

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего
образования
«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ»
Кафедра прикладной океанографии и комплексного управления прибрежными
зонами

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(бакалаврская работа)

«Современные изменения климата и их возможные причины»

Исполнитель: Нефедьев Николай Викторович

Научный руководитель: доктор географических наук, профессор
Малинин Валерий Николаевич

«К защите допускаю»

Заведующий кафедрой


(подпись)

Кандидат географических наук

(ученая степень, ученое звание)

Хаймина Ольга Владимировна

(фамилия, имя, отчество)

«27» 06 2025.

г. Санкт-Петербург

2025 год

ОГЛАВЛЕНИЕ

"Современные изменения климата и их причины"Ошибка! Закладка не определена

ОГЛАВЛЕНИЕ	1
Введение	3
Глава 1. Физико-географическая характеристика глобальных климатических изменений	5
1.1. Современные представления о климатической	5
системе Земли	5
1.2. Естественные и антропогенные факторы изменения климата	7
1.3. Географические особенности проявления глобального потепления в различных регионах мира	14
1.4. Основные последствия потепления: ледники, уровень моря, экосистемы	17
Глава 2. Материалы и методы	24
Глава 3. Результаты исследования	27
3.1 Температура воздуха	27
3.2 Теплосодержание океана	31
3.3 Площадь морского льда	39
3.4 Обсуждение результатов	42
Заключение.....	46
Практические рекомендации	48
Список литературы	50

Введение

Изменение климата в настоящее время представляет собой одну из наиболее значимых глобальных проблем, влияющих как на природную среду, так и на социально-экономические процессы. В последние десятилетия фиксируется устойчивая тенденция к повышению глобальной средней температуры, что сопровождается многочисленными последствиями: таянием ледников, повышением уровня мирового океана, учащением экстремальных погодных явлений и изменением режима осадков.

Актуальность настоящего исследования обусловлена необходимостью более глубокого понимания механизмов, темпов и географической неоднородности климатических изменений. Особое внимание уделяется выявлению причин потепления, его физико-географическим проявлениям и моделированию возможных сценариев развития, что критически важно для разработки адаптационных и смягчающих стратегий.

Целью работы является комплексный анализ современных климатических изменений с позиций физико-географической оценки и математического моделирования процесса глобального потепления.

Для достижения поставленной цели были сформулированы следующие задачи:

1. Проанализировать современное состояние климатической системы Земли и ключевые факторы, влияющие на её изменение;
2. Охарактеризовать географические особенности проявления потепления в различных регионах мира;
3. Собрать и систематизировать метеорологические и климатические данные из международных источников;
4. Провести статистический анализ временных рядов температуры и других климатических параметров;
5. Построить модель прогнозирования климатических изменений на основе собранных данных;

6. Оценить возможные последствия прогнозируемых изменений климата.

Объектом исследования являются глобальные и региональные климатические изменения.

Предмет исследования — физико-географические характеристики и математические модели, описывающие потепление климата.

Методы исследования включают анализ научной литературы, статистическую обработку данных, построение трендов и регрессионных моделей, а также элементы геоинформационного анализа.

Научная новизна работы заключается в комплексной оценке климатических изменений с использованием современных методов анализа и моделирования на основе актуальных данных наблюдений.

Практическая значимость исследования проявляется в возможности применения полученных результатов при разработке климатических стратегий, прогнозировании экологических рисков и в образовательных целях.

Работа состоит из введения, трёх глав, заключения, списка литературы и приложений. В первой главе рассматриваются теоретические и физико-географические аспекты изменения климата. Вторая глава посвящена описанию источников данных и анализу климатических параметров. В третьей главе проводится математическое моделирование и прогнозирование климатических изменений.

Глава 1. Физико-географическая характеристика глобальных климатических изменений

1.1. Современные представления о климатической системе Земли

Глобальное изменение климата – это долговременное повышение средней температуры климатической системы Земли, наблюдаемое на протяжении более века, сопровождающееся широкомасштабными изменениями в атмосфере, океане, криосфере и биосфере. В данном разделе представлен современный взгляд на климатическую систему Земли, факторы изменения климата (естественные и антропогенные), географическую неоднородность проявлений глобального потепления, а также ключевые последствия потепления – таяние льдов, повышение уровня моря и влияние на экосистемы.

Климатическая система Земли рассматривается как сложная, динамичная система, включающая пять основных компонентов: атмосферу, гидросферу (океаны и воды суши), криосферу (ледяные покровы и вечная мерзлота), литосферу (земная поверхность) и биосферу. Эти компоненты находятся во взаимном взаимодействии, перераспределяя энергию и массу. Ключевым внешним источником энергии для климатической системы является Солнце; солнечная радиация поглощается поверхностью Земли и переизлучается в виде теплового инфракрасного излучения. Атмосфера с содержащимися в ней парниковыми газами задерживает значительную часть этого тепла, создавая парниковый эффект, благодаря которому средняя температура у поверхности Земли составляет около $+14^{\circ}\text{C}$ вместо примерно -19°C , которые бы наблюдались при отсутствии в атмосфере парниковых газов. Таким образом, парниковый эффект в естественном виде является необходимым условием существования жизни, поддерживая климат в обитаемом состоянии [14, 17, 21].

Современное понимание климатической системы подчёркивает её целостность и сложные обратные связи. Атмосфера взаимодействует с океаном и сушей: например, океаны аккумулируют и перераспределяют колоссальные объёмы тепла и влаги, сглаживая колебания климата. По оценкам, около 90%

избыточной тепловой энергии, накопленной в климатической системе за последние десятилетия, было поглощено именно мировым океаном, тогда как потепление суши, таяние льдов и нагрев атмосферы суммарно аккумулировали менее 10% этой энергии. Океан выступает главным регулятором климата, поглощая избыточное тепло и двуокись углерода, и распределяя энергию с помощью океанических течений. Криосфера (ледники, ледяные щиты, морской лёд, снежный покров) отражает значительную часть солнечной радиации (высокое альбедо) и влияет на тепловой баланс; её сокращение приводит к положительной обратной связи в виде усиления нагрева поверхности. Биосфера (растительность, почвы, животные организмы) обменивается влагой, углекислым газом и теплом с атмосферой, участвуя в круговоротах углерода и воды и смягчая либо усиливая климатические изменения. Таким образом, климатическая система – это единый комплекс, где изменения в одном звене (например, концентрации атмосферных газов или площади ледников) оказывают влияние на все остальные [2, 4, 6, 7, 10].

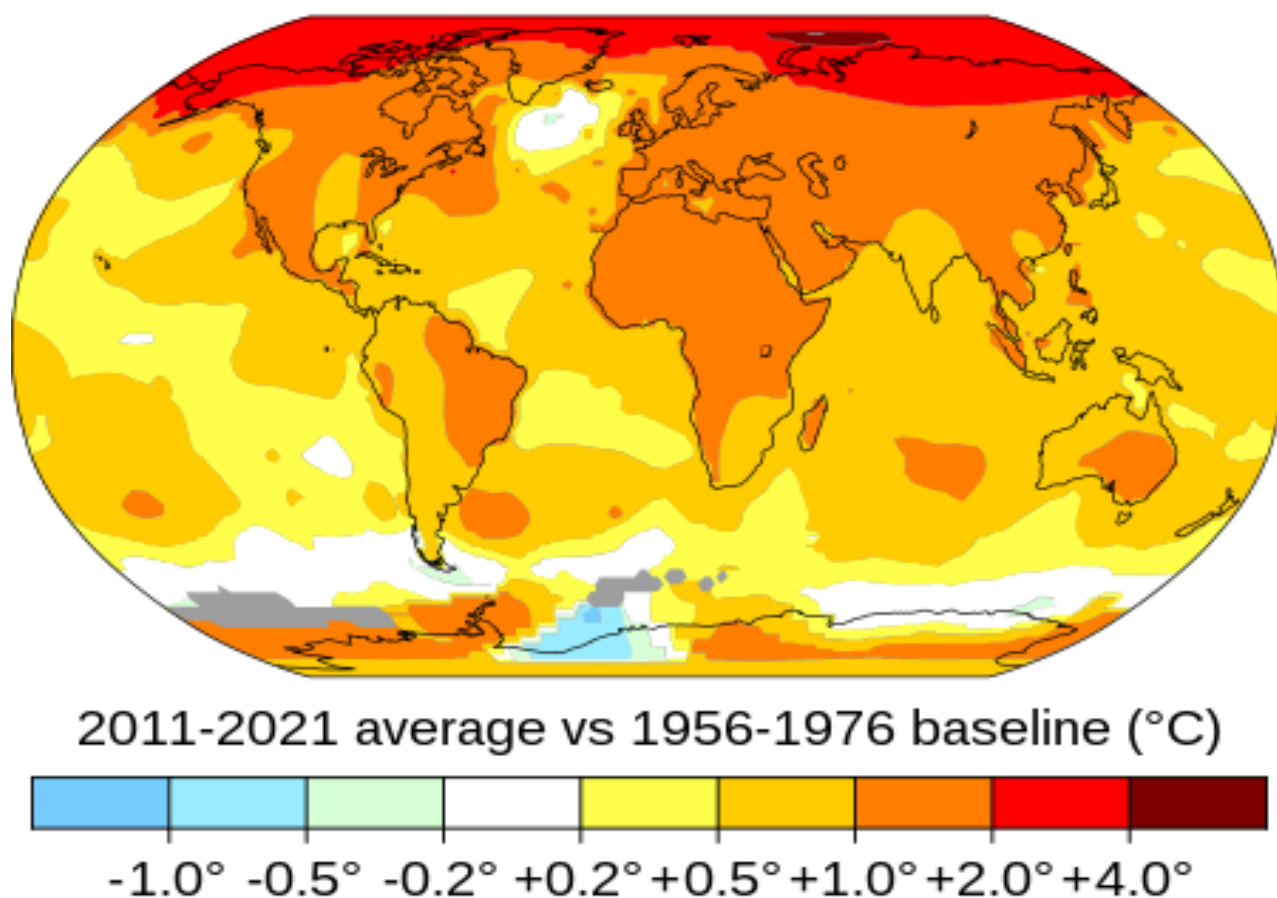
Современные методы изучения климатической системы объединяют наблюдательные данные, палеоклиматические реконструкции и численные модели. За последние десятилетия объем климатических данных существенно возрос, появились высокоточные спутниковые наблюдения, а вычислительные модели климата (атмосферно-океанические и Earth System Models) достигли высокой сложности и реалистичности. Это позволило учёным лучше понять функционирование климатической системы и количественно оценить влияние различных факторов. В частности, с высокой достоверностью установлено, что современное потепление выходит за рамки естественной изменчивости прошлого и не может быть объяснено природными причинами без учёта антропогенного воздействия. Следующие разделы детально рассмотрят эти факторы.

1.2. Естественные и антропогенные факторы изменения климата

Изменчивость климата Земли в геологическом прошлом обуславливалась, прежде всего, естественными факторами. К естественным факторам относятся:

- изменения орбитальных параметров планеты (циклы Миланковича), которые вызывали чередование ледниковых и межледниковых эпох на протяжении многих сотен тысяч лет;
- изменения солнечной активности – 11-летние циклы и более длительные вариации, влияющие на приток солнечной энергии;
- вулканические извержения – крупные извержения выбрасывают аэрозоли и пепел в стратосферу, понижая глобальную температуру на 1–3 года за счёт отражения солнечного света.

Рисунок 1 – Изменение температуры за последние 50 лет



Изменчивость климата Земли в геологическом прошлом была обусловлена действием как внешних, так и внутренних геофизических факторов. Эти процессы происходили на протяжении сотен тысяч и миллионов лет, формируя чередование ледниковых и межледниковых эпох, изменение климатических зон и биоценозов [19, 20, 27].

К внешним факторам изменения климата относятся процессы, происходящие за пределами земной климатической системы, но оказывающие на неё значительное влияние. Прежде всего, это изменения солнечной активности, включая 11-летние циклы и более длительные вариации, которые влияют на количество поступающей к Земле солнечной энергии. Немаловажную роль играют и орбитальные параметры планеты (так называемые циклы Миланковича) — изменения эксцентриситета орбиты, наклона оси и прецессии, которые регулируют распределение солнечного излучения по широтам и сезонную контрастность. К внешним факторам также относят космические лучи, метеоритную активность и гравитационное воздействие других небесных тел.

