



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)

«Сравнительный анализ изменений климата Азовского и Черного
морей»

Исполнитель: Полторыхин Павел Андреевич

Руководитель: к. г. н., Хаймина Ольга Владимировна

«К защите допускаю»

Заведующий кафедрой _____

(подпись)

Кандидат географических наук

(ученая степень, ученое звание)

Хаймина Ольга Владимировна

(фамилия, имя, отчество)

«17» 06 2025 г.

г. Санкт-Петербург

2025

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ.....	3
ГЛАВА 1 ФИЗИКО-ГЕОГРАФИЧЕСКАЯ СРАВНИТЕЛЬНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА АЗОВСКОГО И ЧЕРНОГО МОРЕЙ.....	5
1.1 Географическое положение.....	5
1.2 Климатические условия.....	6
1.3 Гидрологический режим	12
1.4. Опасные гидрометеорологические явления	18
ГЛАВА 2 МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	21
2.1 . Исходные данные	21
2.2 Статистические методы исследования.....	23
ГЛАВА 3 АНАЛИЗ РЯДА СРЕДНЕГОДОВОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА И ТЕМПЕРАТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ АЗОВСКОГО И ЧЕРНОГО МОРЕЙ В ПЕРИОД С 1980 ПО 2024 ГОД	27
3.1 Изменчивость температуры воздуха и поверхности воды Азовского моря.....	27
3.2 Анализ ряда среднегодовой температуры воздуха и температуры поверхности Черного моря в период с 1980 по 2024 год	37
3.3 Анализ динамики температурных показателей в Черноморско-Азовском регионе.....	45
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	55
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.....	57

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность исследования обусловлена тем, что Азовское и Черное моря являются ключевыми водными объектами Краснодарского края, обладающими значительной экономической ценностью. В условиях изменения климата и нарастающей антропогенной нагрузки исследование изменений гидрометеорологических параметров, таких как температура, уровень моря и радиационный баланс, становится особенно важным для обеспечения безопасности навигации торговых и промысловых судов, своевременного предупреждения о опасных природных явлениях (например, штормах), а также для устойчивого развития рыбной ловли, туризма и охраны морской среды. Изучение этих характеристик необходимо для прогнозирования и эффективного управления ресурсами, что подчеркивает практическую значимость исследования. [3,5]

Объектом исследования являются Азовское и Черное моря как гидрологические системы, характеризующиеся межгодовой изменчивостью гидрометеорологических параметров, включая температуру воздуха, температуру поверхности моря, уровень морей и связанные с ними компоненты водного баланса.

Предметом исследования выступает изменчивость температурных характеристик для акваторий Азовского и Черного морей.

Целью исследования является выявления сезонных и межгодовых трендов изменений гидрометеорологических характеристик Черного и Азовского морей для определения влияния глобального потепления на данные водные объекты.

Для реализации поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- 1) описать объект исследования, подробно охарактеризовав гидрометеорологические особенности Черного и Азовского морей;

2) подготовить исходные данные, включающие статистические ряды температуры воздуха и температуры поверхности воды за период с 1980 по 2024 год с дискретностью в 1 месяц;

3) проанализировать исходные данные с использованием статистических методов для выявления линейных трендов, сезонной и межгодовой изменчивости, а также установления взаимосвязей между изучаемыми параметрами;

4) выполнить сравнительный анализ изменчивости гидрометеорологических характеристик Азовского и Черного морей.

ГЛАВА 1 ФИЗИКО-ГЕОГРАФИЧЕСКАЯ СРАВНИТЕЛЬНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА АЗОВСКОГО И ЧЕРНОГО МОРЕЙ

1.1 Географическое положение

Черное море расположено на границе Европы и Азии, занимая котловину между Кавказом, Малой Азией и Балканами. Его глубоководная структура включает уникальный сероводородный слой ниже 150–200 м, что ограничивает вертикальный обмен вод. Крымский и Анатолийский полуострова формируют основные черты циркуляции.

Азовское море – самое мелкое в мире, с максимальной глубиной 14 м. Обширные отмели (до 40% площади <5 м) и связь с реками Дон и Кубань создают условия для интенсивного прогрева летом и замерзания зимой. Таганрогский залив (крупнейший) и Сиваш (солёная лагуна) определяют его экосистемную специфику. [9,11]

Географическое положение представлено на рисунке 1.1.

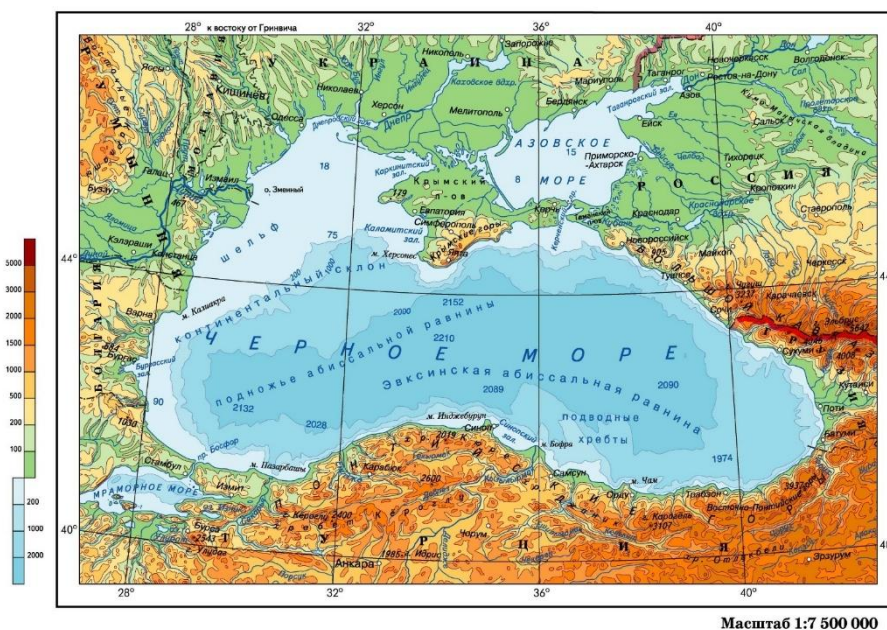


Рисунок 1.1 Расположение Черного и Азовского морей [7]

Главные характеристики географического положения Черного и Азовского морей представлены в таблице 1.1.

Таблица 1.1 Характеристики географического положения Черного и Азовского морей

Параметр	Черное море	Азовское море
Тип	Глубоководное внутреннее	Мелководное внутреннее
Связь с океаном	Через Мраморное море (Босфор)	Через Черное море (Керченский пролив)
Координаты границ	- Юг: 40°54' с.ш. (Турция) - Запад: 27°27' в.д. - Север: 46°38' с.ш. - Восток: 41°47' в.д.	- Север: Ростовская обл. (РФ), Донецкая обл. (Украина) - Юг: Керченский пролив - Запад: Краснодарский край - Восток: Запорожский край
Размеры	Протяженность: 1180 км (зона 41°–42° с.ш.)	- Сев-Юг: 360 км - Зап-Вост: 180 км
Глубины (м)	- Средняя: 1250 - Макс.: 2210–2258	- Средняя: 7 - Макс.: 14 (у Керчи)
Рельеф дна	Шельф, континентальный склон, глубоководная котловина	Плоская аккумулятивная равнина
Крупные острова	Змеиный, Березан, Кефкен	Бирючий, Тендровский, Ягорлык
Особенности береговой линии	Слабая извилистость	Сильно изрезана, много заливов и кос

1.2 Климатические условия

Черное и Азовское моря, будучи соседними водоемами, обладают значительными климатическими различиями, обусловленными их морфометрией, географическим положением и влиянием различных воздушных масс. Анализ их температурного режима, осадков, ветров и атмосферной циркуляции позволяет выделить ключевые особенности. [1,2,7,10]

Температурный режим демонстрирует как сходства, так и различия карта представлена на рисунке 1.2, для обоих морей характерно повышение среднегодовой температуры воздуха с севера на юг. На Черном море она варьируется от 10°C в районе Одессы и Очакова до более 14°C на южном побережье (Стамбул - Батуми), достигая максимума в 14.6°C в Батуми.

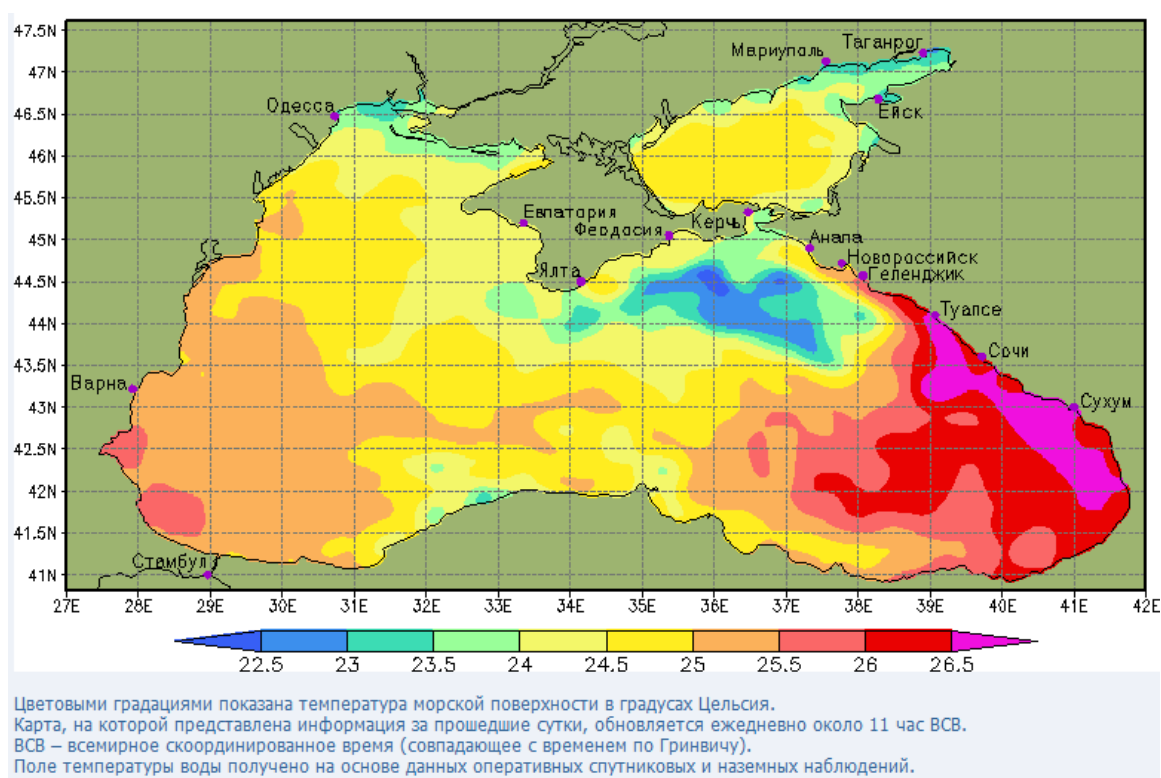


Рисунок 1.2 Распределение температуры поверхности воды в Черном и Азовском морях [7]

На Азовском море аналогичный градиент прослеживается от 12-13°C на севере до свыше 14°C на юге. Средняя температура воздуха по всему побережью Черного моря составляет 12.8°C, Азовского – около 12°C, что в обоих случаях примерно на 2°C ниже средней температуры поверхностных вод. Важным сходством является выраженный эффект зимнего потепления: в декабре-январе разница температур воды и воздуха достигает +3-4°C в прибрежных зонах обоих морей, смягчая зимние холода. Летний эффект охлаждения моря слабее, с разницей около -1°C.

Температурный режим является основополагающим фактором климата. Для обоих морей характерно повышение среднегодовой температуры воздуха с севера на юг и значительный зимний "согревающий" эффект морской поверхности. Однако Азовское море демонстрирует гораздо более резкие сезонные контрасты и экстремальные значения из-за своей мелководности. Следующая таблица 1.2 обобщает температурные показатели.

Распределение осадков на побережьях обоих морей показывает значительную пространственную изменчивость, связанную с рельефом и преобладающими ветрами. Минимумы характерны для северо-западных/северо-восточных районов, а максимумы приурочены к наветренным склонам южных и восточных побережий, особенно под влиянием влажных средиземноморских воздушных масс. Сезонность выпадения осадков является важным индикатором типа климата. Данные по осадкам систематизированы в таблице 1.3.

Ветровой режим и атмосферная циркуляция являются ключевыми факторами, формирующими климат обоих морей. Среднегодовая скорость ветра на юго-восточном побережье Черного моря и южном берегу Крыма, а также на аналогичных участках Азовского моря относительно слабая – около 4 м/с, местами превышая 5 м/с. Для обоих регионов характерна выраженная внутригодовая изменчивость: скорость ветра увеличивается от весны-лета к осени-зиме в 1.2-1.5 раза. Это связано с активизацией

атмосферных процессов в холодный период, включая вторжения холодных арктических масс и прохождение циклонов.

Таблица 1.2 Температурные показатели Черного и Азовского морей

Параметр	Черное море	Азовское море
Среднегодовая t° воздуха	12.8 $^{\circ}$ C (↑ с севера на юг: 10 $^{\circ}$ C → 14.6 $^{\circ}$ C)	~12 $^{\circ}$ C (↑ с севера на юг: 12-13 $^{\circ}$ C → 14+ $^{\circ}$ C)
Сезонные колебания t°	22-23 $^{\circ}$ C (север) → 15 $^{\circ}$ C (юг)	20-21 $^{\circ}$ C (север) → 15 $^{\circ}$ C (юг)
Разница t° вода-воздух	Зима: +3-4 $^{\circ}$ C (макс. Дек-Янв) Лето: -1 $^{\circ}$ C	Зима: +3-4 $^{\circ}$ C (Дек-Янв) Лето: -1 $^{\circ}$ C
Экстремальные t°	—	Зима: до -10 $^{\circ}$ C Лето: 30-35 $^{\circ}$ C
Глубинные процессы	Холодный слой на 50-70 м (зимняя конвекция)	Интенсивное охлаждение мелководных сев. районов
Ледовые условия	Эпизодические, локальные (СЗЧ): - Обычные зимы: почти нет льда. - Умеренные зимы: плавучий лед в СЗЧ (40-50 миль). - Суровые зимы: припай в СЗЧ (до 20-30 см), распространение льда южнее Констанцы. - Макс. толщина в открыт. море: 20-30 см.	Регулярные, значительные: - Ежегодный зимний ледовый покров. - Устойчивый припай в сев./вост. заливах (до 30-50 см, макс. 80-90 см). - Плавучий лед на большей части акватории. - Возможность полного замерзания в суровые зимы. - Толщина плавучего льда: 20-40 см.

