



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)

«Изменчивость климатического режима морей Беллинсгаузена и
Амундсена»

Исполнитель: Гофман Радмила Владимировна

Руководитель: доктор геогр. наук, профессор Малинин Валерий
Николаевич

«К защите допускаю»

Заведующий кафедрой _____

(подпись)

Кандидат географических наук _____

(ученая степень, ученое звание)

Хаймина Ольга Владимировна _____

(фамилия, имя, отчество)

«26 марта 2024 г.

г. Санкт-Петербург

2024

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ.....	2
ГЛАВА 1. ФИЗИКО-ГЕОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ МОРЕЙ АМУНДСЕНА И БЕЛЛИНСГАУЗЕНА	4
1.1. Физико-географическое описание морей Амундсена и Беллинсгаузена и сценарии изменения климата.....	4
1.1.1. Физико-географическая характеристика моря Амундсена	5
1.1.2. Характеристика моря Беллинсгаузена.....	7
1.1.3. Сценарии изменения климатического режима	12
1.2. Обзор существующих исследований по изменчивости климатического режима данных морей	14
ГЛАВА 2. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ И МЕТОДЫ ИХ ОБРАБОТКИ.....	17
2.1. Описание методов исследования, используемых для анализа изменчивости климатического режима	17
2.2. Обоснование выбора методологии и объяснение применения каждого метода.....	20
ГЛАВА 3. КЛИМАТИЧЕСКИЕ ИЗМЕНЕНИЯ МОРЕЙ АМУНДСЕНА И БЕЛЛИНСГАУЗЕНА: АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ И ПРОГНОЗ.....	26
3.1. Антарктида.....	26
3.2. Море Амундсена	30
3.2.1. Анализ данных	30
3.2.2. Выделение и анализ трендовой компоненты	33
3.2.3. Гармонический анализ Фурье.....	33
3.3. Море Беллинсгаузена.....	39
3.3.1. Анализ данных	39
3.3.2. Выделение и анализ трендовой компоненты	42
3.3.3. Гармонический анализ Фурье.....	42
3.4. Прогноз.....	48
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	50
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	52

ВВЕДЕНИЕ

Неотъемлемой частью изучения климатических процессов является анализ изменчивости климатического режима различных регионов нашей планеты. Особый интерес представляют полярные регионы, такие как моря Амундсена и Беллинсгаузена, которые расположены в западной части Антарктиды. Изменения климата в этих регионах имеют важное значение для глобального климата и экосистемы.

Целью данной дипломной работы является исследование изменчивости климатического режима морей Амундсена и Беллинсгаузена. В работе будут рассмотрены различные аспекты изменчивости климата в этих морях, в частности температура воды и воздуха, ледовый режим и другие параметры.

Основной задачей исследования является анализ долговременных тенденций изменчивости климата в морях Амундсена и Беллинсгаузена. Для достижения этой цели будут использованы данные наблюдений за длительный период времени (с 1980 г. до 2023 г.).

Объектом исследования в дипломной работе акватория морей Беллинсгаузена и Амундсена.

Предмет исследования – изменчивость климатического режима выбранных морей за последние десятилетия и в ближайшем будущем.

Задачи дипломной работы:

1. Создание архива данных по температуре воды и ледовитости морей Амундсена и Беллинсгаузена;
2. Анализ изменчивости климатического режима морей Амундсена и Беллинсгаузена;
3. Выявление межгодовой изменчивости температуры воды и площади распространения морского льда с помощью статистических методов.

Важным аспектом работы является также оценка влияния изменений климата в морях Амундсена и Беллинсгаузена на окружающую среду и экосистему региона. Будут рассмотрены потенциальные последствия изменений климата для льдов, флоры и фауны, а также для питательной базы экосистемы.

Методология исследования основана на статистическом анализе доступных наблюдательных данных из различных источников, включая судовые и спутниковые наблюдения. В работе предполагается использование следующих методов: анализ временных рядов (выделение и анализ трендовой компоненты, гармонический анализ).

Ожидается, что результаты исследования позволят более полно понять механизмы изменчивости климата в морях Амундсена и Беллинсгаузена, а также их влияние на региональный климат. Полученные результаты будут иметь практическую ценность в планировании и прогнозировании климатических изменений в регионе Антарктиды, а также для разработки мер по адаптации к ним.