К внутренним геофизическим факторам относят процессы, происходящие в пределах земной оболочки и атмосферы. Одним из наиболее заметных факторов является вулканическая активность: при крупных извержениях в атмосферу выбрасываются аэрозоли и пепел, которые временно снижают прозрачность атмосферы, уменьшая поступление солнечного тепла и вызывая кратковременное похолодание. Также значительное влияние на климат оказывают тектонические процессы, определяющие расположение континентов и океанов, морские течения и обмен веществ между литосферой, гидросферой и атмосферой. Помимо этого, важную роль играют внутренние колебания климатической системы, такие как Эль-Ниньо – Южное колебание (ENSO), Североатлантическое колебание, Тихоокеанское и Арктическое декадные колебания, которые обуславливают межгодовую и десятилетнюю изменчивость климата [1, 4, 5, 18, 20].

Также внутренние колебания климатической системы, такие как Эль-Ниньо и Южное колебание (ENSO), Североатлантическое колебание и другие, приводят к временному перераспределению тепла и влаги между регионами, вызывая аномально тёплые или холодные, влажные или сухие периоды в различных частях света. Однако все эти природные факторы в совокупности не объясняют масштаба и скорости наблюдаемого с середины XX века глобального потепления. Например, спутниковые измерения показывают, что за последние десятилетия общий поток энергии от Солнца не демонстрирует устойчивого роста, а даже незначительно снижался в отдельные периоды, тогда как температура Земли продолжала расти. Это указывает на второстепенную роль солнечного фактора в нынешних климатических изменениях.

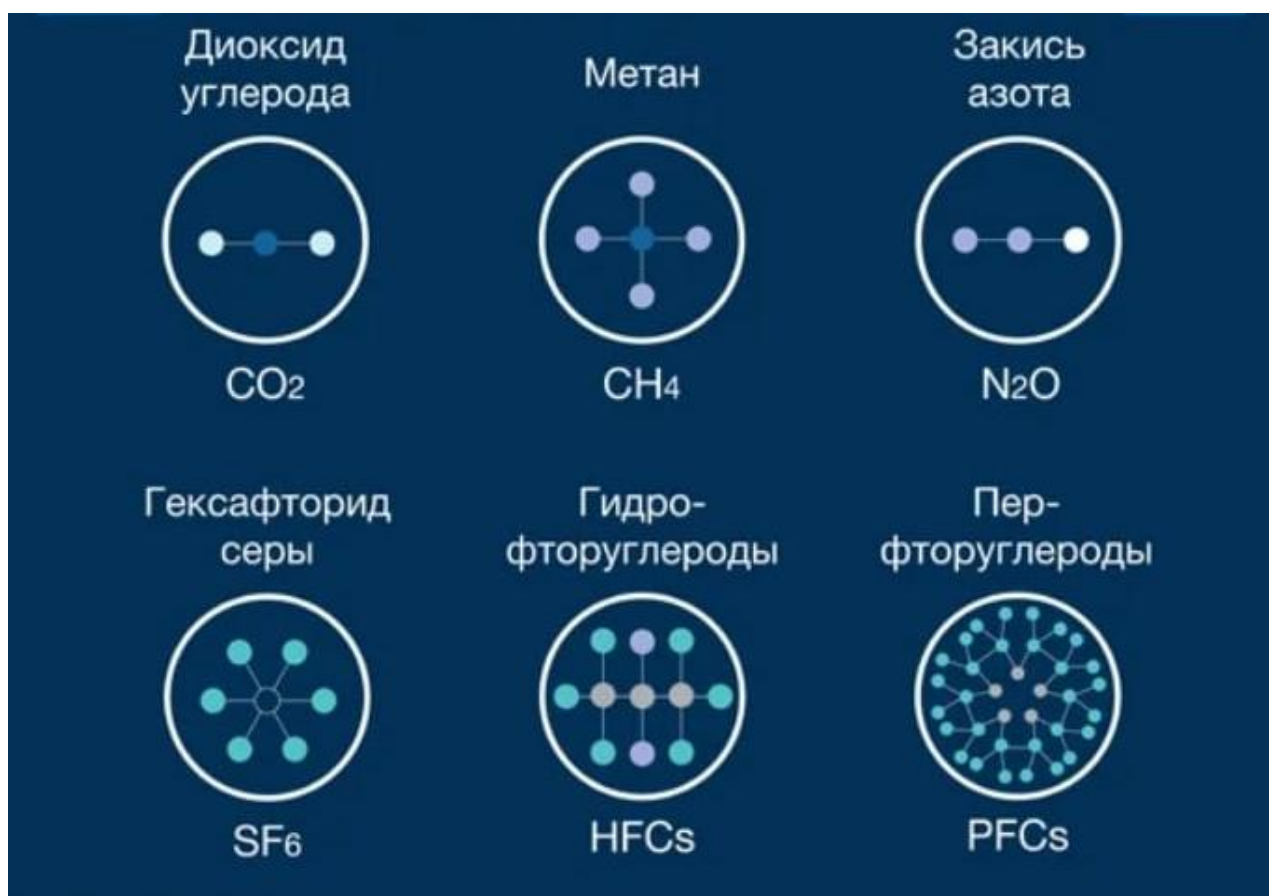
Вулканические извержения, хотя и влияют на климат в краткосрочной перспективе, в долгосрочном плане вызывают скорее эпизодические похолодания (например, извержение Пинатубо в 1991 г. понизило глобальную температуру примерно на 0,5 °C на следующий год). Таким образом, ни один из известных природных драйверов не способен объяснить продолжающееся десятилетиями синхронное потепление атмосферы, океана и суши.

Основной версией изменения климата сейчас считается прежде всего рост концентрации парниковых газов в атмосфере вследствие человеческой деятельности. С промышленной революции (~1750 г.) содержание диоксида углерода (CO₂), метана (CH₄), закиси азота (N₂O) и ряда других парниковых газов непрерывно повышается из-за сжигания ископаемого топлива, вырубки лесов, развития сельского хозяйства и промышленности. Это только МГЭИК. В России

В 2019 году концентрация CO₂ достигла ~410 ppm, что превышает предindustrielle уровень почти на 50% и, по оценкам, является самым высоким значением как минимум за последние 2 миллиона лет истории Земли. Аналогично, концентрации метана и закиси азота сейчас беспрецедентны за 800 тысяч лет – т.е. за весь период, охваченный данными ледниковых кернов

Антарктиды. Такое стремительное изменение состава атмосферы не имеет аналогов в новейшей геологической истории [2, 15, 17, 19, 24].

Рисунок 2 – Газы, входящие в состав парниковых газов



Рост парниковых газов приводит к усилению парникового эффекта: дополнительная доля теплового излучения задерживается в атмосфере, нарушая энергетический баланс планеты.

Межправительственная группа экспертов по изменению климата (IPCC) в своём Шестом оценочном докладе (2021 г.) констатировала, что влияние человека на климатическую систему однозначно привело к её потеплению – потепление на ~1,1 °C по сравнению с доиндустриальным уровнем полностью объясняется совокупным воздействием антропогенных факторов. Отдельный вклад делают разные газы и аэрозоли: так, повышение концентрации CO₂, CH₄ и N₂O обеспечивает основное положительное радиационное воздействие (forcing), тогда как выбросы аэрозолей (сульфатных и др.) частично

компенсируют потепление, отражая солнечный свет и способствуя образованию облаков (охлаждающий эффект) [9, 10, 14, 22].

Тем не менее, суммарный радиационный баланс от всех антропогенных факторов положителен, что и вызвало ускоренное повышение глобальной температуры во второй половине XX и начале XXI века.

Одним из ключевых механизмов антропогенного воздействия на климат является увеличение концентрации парниковых газов. Эти газы отличаются по происхождению, времени жизни в атмосфере и климатическому потенциалу. В таблице 1 приведены основные характеристики наиболее значимых парниковых газов.

Таблица 1 – Основные парниковые газы и их характеристики

Газ	Источник эмиссии	Время жизни в атмосфере	Потенциал потепления (GWP, за 100 лет)
CO ₂	Сжигание ископаемого топлива	100–1000 лет	1
CH ₄	Сельское хоз-во, разложение	~12 лет	28–34
N ₂ O	Удобрения, промышленность	~114 лет	265–298
CFCs	Холодильное оборудование и т.д.	до 50 лет и более	1000+

Как видно из таблицы, углекислый газ (CO₂), несмотря на сравнительно низкий потенциал потепления, оказывает наибольшее влияние на климат из-за его высокой концентрации и длительного времени жизни. Метан (CH₄) и закись азота (N₂ O) обладают значительно большим потенциалом потепления, но присутствуют в атмосфере в меньших количествах. Гидрофторуглероды и фреоны имеют самый высокий GWP и требуют особого внимания при регулировании эмиссий.

Рисунок 3 – Источники парниковых газов



Последующее изложение охватывает географические проявления этих изменений и их последствия.

Климатическая система Земли представляет собой сложный, многокомпонентный механизм, включающий в себя многочисленные обратные связи между атмосферой, океанами, криосферой и биосферой. Изменения в этой системе происходят под влиянием как естественных, так и антропогенных факторов, действующих в различном масштабе времени и пространства. В связи с этим, в научном сообществе продолжают обсуждения относительно степени влияния различных факторов на современные климатические тенденции.

Межправительственная группа экспертов по изменению климата (IPCC), на основе анализа многочисленных наблюдений и моделей, приходит к выводу, что, с высокой вероятностью, основную роль в потеплении климата с середины XX века сыграло антропогенное воздействие, в первую очередь – рост концентрации парниковых газов, таких как диоксид углерода, метан и закись азота. Эта точка зрения поддерживается большинством климатологов и

отражена в ряде международных докладов и научных публикаций [4, 9, 14, 17, 23, 28].

Тем не менее, некоторые исследователи выражают сомнения в однозначности такого вывода. Указывается на значительную роль внутренних колебаний климатической системы, океанических процессов, изменений солнечной и вулканической активности, а также на недостаточную изученность некоторых геофизических механизмов, включая циркуляцию вод Мирового океана, сложные взаимодействия между атмосферными слоями и влияние космических факторов. Также обсуждаются вопросы возможной переоценки вклада антропогенного углекислого газа и недооценки естественной изменчивости.

1.3. Географические особенности проявления глобального потепления в различных регионах мира

Глобальное потепление неравномерно проявляется в разных регионах Земли. Температура повышается повсеместно, однако скорость и масштаб потепления варьируют в зависимости от географического положения, окружающей среды (океан или суша) и других условий. В целом, суша нагревается значительно сильнее и быстрее, чем поверхность океана, из-за меньшей тепловой ёмкости континентов и различий в испарении. По данным IPCC, к началу XXI века (период 2011–2020 гг.) средняя приземная температура над сушей выросла примерно на $1,59^{\circ}\text{C}$ относительно доиндустриального периода, тогда как над мировым океаном – на $0,88^{\circ}\text{C}$. То есть континентальные регионы испытывают более сильное потепление, чем мировое среднее. Особенно быстрыми темпами теплеет климат в северных высоких широтах [12, 18, 27].

Явление, известное как арктическое усиление, приводит к тому, что Арктика нагревается в 2–4 раза быстрее глобального среднего из-за положительных обратных связей, таких как таяние морского льда и снижение отражательной способности поверхности. Так, по наблюдениям, средняя температура воздуха в Арктике за последние полвека росла более чем вдвое быстрее, чем в целом по планете.