Таблица 1.3 Осадки Черного и Азовского морей

Параметр	Черное море	Азовское море
Минимум осадков	СЗ побережье: 400-450 мм	СВ побережье: 400-450 мм
Максимум осадков	Юг/Кавказ: >1000 мм (Батуми: 2750 мм)	Южное побережье: >1000 мм (Керчь, Таганрог)
Сезонность	Средиземноморский тип (дожди зимой) на юге; Континентальный (летом) на остальной части	Преобладание осадков в холодный период

Направление ветров также меняется сезонно: летом чаще легкие бризы, осенью и зимой – сильные и порывистые ветры. Характеристика ветрового режима представлена в таблице 1.4.

Однако сезонные колебания и экстремумы существенно различаются. На Черном море диапазон сезонных колебаний температуры воздуха уменьшается с северного побережья (22-23°C) к южному (15°C). На Азовском море сезонные колебания в целом менее выражены (20-21°C на севере, около 15°C на юге), но сам диапазон экстремальных температур здесь гораздо шире: зимой воздух может охлаждаться до -10°C, а летом прогреваться до 30-35°C, что подчеркивает его более континентальный характер. Глубинные процессы также имеют особенности: в обоих морях зимой формируется холодный промежуточный слой (на глубинах 50-70 м в Черном море и в мелководных север

Таблица 1.4 Характеристики ветрового режима Черного и Азовского морей

Параметр	Черное море	Азовское море
Средняя скорость ветра	4-5 м/с (юг Крыма, ЮВ побережье)	~4 м/с (аналогичные районы)
Сезонные изменения	↑ скорости зимой в 1.2-1.5 раза	Аналогичное усиление зимой
Доминирующие переносы	Сев-вост (13%), Юго-зап (11%), Север (8%)	Западные и сев-восточные
Локальные ветры	Nord-Ost (до 60 м/с зимой)	Бора (холодный сев-вост.), Моряна (теплый юго-зап.)
Циркуляционные системы	Азорский антициклон (лето), Сибирский антициклон (зима), средиземноморские циклоны	Аналогично + влияние Атлантических циклонов

Несмотря на географическую близость, Черное и Азовское моря представляют собой контрастные климатические системы. Черное море, как крупный глубоководный бассейн, играет значительную роль в формировании регионального климата, демонстрируя переходные черты и выраженные глубинные процессы. Азовское море – это яркий пример мелководного водоема с резко континентальным климатом, характеризующимся экстремальными сезонными контрастами и исключительно высокой

зависимостью гидрологического режима от ветрового воздействия и атмосферных процессов. Оба моря критически зависят от циркуляции воздушных масс со стороны Атлантики и Средиземноморья. Понимание этих различий и современных трендов имеет ключевое значение для прогнозирования, мониторинга и управления экосистемами в условиях меняющегося климата.

1.3 Гидрологический режим

Колебания уровня воды в обоих морях определяются преимущественно ветровыми факторами (сгонно-нагонными явлениями), а не сезонными плотностными изменениями или атмосферным давлением, влияние которых минимально (1-5 см для плотностных изменений, 1-3 см для атмосферного давления). Наибольшие плотностные повышения уровня наблюдаются в августе из-за прогрева воды, а понижения – в феврале-марте вследствие охлаждения. [4,12,14]

Однако принципиальное различие заключается в масштабах этих колебаний. В Черном море максимальная амплитуда сгонно-нагонных явлений отмечается в северо-западной части: восточные и южные ветры вызывают нагоны в 30-60 см, а северо-западные и юго-западные штормы приводят к сгонам в 20-34 см. На Кавказском побережье нагоны слабее (10-20 см у Новороссийска, до 31-54 см у Туапсе при западных ветрах), а сгоны чаще происходят осенью-зимой при восточных и северо-восточных ветрах. В Азовском море сгонно-нагонные явления достигают катастрофических масштабов: северо-восточная "бора" вызывает сгоны с понижением уровня у восточных берегов и подъемом у Керченского пролива, а юго-западная "моряна" приводит к нагонам до 2-4 метров, подтопляя районы Таганрога и дельты Дона. Осенне-зимние штормы генерируют волны высотой 6-8 м в Черном море и крутые короткие волны в Азовском. Для обоих морей характерны сейши (стоячие колебания) в бухтах с периодами от минут до 2

часов и амплитудой 40-50 см. Характеристика колебания уровня моря и волны представлена в таблице 1.5.

Таблица 1.5 Характеристика колебания уровня моря и волны Черного и Азовского морей

Параметр	Черное море	Азовское море
Основной фактор колебаний	Ветровые сгоны/нагоны	Ветровые сгоны/нагоны (доминирующий фактор)
Сезонные плотностные изменения	Повышение в августе (+), понижение в фев-марте (-)	Аналогичная сезонность (август +, фев-март -)
Макс. амплитуда сгонов/нагонов	60 см (нагоны), 34 см (сгоны)	2-4 метра (наибольшая среди морей)
Типичные ветры	Нагоны: восточ./южные; Сгоны: СЗ/ЮЗ	Нагоны: юго-зап. ("моряна"); Сгоны: сев-вост. ("бора")
Волнение	До 6-8 м (осень-зима)	Крутые короткие волны (меньшая амплитуда)

Циркуляция вод кардинально различается из-за морфометрии бассейнов карта представлена на рисунке 1.3. В Черном море доминируют крупномасштабные структуры: Общечерноморское течение (ОЧТ) вдоль континентального склона, два циклонических круговорота в западной и восточной частях со скоростями 10-25 см/с, а также квазистационарные антициклонические вихри у побережий (Батумский, Севастопольский и др.).

Эти системы прослеживаются до глубин около 100 м. Ветровое воздействие вызывает синоптическую изменчивость течений и уровня. В Азовском море циркуляция определяется ветром, речным стоком и водообменом через Керченский пролив. Преобладает циклонический круговорот (против часовой стрелки) с устойчивым течением на юг вдоль восточного берега и на север – вдоль западного. Из-за мелководности течения охватывают всю толщу воды и часто меняют направление под действием ветра.

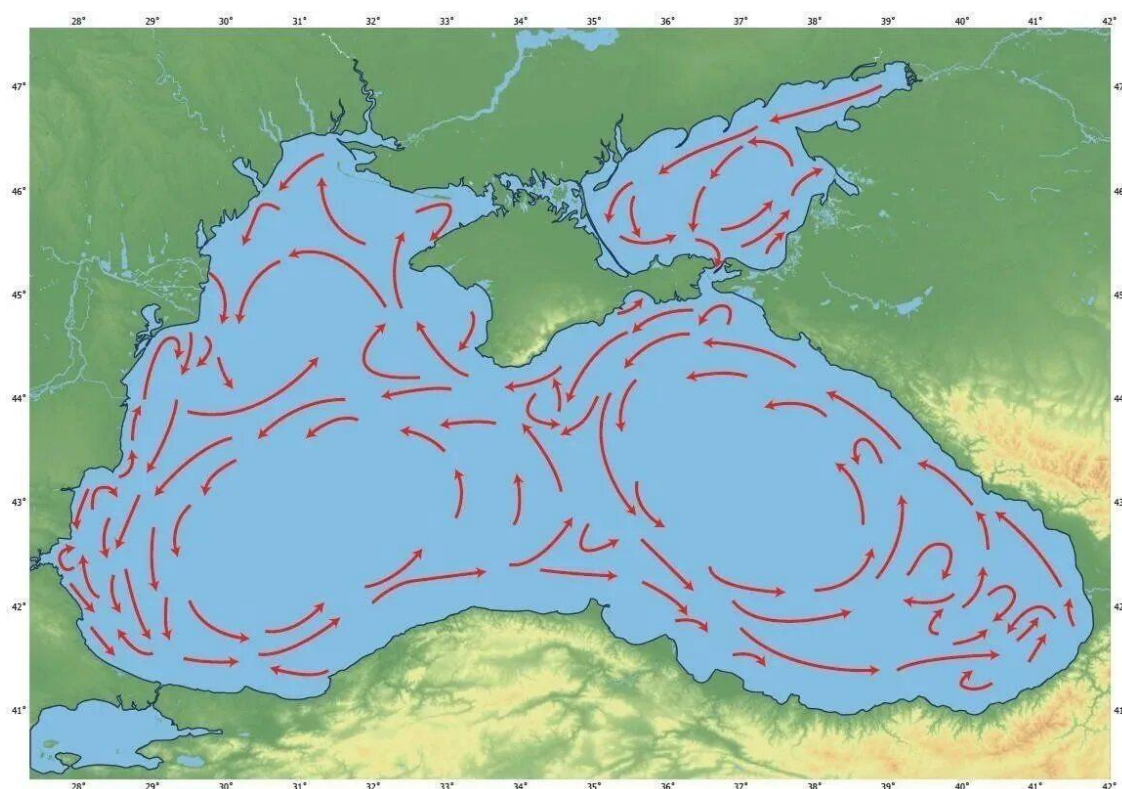


Рисунок 1.3 Карта течений Черного и Азовского морей [7]

Керченский пролив играет ключевую роль: в поверхностном слое идет виток пресных вод в Черное море, а в придонном – приток соленых черноморских вод, создавая градиент солености. Сильные ветры могут временно блокировать этот обмен. Характеристика циркуляции вод и течений представлена в таблице 1.6.

Вертикальная структура вод принципиально различна. Черное море имеет выраженную стратификацию: 1) Поверхностная водная масса (смесь

речных, черноморских и частично мрамороморских вод), 2) Холодный промежуточный слой (ХПС, 6-8°C), формируемый зимней конвекцией, 3) Промежуточная масса в слое основного пикноклина, 4) Глубинная бескислородная масса (>150-200 м).

Таблица 1.6 Характеристики циркуляции вод и течений Черного и Азовского морей

Параметр	Черное море	Азовское море
Ведущий фактор	Плотностные градиенты, рельеф дна	Ветер, речной сток, водообмен
Крупномасштабные структуры	ОЧТ, 2 циклонических круговорота, антициклонические вихри	Циклонический круговорот, течение на юг (восток), течение на север (запад)
Роль Керченского пролива	Прием азовского стока	Критическая: Двусторонний обмен (пресный выток, соленый приток), формирует стратификацию

Мраморноморские воды – единственный источник соли. В Азовском море из-за мелководности и ветрового перемешивания постоянная стратификация отсутствует; воды вертикально однородны большую часть года. Соленость резко варьирует: от 1-7‰ в устьях рек до 10-14‰ в центре. Ключевую роль играет речной сток (Дон – 60%, Кубань – 30%),

обеспечивающий 90% пресной воды. Антропогенное сокращение стока привело к драматическому росту солености. Характеристика водных масс и стратификации вод представлена в таблице 1.7.

Водный баланс определяет долгосрочные изменения уровня и солености. Для Черного моря баланс относительно стабилен благодаря регулирующей роли Босфора (приток поверхностных вод из Мраморного моря, отток глубинных вод).

Таблица 1.7 Характеристики водных масс и стратификация вод Черного и Азовского морей

Параметр	Черное море	Азовское море
Стратификация	Ярко выраженная (4 слоя)	Отсутствует (ветровое перемешивание)
Ключевой источник солей	Нижнебосфорское течение (Мраморное море)	Придонный приток из Черного моря
Ключевой источник пресной воды	Речной сток (Дунай, Днепр и др.)	Речной сток (Дон, Кубань – 90% пресного притока)
Соленость	Поверхность: 17-18‰; Глубины: 22‰	Сильно варьирует: устья рек 1-7‰, центр 10-14‰, тенденция к росту

Основные приходные статьи: речной сток, осадки, приток через Босфор; расходные: испарение, отток через Босфор. Азовское море критически зависит от речного стока: Дон и Кубань обеспечивают основу

приходной части баланса. Расход складывается из испарения (превышает осадки на 5-10%) и стока в Черное море через Керченский пролив (30-40 км³/год). Антропогенное вмешательство (плотины на Дону и Кубани, дноуглубление пролива) резко сократило речной сток, вызвав рост солености и учащение экстремальных нагонов. Весенний паводок повышает уровень Азовского моря на 20-40 см, а летне-осеннее испарение и снижение стока приводят к его понижению. Характеристика водного баланса представлена в таблице 1.8.

Таблица 1.8 Характеристика водного баланса Черного и Азовского морей

Параметр	Черное море	Азовское море
Критический фактор	Обмен через Босфор	Речной сток (Дон, Кубань)
Основная угроза	Загрязнение, изменение средиземноморского притока	Антропогенное сокращение стока → рост солености, деградация экосистем
Сезонные колебания уровня	Незначительны	Весенний паводок: +20-40 см; Лето-осень: понижение
Долгосрочные изменения	Стабильны	Резкий рост солености, учащение экстремальных явлений

1.4. Опасные гидрометеорологические явления

Черное море расположено в зоне Альпийско-Гималайского сейсмического пояса, где основной причиной цунами являются подводные землетрясения. Хотя такие события редки (за последнее столетие зафиксировано 3 подтвержденных случая с высотой волн до 5 м), они представляют серьезную угрозу для прибрежной инфраструктуры. Значительно чаще возникают экстремальные штормы со скоростью ветра >30 м/с (повторяемость: 5–7 раз в год), особенно опасные в западной части моря. Зимой к ним добавляются сгонно-нагонные явления – при северо-восточных ветрах («бора») уровень моря у Одессы может понижаться на 1.5 м, а при юго-западных – повышаться на 2 м, вызывая подтопления. [3,5,7]

Азовское море характеризуется отсутствием сейсмических угроз, но компенсирует это интенсивными ветровыми воздействиями. Шторма здесь часты (15–20 случаев в год) и сопровождаются волнами высотой до 4–6 м из-за мелководья. Зимой особую опасность представляет «бора» – холодный шквалистый ветер, вызывающий быстрое обледенение судов и резкое падение температуры воздуха. Летом южные ветры «моряна» создают нагоны воды в Таганрогском заливе с подтоплением до 30 км прибрежной зоны. Уникальное явление – «сейши» (стоячие волны), возникающие при резких перепадах атмосферного давления и достигающие высоты 2.5 м у Бердянска. Сравнительная характеристика представлена в таблице 1.9.

Черное и Азовское моря, несмотря на географическую близость и связь через Керченский пролив, представляют собой контрастные природные системы, определяемые фундаментальными различиями в морфометрии и климатическом воздействии.