ГЛАВА 1. ФИЗИКО-ГЕОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ МОРЕЙ АМУНДСЕНА И БЕЛЛИНСТАУЗЕНА

1.1. Физико-географическое описание морей Амундсена и Беллинсгаузена и сценарии изменения климата

Моря Амундсена и Беллинсгаузена — это важные географические объекты, расположенные в Антарктическом регионе. Они находятся в южной части Тихого океана, вблизи Антарктического полуострова, между полуостровом и Западным побережьем Антарктиды.

1. Море Амундсена

Море Амундсена, названное в честь норвежского исследователя Руала Амундсена, расположено к западу от Западной Антарктической стены и севернее Айсбергового побережья. Простирается на протяжении примерно 400 километров вдоль берегов Западной Антарктиды. Исторически, это море было покрыто льдом, но современные исследования показали, что ледовый покров сократился, расширив зоны открытой воды [1]. Море Амундсена является ключевым регионом, где происходит разрушение ледников Западной Антарктиды и ускоренное слияние айсбергов [2].

2. Море Беллинсгаузена

Море Беллинсгаузена, получившее свое название в честь русского исследователя Фаддея Беллинсгаузена, находится к югу от Грэхема земель Антарктиды и западнее Западного побережья Антарктического полуострова. Простирается на примерно 480 километров вдоль берегов Антарктического полуострова [3]. Море Беллинсгаузена характеризуется наличием сложного ледового рельефа и обширных айсберговых полей [4].

3. Гидрологические особенности морей Амундсена и Беллинсгаузена

Изменчивость климатического режима морей Амундсена и Беллинсгаузена непосредственно связана с гидрологическими процессами в этом регионе. Вода в этих морях характеризуется низкой температурой и низкой соленостью, что обусловлено близостью к Санкт-Эльзсевиру, мощному ледниковому потоку, который выносит обильное количество пресной воды в моря Амундсена и Беллинсгаузена [5]. Течения субледниковых вод, влияющие на гидродинамику этих морей, образуются в результате смешивания пресных вод с антарктическими льдинами и соленых вод Тихого океана [6].

4. Изменение климата

Моря Амундсена и Беллинсгаузена находятся в фокусе научных исследований в контексте изменения климата. За последние десятилетия темпы сокращения льда в этих морях значительно возросли, что свидетельствует о глобальных изменениях в системе ледниковых потоков Западной Антарктиды [2]. Изменения в ледообразовании и ледовом покрове оказывают существенное влияние не только на гидрологию, но и на климатические процессы в регионе Антарктиды.

В итоге, моря Амундсена и Беллинсгаузена представляют значимый регион в Антарктическом регионе, который является объектом научных исследований в области изменения климата и гидрологии. Их географическое положение и физическая география оказывают существенное влияние на климатические процессы в этом регионе, а изучение этих процессов помогает лучше понять глобальные климатические изменения.

1.1.1. Физико-географическая характеристика моря Амундсена

Окраинное море Тихого океана у берегов Западной Антарктиды. Ограничено с севера условной линией от мыса Дарт на западе до мыса Флайинг-Фиш на востоке, остальные границы проходят по преимущественно ледяным берегам материка. В восточной части значительно вдаётся в берег в районе Земли Мэри Бэрд. Берега высокие, гористые (на мысе Дарт гора Сайпл,

3110 м), в восточной части сильно изрезаны: крупный залив Пайн-Айленд, полуострова Кинг, Канистио, Бэр, Мартин. К морю выходят ледник Туэйтса и шельфовый ледник Геца. Площадь 98 тыс. км². Средняя глубина 286 м, наибольшая глубина не выявлена. Шельф слегка наклонён в сторону моря, представляет собой слабоволнистую аккумулятивную равнину, отгорожен от больших глубин подводным порогом с глубинами над ним 400–500 м. Материковый склон крутой и ровный, продолжается до глубин 4000 м. Ложе практически не прослеживается.

Море расположено в антарктической климатической зоне. В течение всего года над морем господствует холодный материковый воздух. Открыто к северу, на всём протяжении свободно сообщается с водами Тихого океана. Зимой (июль – август) над морем дуют преимущественно западные, восточные и юго-восточные ветры со скоростями 5–8 м/с, нередко штормовой силы (30–35 м/с) повторяемость штормов до 40%. Средняя температура воздуха минимальна в июле, понижается от –18 °С на севере до –28 °С на юге, при штормовых ветрах южных направлений понижается соответственно от –35 до –50 °С. Летом (январь – февраль) над морем дуют преимущественно западные ветры, нередко – южные со скоростью 5–6 м/с, при редких восточных штормовых ветрах достигают 30 м/с. В относительно тёплые летние месяцы температура воздуха понижается от –8 °С на севере до –16 °С на юге, в наиболее холодные годы соответственно от –20 до –24 °С.