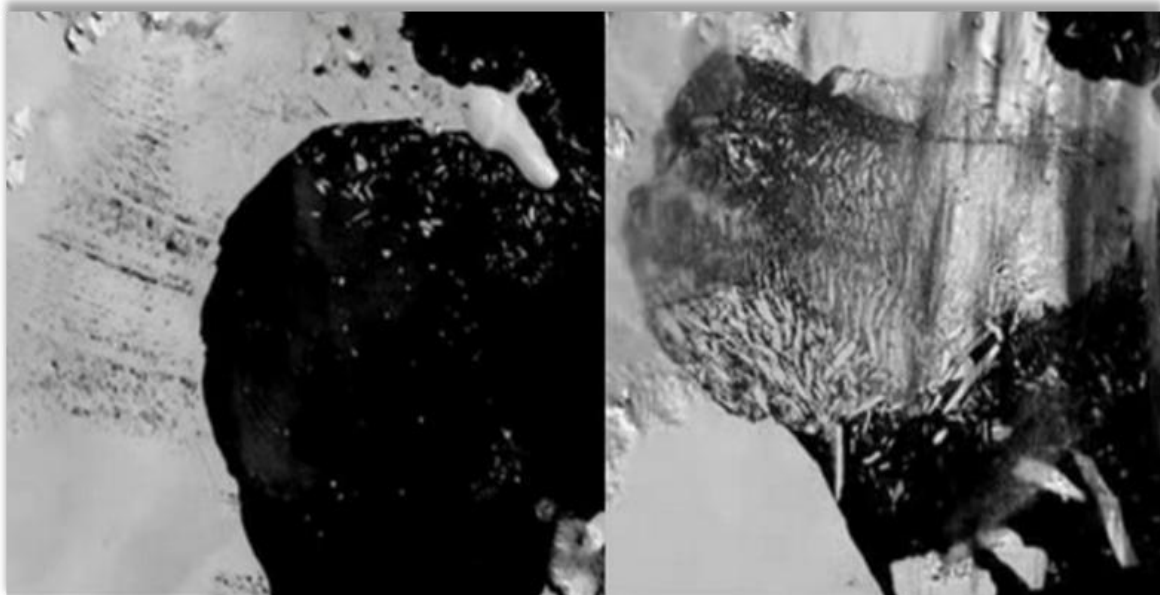


Рис. 4 – Изменение распространения

ранённости льдов в Арктике

Потепление климата неравномерно распределено по земному шару. В зависимости от географического положения и особенностей подстилающей поверхности, одни регионы прогреваются значительно быстрее других. Сравнение темпов потепления в различных регионах представлено в таблице 2.

Таблица 2 – Темпы потепления в разных регионах мира

Регион	Потепление (относительно доиндустриального уровня), °C
Глобально	+1.1
Суша	+1.59
Океаны	+0.88
Арктика	до +3.0
Сибирь (летом)	до +2.5
Тропики	~+1.0

Как следует из таблицы, наиболее интенсивное потепление фиксируется в Арктике и на континентальных территориях северного полушария. В то же время, над океанами и в тропических зонах темпы повышения температуры ниже. Эти различия подтверждают существование региональных климатических аномалий и эффектов, таких как арктическое усиление.

В результате площади летнего морского льда в Арктике сократились примерно на 40% с начала спутниковых наблюдений (1980-е годы) и, по палеоклиматическим данным, являются минимальными как минимум за последнее тысячелетие. Антарктика пока прогревается медленнее из-за массивной ледяной поверхности и особенностей циркуляции атмосферы и океана, однако и там на окраинах шельфовых ледников фиксируются потепление и ускоренное таяние [2, 5, 9].

Помимо температуры, глобальное изменение климата проявляется в перестройке режима осадков и экстремальных погодных событий, причем эти изменения различаются по регионам. Интенсификация гидрологического цикла – один из ключевых эффектов потепления: тёплая атмосфера удерживает больше влаги, и в глобальном масштабе наблюдается рост суммарных осадков и учащение сильных ливней. Однако распределение осадков становится более контрастным: влажные регионы (например, экваториальные и высокие широты) получают ещё больше осадков, а засушливые субтропические зоны – ещё меньше.

По оценкам, в высоких широтах и на участках муссонов среднегодовое количество осадков уже возросло с середины XX века, тогда как на широтах около 30° (Средиземноморье, Ближний Восток, Центральная Азия, юго-запад США и др.) фиксируется тенденция к снижению осадков и усилению засух. Муссонные системы демонстрируют сложные изменения: в некоторых регионах (Южная Азия, Восточная Азия) муссонные дожди усилились, в других – сместился сезон или уменьшилась продолжительность сезона дождей.

Географическое распределение влаги меняется: влажные места становятся влажнее, а сухие – суше, что усиливает риск наводнений в одних регионах и длительных засух – в других, а также усиливается дифференциация между влажными и засушливыми регионами [19, 25, 31].

Экстремальные погодные явления также претерпевают изменения по мере потепления климата, и характер этих изменений различается в разных частях мира. В целом, с ростом глобальной температуры возрастают частота и интенсивность тепловых экстремумов – аномальных жар и волн тепла. Например, рекордные засухи и экстремальные волны жары участились в Европе, Северной Америке, Австралии и Азии в последние десятилетия, зачастую устанавливая новые температурные максимумы, а число экстремальных климатических явлений растёт.

В тропиках наблюдается учащение мощных тропических циклонов (ураганов/тайфунов) максимальных категорий, и увеличивается доля осадков,

выпадающих при этих штормах. Ослабление высотного струйного течения вследствие сокращения температурного градиента между полярными областями и тропиками может приводить к «застреванию» атмосферных блокирующих процессов, вызывая затяжные периоды экстремальной жары или осадков в средних широтах. В некоторых регионах (например, в Западной Европе, Южной Азии) уже прослеживается рост частоты катастрофических наводнений из-за сочетания более сильных ливней и изменения характера атмосферной циркуляции [3, 10, 18].

В других – таких как внутренние части Африки и Австралии – усиливаются засушливые аномалии и пожароопасные условия. Каждый регион планеты уже испытывает на себе множественные эффекты изменений климата, и при дальнейшем потеплении эти эффекты будут нарастать. Например, в горных областях потепление приводит к деградации горных ледников и мерзлоты, что влияет на сток рек; в прибрежных зонах подъём уровня моря усиливает эрозию берегов и засоление почв; в полярных районах – таяние вечной мерзлоты грозит высвобождением парниковых газов. Таким образом, география глобального потепления проявляется в том, что разные части земного шара испытывают различные сочетания климатических изменений – от повышения температуры и сдвига сезонов до изменений осадков, уровня моря и частоты экстремальных событий.

1.4. Основные последствия потепления: ледники, уровень моря, экосистемы

Продолжающееся потепление уже влечет за собой многочисленные физические и биологические последствия, масштаб которых возрастает с увеличением температуры. К наиболее значимым последствиям глобального потепления относятся: таяние ледников и сокращение криосферы, повышение уровня Мирового океана, а также негативное воздействие на экосистемы по всему миру. Рассмотрим каждый из этих аспектов.

Глобальное потепление вызывает ускоренное таяние практически всех видов ледяных накоплений на Земле. Горные (материковые) ледники по всем континентам стремительно теряют массу. С 1950-х годов отмечается практически повсеместный отступление ледников – скорость их сокращения в последние десятилетия не имеет аналогов как минимум за последние 2000 лет.

По данным Всемирной метеорологической организации, в период 2011–2020 гг. толщина горных ледников сокращалась в среднем на примерно 1 метр в год, что представляет собой беспрецедентную скорость деградации ледникового покрова. Такое истончение ледников уже приводит к уменьшению запасов пресной воды в летний сезон в горных регионах Азии, Южной Америки, Европы, угрожая водоснабжению многих миллионов людей, зависящих от стока ледниковых рек [36].

Полярные ледяные щиты Гренландии и Антарктиды также теряют массу с нарастающей скоростью. Антарктический ледяной щит в последнем десятилетии (2011–2020 гг.) терял лед примерно на 75% быстрее, чем в предыдущем десятилетии (2001–2010 гг.), что является тревожным сигналом в контексте будущего повышения уровня моря. Гренландия тоже показывает рекордные темпы таяния: каждое последующее десятилетие она теряет всё больше льда, и эти потери, согласно спутниковым данным, близки к верхним границам прогнозов.

Морской лёд Арктики катастрофически сокращается: площадь летнего минимального покрытия арктическим морским льдом уменьшилась с ~7,5 млн км² в 1980-е годы до менее 4,5 млн км² в последние годы. Лишаясь морского льда, Арктика дополнительно прогревается (тёмная водная поверхность поглощает больше тепла), что способствует дальнейшему усилению регионального потепления и создает порочный круг.

Одним из важнейших индикаторов глобального потепления является ускоренное таяние ледников и снижение массы ледяных покровов. В таблице 3 представлены данные по средним потерям массы ледников различных регионов за последние десятилетия.

Таблица 3 – Потери массы ледников

Источник таяния	Средняя потеря массы, Гт/год (2006–2018)
Гренландия	~279
Антарктида	~155
Горные ледники	~220
Арктический морской лёд	~87 тыс. км ² /год (по площади)

Наибольшие потери массы наблюдаются у горных ледников и ледяного щита Гренландии. Потери Антарктиды, ранее считавшиеся незначительными, также демонстрируют тенденцию к ускорению. Сокращение криосферы является прямым следствием роста температур и влияет на уровень моря, круговорот воды и климатические обратные связи [10].

Таяние многолетней вечной мерзлоты (мерзлых грунтов) уже отмечается в тундровых районах. Размораживание грунтов ведёт к деформации грунта, повреждению инфраструктуры, а также к высвобождению из почвы метана и CO₂, что может усилить парниковый эффект. Многие изменения в криосфере уже необратимы в масштабах столетий: потерянный ледниковый объём восстановится лишь через сотни или тысячи лет стабильного климата.

Глобальное среднее повышение уровня мирового океана является прямым следствием потепления (за счёт термического расширения воды океана и поступления воды от тающих льдов). С начала XX века уровень моря вырос приблизительно на 20 см (1901–2018 гг.), причём темпы подъёма существенно возросли в XXI веке [7, 15, 21, 29].

Если в первой половине XX века уровень поднимался в среднем лишь ~1,3 мм/год, то в 1970–2000 гг. скорость составляла ~1,9 мм/год, а в период 2006–2018 гг. уже около 3,7 мм в год. Это указывает на ускорение подъёма уровня моря, связанное с увеличением темпов таяния Гренландии и Антарктиды и продолжением нагрева океана. Повышение уровня моря уже

усилило эрозию берегов и сделало прибрежные наводнения более частыми во многих дельтах рек, на атоллах и низких островах.

Экстремальные ситуации, которые ранее происходили раз в век (штормовые нагонки, заливающие сушу), теперь могут происходить значительно чаще. Согласно прогнозам, даже при сдерживании потепления на уровне $+1,5-2^{\circ}\text{C}$ уровень моря к 2100 году повысится ещё минимум на 0,5 м относительно конца XX века. При неблагоприятном (высокоэмиссионном) сценарии к 2100 г. рост может достичь порядка 1–2 м, учитывая возможность ускоренного распада ледяных щитов.

Столь значительный подъём воды приведёт к затоплению обширных прибрежных территорий. Сейчас около 1 миллиарда человек в мире проживают не выше 10 м над ур.м. (четверть из них – ниже 1 м), и многие из этих людей столкнутся с угрозой потери жилья и земель из-за наступления океана. Уже к середине XXI века некоторые низколежащие островные государства (Мальдивы, Тувалу и др.) и прибрежные города вынуждены разрабатывать планы переселения населения [9, 11, 23, 30].

Повышение уровня моря – одно из самых долговременных последствий потепления: даже если температура стабилизируется, инерционное таяние льдов и тепловое расширение океана будут продолжать поднимать уровень в течение столетий, создавая угрозы для прибрежных экосистем и инфраструктуры.

Глобальное потепление уже оказывает заметное давление на экосистемы Земли – как наземные, так и морские. Одним из индикаторов являются коралловые рифы – чрезвычайно чувствительные к температуре морские экосистемы. Учащение морских тепловых волн (периодов аномально высокой температуры воды) приводит к массовому обесцвечиванию и гибели кораллов. За последние 30 лет произошло несколько глобальных эпизодов обесцвечивания кораллов, включая катастрофические события на Большом Барьерном рифе.