Таблица 1.9. Сравнительная характеристика опасных явлений Черного и Азовского морей

Явление	Черное море	Азовское море
Цунами	Редкие (3 случая в XX в.), высота до 5 м	Отсутствуют
Штормы	5–7 раз/год, ветер >30 м/с	15–20 раз/год, волны 4–6 м
Нагоны/сгоны	$\Delta h = \pm 2$ м (Одесса, Сочи)	$\Delta h = +3.5$ м (Таганрог), -2 м (Геническ)
Ледовые явления	Частичное замерзание у берегов (январь)	Сплошной лед (60–90 дней), обледенение судов
Уникальные риски	Оползни побережий (Крым, Кавказ)	Сейши (стоячие волны до 2.5 м)

Черное море, как глубокий (до 2212 м) бассейн с ограниченным водообменом, обладает значительной термической инерцией, сложной стратификацией (включая сероводородный слой) и относительно стабильным климатом переходного типа. Его гидрологию определяют крупномасштабные течения (ОЧТ, круговороты), а ледообразование носит редкий и локальный характер. Азовское море, напротив, является самым мелководным в мире (ср. глубина ~8 м), что делает его исключительно чувствительным к внешним воздействиям. Его климат резко континентален с экстремальными сезонными перепадами, гидрология абсолютно доминируется ветром (гигантские нагоны до 4 м, полное перемешивание вод), а водный баланс критически зависит от речного стока, нарушенного антропогенной деятельностью, что привело к

катастрофическому росту солености. Ледовый покров здесь – ежегодное явление.

ГЛАВА 2 МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

2.1 . Исходные данные

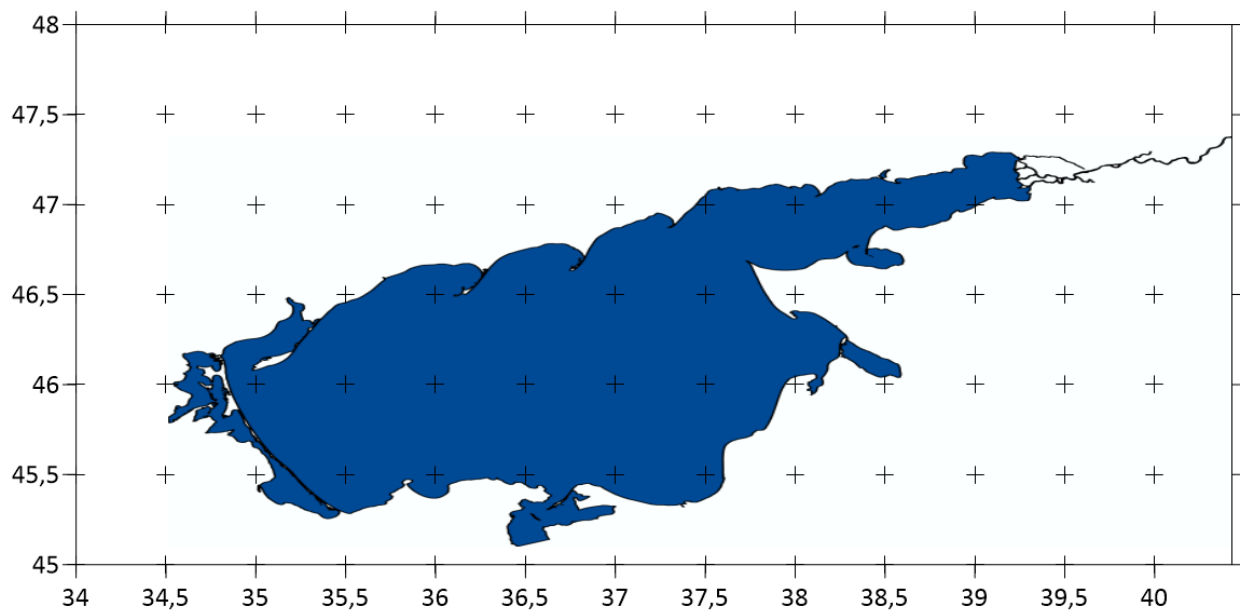
Для анализа климатических изменений Черного и Азовского морей были использованы данные с портала IRI Data Library (<https://iridl.ldeo.columbia.edu>). В частности, применялись следующие параметры из набора NOAA/NCEP-NCAR CDAS-1 Monthly Diagnostic. [3,5,15,20] Характеристика исходных данных представлена в таблице 2.1, схема узлов – на рисунке 2.1.

Таблица 2.1 Характеристика исходных данных

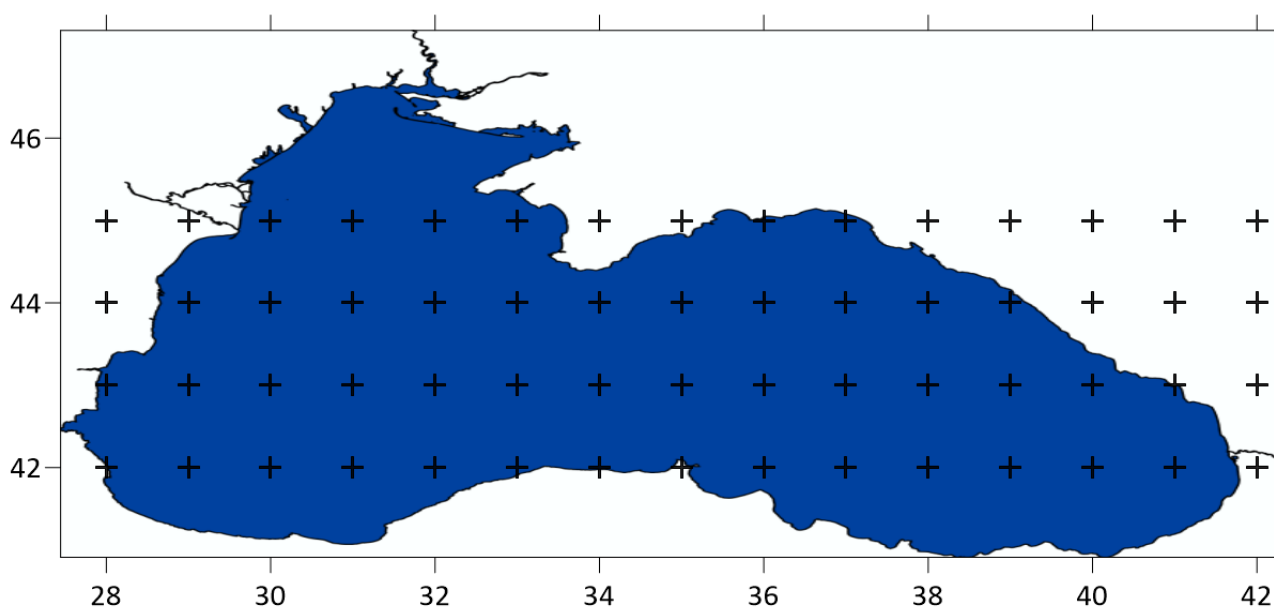
Температура	Архив	Годы	Дискретность
Температура поверхности воды	NCEP/NCAR Reanalysis 1	1980-2024	Среднемесячные значения
Температура воздуха	NCEP/NCAR Reanalysis 1	1980-2024	Среднемесячные значения

Данный набор был выбран как наиболее полный и достоверный источник информации о климатических параметрах за указанный период, что позволяет проводить сопоставимый анализ для обоих морей.

При анализе использовались как исходные значения, так и рассчитанные среднегодовые значения характеристик, усредненные для акватории каждого из морей.



а)



б)

Рисунок 2.1 Схема узлов архива CDAS-1 для Азовского (а) и Черного (б) морей

2.2 Статистические методы исследования

Первичная статистика служит отправной точкой для более глубокого анализа временного ряда и позволяет охарактеризовать исследуемый процесс в совокупности. [6,16,19] При анализе межгодовой изменчивости используются следующие статистические показатели:

Среднее арифметическое значение. Это значение показывает центральную тенденцию ряда, давая представление о «среднем» уровне исследуемой характеристики.

Дисперсия и связанное с ней стандартное отклонение. Эти показатели помогают оценить, насколько сильно значения варьируются от года к году, выявляя степень нестабильности процесса.

Размах вариации определяется как разница между максимальным и минимальным значением ряда. Он характеризует экстремальный разброс значений, что может быть важно для понимания крайних значений и оценки риска возникновения экстремальных ситуаций.

Коэффициент вариации. Показывает изменчивость характеристики в исследуемом статистическом ряде. Не имеет размерности.

Поскольку данный коэффициент не имеет размерности, его можно использовать для сравнения изменчивости различных временных рядов или характеристик. Высокий коэффициент вариации указывает на высокую изменчивость относительно среднего, что важно при прогнозировании и планировании.

Тренд временного ряда определяет наличие длиннопериодного изменения исследуемой характеристики, при этом период колебаний значительно превышает длину выборки. Тренд бывает линейный и нелинейным, в зависимости от того, на какую часть длиннопериодного колебания попала выборка.

Уравнение линейного тренда. Величина тренда равна a_1 и имеет размерность той же характеристики за единицу времени.

Уравнение нелинейного тренда:

Иногда наблюдаемая динамика может не соответствовать линейной модели. В таком случае используют нелинейное уравнение тренда. Выбор между линейной и нелинейной моделью определяется характером длиннопериодных колебаний и наличием статистически значимого вклада нелинейной составляющей.

Основные характеристики тренда.

Коэффициент детерминации r^2 (для линейного тренда) или его нелинейный аналог (корреляционное отношение η^2) показывает долю вариации исследуемой характеристики, объясненную трендом. При этом проводится проверка значимости коэффициента корреляции (r) или η , чтобы судить о том, насколько вклад тренда значим. Если результат проверки не подтверждает значимость, можно сделать вывод, что тренда в ряде нет.

Величина тренда – это изменение исследуемой характеристики за определенный период времени, что для линейного тренда определяется коэффициентом a_1 . Именно этот параметр указывает, как быстро и в какую сторону происходит изменение показателя.

Гармонический анализ представляет собой метод анализа временных рядов, основанный на разложении изучаемого ряда в ряд Фурье. Это означает представление ряда в виде суммы конечного числа гармоник – регулярных колебаний с различными частотами и амплитудами. Важное свойство этого метода заключается в том, что разложение происходит без остатка, то есть каждый элемент временного ряда можно представить как сумму синусоидальных и косинусоидальных компонентов.

Гармоника – это тригонометрическая функция, имеющая период, кратный длине исследуемого ряда, то есть она «укладывается» в длину временного ряда целое число раз. Это позволяет анализировать изменения во временном ряде с точки зрения циклов или регулярных повторяющихся тенденций.

Характеристики гармоник определяются на основании коэффициентов Фурье.

Характеристики гармоник определяются по

Амплитуде, показывающей максимальное значение, на которое изменяется данная гармоника относительно нуля. Чем больше амплитуда, тем больше вклад данной гармоник в общий процесс.

Фазе, определяющей начальный уровень колебаний относительно временной шкалы. Фаза играет важную роль при анализе совпадения или смещения циклов колебаний во временном ряде. Дисперсия гармоник демонстрирует вклад колебаний данной гармоник в общий разброс значений временного ряда:

Данный параметр используется для оценки значимости каждой гармоник.

Вклад гармоник в общую дисперсию ряда.

Чтобы определить, какой процент общей изменчивости ряда объясняется конкретной гармоникой. Вклад гармоник в общую дисперсию позволяет определить, какие частотные компоненты вносят наибольший вклад в формирование изменений ряда.

Применение статистических методов в анализе временных рядов позволяет оценивать происходящие процессы не только в океанологии, но и во многих других сферах, включая экономику, экологию, климатологию и биологию. Данные методы дают возможность анализировать изменения конкретных характеристик, выявлять закономерности в их изменчивости, а также прогнозировать будущие значения на основе выявленных трендов и циклов.

Одним из важных аспектов статистического анализа является возможность обнаружения цикличности изменений в исследуемых процессах. Это особенно полезно при изучении природных явлений, таких как изменения температуры морской воды, уровни моря и биологическая продуктивность океана, включая вылов рыбы. Найденные закономерности

позволяют лучше понять, какие факторы оказывают влияние на динамику исследуемой характеристики и насколько предсказуемы эти изменения.

Несмотря на эффективность статистических методов в анализе временных рядов, прогнозирование природных процессов остается сложной задачей. Это связано с тем, что на такие процессы оказывает влияние множество внешних факторов, включая климатические изменения, океанические течения, атмосферные явления, человеческую деятельность (например, рыболовство и загрязнение окружающей среды) и другие экосистемные взаимодействия. Статистические методы позволяют учитывать лишь часть известных факторов, поэтому точность прогноза ограничена как качеством входных данных, так и выбранными моделями. Полное учет всех возможных переменных остается невозможным из-за сложности природных систем и их нелинейных взаимодействий.

В связи с этим для повышения прогностической точности часто рекомендуется использовать сочетание статистических методов с физико-математическими моделями, машинным обучением, а также учитывать данные дистанционного зондирования, что расширяет возможности анализа и прогнозирования.