В море распространён антарктический гидрологический тип структуры вод. В связи с преобладанием глубин до 500 м в море господствует поверхностная антарктическая вода. В зимнее время море полностью покрыто льдом, температура воды на поверхности около –1,5 °С в северной и около –1,8 °С в южной части; от горизонта 50–70 м и до дна температура понижается в среднем до 0,5 °С, а в самой северной части до –1,5 °С. Летом море почти полностью покрыто дрейфующими льдами, лишь у побережья образуются небольшие пространства чистой воды под действием ветров, дующих с

материка; температура поверхностных вод повышается до 0,0 °С, реже до 1,0 °С. Распределение температуры воды по вертикали в районах, постоянно покрытых льдом почти однородно по глубине; только в зонах свободных ото льда температура несколько понижается с глубиной. Солёность на поверхности и по глубине моря изменяется в небольших пределах, зимой подо льдом составляет 34,00–34,25 ‰, летом понижается до 33,0 ‰ (за счёт опреснения при таянии льда).

Кроме дрейфующих льдов в А. м. существует многолетний припай, покрывающий весь залив Пайн-Айленд. С берегов Антарктиды в море поступают обломки материкового льда, формирующие айсберги, которые вместе с дрейфующими льдами двигаются за пределы А. м. в сторону пролива Дрейка. Течения на поверхности моря формируются под воздействием преобладающих ветров, циркуляции прилегающих вод океана и конфигурации береговой линии Антарктиды. Общий перенос вод осуществляется с востока на запад в виде Прибрежного антарктического течения. Приливы полусуточные, высотой около 1 м. В море водятся тюлень Росса, тюлень Уэдделла, морской леопард, киты, пингвины, альбатросы [7].

1.1.2. Характеристика моря Беллинсгаузена

Окраинное море Тихого океана у берегов Западной Антарктиды между Антарктическим полуостровом на востоке и островом Терстон на западе. С севера ограничено линией мыс Флайинг-Фиш (остров Терстон) – северный берег острова Петра I – северная оконечность острова Аделейд; с запада и юга море ограничено слабо изрезанным ледниковым побережьем Антарктиды в районе Земли Элсуэрта, с востока – сильно изрезанным побережьем с многочисленными заливами – Маргерит, Симонова, Лазарева, Ронне и др. Крупные острова – Петра I и Земля Александра I. Пл. 487 тыс. км², объём 614 тыс. км³, средняя глубина 1261 м, наибольшая глубина 4115 м. Б. м. неглубоко

врезано в материк и полностью открыто к северу, что обуславливает свободный водообмен с прилежащими пространствами Тихого океана.

Шельф имеет глубины до 400–500 м, в значительной мере расчленён, особенно на малых глубинах по мере приближения к берегу, в центральной части – более ровный, на севере прослеживается довольно обширная замкнутая котловина с глубинами несколько больше 500 м. Материковый склон довольно крутой, ровный или слегка выпуклый в верхней части, на глубинах более 2500 м представляет собой глыбовую поверхность с острыми и очень неровными краями. В местах перехода склона в ложе, на глубинах около 3200 м, наблюдаются такие же глыбы, как и на склоне. Ложе занимает сравнительно небольшую часть дна моря. Глубже рельеф дна более спокойный, причём глубины постоянно увеличиваются к северу.

Море целиком расположено к югу от Полярного круга, в антарктической климатической зоне, где в течение всего года преобладает воздух с Антарктического материка. Круглогодично отмечается пониженное атмосферное давление, преобладает зональный перенос воздушных масс, на который влияет активная циклоническая деятельность. В зимний сезон дуют ветры западного, восточного и северо-восточного направлений со скоростью до 7 м/с, с июня по август довольно часто случаются штормы; воздух над морем сильно охлаждается, температура понижается с севера на юг от $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$ у острова Петра I до $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ у побережья, минимальные значения достигают $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ на севере и $-42\text{ }^{\circ}\text{C}$ на юге.