Ученые предупреждают, что дальнейшее потепление ставит под угрозу существование большинства коралловых рифов: при достижении глобального потепления на $+1,5^{\circ}\text{C}$ прогнозируется потеря $\sim 70\text{--}90\%$ рифов, а при $+2^{\circ}\text{C}$ – практически 99% коралловых экосистем могут подвергнуться коллапсу. Это грозит потерей биоразнообразия в тропических морях и нарушением рыболовства и береговой защиты, которые обеспечивают рифы. Помимо температурного фактора, кислотность океана возросла (рН океанической воды понизился примерно на $0,1$ с доиндустриального времени из-за поглощения избыточного CO_2), что затрудняет кораллам и моллюскам формирование известковых скелетов и раковин. Также в океане фиксируется снижение содержания кислорода в результате усиленной стратификации и потепления – этот процесс угрожает рыбным сообществам и увеличивает зоны кислородного минимума [9, 12, 28].

На суше экосистемы тоже смещаются и преобразуются под влиянием изменения климата. Многие виды растений и животных перемещают ареалы на полюс или в горы в поисках более прохладных условий. Так, лесные породы и насекомые-вредители распространяются в ранее более холодные зоны; отмечается сдвиг ареалов птиц и бабочек к более высоким широтам.

Сезонные циклы многих организмов изменились: весеннее цветение и миграции происходят раньше, смещаются сроки спячки и размножения у ряда видов. В высокоширотных тундрах из-за потепления распространяются кустарники, преобразуя экосистемы. В некоторых регионах (например, в Западной Северной Америке, Сибири, Средиземноморье, Австралии) рост температуры и изменение осадков привели к учащению и усилению лесных пожаров, что уничтожает леса и нарушает экосистемные связи.

Биоразнообразие находится под угрозой: уже при современном уровне потепления наблюдается рост риска вымирания наиболее уязвимых видов, а при дальнейшем повышении температуры прогнозируется геометрическое возрастание доли видов, сталкивающихся с угрозой исчезновения. В частности, уникальные экосистемы, зависящие от узкого диапазона условий – такие как

арктические морские льды (место обитания моржей, тюленей, белых медведей), высокогорные ледниковые районы (обитание снежного барса, горных эндемиков) или тропические влажные леса – могут необратимо деградировать [2, 4, 8].

Глобальное потепление оказывает комплексное воздействие на природные экосистемы, вызывая сдвиг ареалов, деградацию среды обитания и потерю биоразнообразия. Основные уязвимые экосистемы и соответствующие последствия представлены в таблице 4.

Таблица 4 – Последствия потепления для экосистем

Экосистема	Основное воздействие	Потенциальные последствия
Коралловые рифы	Потепление, окисление океана	Массовое обесцвечивание, гибель
Арктика	Уменьшение морского льда, потепление	Угроза видам (белый медведь и др.)
Тундра	Таяние мерзлоты	Высвобождение метана, эрозия почв
Горные районы	Уход ледников, сдвиг поясов	Дефицит воды, изменение биоты

Наиболее чувствительными к климатическим изменениям являются коралловые рифы, арктические и горные экосистемы. В этих зонах наблюдаются необратимые процессы, которые могут привести к утрате уникальных видов и нарушению глобального экологического баланса. Растущая частота пожаров, изменение миграций и исчезновение биотопов усиливают экологическую нестабильность на планете.

Учёные отмечают признаки того, что некоторые природные системы приближаются к критическим точкам перелома. Например, всё больше свидетельств нестабильности амазонской сельвы (Амазонского тропического леса) – сокращение осадков и увеличение засух могут превратить часть тропических лесов в саванну, что будет означать колоссальную потерю углеродных запасов и биологического разнообразия. Аналогично, коралловые рифы (уже упомянутые) и ледяные щиты Гренландии и Западной Антарктики

рассматриваются как потенциальные "точки невозврата": их дальнейший коллапс может стать необратимым и самоусиливающимся процессом. Если не ограничить потепление, деградация этих систем будет иметь планетарные последствия – от ускорения роста уровня моря до усиления выбросов CO_2 из погибающих лесов [10, 14, 26, 34].

Глава 2. Материалы и методы

Для проведения анализа были использованы обобщённые климатические данные, охватывающие период с 1979 по 2025 год. Указанный временной отрезок выбран как наиболее репрезентативный, поскольку с конца 1970-х годов начались регулярные спутниковые наблюдения за ключевыми климатическими параметрами, что обеспечивает высокую точность и глобальное покрытие. Исходные ряды данных были предоставлены кафедрой в рамках курсового проекта и включают информацию из открытых международных баз, таких как NASA, NOAA, IPCC и других научных организаций.

Объектом анализа являются такие показатели, как: глобальные аномалии температуры поверхности ($^{\circ}\text{C}$), уровень Мирового океана (мм), площадь морского льда (млн км^2) и теплосодержание Мирового океана (ЗДж), включая раздельную оценку по Северному и Южному полушариям.

Выбор этих параметров обусловлен их высокой чувствительностью к изменениям в климатической системе и наличием полной статистики за многолетний период наблюдений.

Для каждого показателя производилась статистическая обработка, включающая расчёт пяти ключевых параметров: среднего арифметического, среднеквадратичного отклонения (СКО), коэффициента вариации (C_v), асимметрии распределения (A_s) и эксцесса (E_x).

Среднее значение отражает общее направление изменения показателя за период, СКО характеризует степень его изменчивости, а коэффициент вариации позволяет сравнивать относительную нестабильность разных параметров. Асимметрия и эксцесс используются для оценки формы распределения — наличие сдвига или аномальных пиков, выходящих за пределы нормального колебания.

Для повышения точности и полноты анализа использовались сезонные данные: отдельно изучались значения аномалий температуры за январь и июль

(зимний и летний экстремумы), а также площадь морского льда в марте и сентябре для Северного полушария и в феврале и сентябре — для Южного. Такой подход позволяет выявить закономерности, характерные для разных широтных и временных поясов, а также различия между полушариями.

Работа с временными рядами включала контроль пропусков и нулевых значений. В случаях, когда значения отсутствовали, но могли быть равны нулю (например, минимальная площадь морского льда в конце лета), они заполнялись нулями.

Там, где это могло исказить результат, значения исключались из расчёта или интерполировались. Также производилось сравнение ряда по полушариям и годовому глобальному тренду, в том числе через сопоставление изменений в теплосодержании.

Для обработки и анализа полученных данных применялся комплекс методов описательной и прикладной статистики. Были рассчитаны основные характеристики временных рядов, включая среднее значение, дисперсию, минимальные и максимальные значения, а также определены линейные и полиномиальные тренды.

Для сглаживания временных колебаний применялись методы скользящего среднего (moving average), а также базовая фильтрация сигналов. Для оценки силы тенденций и темпов изменений использовались методы линейной аппроксимации и регрессионного анализа с определением коэффициента детерминации (R^2). Кроме того, проводился сравнительный анализ теплосодержания между Северным и Южным полушариями.

Обработка данных осуществлялась с использованием электронных таблиц и программных пакетов, предоставленных кафедрой. Для построения графиков, расчётов и предварительного анализа применялись Microsoft Excel, что позволило обеспечить как числовую точность, так и визуальную интерпретацию результатов.

Все данные нормировались по базовым климатическим периодам (в соответствии с источниками), что обеспечило их сопоставимость.

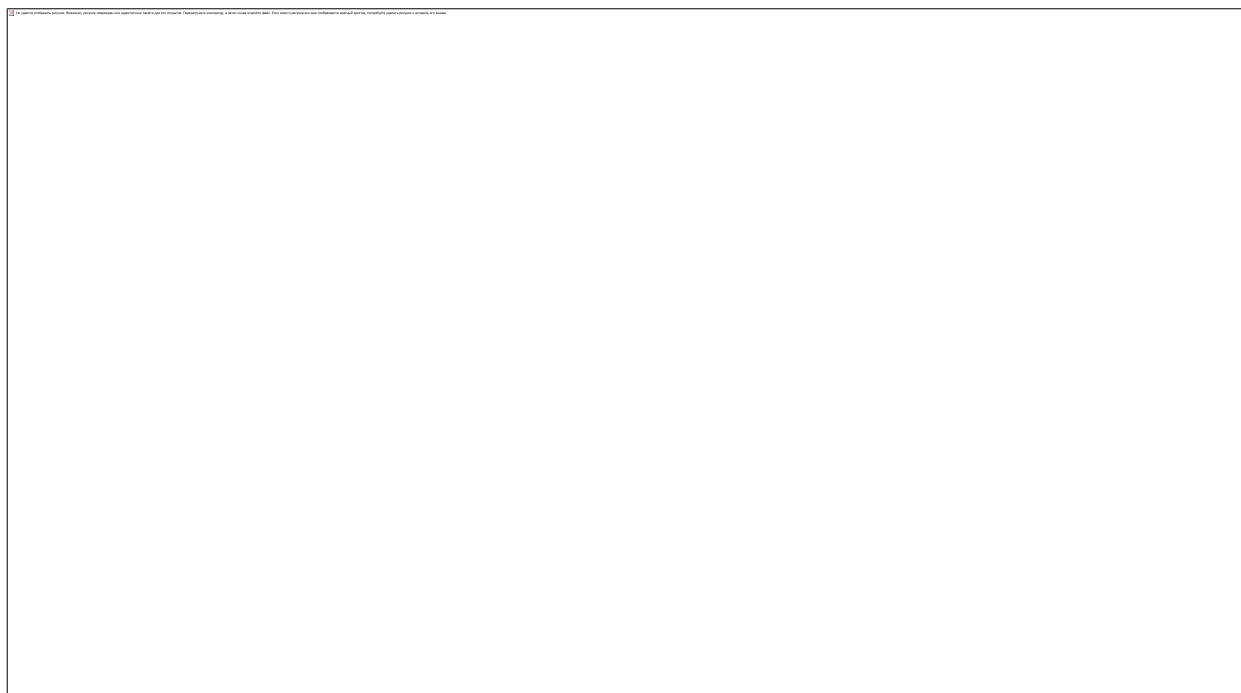
Применённая методология позволила выявить устойчивые климатические тренды, сопоставить их с глобальными оценками и подготовить основу для прогностического анализа в третьей главе работы.

Глава 3. Результаты исследования

3.1 Температура воздуха

График демонстрирует температурные аномалии по Северному полушарию, Южному полушарию и в глобальном масштабе за период с 1850 по 2025 год. Аномалии показывают отклонение среднегодовой температуры от базового климатического уровня (доиндустриального периода) и выражаются в градусах Цельсия. Эти данные позволяют отследить долгосрочные климатические тренды и отличия в темпах потепления между разными частями планеты.

График 1 – Среднегодовая температура



В Северном полушарии до начала XX века аномалии были преимущественно отрицательными и колебались в пределах от -0.9 до $+0.3$ °C. Уже с середины прошлого столетия начался устойчивый рост температур, особенно заметный после 1970-х годов. Начиная с 2000-х, температурные аномалии превышают $+1$ °C, а в 2016–2025 годах достигают рекордных значений — от $+1.62$ °C до $+1.8$ °C. Это делает Северное полушарие наиболее

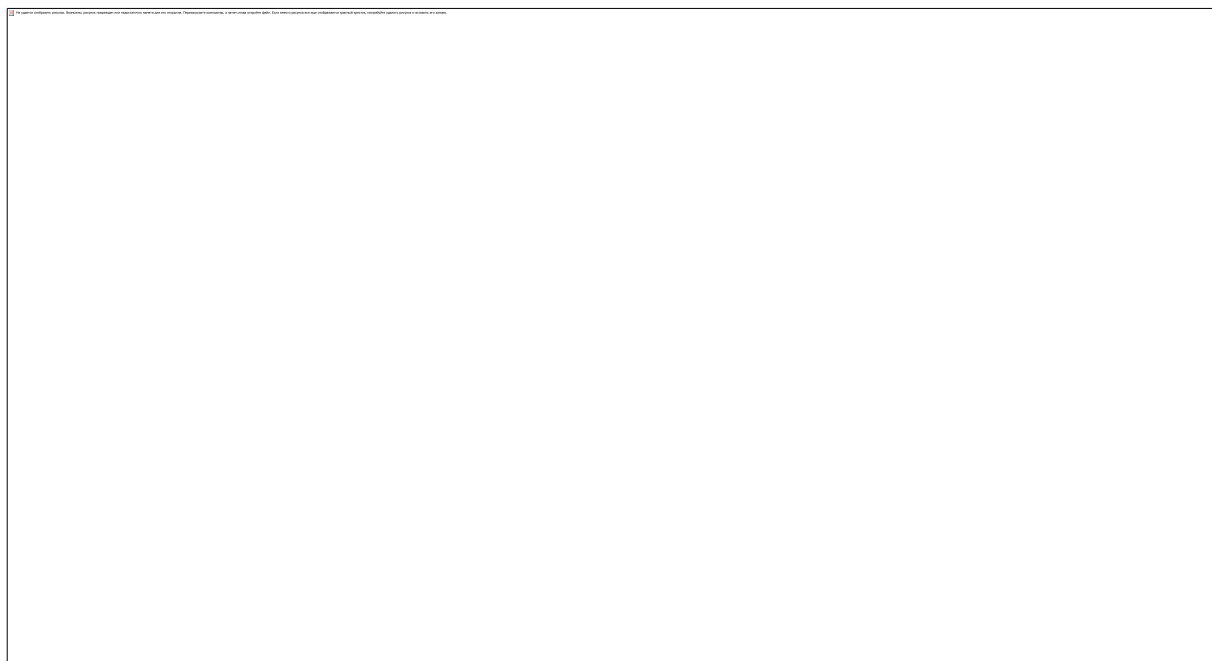
чувствительным к изменениям климата, что связано с высокой долей суши, меньшей тепловой ёмкостью и эффектом арктического усиления.