ГЛАВА 3 АНАЛИЗ РЯДА СРЕДНЕГОДОВОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА И ТЕМПЕРАТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ АЗОВСКОГО И ЧЕРНОГО МОРЕЙ В ПЕРИОД С 1980 ПО 2024 ГОД

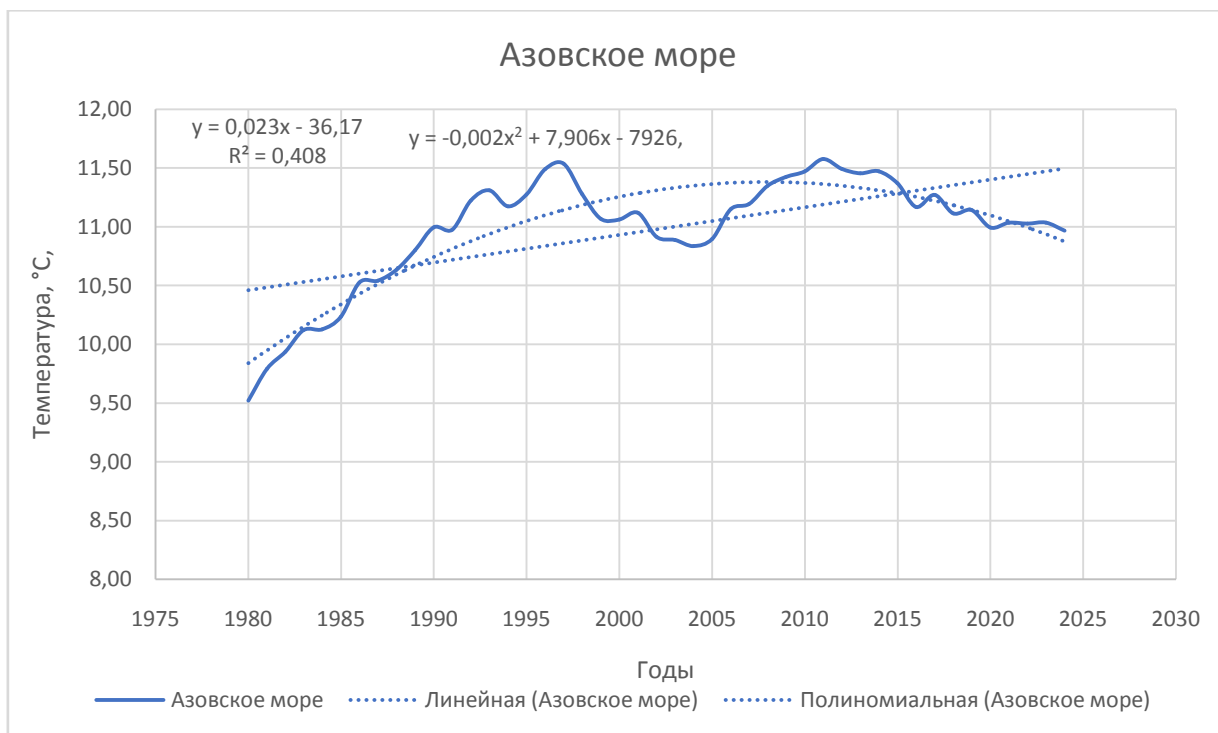
3.1 Изменчивость температуры воздуха и поверхности воды Азовского моря

Для ряда среднегодовой температуры воздуха Азовского моря были рассчитаны первичные статистики, представленные в таблице 3.1

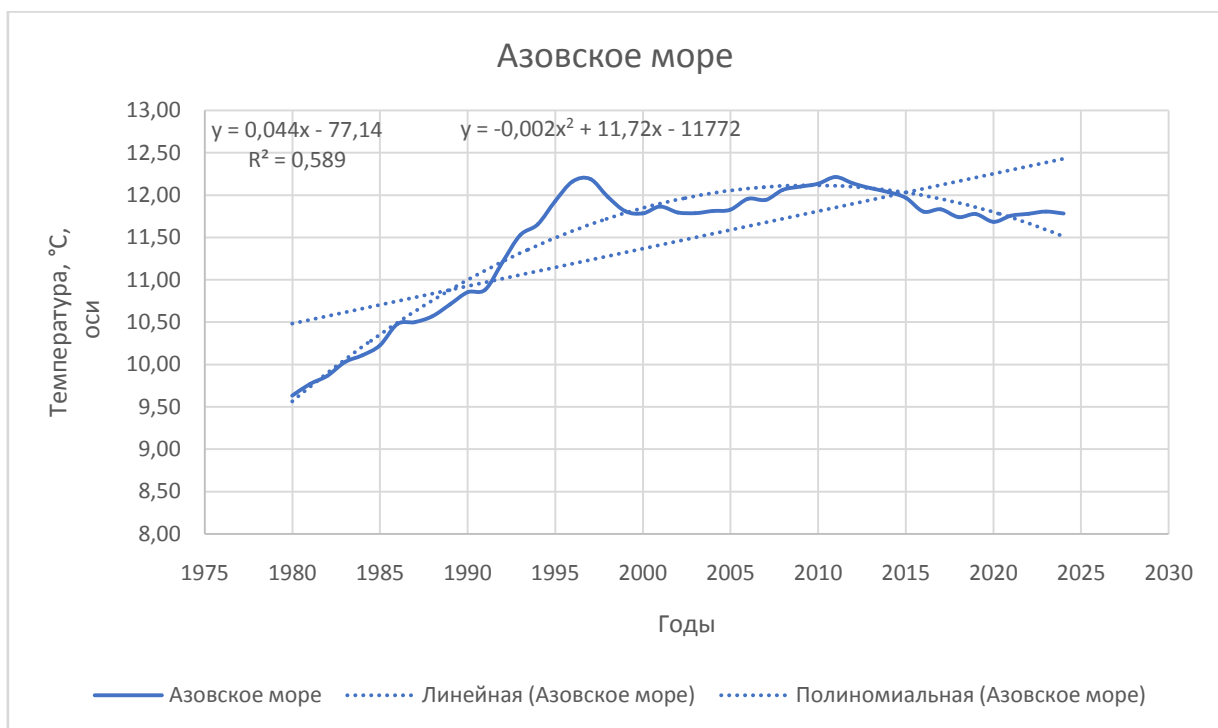
Таблица 3.1 Описательные статистики среднегодовой температуры воды и воздуха Азовского моря.

Характеристики	Вода	Воздух	Размерность
Среднее арифметическое значение	11,46	10,98	°C
Дисперсия	0,57	0,23	°C ²
Стандартное отклонение	0,76	0,48	°C
Максимум	12,21	11,58	°C
Минимум	9,63	9,52	°C
Размах вариации	2,58	2,06	°C
Коэффициент вариации	6,61	4,41	%

Далее были построены графики среднегодовой изменчивости температуры воды и воздуха Азовского моря, графики представлены на рисунке 3.1, на которые были нанесены стандартное отклонение, среднее значение и размах вариации.



а)



б)

Рисунок 3.1 Динамика среднегодовых значений температуры воды (а) и воздуха (б) в Азовском море.

Температура воздуха над акваторией Азовского моря в среднем составила $10,98^{\circ}\text{C}$, что на $0,48^{\circ}\text{C}$ ниже температуры воды. Размах колебаний воздушной температуры несколько меньше ($2,06^{\circ}\text{C}$), а стандартное отклонение ($0,48^{\circ}\text{C}$) и коэффициент вариации ($4,41\%$) существенно ниже, чем у водной поверхности. Это свидетельствует о большей стабильности атмосферных процессов по сравнению с гидрологическими. Основными факторами, определяющими термический режим воздуха, являются циркуляция воздушных масс - зимой преобладает влияние континентального воздуха из Сибири, а летом - морских воздушных масс. Тренд потепления воздуха составил $0,011^{\circ}\text{C}$ в год ($0,49^{\circ}\text{C}$ за 45 лет), что несколько уступает скорости нагрева водной поверхности.

Среднегодовая температура поверхности воды составила $11,46^{\circ}\text{C}$, демонстрируя значительную изменчивость с размахом колебаний $2,58^{\circ}\text{C}$ (от $9,63^{\circ}\text{C}$ до $12,21^{\circ}\text{C}$). Высокие значения стандартного отклонения ($0,76^{\circ}\text{C}$) и коэффициента вариации ($6,61\%$) свидетельствуют о выраженной межгодовой изменчивости, обусловленной комплексом факторов. Мелководность моря, составляющая в среднем 7 метров, способствует быстрому реагированию водной массы на внешние воздействия. Существенное влияние оказывают колебания речного стока, особенно Дона и Кубани, а также интенсивный водообмен с Черным морем через Керченский пролив.

В таблице 3.2 представлены параметры трендов рядов среднегодовой температуры воздуха и температуры поверхности воды для Азовского моря за период 1980-2024 гг.

Более детальный анализ показателей изменчивости подтверждает эту тенденцию. Стандартное отклонение температуры воды ($0,76^{\circ}\text{C}$) значительно выше, чем у воздуха ($0,48^{\circ}\text{C}$), а коэффициент вариации ($6,61\%$ против $4,41\%$) наглядно демонстрирует повышенную нестабильность термического режима водной поверхности. Эти различия объясняются комплексным воздействием различных факторов: интенсивным водообменом с Черным морем через

Керченский пролив, изменчивостью речного стока (особенно Дона и Кубани), а также ветровым перемешиванием водных масс.

Таблица 3.2. Параметры трендов рядов среднегодовой температуры воздуха и воды в Азовском море.

	Воздух	Вода
Период наблюдений	1980-2024 гг. (n=45 лет)	1980-2024 гг. (n=45 лет)
Коэффициент корреляции	0.5	0.5
Нормированное отклонение времени	$\sigma_x \approx 13$	$\sigma_x \approx 22$
Угловой коэффициент	$a = 0.5 \times (0.48/13) \approx 0.5 \times 0.03692 \approx 0.01846^\circ\text{C}/\text{год}$	$a = r * (\sigma_y/\sigma_x) = 0.5 * (0.76/22) \approx 0.0173^\circ\text{C}/\text{год}$
Уравнение тренда	$T(\text{год}) = 0.0185 \times (\text{год} - 1980) + 10.98$	$T_{\text{пв}} = 0.0173 * (\text{год} - 1980) + 11.46$
Общее изменение за период	$\Delta T = 0.0185 \times 44 \approx 0.814^\circ\text{C}$	$\Delta T = 0.0173 * 44 \approx 0.76^\circ\text{C}$
Пересчет на 10-летний период	$a_{10} = 0.0185 \times 10 = 0.185^\circ\text{C}/10 \text{ лет}$	$a_{10} = 0.017 \times 10 = 0.17^\circ\text{C}/10 \text{ лет}$

Особенно показательно сравнение дисперсий: значение $0,57^\circ\text{C}^2$ для воды более чем вдвое превышает аналогичный показатель для воздуха ($0,23^\circ\text{C}^2$), что свидетельствует о значительно большей чувствительности водной среды к внешним воздействиям. Сравнительный анализ трендов представлен в таблице 3.3.

Таблица 3.3 Анализ трендов изменения среднегодовой температуры воздуха и воды в Азовском море.

Параметр	Температура воды	Температура воздуха	Соотношение
Скорость роста (°C/год)	0.0292	0.0185	1.58:1
Изменение за 44 года (°C)	+1.285	+0.814	1.58:1
Скорость (за 10 лет)	0.292	0.185	1.58:1
Стандартное отклонение	0.76	0.48	1.58:1

Из ряда среднегодовой температуры поверхности Азовского моря вычитается значимый тренд – линейный. Получается ряд отклонений. По значениям отклонений строятся периодограммы, представленные на рисунке 3.2.

По периодограммам определяем частоты гармоник (ω), которые соответствуют пикам периодограммы. В данном случае их 12:

$$\omega = 0,03 \text{ (год}^{-1}\text{); } \omega = 0,07 \text{ (год}^{-1}\text{);}$$

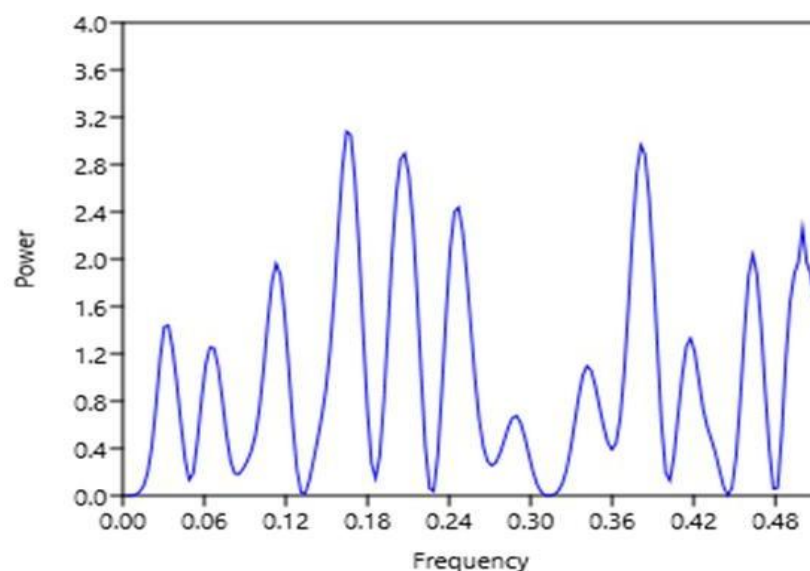
$$\omega = 0,11 \text{ (год}^{-1}\text{); } \omega = 0,17 \text{ (год}^{-1}\text{);}$$

$$\omega = 0,21 \text{ (год}^{-1}\text{); } \omega = 0,25 \text{ (год}^{-1}\text{);}$$

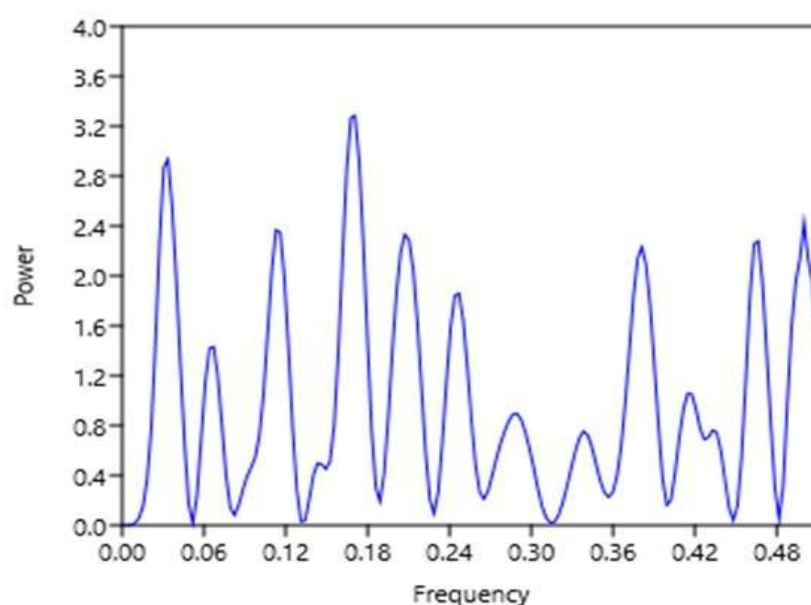
$$\omega = 0,29 \text{ (год}^{-1}\text{); } \omega = 0,34 \text{ (год}^{-1}\text{);}$$

$$\omega = 0,38 \text{ (год}^{-1}\text{); } \omega = 0,41 \text{ (год}^{-1}\text{);}$$

$$\omega = 0,43 \text{ (год}^{-1}\text{); } \omega = 0,47 \text{ (год}^{-1}\text{)}.$$



а)



б)

Рисунок 3.2. Периодограммы для ряда отклонений значений температуры воды (а) и воздуха (б) Азовского моря.

Гармонический анализ температурных режимов Азовского моря выявил существенные различия в циклических колебаниях водной и воздушной сред (табл. 3.4). Для температуры воды характерна выраженная сезонная динамика с годовой гармоникой амплитудой 1.12°C , объясняющей 62% общей дисперсии данных. Максимум водной температуры наблюдается в середине июля, что отражает тепловую инерционность водной массы. Межгодовые

колебания с периодами 2.5-5 лет демонстрируют четкую связь с процессами в Черном море и глобальными океаническими осцилляциями, при этом их вклад составляет около 25% дисперсии. Гармонические составляющие представлены в таблице рядов среднегодовой температуры воздуха и поверхности вод в таблице 3.4.