В летний сезон преобладают ветры восточного и северо-восточного направлений, дующие со скоростью в среднем 3–5 м/с. Штормы наблюдаются реже, чем зимой, и почти не достигают большой силы. Вследствие контраста температуры между «холодным» материком и относительно тёплой водной поверхностью моря площадь депрессии, расположенной на северо-востоке, увеличивается, возрастает повторяемость западных и юго-западных ветров. В летнее время воздух над морем слабо прогревается, его температура остаётся

невысокой, продолжая понижаться с севера на юг, среднемесячные значения температуры воздуха в январе от 4,0 до 0,0 °С, в феврале от 6,0 до –2,0 °С. Погода в море обычно неустойчива. Довольно редко и кратковременно при южных ветрах, дующих с материка, наблюдается сухая и ясная погода.

Гидрологический режим Б. м. формируется под влиянием его положения в высоких южнополярных широтах, ледяных берегов и шельфовых ледников на юге, свободного сообщения с тихоокеанскими водами на севере и действия устойчивых ветров. Немногочисленные данные океанологических наблюдений позволяют считать, что в Б. м. распространён лишь антарктический тип гидрологической структуры. Вследствие расположения моря преимущественно на шельфе преобладают поверхностные антарктические и в меньшей степени глубинные и придонные воды. Поверхностные антарктические воды образуются в условиях сурового климата и распространяются до горизонтов 200–400 м, пространственно-временные колебания их океанологических характеристик незначительны – температура воды изменяется от –1,0 до 1,9 °С, солёность от 33,8 до 34,5 ‰. Из-за малой продолжительности тёплого сезона (1–1,5 мес.) не формируется летняя модификация поверхностных вод. Поверхностные и глубинные воды моря разделены промежуточным слоем толщиной около 100 м, температура воды в южной части изменяется от –1,0 до 0,5°, солёность 34,0 ‰. Глубинные антарктические воды занимают самую мористую часть шельфа, частично материковый склон, над которым их толщина достигает 1000–1200 м, они формируются в процессе трансформации части вод восточного потока, поступающего в море из Тихого океана; их температура 0,0–0,5 °С, солёность около 34,5 ‰. Промежуточный слой между глубинными и придонными антарктическими водами выражен нечётко. Придонные воды образуются в результате смешивания поверхностных и глубинных вод (вероятно, на шельфе), лежат под глубинными и встречаются лишь на северных окраинах Б. м., в районе океанического ложа, их верхняя граница находится в основном на горизонтах 1500–2000 м, и они

распространяются до самых больших глубин. Их температура на горизонтах 3000–4000 м 0,1–0,2 °С (несколько повышается с юга на север), а солёность близка к 34,7 ‰. Длительная суровая зима и очень короткое и холодное лето обуславливают незначительные пространственно-временные изменения гидрологических характеристик во всём море. Температура воды на поверхности незначительно повышается с юга на север и почти не меняется по параллели.

Зимой море полностью покрыто льдом, температура воды на поверхности близка к температуре замерзания (от –1,7 до –1,9 °С). Летом температура воды на поверхности почти повсюду –1,5 °С, только у самой северной границы моря она имеет значение 1,0 °С или немного ниже. Солёность на поверхности изменяется в небольших пределах, зимой увеличивается с севера на юг. Летом в северных районах моря происходит кратковременное таяние льда, прослеживается язык пониженной солёности (32,25–33,00 ‰), вытянутый в общем с востока на запад примерно по параллелям 68–70° ю. ш., что связано, вероятно, с положением кромки тающих льдов. Плотность воды в Б. м. несколько понижена по сравнению с сопредельными водами вследствие меньшей солёности его вод. Зимой плотность на поверхности несколько больше, чем летом.

Ветер и ледяной покров определяют возможности возникновения и развития ветрового волнения в море. Зимой оно целиком покрыто льдом. В очень короткое тёплое время года его северные и частично центральные районы освобождаются от льдов, в это время здесь довольно часто дуют сильные ветры, вызывающие волнение в 3–4 балла, из-за сравнительно небольших разгонов развивают волны высотой до 3 м. У кромки льдов они обычно имеют высоту ок. 1 м. При довольно продолжительных осенних ветрах в открытых пространствах северной части моря волны могут достигать высоты более 4 м. В промежутках между штормами наблюдается зыбь высотой около 2 м, а после продолжительных штормов – до 4 м.