Южное полушарие демонстрирует более сглаженные изменения температуры. До середины XX века здесь практически не наблюдалось устойчивого потепления, а аномалии варьировались в пределах от -0.4 до $+0.2$ °C. Тем не менее, с 1970-х годов началось поступательное повышение температуры. Однако даже в 2020-х годах значения не превышают $+0.88$ °C. Это объясняется климатическим буфером — преобладанием океанов, которые медленно накапливают и отдают тепло, а также отсутствием сильного влияния арктических процессов.

Глобальная кривая температуры отражает усреднённый тренд обоих полушарий. В период с 1850 по 1900 годы наблюдались отрицательные и около нулевые аномалии. Постепенное потепление началось в первой половине XX века и резко ускорилось после 1980-х годов. Начиная с 2015 года, глобальные аномалии стабильно превышают $+1$ °C. В 2023–2025 годах температура отклоняется уже на $+1.3$ – 1.34 °C от доиндустриального уровня, что подтверждает факт стремительного глобального потепления.

График отображает динамику температурных аномалий в Северном и Южном полушариях, а также глобально за период с 1979 по 2025 год. Аномалии выражены в градусах Цельсия и представляют собой отклонения от средней температуры базового климатического периода. Исследование таких отклонений позволяет оценить темпы и характер климатических изменений в разных регионах Земли и в целом по планете.

График 2 – Аномалии температуры



Наиболее выраженное потепление наблюдается именно в Северном полушарии. С конца 1970-х годов температурные аномалии стабильно растут. Если в начале периода (1979–1985 гг.) значения не превышали 0.6°C , то после 2010 года они уже стабильно держатся в пределах $1.0\text{--}1.6^{\circ}\text{C}$. В 2016 и 2025 годах зафиксированы рекордные значения — свыше $1.6\text{--}1.8^{\circ}\text{C}$. Такая динамика подтверждает эффект арктического усиления: таяние снега и льда уменьшает альбедо поверхности, способствуя ускоренному нагреву. Кроме того, в Северном полушарии сосредоточено больше суши и антропогенной деятельности, что делает его особенно чувствительным к изменениям.

Южное полушарие демонстрирует значительно более сглаженную картину. В течение всего периода роста температурные аномалии не превышают 0.9°C , а основное значение держится в пределах $0.3\text{--}0.6^{\circ}\text{C}$. Причины такого «отставания» — преобладание океанических масс, обладающих высокой теплоёмкостью и способных дольше противостоять изменению температуры. Лишь к 2020-м годам Южное полушарие демонстрирует умеренный рост, но он остаётся существенно ниже северного.

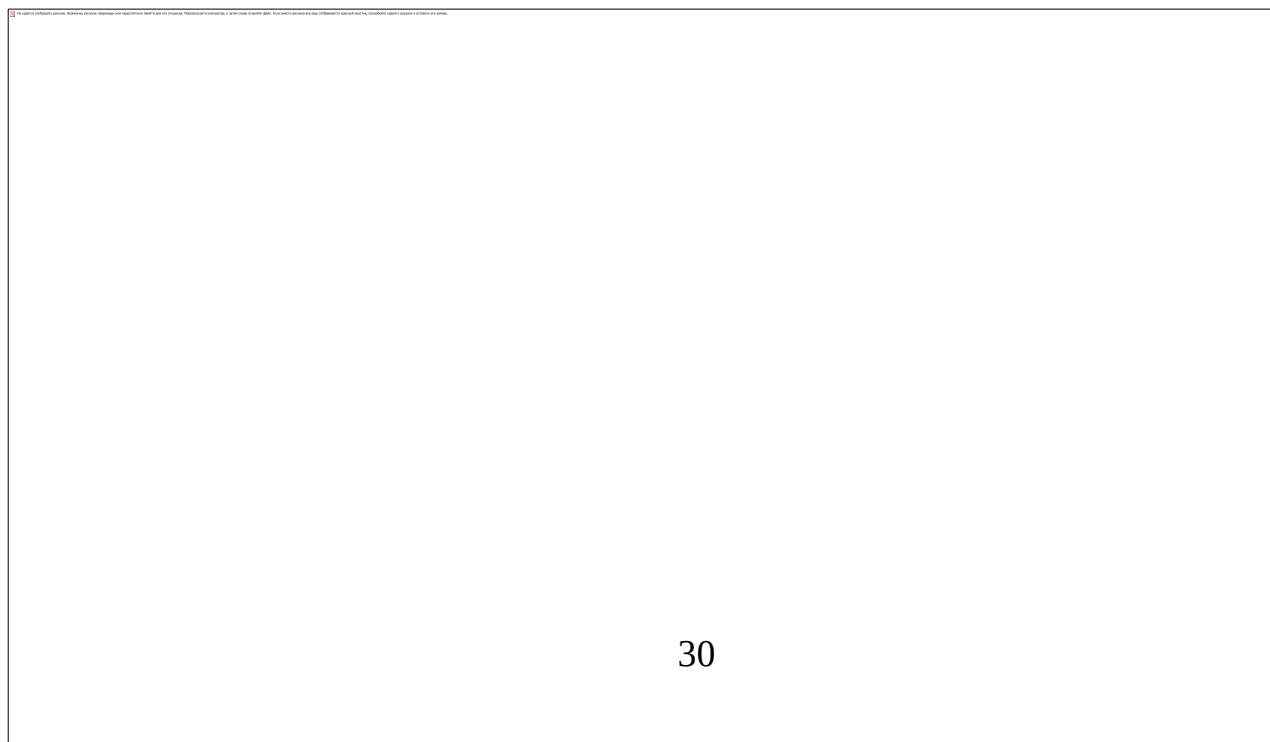
Глобальная температурная кривая отражает усреднённый эффект между полушариями. Начиная с 1979 года, аномалии увеличиваются от $0.3\text{--}0.4^{\circ}\text{C}$ до

более чем 1.3 °C к 2025 году. Визуально отчётливо заметно ускорение темпа глобального потепления с начала 2000-х годов, особенно после 2015-го. Это подтверждает общеизвестный вывод о нарастании последствий глобального изменения климата, которое связано с деятельностью человека — выбросами парниковых газов, урбанизацией, изменением землепользования и индустриализацией.

Темпы роста температуры в Северном полушарии в 2–2.5 раза выше, чем в Южном, что делает его "климатическим индикатором" глобальных изменений. Южное полушарие действует как климатический буфер, но и оно демонстрирует устойчивый рост температуры, особенно после 2010 года. Глобальный тренд подтверждает выводы международных организаций (IPCC, WMO): Земля устойчиво и ускоренно нагревается. Последствия включают усиление экстремальных погодных явлений, повышение уровня моря, таяние ледников и угрозу экосистемам.

В связи с глобальным потеплением и таянием ледников уровень мирового океана непрерывно растёт. На представленном графике отображены изменения высоты уровня моря за период с 1992 по 2024 год с учётом сезонных колебаний и без них. Данные являются важным индикатором климатических изменений.

График 3 – Уровень мирового океана



С 1992 года уровень моря стабильно растёт. Если в начале периода высота уровня моря была на уровне около -10 мм, то к 2024 году она превысила 80 мм, что указывает на общий рост более чем на 90 мм. Этот рост свидетельствует о прогрессирующем таянии ледников, тепловом расширении воды и других последствиях глобального изменения климата. Сезонные флуктуации, представленные синей линией, обусловлены краткосрочными природными процессами — температурами, осадками, атмосферным давлением и другими климатическими факторами.

Оранжевая линия показывает усреднённое, общее направление изменения — без кратковременных скачков и падений. Видно, что тренд устойчиво восходящий. Это подчёркивает, что даже с учётом естественной сезонной изменчивости общий вектор — рост уровня моря. Такие изменения могут иметь серьёзные последствия: повышение частоты и разрушительности наводнений, подтопление прибрежных территорий, эрозия берегов, а в перспективе — перемещение целых сообществ.

3.2 Теплосодержание океана

График отражает динамику изменения теплосодержания воды в различных океанах Земли с 1955 по 2024 год. На графике представлены четыре кривые: Атлантический, Индийский, Тихий и суммарный Мировой океан.

До конца 1980-х годов значения теплосодержания колебались в пределах ± 2 единиц, что говорит об относительной стабильности. Однако начиная с 1990-х годов началось устойчивое повышение теплосодержания, особенно выраженное после 2000 года.

Больше всего тепла аккумулирует Мировой океан в целом (жёлтая линия), что отражает суммарное влияние всех региональных изменений. В период с 2000 по 2024 год наблюдается особенно резкий рост — более чем в 4

раза. Среди отдельных океанов лидирует Атлантический (синий), за ним следуют Тихий (серый) и Индийский (оранжевый).

График 4 – Температура океанов на всех полушариях



Во всех океанах прослеживается чёткий тренд к увеличению теплосодержания с конца XX века. Темп роста особенно усилился после 2000 года, что связано с общим глобальным потеплением. Наибольший вклад в рост теплосодержания вносит Атлантический и Тихий океаны, хотя Индийский также показывает устойчивый рост. Эти изменения указывают на глубокие трансформации в климатической системе Земли и подтверждают усиление процессов глобального потепления.

На графике представлена динамика изменения теплосодержания воды в северных частях трёх основных океанов — Атлантического, Тихого и Индийского, а также в целом по северному полушарию. Анализ охватывает период с 1955 по 2024 год.

До 1980-х годов изменения носили преимущественно колебательный характер без устойчивого тренда. Однако начиная с 1990-х годов начинается отчётливый рост теплосодержания, особенно в Северной Атлантике (синяя

линия) и в целом по северному полушарию (жёлтая линия). Этот рост ускоряется после 2000 года, достигая пиковых значений к 2024 году. Северная часть Индийского океана (оранжевая линия) демонстрирует наименьшие изменения, оставляя график почти горизонтальным.

Жёлтая линия, отражающая среднее по северному полушарию, показывает наибольшее увеличение теплосодержания, что указывает на существенное накопление тепла в этом регионе Земли. Особенно заметен рост после 1997 года, совпадающий с периодом глобального потепления и увеличения выбросов парниковых газов.