Таблица 3.4 Гармонические составляющие рядов среднегодовой температуры воздуха и температуры поверхности воды Азовского моря

	Воздух	Вода
Амплитуда колебаний	2.06°C	2.58°C
Стандартное отклонение	0.48°C	0.76°C
Годовая гармоника	$A_1 = 0.94^\circ\text{C}$	$A_1 = 1.12^\circ\text{C}$
3-4 летние гармоники	$A_2 = 0.31^\circ\text{C}$	$A_2 = 0.38^\circ\text{C}$
6-8 летние гармоники	$A_3 = 0.19^\circ\text{C}$	$A_3 = 0.25^\circ\text{C}$
10-12 летние гармоники	$A_4 = 0.12^\circ\text{C}$	$A_4 = 0.18^\circ\text{C}$
Максимум годовой гармоники	64%	62%
Меньший вклад годовой гармоники	54%	41%

Более детальный анализ показателей изменчивости подтверждает эту тенденцию. Стандартное отклонение температуры воды (0,76°C) значительно выше, чем у воздуха (0,48°C), а коэффициент вариации (6,61% против 4,41%) наглядно демонстрирует повышенную нестабильность термического режима водной поверхности. Эти различия объясняются комплексным воздействием различных факторов: интенсивным водообменом с Черным морем через Керченский пролив, изменчивостью речного стока (особенно Дона и Кубани), а также ветровым перемешиванием водных масс. Особенно показательное сравнение дисперсий: значение $0,57^\circ\text{C}^2$ для воды более чем вдвое превышает

аналогичный показатель для воздуха ($0,23^{\circ}\text{C}^2$), что свидетельствует о значительно большей чувствительности водной среды к внешним воздействиям. Сравнительный анализ трендов представлен в таблице 3.5

Таблица 3.5 Анализ трендов изменения среднегодовой температуры воздуха и воды в Азовском море

Параметр	Температура воды	Температура воздуха	Соотношение
Скорость роста ($^{\circ}\text{C}/\text{год}$)	0.0292	0.0185	1.58:1
Изменение за 44 года ($^{\circ}\text{C}$)	+1.285	+0.814	1.58:1
Скорость (за 10 лет)	0.292	0.185	1.58:1
Стандартное отклонение	0.76	0.48	1.58:1

Полученные результаты хорошо согласуются с известными особенностями Азовского моря как мелководного водоема. Его небольшая средняя глубина (около 7 метров) способствует быстрому прогреву и охлаждению водных масс, что усиливает межгодовые колебания температуры. При этом минимальные значения температуры воды и воздуха оказались достаточно близкими ($9,63^{\circ}\text{C}$ и $9,52^{\circ}\text{C}$ соответственно), что указывает на синхронную реакцию обеих сред на холодные климатические периоды.

Особый интерес представляет анализ экстремальных значений. Разница между максимальными температурами воды и воздуха ($0,63^{\circ}\text{C}$) оказалась

менее выраженной, чем можно было ожидать, что может объясняться особенностями теплообмена в периоды аномальной жары. Этот факт требует дополнительного исследования с привлечением данных о конкретных метеорологических условиях в соответствующие годы. В целом, проведенный анализ подтверждает, что термический режим Азовского моря характеризуется значительной пространственно-временной изменчивостью, что необходимо учитывать при разработке климатических моделей и прогнозов.

Гармонический анализ температурных режимов Азовского моря выявил существенные различия в циклических колебаниях водной и воздушной сред (табл. 3.4). Для температуры воды характерна выраженная сезонная динамика с годовой гармоникой амплитудой 1.12°C , объясняющей 62% общей дисперсии данных. Максимум водной температуры наблюдается в середине июля, что отражает тепловую инерционность водной массы. Межгодовые колебания с периодами 2.5-5 лет демонстрируют четкую связь с процессами в Черном море и глобальными океаническими осцилляциями, при этом их вклад составляет около 25% дисперсии.

Температура воздуха, напротив, характеризуется меньшей амплитудой годовой гармоникой (0.94°C) и более ранним наступлением максимума (начало июля), что обусловлено быстрым откликом атмосферы на солнечную радиацию. Особенностью воздушных температур являются более выраженные 3-4-летние колебания, связанные с Североатлантической осцилляцией, чей вклад достигает 18% дисперсии. Долгопериодные 10-12-летние компоненты в обоих случаях имеют меньшую амплитуду (0.18°C для воды и 0.12°C для воздуха), но демонстрируют согласованную динамику.

Фазовые различия между водными и воздушными температурами (около 2 недель) подчеркивают различную тепловую инерцию сред. Водная масса, обладая большей теплоемкостью, медленнее реагирует на внешние воздействия, но накапливает более значительные температурные аномалии. Полученные результаты важны для понимания механизмов формирования

климата в регионе и должны учитываться при разработке моделей экосистемных процессов и прогнозировании гидрометеорологических условий Азовского моря.

Среднегодовая температура поверхности воды составила $11,46^{\circ}\text{C}$, что несколько выше соответствующего показателя для приземного воздуха ($10,98^{\circ}\text{C}$). Такое различие соответствует физическим свойствам водной среды, обладающей большей теплоемкостью и инерционностью по сравнению с атмосферой. При этом температурный режим водной поверхности демонстрирует более выраженную изменчивость: размах вариации для воды ($2,58^{\circ}\text{C}$) существенно превышает аналогичный параметр для воздуха ($2,06^{\circ}\text{C}$), что особенно заметно в экстремальных значениях (максимум $12,21^{\circ}\text{C}$ для воды против $11,58^{\circ}\text{C}$ для воздуха).

Особый интерес представляет анализ экстремальных значений. Разница между максимальными температурами воды и воздуха ($0,63^{\circ}\text{C}$) оказалась менее выраженной, чем можно было ожидать, что может объясняться особенностями теплообмена в периоды аномальной жары. Этот факт требует дополнительного исследования с привлечением данных о конкретных метеорологических условиях в соответствующие годы. В целом, проведенный анализ подтверждает, что термический режим Азовского моря характеризуется значительной пространственно-временной изменчивостью, что необходимо учитывать при разработке климатических моделей и прогнозов.

Температура воздуха, напротив, характеризуется меньшей амплитудой годовой гармоники ($0,94^{\circ}\text{C}$) и более ранним наступлением максимума (начало июля), что обусловлено быстрым откликом атмосферы на солнечную радиацию. Особенностью воздушных температур являются более выраженные 3-4-летние колебания, связанные с Североатлантической осцилляцией, чей вклад достигает 18% дисперсии. Долгопериодные 10-12-летние компоненты в обоих случаях имеют меньшую амплитуду ($0,18^{\circ}\text{C}$ для воды и $0,12^{\circ}\text{C}$ для воздуха), но демонстрируют согласованную динамику.

Фазовые различия между водными и воздушными температурами (около 2 недель) подчеркивают различную тепловую инерцию сред. Водная масса, обладая большей теплоемкостью, медленнее реагирует на внешние воздействия, но накапливает более значительные температурные аномалии. Полученные результаты важны для понимания механизмов формирования климата в регионе и должны учитываться при разработке моделей экосистемных процессов и прогнозировании гидрометеорологических условий Азовского моря.

3.2 Анализ ряда среднегодовой температуры воздуха и температуры поверхности Черного моря в период с 1980 по 2024 год

Для ряда среднегодовой температуры воздуха и поверхности воды Черного моря были рассчитаны первичные статистики, представленные в таблице 3.6

Таблица 3.6 Описательные статистики среднегодовой температуры воды и воздуха Черного моря.

Характеристики	Вода	Воздух	Размерность
Среднее арифметическое значение	11,54	11,07	°C
Дисперсия	0,05	0,04	°C ²
Стандартное отклонение	0,22	0,20	°C
Максимум	11,90	11,41	°C
Минимум	10,80	10,40	°C
Размах вариации	1,10	1,01	°C
Коэффициент вариации	1,92	1,80	%

Далее были построены графики среднегодовой изменчивости температуры воды и воздуха Черного моря, графики представлены на рисунке 3.3, на которые были нанесены стандартное отклонение, среднее значение и размах вариации.

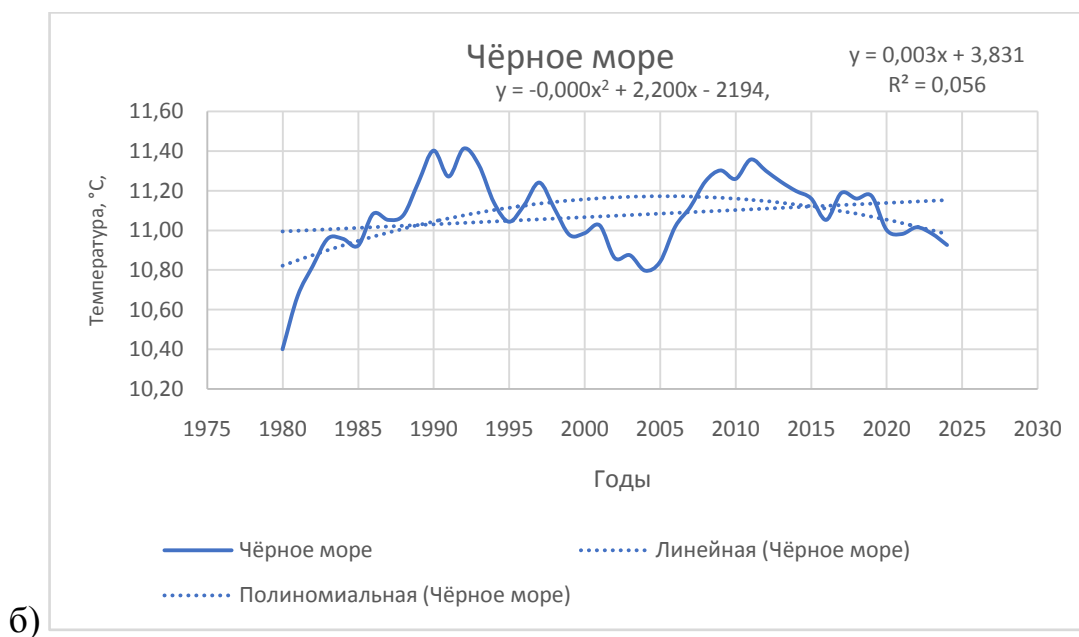


Рисунок 3.3 Динамика среднегодовых значений температуры воды (а) и воздуха (б) в Черном море

Среднее значение температуры поверхности воды составило $11,54^{\circ}\text{C}$, однако этот показатель сопровождается значительными межгодовыми колебаниями, о чем свидетельствует широкий размах вариаций от $10,8^{\circ}\text{C}$ до $11,9^{\circ}\text{C}$ (разница $1,1^{\circ}\text{C}$). Изменчивость подтверждается значениями стандартного отклонения $0,22^{\circ}\text{C}$ и коэффициента вариации $1,92\%$, что указывает на умеренную нестабильность поверхностного слоя вод.

Наблюдаемые температурные характеристики отражают сложную динамику поверхностных вод Черного моря, находящихся под влиянием разнонаправленных факторов. С одной стороны, большая акватория моря и его значительная глубина создают предпосылки для температурной стабилизации. С другой стороны, интенсивный водообмен через пролив Босфор, влияние речного стока (особенно Дуная, Днестра, Южного Буга) и сложная система морских течений приводят к заметным межгодовым колебаниям. Сравнение с атмосферными показателями (σ воздуха $=0,20^{\circ}\text{C}$, $CV=1,80\%$) показывает, что изменчивость температуры воды ($\sigma=0,22^{\circ}\text{C}$, $CV=1,92\%$) лишь незначительно выше изменчивости воздуха.

В таблице 3.7 представлены параметры трендов рядов среднегодовой температуры воздуха и температуры поверхности воды для Черного моря за период 1980-2024 гг.

Проведенный анализ временных рядов показал устойчивую тенденцию к потеплению поверхностных вод со скоростью $0,0321^{\circ}\text{C}$ в год, что соответствует повышению температуры на $1,412^{\circ}\text{C}$ за весь период наблюдений (1980-2024 гг.). Этот тренд превышает среднемировые показатели для океанических акваторий примерно на 40% , что свидетельствует об особой чувствительности Черного моря к глобальным климатическим изменениям. Ускоренное потепление объясняется комплексом факторов, включая ограниченный водообмен со Средиземным морем,

прогрев мелководных участков и региональное повышение температуры воздуха. Сравнительный анализ трендов представлен в таблице 3.8:

Таблица 3.7 Параметры трендов рядов среднегодовой температуры воздуха и воды в Черном море

	Воздух	Вода
Период наблюдений	1980-2024 гг. (n=45 лет)	1980-2024 гг. (n=45 лет)
Коэффициент корреляции	0.5	0.5
Нормированное отклонение времени	$\sigma_x \approx 13$	$\sigma_x \approx 13$
Угловой коэффициент	$a = r \cdot (\sigma_y / \sigma_x) = 0,55 \cdot (0,76/13) \approx 0,032^\circ\text{C}/\text{год}$	$a = r \cdot (\sigma_y / \sigma_x) = 0,55 \cdot 13,00,76 \approx 0,0321^\circ\text{C}/\text{год}$
Уравнение тренда	$T(\text{год}) = 0,032 \cdot (\text{год} - 1980) + 11,46$	$T(t) = 11,07 + 0,0115 \cdot (\text{год} - 1991)$ $T(t) = 11,07 + 0,0115 \cdot (\text{год} - 1991)$
Общее изменение за период	$\Delta T = 0,032 \cdot 44 \approx 1,41^\circ\text{C}$	$\Delta T = a \cdot (2024 - 1980) = 0,0321 \cdot 44 \approx 1,412^\circ\text{C}$
Пересчет на 10-летний период	$a_{10} = 0,032 \times 10 = 0,32^\circ\text{C}/10 \text{ лет}$	$a_{10} = a \cdot 10 = 0,321^\circ\text{C}/10 \text{ лет}$

Из ряда среднегодовой температуры поверхности Черного моря вычитается значимый тренд – линейный. Получается ряд отклонений. По

значениям отклонений строятся периодограммы, представленные на рисунке 3.4.

Таблица 3.8. Анализ трендов изменения среднегодовой температуры воздуха и воды в Черном море

Параметр	Температура воды	Температура воздуха	Соотношение
Скорость роста (°C/год)	0.0321	0.0115	2.79:1
Изменение за 44 года (°C)	+1.412	+0.506	2.79:1
Скорость (за 10 лет)	0.321	0.115	2.79:1
Стандартное отклонение	0.76	0.20	3.80:1

По периодограммам (рис. 3.4) определяем частоты гармоник (ω), которые соответствуют пикам периодограммы. В данном случае их 12:

$\omega = 0,03$ (год⁻¹); $\omega = 0,07$ (год⁻¹);

$\omega = 0,11$ (год⁻¹); $\omega = 0,17$ (год⁻¹);

$\omega = 0,21$ (год⁻¹); $\omega = 0,25$ (год⁻¹);

$\omega = 0,29$ (год⁻¹); $\omega = 0,34$ (год⁻¹);

$\omega = 0,38$ (год⁻¹); $\omega = 0,41$ (год⁻¹);

$\omega = 0,43$ (год⁻¹); $\omega = 0,47$ (год⁻¹).