Движение поверхностных вод в море вызывается главным образом преобладающими ветрами, в меньшей степени – перемещением соприкасающихся с ними океанских вод на севере. В прибрежных районах на поверхностные течения влияет конфигурация береговой линии. Господствующие здесь ветры восточных направлений создают поток поверхностных вод в общем на запад, образуя вдоль побережья континента полосу (шириной около 500 км) почти непрерывного кольца ветровых течений – Прибрежного антарктического течения. Его северная граница изменяется в пространстве и во времени. В центральной части моря она проходит примерно по 68–69° ю. ш., а в западной – южнее 70° ю. ш. Зимой эта граница занимает более южное положение, чем летом. Скорость Прибрежного течения не превышает 15 см/с. На северных окраинах моря прослеживается довольно слабо выраженное перемещение поверхностных вод на восток, в центральной части отмечается циклоническая циркуляция. Переменные по направлению ветры в тёплое время года вызывают кратковременные неустойчивые поверхностные течения.

Полусуточные приливы в море вызывает приливная волна, приходящая из открытых районов Тихого океана, их высота в основном 1,8–2 м в открытых районах и может увеличиваться у берегов до 2,5 м. Постоянный ледяной покров гасит приливную волну. Приливные течения довольно отчётливо выражены у берегов материка, главным образом в узких проливах. Отмечаются сезонные (до 16 см) и сгонно-нагонные (до 1,5 м) колебания уровня моря. Б. м. – одно из наиболее ледовитых антарктических морей. В течение почти всего года оно бывает практически полностью покрыто льдом, лишь в феврале – марте его северные и северо-восточные районы частично очищаются от льда. Распространены плавучие льды, припай и айсберги, у берегов располагаются шельфовые ледники. Льдообразование начинается у кромки дрейфующих льдов примерно в конце апреля – начале мая и распространяется к северу вплоть до июня. В течение зимы море сплошь покрыто тяжёлыми, сплочёнными,

малоподвижными льдами, толщина которых у берега за счёт торошения достигает 4,5 м. При сильных и продолжительных ветрах с берега в разных районах моря образуются значительные полыньи и разводья, наиболее часто у островов Петра I и Земля Александра I. Припай развит в относительно узкой прибрежной полосе и достигает толщины 3–4 м. Таяние льда начинается в ноябре – декабре. В короткое лето ледовая обстановка в море характеризуется распространением тяжёлых льдов сплочённостью до 9 баллов в южной части, 3–4 балла в центральной, 1–3 балла в прикромочной. Среди дрейфующих льдов встречаются многочисленные небольшие и невысокие айсберги. Проливы между берегом Антарктиды и близлежащими островами, а также некоторые бухты заполнены шельфовыми ледниками с высотой барьера до 30 м.

В этом море водятся тюлень-крабод, тюлень Уэдделла, морской леопард, южный морской котик, южный морской слон, пингвины и другие птицы; в открытом море – криль и киты [8].

1.1.3. Сценарии изменения климатического режима

Возможные сценарии изменения климатического режима морей Амундсена и Беллинсгаузена [9]:

1. Увеличение температуры морской воды и таяние льдов. Глобальное потепление может привести к увеличению температуры воды в морях Амундсена и Беллинсгаузена, что может вызвать таяние льдов и изменение морского ледяного покрова.

2. Изменения в режиме циркуляции и ветровой активности. Изменения в климатических условиях могут привести к изменениям в режиме циркуляции воды и ветровой активности в данных морях. Это, в свою очередь, может повлиять на температуру воды, воздействие на флору и фауну.

3. Влияние на морскую биологию. Изменение климатического режима также может оказать влияние на морскую биологию в морях Амундсена и

Беллинсгаузена. Например, сдвиг в температурных условиях может повлиять на распространение видов рыб и других морских организмов.

4. Экстремальные явления. Повышение температуры воды и изменение климатических условий может также спровоцировать экстремальные явления, такие как ураганы или сильные штормы, которые могут повлечь за собой серьезные последствия для морской среды.

