipina, U.I. (2022) Osobennosti temperaturnogo rezhima u poverkhnosti Zemnogo shara v 2021 [Features of the temperature regime near the surface of the Earth in 2021, *Fundamental'naya i prikladnaya klimatologiya*, vol. 8, no. 2, pp. 258-290.

CMCP (2016) *Reshenie Central'noj metodicheskoy komissii po gidrometeorologicheskim I geliogeofizicheskim prognozamot 20 dekabrya 2016 g.* [Decision of the Central Methodical Commission for Hydrometeorological and Heliogeophysical Forecasts of December 20, 2016], available at: <http://method.meteorf.rum>.

Berkeley, Earth (2023) *Global Temperature Report for 2022*, Posted on January 12, 2023 by Robert Rohde, <https://berkeleyearth.org/global>.

Byrne, Michael (2020) *Why does land warm up faster than the oceans?* Guest post: Why does land warm up faster than the oceans? (carbonbrief.org).

Hausefather, Zeke (2023) *State of the climate. How the world warmed in 2022*, <https://www.carbonbrief.org/state-of-the-climate-how-the-world-warmed-in-2022/>.

IPCC (2022) *IPCC Sixth Assessment Report, Climate Change 2022, Impacts. Adaptation and Vulnerability*, <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/>.

IPCC (2023) *Carbon Brief's definitive guide to the entire IPCC sixth assessment cycle*, https://www.carbonbrief.org/wp-content/uploads/2023/03/IPC_1435-tn1-1550x804.jpeg.

WMO (2022a) *Provisional State of Climate in 2022. Eight warmest years record witness surge in climate change impacts*, Press Release, no. 06112022.

WMO (2022b) *State of Climate in 2022, Extreme events and major impacts*, Press Release, no. 1201202312.

WMO (2022в) *United in Science. We are heading in the wrong direction*, Press Release, no.13092022.

WMO (2023) *State of the Global Climate in 2022*, WMO, no. 1316, ISBN 978-92-63-11316-0.

Статья поступила в редакцию (Received): 25.04.2023.

Статья доработана после рецензирования (Revised): 15.05.2023.

Принята к публикации (Accepted): 20.05.2023.

Для цитирования / For citation:

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.

Rankova, E.Ya., Samokhina, O.F., Antipina, U.I. Smirnov, V.D. (2023) Features of the surface temperature regime over the globe in 2022, *Fundamental and Applied Climatology*, vol. 9, no. 3, pp. 330-368, doi:10.21513/2410-8758-2023-3-330-368.

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>.