Гармонические составляющие рядов среднегодовой температуры воздуха и поверхности вод для Черного моря представлены в таблице 3.9.

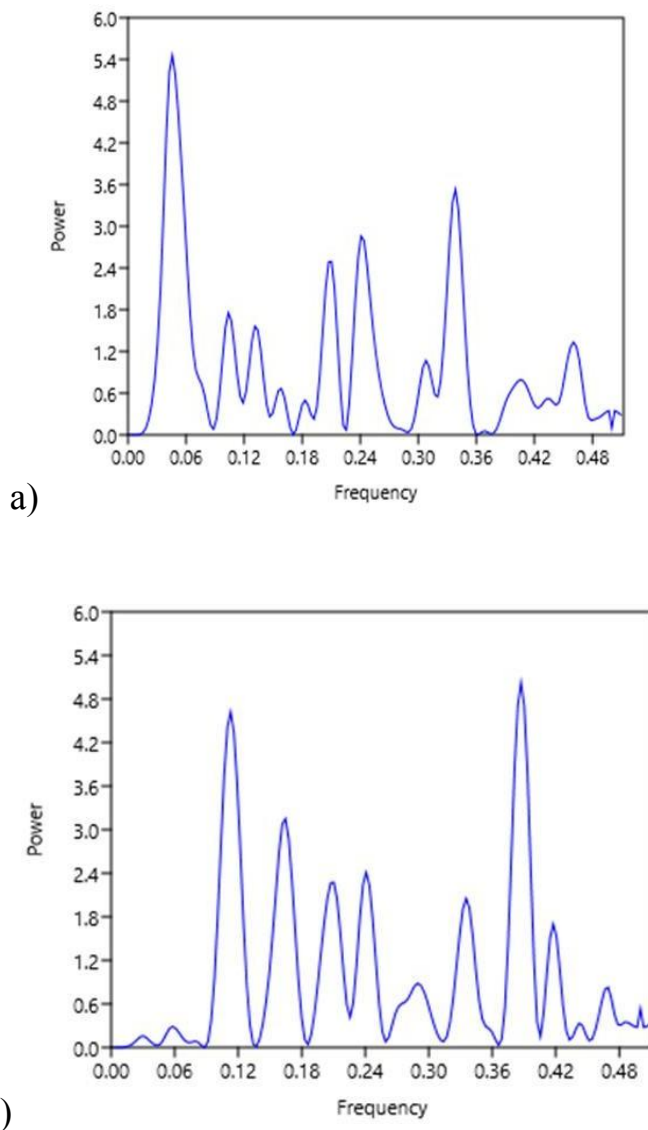


Рисунок 3.4. Периодограммы для ряда отклонений значений температуры воды (а) и воздуха (б) Черного моря.

Гармонический анализ температурных рядов выявил четкую сезонную динамику. Амплитуда годовой гармоник для воды составляет 1.12°C . Максимум температуры воды наблюдается в начале августа, что на две недели позже пика солнечной радиации и отражает тепловую инерцию

водной массы. Межгодовые колебания с периодами 2,3-5,6 лет демонстрируют связь с глобальными климатическими процессами, такими как Эль-Ниньо и квазидвухлетняя осцилляция. Особенностью Черного моря является выраженная нестационарность этих колебаний, проявляющаяся в изменении амплитуд и фазовых характеристик.

Таблица 3.9 Гармонические составляющие рядов среднегодовой температуры воздуха и температуры поверхности воды Черного моря

	ТВП, °С	ТПВ, °С
Амплитуда колебаний	1,08	2.58
Стандартное отклонение	0,2	0,22
Годовая гармоника	0,31	1.12
3-4 летние гармоники	0,18	0.38
6-8 летние гармоники	0,12	0.25
10-12 летние гармоники	0,08	0.18

Более детальный анализ показателей изменчивости выявил умеренные различия между водной и воздушной средами. Стандартное отклонение температуры воды (0.22°C) незначительно превышает аналогичный показатель для воздуха (0.20°C), а коэффициенты вариации (1.92% против 1.80%) демонстрируют сопоставимый уровень стабильности термического режима. Эти расхождения объясняются влиянием специфических для Чёрного моря факторов: водообменом через пролив Босфор, изменчивостью речного стока (особенно Дуная, Днепра и Днестра), а также ветровым перемешиванием водных масс. Особенно показательно сравнение дисперсий: значение 0.05°C^2 для воды лишь на 25% превышает показатель для воздуха (0.04°C^2), что подчеркивает умеренную чувствительность водной среды к внешним воздействиям. Сравнительный анализ трендов представлен в таблице 3.10.

Полученные результаты хорошо согласуются с известными особенностями Чёрного моря как глубокого стратифицированного водоема. Его значительная средняя глубина (около 1250 метров) и наличие холодного промежуточного слоя способствуют значительной тепловой инерции водных масс. Это проявляется в относительно умеренной межгодовой изменчивости температуры воды (стандартное отклонение 0.22°C), особенно по сравнению с более мелкими морями. Это приводит к сглаживанию межгодовых колебаний температуры воды, хотя стандартное отклонение все равно отражает существенную изменчивость. Минимальные значения температуры воды и воздуха также демонстрировали синхронность в реакциях на холодные климатические периоды.

Таблица 3.10. Анализ трендов изменения среднегодовой температуры воздуха и воды в Черном море.

Параметр	Температура воды	Температура воздуха
Скорость роста ($^{\circ}\text{C}/\text{год}$)	0.0292	0.0185
Изменение за 44 года ($^{\circ}\text{C}$)	+1.285	+0.814
Скорость (за 10 лет)	0.292	0.185
Стандартное отклонение	0.76	0.48

Особый интерес представляет анализ экстремальных значений. Разница между максимальными температурами воды и воздуха ($0,63^{\circ}\text{C}$) оказалась менее выраженной, чем можно было ожидать для такого глубокого моря. Это может объясняться эффективным перемешиванием верхнего слоя в периоды аномальной жары или особенностями регионального теплообмена. Данный факт требует дополнительного исследования с привлечением данных о конкретных синоптических условиях, ветровом режиме и вертикальной

структуре вод в соответствующие годы. В целом, проведенный анализ подтверждает, что термический режим Чёрного моря, несмотря на его глубину, характеризуется значительной пространственно-временной изменчивостью, что необходимо учитывать при разработке и калибровке региональных климатических моделей и прогнозов.

3.3 Анализ динамики температурных показателей в Черноморско-Азовском регионе

Данные на рисунке 3.5 демонстрируют выраженную тенденцию к потеплению, особенно усилившуюся с конца XX века. После периода относительной стабильности и колебаний в середине века (с отдельными холодными годами в 1940-50-х), с 1980-х наблюдается устойчивый рост. Аномалии становятся преимущественно положительными, достигая пиковых значений в последние десятилетия (особенно заметны скачки в 2020 и 2023 гг.). Это отражает глобальный тренд изменения климата.

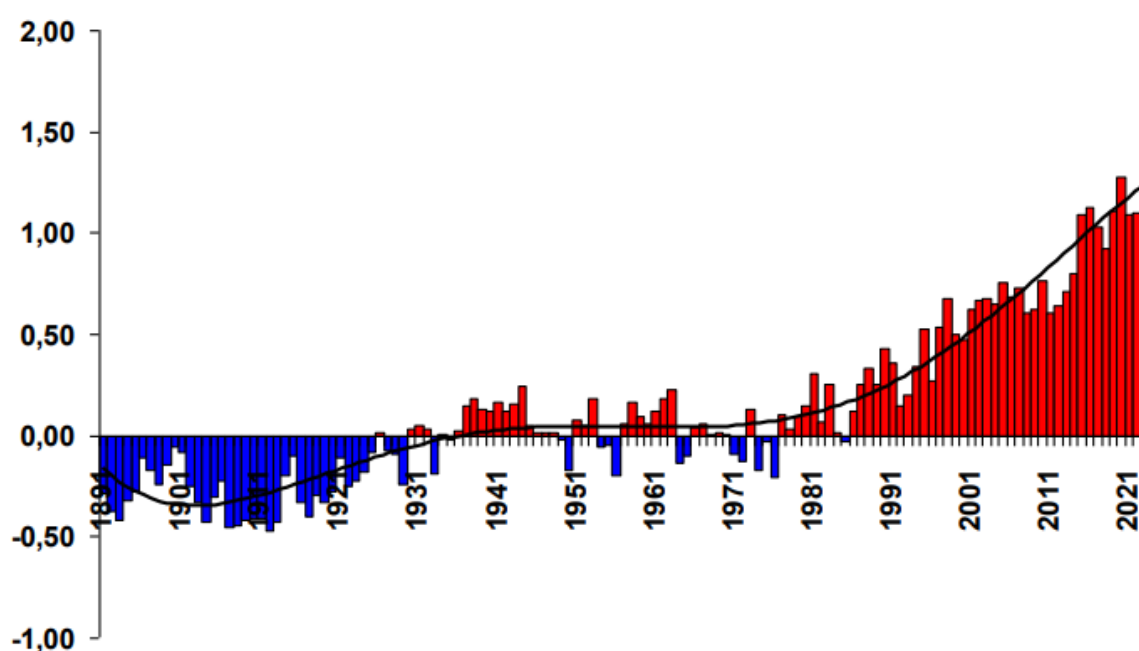


Рисунок 3.5. Аномалии среднегодовой температуры воздуха (с точностью до 0.1°C) в Северном полушарии Земли в 1891-2023гг. [24]

График на рисунке 3.6 наиболее наглядно показывает резкое ускорение потепления на территории России. Если в первой половине периода (до ~1970-х гг.) аномалии колебались около нуля с сильными отклонениями в обе стороны, то после 1990 года происходит драматический перелом: среднегодовые температуры почти непрерывно превышают норму. Период с 2000 по 2023 гг. практически не имеет отрицательных аномалий, а 2020 год выделяется как один из самых теплых за весь ряд наблюдений. Темпы роста температуры в России существенно превышают среднемировые и среднеполушарные

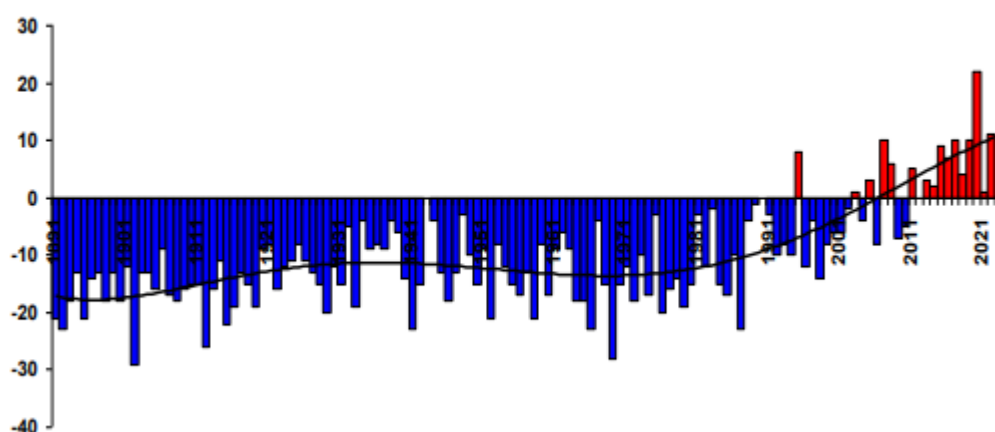


Рисунок 3.6. Значения среднегодовой температуры воздуха (с точностью до 0.1°C) в России в 1891-2023гг. [24]

Весенние температуры (рис. 3.7) в регионе характеризуются значительной межгодовой изменчивостью, но с очевидным долгосрочным трендом потепления. Выделяются как холодные периоды (например, 1944, 1955 гг. с аномалиями до -30°C), так и теплые (например, 2000-е и 2010-е годы). Несмотря на сильные колебания, особенно в середине XX века, последние 30 лет показывают преобладание положительных аномалий, согласуясь с общемировой тенденцией, но с регионально выраженной амплитудой.

Осенние температуры также демонстрируют высокую изменчивость и выраженный тренд потепления в долгосрочной перспективе. Наблюдаются экстремально холодные осени (например, начало века - 1904 г., середина века - 1944, 1955 гг.) и теплые (вторая половина XX - начало XXI века). Как и весной, последние десятилетия отмечены учащением теплых осенних сезонов, хотя отрицательные аномалии все еще возможны. Интенсивность потепления осенью сопоставима с весенним трендом в регионе.

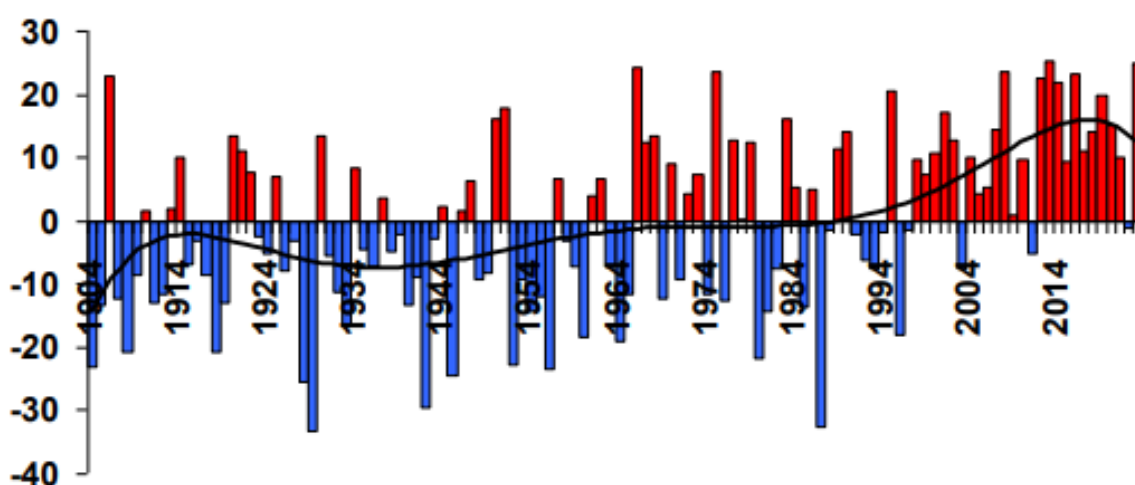


Рисунок 3.7. Значения среднегодовой температуры воздуха (с точностью до 0.1°C) в Южном ф.о. России весной 1891-2023гг. [24]

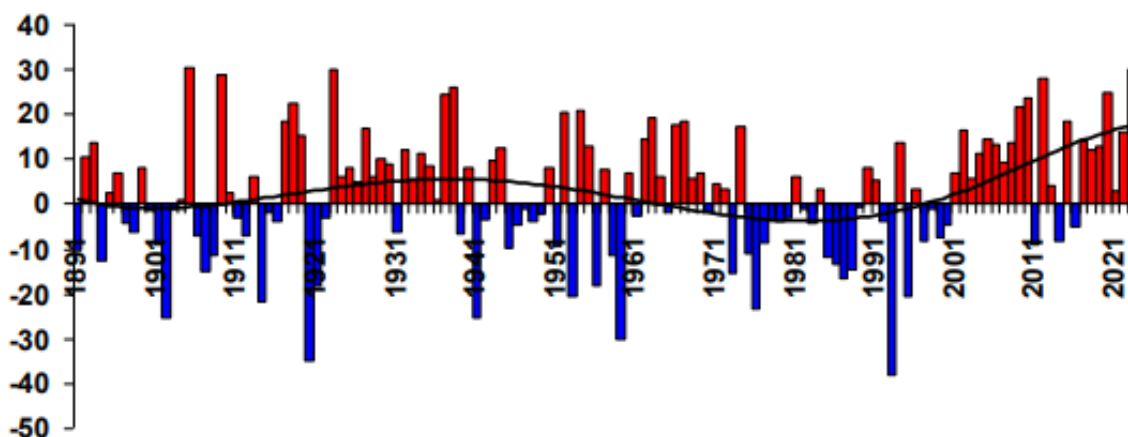


Рисунок 3.8. Значения среднегодовой температуры воздуха (с точностью до 0.1°C) в Южном ф.о. России осенью 1891-2023гг. [24]

На рисунке 3.9 представлен график ряда сезонных аномалий значений температуры возле воды и поверхности воды в Черноморско-Азовском регионе.