1.2. Обзор существующих исследований по изменчивости климатического режима данных морей

Обзор существующих исследований по изменчивости климатического режима морей Амундсена и Беллинсгаузена является важным этапом работы по этой теме. Специалисты из различных учреждений и университетов по всему миру занимались анализом климатических изменений, которые происходят в этих регионах. В каждой статье ниже есть информация о том, что протяженность морского льда в Антарктике медленно увеличивалась в течение четырех десятилетий спутниковой эры до 2014 года, когда расширение остановилось, а затем в следующие пару лет последовало быстрое сокращение. Ниже приведены некоторые ключевые исследования, которые могут помочь лучше понять изменчивость климата в морях Амундсена и Беллинсгаузена:

1. Работа «Связь изменений площади морского льда Антарктики в 1979–2020 годах с сезонными режимами изменчивости морского льда Антарктики» [10] показывает, что долгосрочная тенденция увеличения площади морского льда в Антарктике и его недавнее уменьшение могут быть в значительной степени объяснены первым, вторым и четвертым эмпирическими режимами ортогональной функции изменчивости морского льда в южное лето, осень и весну. Из данной работы следует, что изменчивость морского льда, представленная тремя режимами, в основном соответствует тому, что ожидается от аномальных атмосферных циркуляций, связанных с планетарными волновыми цепочками, которые вызываются аномальной температурой поверхности моря (ТПМ) и конвективной активностью над южной частью Индийского и Тихого океанов. В частности, результаты предполагают наличие дальней связи (дальняя связь относится к климатическим аномалиям, связанным друг с другом на расстояниях порядка тысячи километров) между периодами увеличения площади морского льда в Антарктике за последние четыре десятилетия и положительными аномалиями

ТПО над юго-восточной частью Индийского океана и западной тропической частью Тихого океана. Обратный процесс происходит в период снижения. Соответственно, одни и те же механизмы на разных этапах были связаны с периодами увеличения и уменьшения площади морского льда в Антарктике.

2. В статье «Межгодовая изменчивость площади морского льда регионов Антарктики» [11] указано, что единственный регион в Антарктике, где шло уменьшение площади распространения морского льда (ПРМЛ) до 2014 года — это моря Беллинсгаузена и Амундсена. В первую половину года (январь — июнь) здесь происходит сильное сокращение ПРМЛ, причём во вторую половину (июль — декабрь) тренды отсутствуют. Очевидно, уменьшение ПРМЛ связано с целым рядом факторов атмосферного и океанического происхождения. К атмосферным факторам относятся индексы южной круговой моды (*англ.* Southern Annular Mode — SAM) и центра низкого давления моря Амундсена (*англ.* Amundsen Sea Low — ASL), способствующие уменьшению ПРМЛ в МБА. Однако уверенно можно утверждать о преобладающей роли циркумполярной глубинной воды (*англ.* Circumpolar Deep Water — CDW) в сокращении ПРМЛ в морях Беллинсгаузена и Амундсена и потеплении западной стороны Антарктического п-ова. Ближе всего тёплый поток CDW подходит к берегам Антарктиды в морях Амундсена и Беллинсгаузена, на шельфе которых он поднимается вверх, повышая температуру поверхностных вод и уменьшая площадь морского льда, что способствует потеплению западной стороны Антарктического п-ова.

3. Целью исследования «Реконструкция изменений в секторе моря Амундсена и моря Беллинсгаузена Западно-Антарктического ледникового щита со времени последнего ледникового максимума» [12] являлось восстановление и анализ изменений, происходивших в регионе западного антарктического ледяного щита со времени последнего ледникового максимума. Авторы использовали различные методы, включая изучение осадков, гравитационных

данных, геохимические анализы, для восстановления истории изменений ледяного щита в данном регионе. Они сделали следующие выводы:

- Немногочисленные космогенные данные о возрасте обнажения поверхности и данные о ледяных ядрах, доступные во внутренних районах Западной Антарктиды, указывают на то, что высота поверхности льда там мало изменилась со времени последнего ледникового максимума.

- Лед в море Амундсена отступил почти до своих современных границ к началу голоцена (около 10.000 года до нашей эры) после относительно быстрого отступления со среднего шельфа в течение предыдущих нескольких тысяч лет. Напротив, постепенное отступление льда произошло от внешнего к среднему шельфу вдоль желоба Бельгика в море Беллинсгаузена. Внутренний шельф его притока залива Эльтанин также освободился от стоящего льда к раннему голоцену, но отступление в приток Ронне-Энтрэнс продолжалось на протяжении большей части голоцена. Траектория отступления в АСЭ напоминает траекторию на континентальном шельфе к западу от Антарктического полуострова, тогда как траектория вдоль притока Ронне-Энтрэнс желоба Бельгика напоминает прогрессивное отступление, зафиксированное в море Росса. Таким образом, вдоль западно-антарктической окраины, по-видимому, происходит чередование зон, в которых постепенное отступление продолжалось в течение голоцена, и зон, в которых отступление, близкое к современным границам, было почти завершено к раннему голоцену.