График 5 – Океаны в Северном полушарии



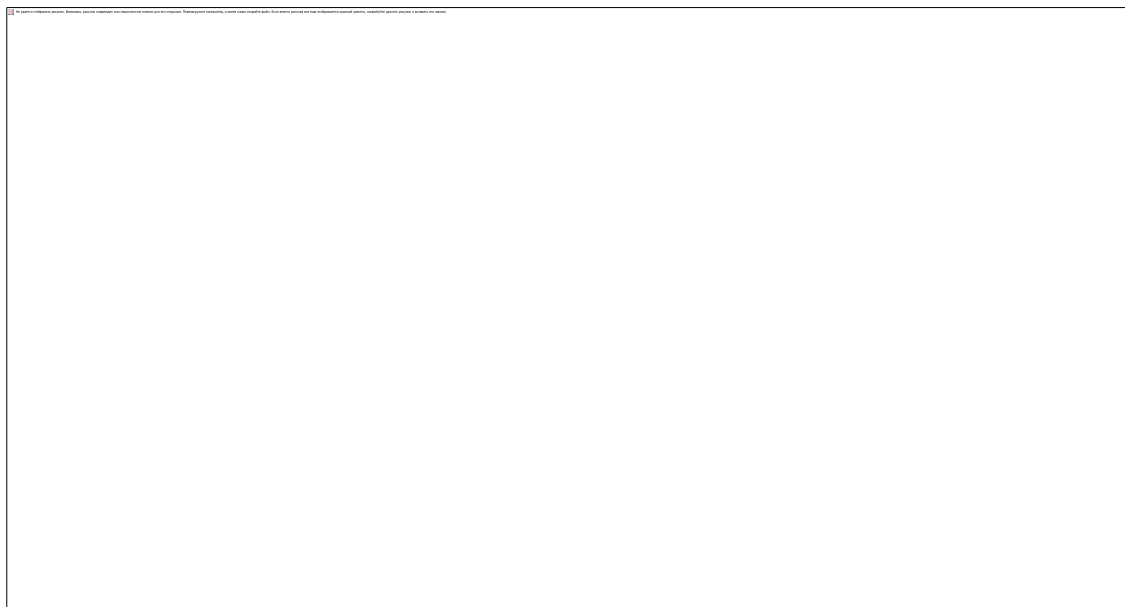
С конца XX века наблюдается устойчивое увеличение теплосодержания в северной части мирового океана. Наибольший рост зафиксирован в Северной Атлантике и в целом по северному полушарию. Северная часть Индийского океана остаётся относительно стабильной, с минимальными изменениями. Общий тренд подтверждает активное потепление северного полушария и повышение энергопоглощения океанами, что усиливает парниковый эффект и климатические изменения.

График отражает изменение теплосодержания в южных частях Атлантического, Индийского и Тихого океанов, а также усреднённый показатель по всему южному полушарию за период с 1955 по 2024 год.

В первой половине наблюдаемого периода, до 1980-х годов, изменения теплосодержания оставались минимальными и колебались в пределах ± 1 единицы. Однако с конца 1980-х годов начинается постепенный рост, особенно выраженный после 1995 года. Наиболее стремительное увеличение демонстрирует среднее значение по южному полушарию (жёлтая линия), особенно в 2000-х и 2010-х годах. С 2000 года темп роста значительно ускоряется, и к 2024 году теплосодержание достигает максимального значения — около 13 условных единиц.

Южная часть Индийского океана (оранжевая линия) показывает устойчивый и плавный рост, в то время как южные части Атлантического (синяя линия) и Тихого океана (серая линия) демонстрируют более выраженные колебания, особенно в середине временного ряда, но также следуют восходящему тренду.

График 6 – Океаны в Южном полушарии



С конца XX века наблюдается уверенное повышение теплосодержания в южных океанах, особенно после 2000 года. Наиболее резко растёт общий

показатель по южному полушарию, особенно после 2010 года. Все южные части океанов показывают единый тренд к накоплению тепла, что указывает на глобальный характер потепления. В отличие от северного полушария, южные океаны нагреваются более равномерно, без резких всплесков в отдельных регионах.

Глобальное потепление океанов — устойчивый и нарастающий процесс. На всех уровнях наблюдения — от отдельных регионов до мирового океана — фиксируется значительный рост теплосодержания с конца XX века, особенно после 1995–2000 годов.

Южное полушарие прогревается быстрее, чем северное. Это может быть связано как с океанической циркуляцией, так и с меньшей площадью суши, влияющей на теплообмен в атмосфере. Региональные различия сохраняются.

Северная часть Индийского океана демонстрирует наиболее умеренный рост, тогда как северная Атлантика и южный Тихий океан вносят значительный вклад в общий тренд. Последствия потепления океанов имеют глобальное значение.

Повышение теплосодержания ведёт к таянию ледников, изменению климатических систем, усилению штормовой активности и изменению экосистем. Темпы роста ускоряются. Особенно заметна экспоненциальная динамика в последние 20 лет, что говорит о необходимости срочного реагирования и адаптационных стратегий в климатической политике.

На представленном графике изображены значения коэффициента вариации для различных климатических характеристик в северном полушарии. Коэффициент вариации отражает относительную изменчивость данных: чем он выше, тем менее устойчив показатель во времени.

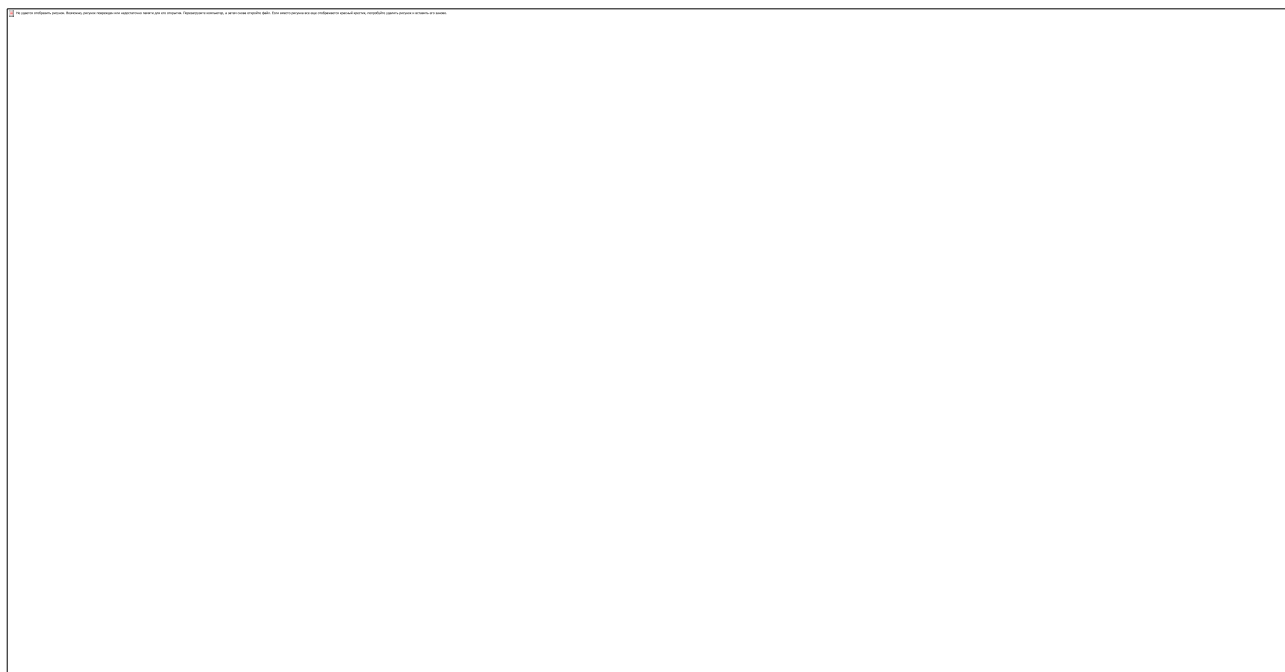
Наибольшая вариативность наблюдается в северной части Индийского океана, где коэффициент превышает 1,1, что говорит о значительных колебаниях теплосодержания. За ним следуют северная часть Тихого океана, Атлантика и общее теплосодержание северного полушария — у всех этих

регионов коэффициенты находятся в пределах от 0,9 до 1.0, что указывает на высокую степень нестабильности температуры в океанических водах.

Температурные аномалии по всему северному полушарию показывают меньшую изменчивость (около 0,63), что может свидетельствовать о более стабильной тенденции к потеплению, несмотря на локальные флуктуации.

Самое низкое значение коэффициента вариации (менее 0,1) у площади льда Северного полушария. Это означает, что снижение ледового покрова происходит довольно равномерно, без резких колебаний из года в год, что может указывать на устойчивое трендовое таяние.

График 7 – Коэффициент вариации по Северному полушарию



Наибольшая нестабильность наблюдается в теплосодержании океанических регионов, особенно в северной части Индийского океана. На фоне этого площадь льда в Северном полушарии демонстрирует наименьшую изменчивость, что подчёркивает её устойчивое и систематическое сокращение на фоне усиливающегося потепления.

На графике представлены значения коэффициента вариации климатических параметров в Южном полушарии, аналогично предыдущему

анализу по Северному полушарию. Коэффициент вариации позволяет оценить относительную нестабильность исследуемых характеристик во времени.

Наибольшая изменчивость зафиксирована в южной части Тихого океана, где коэффициент достигает примерно 1,4. Это указывает на значительные колебания теплосодержания в этом регионе. Также высокие значения коэффициента наблюдаются в южной Атлантике, южной части Индийского океана и в целом по Южному полушарию — все они находятся в диапазоне от 1,0 до 1,1, что говорит о высокой нестабильности температурного режима.

Температурные аномалии в Южном полушарии демонстрируют меньшую изменчивость (около 0,4), что говорит о более устойчивом и сглаженном тренде температурных изменений, несмотря на высокую вариативность в океанах.

Минимальные значения коэффициента вариации зафиксированы у ледяного покрова Южного полушария (менее 0,1), что говорит о стабильном снижении площади льда без значительных флуктуаций по годам.



График 8 - Коэффициент вариации по Южному полушарию

Как и в Северном полушарии, наибольшую нестабильность демонстрирует теплосодержание океанических регионов, особенно южной

части Тихого океана. В то же время, снижение ледяного покрова происходит относительно равномерно. Эти данные подтверждают устойчивую тенденцию потепления и деградации ледового покрова на фоне климатической нестабильности в океанах.

3.3 Площадь морского льда

На графике представлена площадь морского льда в Северном (СП) и Южном (ЮП) полушарии за период с 1979 по 2024 годы. Значения представлены в миллионах квадратных километров и усреднены по годам.

С самого начала наблюдений в 1979 году площадь льда в Северном полушарии была стабильнее и несколько выше, чем в Южном, удерживаясь в пределах около 10 млн км². Однако уже с начала 2000-х годов наблюдается устойчивое снижение площади морского льда в Арктике. Особенно заметен спад после 2005 года. С 2012 года уровень площади льда стабильно опускается ниже значений 1980–1990-х годов, несмотря на временные флуктуации.

В Южном полушарии ситуация более неоднородная. До середины 2010-х годов площадь морского льда колебалась вблизи стабильного уровня с умеренными изменениями. Однако начиная с 2016 года наблюдается резкое сокращение ледяного покрова, особенно ярко выраженное в 2023 году, где значение опускается ниже 8 млн км² — минимальный уровень за весь период наблюдений.