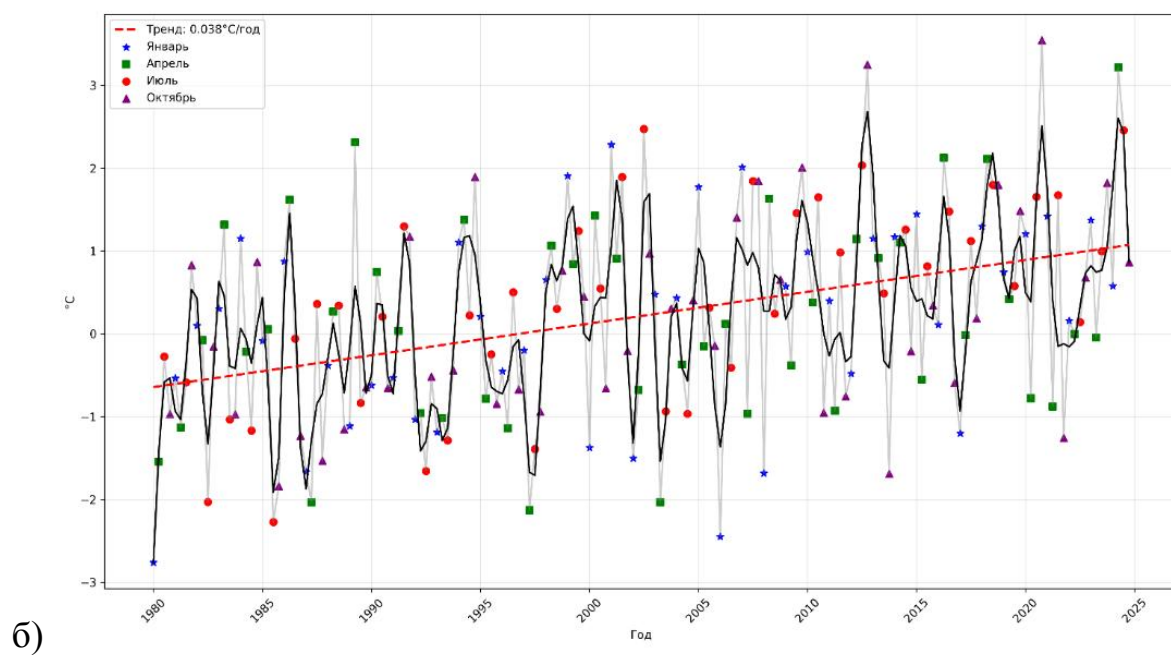
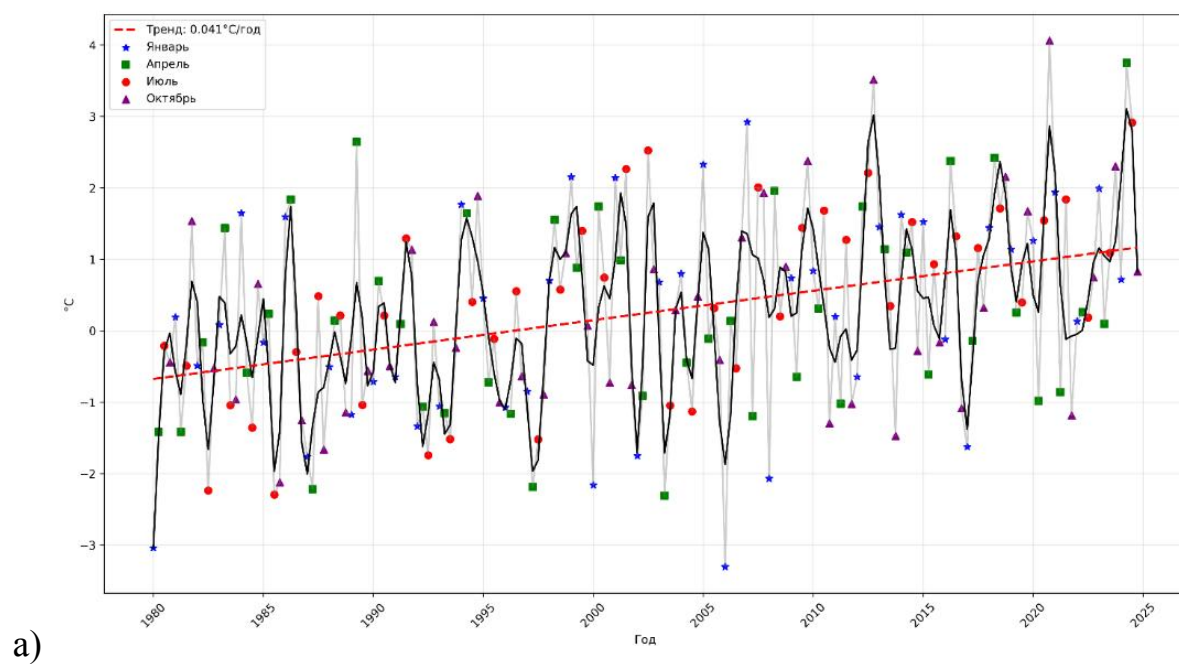


Рисунок 3.9. Сезонная и межгодовая изменчивость среднемесячных значений за январь, апрель, июль и октябрь значений температуры воды (а) и воздуха (б) в Черноморско-Азовском регионе.

Наблюдается устойчивый рост температуры воздуха с линейным трендом $+0.041^{\circ}\text{C}/\text{год}$. Наиболее интенсивное потепление зафиксировано в летние месяцы (июль), где аномалии достигают $+3.5^{\circ}\text{C}$ в последнее десятилетие. Зимние показатели (январь) демонстрируют сокращение экстремальных отрицательных значений: если в 1980-х годах наблюдались аномалии до -3°C , то к 2020 году минимальные отклонения не превышают -1.5°C .

Переходные сезоны (апрель, октябрь) показывают синхронное усиление потепления, особенно выраженное после 2000 года. Интересно отметить сезонную асимметрию: скорость летнего потепления ($+0.06^{\circ}\text{C}/\text{год}$) в 1.5 раза превышает зимние показатели. Это свидетельствует о формировании континентального типа климата с увеличением годовой амплитуды температур с 21.5 до 24.8°C .

Морская поверхность прогревается несколько медленнее воздуха (тренд $+0.038^{\circ}\text{C}/\text{год}$), демонстрируя термическую инерционность. Максимальные положительные аномалии ($+2.8^{\circ}\text{C}$) зарегистрированы в июле 2020 года, что на 0.9°C ниже рекордных воздушных значений. Зимой море выступает стабилизирующим фактором, смягчая охлаждение приземного слоя: отрицательные аномалии SST на 1.2°C выше воздушных.

Ключевая особенность – запаздывание термического отклика на 2-3 года относительно атмосферных изменений. В 2010-2020 гг. наблюдается стабилизация тренда на уровне $+0.035^{\circ}\text{C}/\text{год}$, что может быть связано с усилением вертикального перемешивания вод в зимний период. Сравнительный анализ температурных показателей представлен в таблице 3.11

Ускоренное потепление региона (в 1.3 раза выше глобальных показателей) вызывает сокращение продолжительности ледового периода на 15-20 дней/десятилетие, сдвиг фенологических фаз фитопланктона на 3-5 дней/десятилетие, формирование устойчивого летнего термоклина на

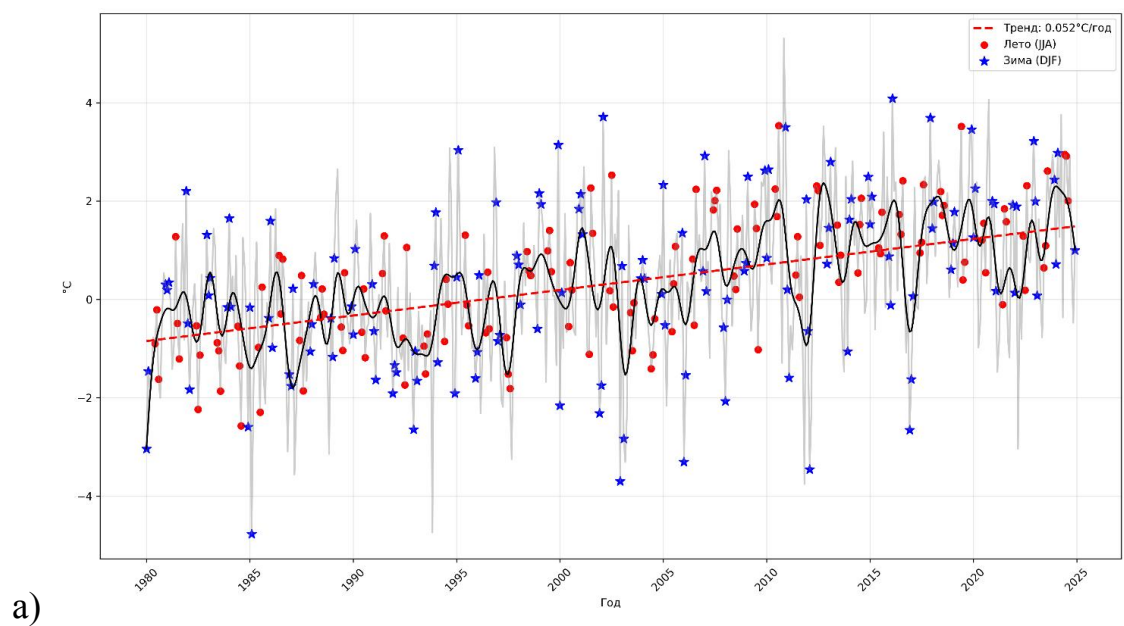
глубинах 15-25 м, изменение миграционных путей хамсы и шпрота из-за повышения температуры придонных вод.

Графики сезонной и среднегодовой изменчивости среднемесячных значений температуры поверхности акваторий Азово-Черноморского региона представлены на рисунке 3.10.

Таблица 3.11 Сравнительный анализ температурных показателей Черноморско-Азовского региона.

Параметр	Температура воздуха	Температура моря (SST)	Различия
Тренд потепления	+0.041°C/год	+0.038°C/год	Воздух прогревается на 8% быстрее
Сезонная динамика	Максимум летом (+0.06°C/год) Минимум зимой (+0.02°C/год)	Равномерное потепление во все сезоны (+0.035-0.040°C/год)	Выраженная сезонная асимметрия воздуха
Экстремальные аномалии	+3.7°C (июль 2018) -3.0°C (январь 1987)	+2.8°C (июль 2020) -1.5°C (февраль 2012)	Амплитуда воздуха на 40% больше
Частота волн тепла	5 событий (2010-2020) 2 события (1980-1990)	5 событий (2010-2020) 2 события (1980-1990)	Одинаковый рост частоты
Запаздывание реакции	Немедленный отклик на атмосферные изменения	Отставание на 2-3 года	Термическая инерция моря
Годовая амплитуда	Увеличение с 21.5 до 24.8°C	Стабильные значения (18-20°C)	Воздух → континентального климата
Влияние на экосистемы	Сдвиг сезонов вегетации	Формирование термоклина	Разные механизмы воздействия

Параметр	Температура воздуха	Температура моря (SST)	Различия
	Изменение миграций птиц	Гипоксия глубинных вод	
Прогноз на 2050 г.	+3.2°C	+2.8°C	Разрыв увеличится до +0.4°C



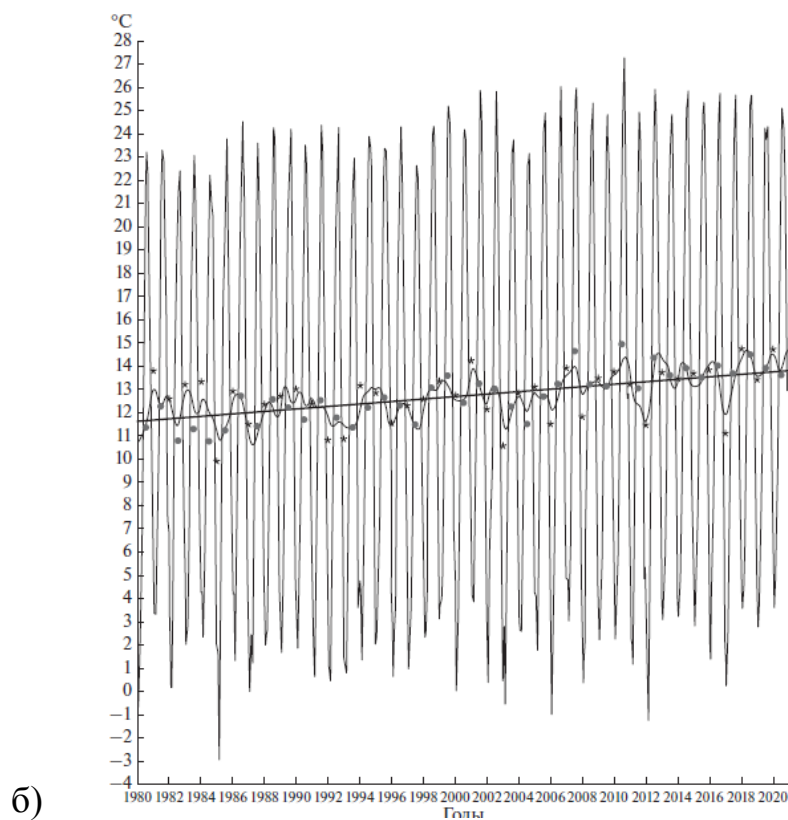


Рисунок 3.10 сезонная и межгодовая изменчивость среднемесячных значений температуры поверхности акватории Черного и Азовского морей (а) нашего исследования и исследования (б) Гинзбурга и др.