- Скорость истончения и отступления линии заземления, наблюдаемая на шельфовых ледниках и ледниках вокруг залива моря Амундсена за последние два десятилетия, значительно быстрее, чем любая, которая может быть надежно установлена в дегляциальных записях этого сектора. Однако, по имеющимся данным, нельзя утверждать, что они беспрецедентны для голоцена.

Эти исследования являются лишь небольшими примерами из обширного спектра работ, посвященных изменениям климата в морях Амундсена и Беллинсгаузена.

ГЛАВА 2. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ И МЕТОДЫ ИХ ОБРАБОТКИ

2.1. Описание методов исследования, используемых для анализа изменчивости климатического режима

Изучение изменчивости климата является важной задачей для понимания процессов, происходящих в окружающей нас среде. Для анализа изменений климата существует множество методов и подходов, каждый из которых вносит свой вклад в понимание климатических процессов. Ниже представлен обширный обзор методов изучения изменчивости климата с примерами источников.

1. Анализ данных наблюдений.

Метеорологические данные. Один из основных методов изучения изменчивости климата – это изучение метеорологических данных, включающих параметры, такие как температура, атмосферное давление, влажность и осадки. Анализ этих данных позволяет определить долгосрочные тенденции и цикличность климатических изменений. Пример источника: Национальный центр данных о климате (NCDC), доступный по адресу www.ncdc.noaa.gov.

Гидрологические данные: Изучение гидрологических данных, таких как уровень воды, температура и солёность воды, помогает понять изменения климата в регионах с преобладанием водных ресурсов. Пример источника: Всемирный центр метеорологических данных (WMO), доступный по адресу www.wmo.int/pages/index_en.html.

Долгосрочные временные ряды: Анализ временных рядов климатических данных помогает выявить тренды и цикличность изменчивости климата на протяжении длительного временного периода. Пример источника: База данных Мировой метеорологической организации (WMO), доступная по адресу <https://climexp.knmi.nl>.

2. Моделирование климата.

Численные климатические модели. Использование глобальных и региональных климатических моделей позволяет моделировать изменения климата под воздействием различных факторов, включая естественные процессы и антропогенные воздействия. Пример источника: Институт Геофизики и Планетологии Университета Луизианы (LPG) с его моделью климата ACCESS-1.3, доступный по адресу http://geoinfo.louisiana.edu/modeling/ACCESS_1_3.html.

Реконструкция климата: Реконструкция климата на основе архивных данных, таких как ледниковые керны, деревья и седименты донных отложений, позволяет воссоздать историческую изменчивость климата. Пример источника: Программа Научно-исследовательского центра по изучению ледниковых кернов (CRC-CRYO), доступная по адресу www.cryocenter.org.

3. Спутниковые данные.

Наблюдения из космоса. Использование спутниковых данных по температуре поверхности моря, облаках, ледяному покрову и другим параметрам позволяет отслеживать изменения климата на больших пространствах и в реальном времени. Пример источника: Национальный центр данных по снегу и льду, доступный по адресу <https://nsidc.org/home>.

4. Изучение причин изменчивости климата.

Анализ воздействия океанических течений, изменений температуры поверхности воды и других факторов на климат позволяет понять механизмы изменчивости климата. Пример источника: Институт океанографии США (Scripps) и его исследования океанического воздействия на климат, доступные по адресу www.scripps.ucsd.edu.

5. Исследование атмосферных процессов.

Анализ атмосферных циркуляций. Изучение атмосферных циркуляций, таких как Эль-Ниньо-Ла-Нинья и много других, помогает объяснить изменчивость климата в различных регионах. Пример источника: Центр климатических прогнозов и мониторинга (CPC) Национального управления океанических и атмосферных исследований (NOAA), доступный по адресу www.cpc.ncep.noaa.gov.

6. Использование географических информационных систем (ГИС)

Пространственный анализ. ГИС позволяют анализировать пространственные данные о климате, включая температурные и осадочные режимы, и выявлять связи между различными климатическими параметрами. Пример источника: Центр географической информации (CGI), доступный по адресу www.cgi.org.

7. Методы статистического анализа.

Трендовые анализы. Использование статистических методов позволяет определить наличие и характер трендов в климатических данных и оценить статистическую значимость полученных результатов. Пример источника: Центр статистических исследований (CSS) Университета Стэнфорда, доступный по адресу www.css.stanford.edu.