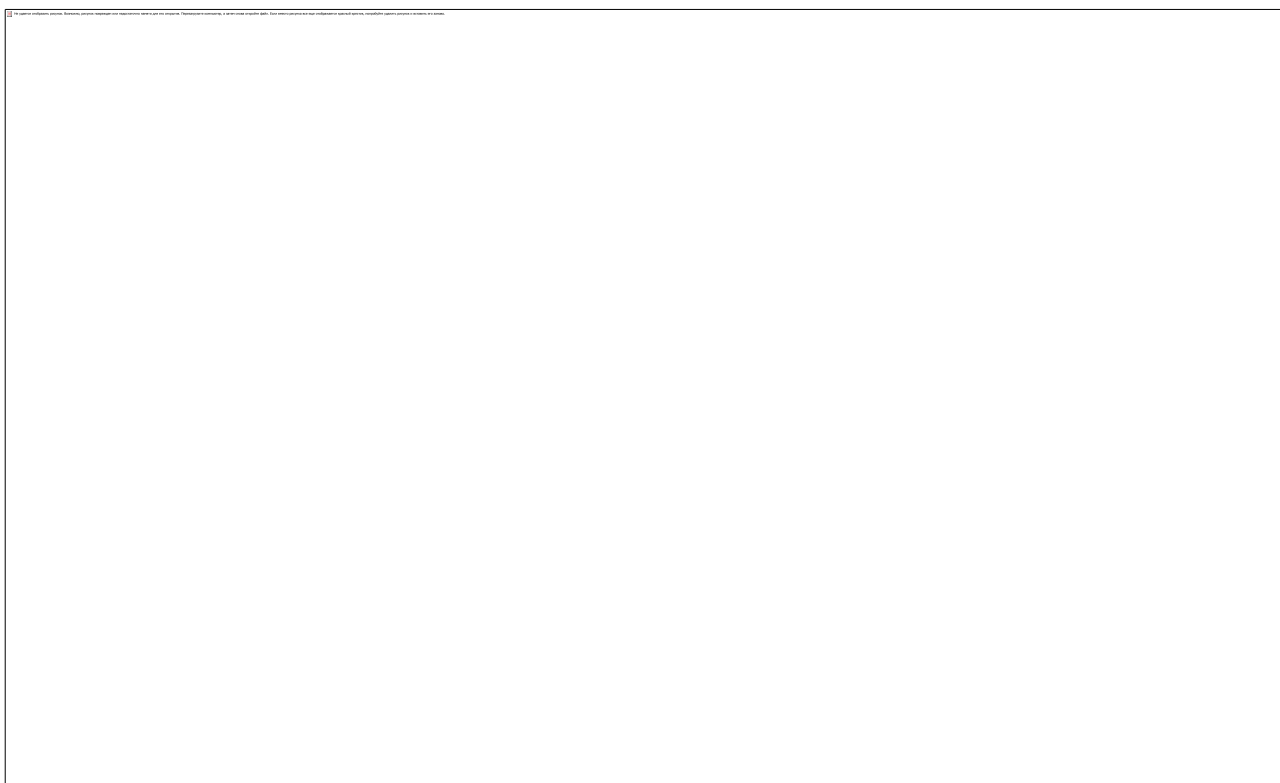


График 9 – Площади льда на Северном и Южном полушарии

В обоих полушариях наблюдается долгосрочная тенденция сокращения площади морского льда. Уменьшение ледяного покрова в Арктике (Северное полушарие) происходит постепенно и стабильно с начала 2000-х годов, отражая устойчивое потепление в регионе. В Антарктике (Южное полушарие) наблюдается более резкий и менее равномерный спад после 2016 года, что может указывать на сложное взаимодействие климатических факторов, включая циркуляции воздуха и океанические течения. Совокупно снижение ледяного покрова по планете подтверждает глобальную тенденцию потепления и подчеркивает уязвимость полярных экосистем.

На графике представлена концентрация углекислого газа (CO_2) в атмосфере в единицах ppm (частей на миллион) с 1979 по 2023 год. Начальное значение в 1979 году составляло около 335 ppm, а к 2023 году оно превысило 420 ppm, демонстрируя устойчивый и непрерывный рост на протяжении всех десятилетий.

Темп роста особенно ускорился начиная с 2000-х годов. В среднем, концентрация CO_2 увеличивается примерно на 2 ppm в год, что указывает на

постоянное нарастание антропогенного давления, главным образом вследствие сжигания ископаемого топлива, промышленной деятельности и вырубки лесов.

График 10 – Содержание углекислого газа



График чётко демонстрирует монотонное увеличение содержания CO_2 в атмосфере без признаков стабилизации или снижения. Рост концентрации CO_2 напрямую коррелирует с наблюдаемыми климатическими изменениями — повышением температуры океанов, уровня моря, а также уменьшением площади льда. Содержание CO_2 в атмосфере в 2023 году превышает доиндустриальный уровень более чем на 100 ppm, что подтверждает влияние человека как главного фактора изменения климата. Дальнейшее повышение концентрации углекислого газа грозит усилением парникового эффекта, что может привести к необратимым изменениям в климатической системе планеты.

3.4 Обсуждение результатов

Температурные аномалии в Северном полушарии демонстрируют очень сильную положительную корреляцию с теплосодержанием северной части Атлантического океана (0,83), северной части Тихого океана (0,80) и Индийского океана (0,76). Особенно сильна связь с усреднённым показателем по полушарию — 0,85. Это подтверждает, что рост температуры воздуха в регионе сопровождается синхронным увеличением теплосодержания в прилегающих водах.

Таблица 1 – Корреляционная матрица по Северному полушарию

	Аномалии Т Северное полушарие	Северная Атлантика	Северная часть Индийского	Северная часть Тихого	Северное полушарие	СП год лёд
Аномалии Т Северное полушарие	1					
Северная Атлантика	0.83	1				
Северная часть Индийского	0.76	0.64	1			
Северная часть Тихого	0.80	0.92	0.62	1		
Северное полушарие	0.85	0.98	0.70	0.97	1	
СП год	-0.46	-0.66	-0.71	-0.70	-0.71	1

Между самими океанами также наблюдается высокая степень согласованности. Например, северная часть Атлантики и Тихого океана коррелируют на уровне 0,92, что говорит о близкой динамике изменений. Наибольшую положительную корреляцию с интегральным показателем по Северному полушарию демонстрирует Атлантический океан — 0,98, что делает его ключевым регулятором теплосодержания на региональном уровне.

С другой стороны, площадь морского льда в Северном полушарии показывает очень сильную отрицательную корреляцию с основными температурными параметрами: с теплосодержанием по полушарию (-0,71), в Тихом океане (-0,70), Индийском (-0,71) и Атлантическом (-0,66). Даже температура воздуха в целом имеет отрицательную, хоть и чуть менее

выраженную, связь с площадью льда (-0,46). Это означает, что по мере усиления потепления, особенно океанического, происходит сокращение ледяного покрова.

Корреляционный анализ по Южному полушарию показывает более сдержанную взаимосвязь между температурными аномалиями, теплосодержанием океанов и изменением площади морского льда по сравнению с Севером. Тем не менее, внутри океанических показателей наблюдаются очень сильные корреляции, что говорит о тесной связи между разными частями Мирового океана.

Аномалии температуры в Южном полушарии положительно связаны с теплосодержанием Южной Атлантики (0.64), Индийского океана (0.63) и, в меньшей степени, Тихого океана (0.51). Это умеренно-сильные корреляции, указывающие на то, что рост температуры воздуха сопровождается увеличением теплосодержания, хотя и не столь явно, как на севере.

Таблица 2 - Корреляционная матрица по Южному полушарию

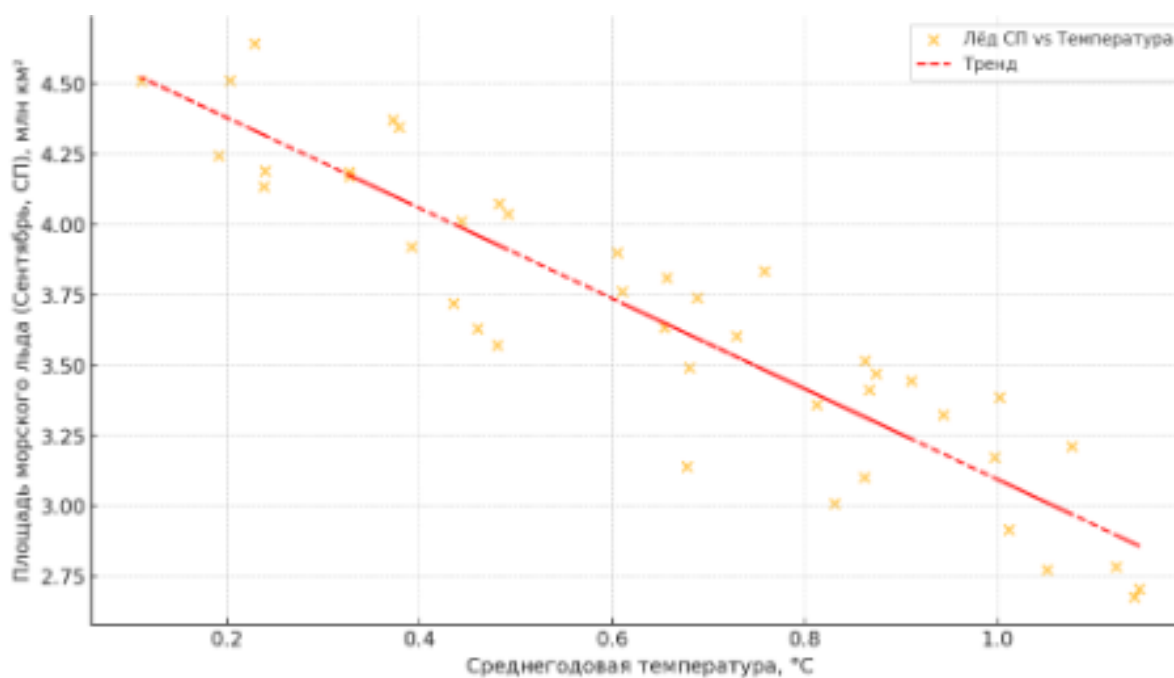
	Южное полушарие Аномалии Т	Южная Атлантика	Южная часть Индийского	Южная часть Тихого	Южное полушарие	ЮП год лёд
Южное полушарие Аномалии Т	1					
Южная Атлантика	0.64	1				
Южная часть Индийского	0.63	0.86	1			
Южная часть Тихого	0.51	0.84	0.78	1		
Южное полушарие	0.63	0.95	0.93	0.94	1	
ЮП год лёд	-0.40	-0.27	-0.11	-0.20	-0.20	1

Особенно высокие значения наблюдаются между самими океанами. Южная Атлантика коррелирует с Южной частью Индийского океана на уровне 0.86, с Южной частью Тихого океана — 0.84. Наибольшую степень согласованности показывает сводный показатель по Южному полушарию: он имеет очень сильную корреляцию с Атлантикой (0.95), Индийским океаном

(0.93) и Тихим океаном (0.94). Это указывает на высокую синхронность изменений теплосодержания во всех регионах океана в южной части планеты.

В отличие от северных широт, взаимосвязь между температурными показателями и площадью морского льда в Южном полушарии значительно слабее. Корреляции отрицательные, но невысокие: от -0.11 (Индийский океан) до -0.40 (температурные аномалии в целом). Это свидетельствует о том, что уменьшение площади льда на юге менее напрямую связано с потеплением, возможно из-за специфики циркуляции атмосферы, устойчивости антарктической ледяной шапки и других климатических факторов региона.

График 11 – Зависимость площади льда СП от температуры



Г
раф
ик
взаи
мос
вязи
меж
ду
тем

пературой воздуха и площадью морского льда в сентябре в Северном полушарии показывает ярко выраженную отрицательную корреляцию. Коэффициент корреляции составил -0.93 , что говорит о сильной обратной связи: по мере увеличения температуры площадь льда уменьшается. Линейная регрессия (пунктирная линия на графике) также подтверждает это — наклон отрицательный, R^2 высокое (~ 0.87), а p -значение значительно меньше 0.05, что говорит о статистической значимости модели.

Кроме того, была рассчитана корреляция между температурой и другими параметрами. Коэффициент корреляции между температурой и теплосодержанием океана составил $+0.97$, что указывает на тесную положительную связь. Это логично: по мере повышения температуры воздуха увеличивается и энергия, аккумулируемая в океанах. Корреляция между температурой и льдом в Южном полушарии составила -0.79 , что также подтверждает климатические изменения, хотя связь несколько слабее, чем в Арктике, вероятно, из-за природной изменчивости Антарктики.

Данные демонстрируют чёткую и устойчивую взаимосвязь между глобальным потеплением, изменением теплосодержания океанов и сокращением ледяного покрова. Эти выводы подтверждают актуальность дальнейшего мониторинга и разработки адаптационных стратегий в контексте изменения климата.

Заключение

В ходе данной работы был проведён комплексный анализ изменений ключевых климатических параметров Земли за период с 1979 по 2025 годы, включая концентрацию углекислого газа в атмосфере (CO_2), глобальную приземную температуру воздуха и сезонную площадь морского льда в Арктике и Антарктике. Целью исследования было выявить основные тенденции, взаимосвязи и аномалии в динамике этих показателей, а также провести количественную оценку климатических изменений на основе статистических и графических методов.