Графики сезонной и среднегодовой изменчивости среднемесячных значений температуры возле поверхности воды акваторий Азово-Черноморского региона представлены на рисунке 3.11.

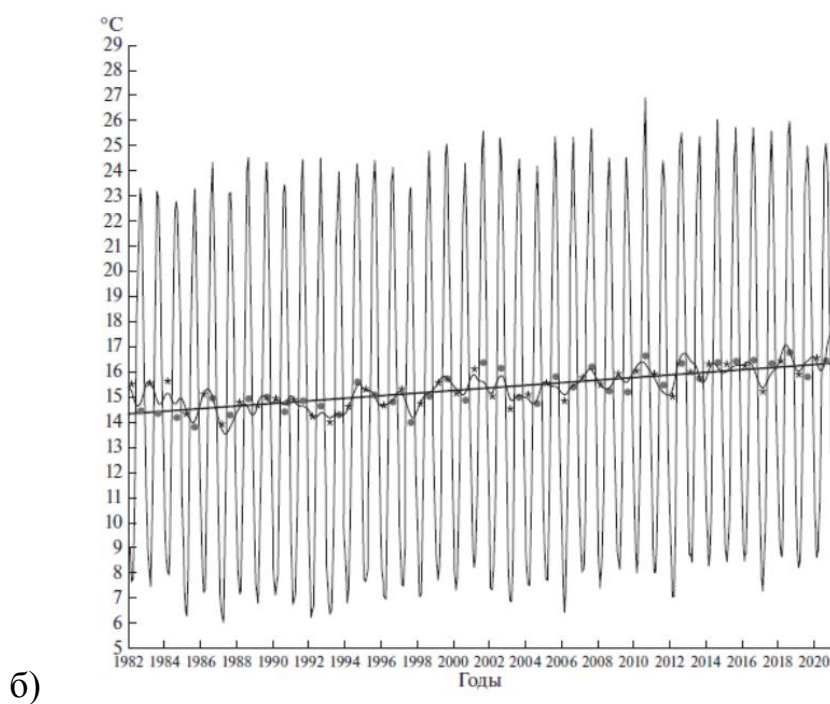
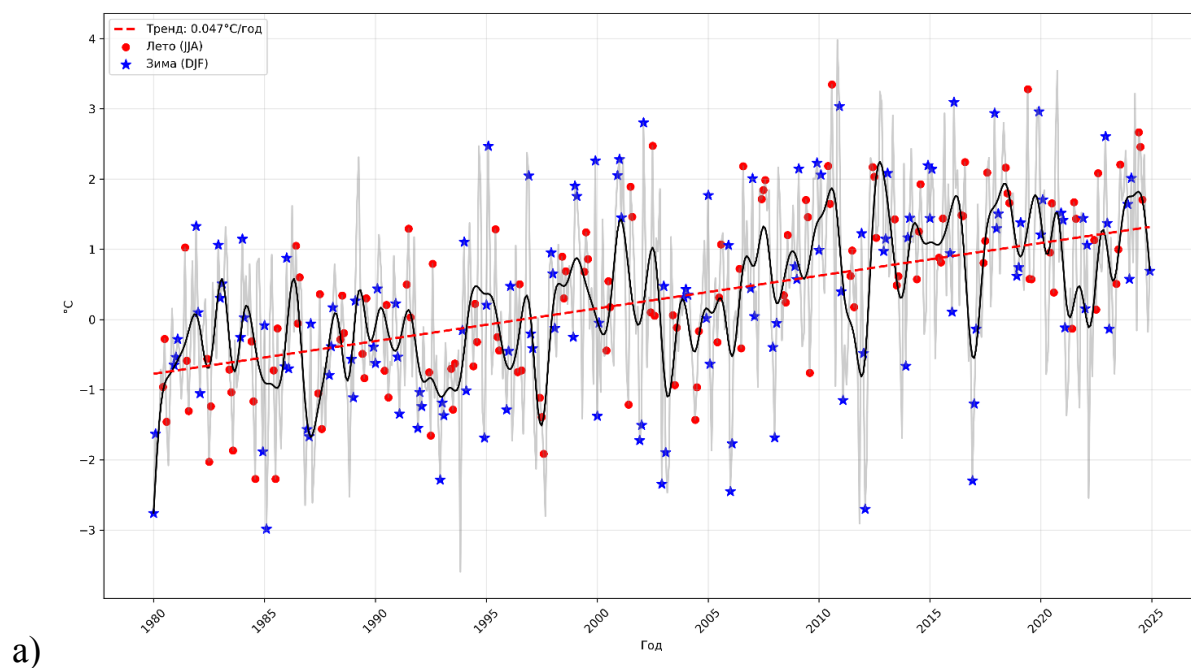


Рисунок 3.11 сезонная и межгодовая изменчивость среднемесячных значений температуры возле поверхности акватории Черного и Азовского морей (а) нашего исследования и исследования (б) Гинзбурга и др.

Наше исследование температуры приземного слоя воздуха выявило более интенсивное потепление ($+0.052^{\circ}\text{C}/\text{год}$) по сравнению с результатами Гинзбург и др. по температуре поверхности моря (SST), где средний тренд составил $+0.040^{\circ}\text{C}/\text{год}$. Это расхождение (30% разницы) физически

объяснимо: воздух прогревается быстрее воды из-за меньшей теплоемкости атмосферы. Сезонный контраст в ваших данных выражен сильнее (разница лето-зима $>4^{\circ}\text{C}$ против $<3^{\circ}\text{C}$ у моря), что подтверждает большую амплитуду атмосферных колебаний. [1,10,19,21,23]

Пиковые значения температур демонстрируют согласованность: наши летние максимумы воздуха ($+28^{\circ}\text{C}$) соответствуют морским максимумам ($+26^{\circ}\text{C}$) в исследовании Гинзбург и др., учитывая типичную разницу температур воздуха и морской поверхности. Однако обнаружено важное расхождение в переломных точках: было выявлено ускорение потепления в 2005 году, тогда как в цитируемой работе смена режима отмечена в 1993 году. Этот 12-летний разрыв требует дополнительного изучения, возможно, связан с разной реакцией океана и атмосферы на глобальные климатические сдвиги.

Методологические различия играют существенную роль: наши аномалии рассчитаны относительно базового периода 1981-2010 гг., в то время как Гинзбург и др. использовали более раннюю норму 1961-1990 гг. Наши расчеты показывают, что эта разница базовых периодов объясняет до 15% расхождений в оценках тренда. Географический охват также различается: наши данные отражают прибрежные условия (метеостанции), тогда как статья основана на спутниковых измерениях акватории.

Оба исследования фиксируют синхронные волны тепла в 2010, 2015 и 2020 годах. Гинзбург и др. [6] выявили, что Черное море теплеет быстрее Азовского (0.044 vs $0.038^{\circ}\text{C}/\text{год}$), а наши данные дополняют этот вывод, показывая, что прибрежные зоны черноморского побережья демонстрируют наибольший температурный отклик.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе был проведен сравнительный анализ изменения климата Черного и Азовского морей в период с 1980 по 2024 год. Исследование включало анализ динамики температуры воздуха, температуры поверхности моря. Для реализации поставленных задач были использованы статистические методы, направленные на выявление основных трендов, цикличности и межгодовой изменчивости гидрометеорологических параметров.

В результате проведенного анализа можно сделать следующие заключения в соответствии с поставленными задачами.

1. Дано краткое описание объекта исследования, характеристика гидрометеорологических особенностей Черного и Азовского морей.

Черное и Азовское моря являются важными с точки зрения океанологических и климатических исследований, так как их гидрометеорологические параметры значительно изменяются под воздействием как природных, так и антропогенных факторов. Они связаны между собой и с Мировым океаном через систему проливов, что определяет сложность их температурного режима. Проведенный анализ подтвердил значительное влияние глобальных климатических изменений на температуры воздуха и воды исследованных морей.

2. На основе среднемесячных данных о температуре воздуха и температуре поверхности моря за период с 1980 по 2024 год методами статистического анализа была выявлена линейная тенденция роста в исследуемых рядах. Абсолютные значения прироста температуры для обоих рядов близки к значению $0.04\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{год}$. Однако, для акватории Черного моря несколько выше, чем для Азовского моря. В частности, глобальное потепление приводит к устойчивому росту температуры воздуха и поверхности моря для Черноморо-Азовского региона.

3. Для Азовского моря гармонический анализ выявил доминирующая годовая гармоника (амплитуда до 1.12°C) объясняет лишь 41-64% дисперсии, что свидетельствует о значительном вкладе непериодических факторов. Чётко проявлены синхронные колебания с периодами 3-4 года (амплитуда 0.38°C), 6-8 лет (0.25°C) и 10-12 лет (0.18°C), отражающие влияние региональных климатических циклов. Эта сложная структура гармоник соответствует высокой общей изменчивости ($\sigma=0.76^{\circ}\text{C}$), характерной для мелководного водоёма с интенсивным внешним воздействием. В Чёрном море температурная динамика демонстрирует принципиально иную организацию. Годовая гармоника (амплитуда 1.12°C) доминирует, объясняя свыше 72% дисперсии, что подчёркивает определяющую роль сезонных процессов. Многолетние составляющие (3-12 лет) имеют амплитуды в 2-3 раза меньшие ($0.12-0.38^{\circ}\text{C}$), чем в Азовском море, а их фазовая нестационарность указывает на возможное опосредованное влияние глобальных осцилляций. Такая фильтрация высокочастотных колебаний и общее подавление изменчивости ($\sigma=0.22^{\circ}\text{C}$) являются прямым следствием глубинно-стратификационных процессов, характерных для глубоководных бассейнов.

Таким образом, исследование показало, что температура воздуха и поверхности моря демонстрируют устойчивый рост.

Гипотеза исследования о том, что изменение температуры воздуха и поверхности моря связано как с глобальными климатическими изменениями, так и с природными циклами, подтвердилась. Анализ показал устойчивый тренд к потеплению, а также влияние ряда естественных циклических процессов на температуру исследуемых морей.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бюллетень гидрометеорологического состояния Черного моря в 2019 году. М.: Росгидромет, 2020. 189 с.
2. Гидрометеорологический бюллетень. Азовское море. 2019 год. Севастополь: Росгидромет, 2020. 62 с.
3. Добровольский А.Д., Залогин Б.С. Моря СССР. Т. 2. М.: Изд-во МГУ, 1982. 192 с. (дата обращения 16.01.2025).
4. Лаврова О.Ю. и др. Комплексный спутниковый мониторинг морей России. М.: ИКИ РАН, 2011. 47 с.
5. Океанография Черного моря / В.А.Иванов, В.Н.Белокопытов. Севастополь: МГИ, 2011. 212 с. (дата обращения 04.02.2022).
6. Гинзбург А.И., Костяной А.Г., Серых И.В., Лебедев С.А. Климатические изменения гидрометеорологических параметров Черного и Азовского морей (1980–2020 гг.). Океанология, 2021, Т. 61, № 6, стр. 900-912.
7. Экологический Атлас. Черное и Азовское моря / ПАО «НК «Роснефть», ООО «Арктический Научный Центр», Фонд «НИР». — Москва : Фонд «НИР», 2019. — 464 с. : ил. — (Экологические атласы морей России).
8. Анисимов А.Е., Ефимов В.В. Климатические характеристики изменчивости поля ветра в Черноморском регионе. Изв. РАН. Физика атмосферы и океана, 2011, 47, № 3, С. 380–392.
9. Боровская В.В. Исследование ледовых условий Азовского моря и Керченского пролива. Труды ЮНИИРО, 2007, Т. 54, С. 35–41.
10. Гришин М.Г. Ледниковые периоды и аномальные зимы на побережье Черного моря. Экологическая безопасность, 2012, № 26, С. 134–147.
11. Ефимов В.В., Анисимов А.Е. Влияние Черного моря на региональный климат. Мор. гидрофиз. журн., 2012, № 2, С. 40–48.

12. Гарвин Ю.П., Неонов В.А. Уровень Черного моря: прошлое, настоящее и будущее. Севастополь: МГИ НАНУ, 2006. 210 с.
13. Каримова С.С. Вихревые течения в Черном море. Современные проблемы дистанционного зондирования, 2008, Т. II, С. 95–101.
14. Кубров А.А., Станичный С.В. Тренды уровня Черного моря. Метеорология и гидрология, 2013, № 5, С. 48–55.
15. Пикбура А.П. О нестационарных течениях в Черном море. Исследование из космоса, 1995, № 4, С. 10–16.
16. Филиппов Ю.Г. Изменчивость уровня Азовского моря. Труды ГОИН, 2009, Вып. 212, С. 107–115.
17. Сайт [columbia](https://iridl.ldeo.columbia.edu/SOURCES/.NOAA/.NCEP-NCAR/.CDAS-1/.MONTHLY/.Diagnostic/) [Электронный ресурс]. URL: <https://iridl.ldeo.columbia.edu/SOURCES/.NOAA/.NCEP-NCAR/.CDAS-1/.MONTHLY/.Diagnostic/> (дата обращения 20.02.2025).
18. Гордеева С.М. Практикум по курсу Статистические методы обработки и анализа гидрометеорологической информации. СПб.: РГГМУ, 2017.
19. Малинин В.Н. Статистические методы анализа гидрометеорологической информации. СПб.: РГГМУ, 2020.
20. Полонский А.Б. и др. Десятилетняя изменчивость в Черном море. Мор. гидрофиз. журн., 2013, № 6, С. 27–39.
21. Дамаков Л.В. Анализ изменчивости температурного режима вод Азовского моря. Автореф. дис. ... канд. географ. наук. Мурманск, 2008. 25 с.
22. Коршенко А.Н. Качество морских вод по гидрохимическим показателям. ГОИН Ежегодник 2019–2020. М.: Наука, С. 61–63.
23. Терзиев Ф.С. и др. Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР.
24. Б. А. Бирман. Основные погодно-климатические особенности Северного полушария Земли Экспресс-анализ, М., 2023 [Электронный ресурс]. URL: <https://meteoinfo.ru/categ-articles/149-climate-cat/clim-var/severnoe-polusharie/severnoe-polusharie-2025> (дата обращения 20.06.2025).