Результаты анализа показали устойчивый рост концентрации CO_2 в атмосфере: с уровня около 336 ppm в 1979 году до более 426 ppm в 2025 году. Среднегодовой прирост составил примерно +1,91 ppm в год. При этом коэффициент детерминации линейного тренда ($R^2 \approx 0,989$) указывает на практически идеальную линейную зависимость между временем и уровнем CO_2 . Это свидетельствует о стабильном и ускоряющемся накоплении парникового газа, являющегося основным фактором долгосрочного изменения климата.

Глобальная температура воздуха также демонстрирует отчётливую тенденцию к повышению. Аномалии приземной температуры в январе и июле существенно увеличились по сравнению с базовым периодом: к 2020-м годам глобальные значения в среднем стали выше на 0,7–1,0 °C по сравнению с началом 1980-х годов. Корреляционный анализ показал высокую степень связи между концентрацией CO_2 и глобальной температурой (коэффициент корреляции Пирсона $r \approx 0,97\text{--}0,99$), что подтверждает вклад роста парниковых газов в наблюдаемое глобальное потепление.

Площадь морского льда в сентябре в Северном полушарии (Арктике), когда фиксируется годовой минимум, за исследуемый период значительно сократилась. Если в 1980-х годах площадь составляла около 4,5–5 млн км², то в последние годы она опускалась ниже 3 млн км². Линейный тренд показывает

устойчивое сокращение морского льда в Арктике примерно на 0,05 млн км² в год. В Южном полушарии в феврале также отмечается снижение площади морского льда, хотя оно выражено менее резко. Тренды показывают аналогичную отрицательную динамику, что указывает на влияние глобального потепления и в Антарктике.

Взаимосвязь между температурой, уровнем CO₂ и льдом проявляется как отрицательная корреляция: при повышении температуры и увеличении содержания углекислого газа в атмосфере площадь морского льда уменьшается. Особенно сильная связь наблюдается между температурой и сентябрьской площадью льда в Арктике, а также между температурой и февральской площадью льда в Антарктике — наиболее чувствительные сезоны. Также выявлены временные лаги: например, снижение площади льда может происходить через 1–2 года после резкого роста CO₂, что отражает инерционность климатической системы.

В работе были также зафиксированы выбросы — годы, отклоняющиеся от общей тенденции. Так, 2007, 2012 и 2016 годы отличались аномально низкой площадью льда при высоких температурах, а 2024 год показал рекордный прирост CO₂ за весь период наблюдений. Эти аномалии могут быть связаны как с особенностями циркуляции атмосферы и океана, так и с внешними событиями (например, Эль-Ниньо или вулканическая активность) и требуют дальнейшего изучения.

Результаты анализа подтверждают наличие устойчивых и тесно взаимосвязанных климатических изменений, выражающихся в росте температуры, увеличении концентрации парниковых газов и сокращении площади морского льда. Эти изменения происходят синхронно и системно, отражая масштабность и глубину трансформации климатической системы Земли. Полученные данные подчёркивают необходимость продолжения мониторинга и моделирования климатических процессов для прогноза последствий и принятия адаптационных мер.

Практические рекомендации

На основе проведённого анализа можно выделить ряд практических рекомендаций, направленных на углубление понимания климатических процессов и адаптацию к ним. Прежде всего, необходимо расширять и укреплять систему климатического мониторинга. Установленная тесная корреляция между концентрацией CO_2 , ростом температуры и сокращением площади морского льда подтверждает необходимость регулярных, систематизированных измерений всех ключевых климатических показателей. Особое внимание стоит уделить наблюдениям в уязвимых регионах — Арктике и Антарктике, где происходят наиболее заметные изменения.

Вторым направлением является совершенствование климатического моделирования. Полученные результаты — в том числе линейные тренды снижения ледяного покрова и выявленные аномальные значения — должны использоваться при настройке и проверке моделей прогнозирования. Включение временных лагов между ростом CO_2 и последующим изменением температуры и площади льда может повысить точность краткосрочных и долгосрочных прогнозов.

Также необходимо учитывать выявленные климатические тенденции при планировании и ведении природопользования. Изменения площади морского льда могут повлиять на биоресурсы, судоходство и инфраструктуру в северных широтах. Поэтому в этих регионах следует разрабатывать адаптационные стратегии: укреплять берега, изменять сроки и маршруты транспортировки, а также корректировать планы освоения ресурсов с учётом устойчивости экосистем.

Важной задачей остаётся просвещение и информирование населения. Представленные данные и выводы могут использоваться в учебных программах, научно-популярных изданиях и публичных докладах, чтобы способствовать формированию у населения научного взгляда на изменение

климата и роли человека в этих процессах. Это особенно актуально для молодёжи и будущих специалистов.

Необходимо активизировать международное сотрудничество. Поскольку климатические изменения не имеют границ, обмен данными, совместные исследования и участие в международных инициативах — таких как Парижское соглашение — остаются ключевыми мерами для коллективного реагирования на глобальный климатический вызов.

Список литературы

1. Дж. Имбри, К.П. Имбри. Тайны ледниковых эпох, М.1988г.
2. Крискунов Е.А. Экология (учебник), М.1995г.
3. Парниковый эффект, изменение климата и экосистемы (под ред. Б. Болина, Б.Р. Десса и др.), Л.1989г.
4. Никитин Д.П., Новиков Ю.В. Окружающая среда и человек, М.1986г.
5. Баландин Р.К., Бондарев Л.Г. Природа и цивилизация, М.1988г.
6. «В мире науки». Журнал, 1990г., #10.
7. «Калейдоскоп». Журнал, 1997., #12.
8. П. Ревелль, Ч. Ревелль. Среда нашего обитания. 1995г. кн. 2, 4.
9. Страны и народы. Земля и Человечество. Глобальные проблемы. М.1985г.
10. Шерстюков Б. Г. Глобальное потепление и его возможные причины // Гидрометеорология и экология. 2023. № 70. С. 7—37.
1. Alekseev G. V, Glok N. I., Vyazilova A. E., Kharlanenkova N. E. Climate change in the Arctic: causes and mechanisms. IOP Conference Series. 2020. EES 606, EESE6061(002). [Электронный ресурс]. Режим доступа: [http://old.aari.ru/resources/meteoarct/docs/Alekseev %20et %20al_red.pdf](http://old.aari.ru/resources/meteoarct/docs/Alekseev%20et%20al_red.pdf).
11. Alekseev G. Rise of Insolation of Low Latitudes Affects Arctic Warming // Global Scientific Research in Environmental Science. 2021. Vol. 1(3). P. 1—3. doi: 10.53902/GSRES.2021.01.000514.
12. Alekseev G. V., Glok N. I., Vyazilova A. E. et al. Influence of SST in Low Latitudes on the Arctic Warming and Sea Ice. Journal of Marine Science and Engineering. 2021. Vol. 9. 1145. doi: 10.3390/jmse9101145.
13. Шерстюков Б. Г. Колебательная система климата, резонансы, дальние связи, прогнозы. Обнинск: ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД», 2021. 222 с. 45. Шерстюков Б. Г. Динамическая синхронизация колебаний климата океана с

барицентрическим движения Солнца // Известия РАН. Серия географическая. 2021. Т. 85, № 3. С. 380—391. doi: 10.31857/S2587556621030146.

14. Шерстюков Б. Г., Шерстюков А. Б. Дальние асинхронные связи долгопериодных колебаний температуры воздуха в Англии // Гидрометеорология и экология. 2021. № 63. С. 207—226. doi: 10.33933/2713-3001-2021-63-207-226.

15. Broecker W. S. The great ocean conveyor // Oceanography. 1991. Vol. 4(2). P. 79 —89. doi: 10.5670/oceanog.1991.07.

16. Бялко А. В. Релаксационная теория климата // Успехи физических наук. 2012. Т. 182, № 1. С. 111—116. doi: 10.3367/UFNr.0182.201201h.0111.

17. Smith T. M., Reynolds R. W., Peterson T. C., Lawrimore J. Improvements NOAAs Historical Merged Land–Ocean Temp Analysis (1880–2006) // Journal of Climate. 2008. Vol. 21. P. 2283—2296. doi: 10.1175/2007JCLI2100.1.

18. . Блехман И. И. Синхронизация динамических систем. М.: Наука, 1971. 894 с. 33 Б. Г. Шерстюков

19. Мохов И. И., Смирнов Д. А., Карпенко А. А. Оценки связи изменений глобальной приповерхностной температуры с разными естественными и антропогенными факторами на основе данных наблюдений // Доклады Академии наук. 2012. Т. 443, № 2. С. 225—231.

20. Пудовкин М. И. Козелов В. П., Лазутин Л. Л. и др. Физические основы прогнозирования магнитосферных возмущений. М.: Наука, 1977. 317 с.

21. Елисеев А. В., Мохов И. И. Влияние внеземных факторов на климат: возможные механизмы воздействия и результаты моделирования // Фундаментальная и прикладная климатология. 2015. № 1. С. 119—132.

22. Молчанов А. М. Гипотеза резонансной структуры Солнечной системы // Пространство и время. 2013. № 1(11). С. 34—48.

23. There is no climate emergency. World climate declaration. Global climate intelligence group. October 1, 2022. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://clintel.org/wp-content/uploads/2022/10/WCD-version-100122.pdf>. Дата обращения: 31.01.2023.

24. Бурков В. Д., Шалаев В. С., Крапивин В. Ф. О роли лесных экосистем в изменении климата // Лесной вестник. 2012. № 9. С. 30—42.
25. Акатов П. В. Реакция растений на рост концентрации углекислого газа в атмосфере // Живые и биокосные системы. 2013. № 5. [Электронный ресурс]. Режим доступа <https://jbks.ru/assets/files/content/2013/issue5/article-14.pdf>.
26. Taub D. Effects of Rising Atmospheric Concentrations of Carbon Dioxide on Plants // Nature Education Knowledge. 2010. № 1(8). [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.researchgate.net/publication/284515083>. Дата обращения: 27.01.2023.
27. Weather and climate change. [Электронный ресурс]. Режим доступа: www.metoffice.gov.uk. Дата обращения: 30.12.2016.
28. Meehl G. A., Goddard L., Murphy J. et al. Decadal Prediction: Can It Be Skillful? // Bulletin of the American Meteorological Society. 2009. Vol. 90. P. 1467—1485. doi: 10.1175/2009BAMS2778.1.
29. Вакуленко Н. В., Нигматулин Р. И., Сонечкин Д. М. К вопросу о глобальном изменении климата // Метеорология и гидрология. 2015. № 9. С. 89—97.
30. Лоренц Э. Н. Природа и теория общей циркуляции атмосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1970. 259 с.
31. Марчук Г. И. Численное решение задач динамики атмосферы и океана. Л.: Гидрометеиздат, 1974. 308 с.
32. Матишов Г. Г., Дженюк С. Л., Моисеев Д. В. Климат и большие морские экосистемы Арктики // Вестник Российской академии наук. 2017. Т. 87, № 2. С. 110—120. doi: 10.7868/S0869587317020086.
33. Семенов В. А. Колебания современного климата, вызванные обратными связями в системе атмосфера — Арктические льды — океан // Фундаментальная и прикладная климатология. 2015. Вып. 1. С. 232—248.
34. Boden T., Andres B. Global CO₂ Emissions from Fossil-Fuel Burning, Cement Manufacture, and Gas Flaring: 1751—2014. [Электронный ресурс]. Режим

доступа: https://cdiac.ess-dive.lbl.gov/ftp/ndp030/global.1751_2014.ems. Дата обращения: 31.01.2023.

35. Kosaka Y., Xie S-P. Recent global-warming hiatus tied to equatorial Pacific surface cooling // *Nature*. 2013. Vol. 501. P. 403—407. doi: 10.1038/nature12534.

36. Xie S-P., Kosaka Y. What Caused the Global Surface Warming Hiatus of 1998—2013? // *Current Climate Change Reports*. 2017. Vol. 3. P. 128 —140. doi: 10.1007/s40641-017-0063-0.