Изучение изменчивости климата — это многогранный и многопрофильный процесс, который требует комплексного подхода и использования разнообразных методов и источников данных. Комбинирование различных методов позволяет создать более полное представление о климатических изменениях и их причинах, что важно для развития стратегий адаптации к изменяющимся климатическим условиям.

2.2. Обоснование выбора методологии и объяснение применения каждого метода

В дипломной работе будет использован целый комплекс из методов, о которых шла речь выше:

- 1) Анализ данных наблюдений;
- 2) Изучение причин изменчивости климата;
- 3) Спутниковые данные;
- 4) Методы статистического анализа.

Рассмотрим их кратко:

1) Невозможно провести исследование без первичного анализа данных наблюдений. Гидрологические и метеорологические характеристики важны на самом первом этапе любой разработки сценария климата;

2) Изменчивость климата — это естественный процесс, который происходит под воздействием различных факторов.

Вот некоторые из основных причин изменчивости климата:

- Изменения в солнечной активности. Это может оказывать влияние на климат через изменения в количестве солнечного излучения, которое поступает на Землю;
- Вулканическая активность. Вулканы могут выбрасывать в атмосферу огромные количества пепла и газов, что может привести к охлаждению климата за счет блокировки солнечного света;
- Естественные колебания в океане. Такие явления, как Эль-Ниньо и Ла-Нинья, вызывают колебания в температуре океана и атмосферы, которые влияют на климат по всей планете. Например, именно в Тихом океане происходила максимальная интенсификация процесса потепления, в том числе

за счет увеличения повторяемости явления Эль-Ниньо во второй половине XX столетия, причем в течение 1993–2003 гг. оно отмечалось три раза [13];

- Географические изменения: Изменения в географических условиях, такие как перемещение континентов и изменение океанских течений, могут существенно повлиять на климат, но это происходит в течение многих миллионов лет;

- Антропогенные факторы: Деятельность человека, такая как выбросы парниковых газов, загрязнение атмосферы и изменения в использовании земли, также оказывают значительное влияние на климат.

Все эти факторы взаимодействуют и вносят свой вклад в изменчивость климата. Понимание этих причин помогает ученым лучше прогнозировать будущие изменения в климате и разрабатывать стратегии адаптации к ним;

3) Спутниковые данные наглядно показывают изменение климата на протяжении времени. Для примера возьмем 4 спутниковых изображения с сайта Национального центра данных по снегу и льду [14] для сравнения площади Антарктиды, покрытой льдом за 1979, 1994, 2005 и 2023 годы. Благодаря медиане можно заметить, как в течение 45 лет изменяется площадь льдов. Видно, что на первом снимке 1979 года общая протяженность морского льда выше на 1.6 миллиона км², чем в 2023 году (рис. 2.1.);

4) Методы статистического анализа данных. В своей работе я использую анализ временных рядов (выделение и анализ трендовой компоненты, гармонический анализ Фурье). Временные ряды являются одним из основных объектов анализа в статистике и эконометрике, поскольку они отражают изменения в переменной в зависимости от времени. Применение методов анализа временных рядов позволяет выявлять тренды, сезонные колебания, циклические изменения и другие закономерности, что помогает прогнозировать дальнейшее развитие событий или явлений.

Выделение и анализ трендовой компоненты позволяет понять долгосрочные динамики и закономерности в данных, что важно для принятия решений, разработки стратегий и прогнозирования будущих событий. Анализ тренда помогает выявить ключевые направления развития явления и предсказать его будущее.

Ход работы был следующим:

1. Линейный тренд рассчитан по уравнению линейной регрессии:

$$X = a_1t + a_0 + \varepsilon;$$

2. Были оценены характеристики тренда: коэффициенты тренда (a_1, a_0), коэффициент детерминации (R^2), т.е. вклад тренда в общую дисперсию ряда;

3. Проведена оценка значимости линейного тренда. Для этого была рассмотрена нулевая гипотеза:

$$H_0: a_1 = 0$$

$$H_1: a_1 \neq 0$$

Для проверки был рассчитан критерий Стьюдента для каждой характеристики и критическое значение $t: t_{кр} = 2.018$.

Если $t_{a_1} > t_{кр}$, то нулевая гипотеза отвергалась, коэффициент тренда значим, т.е. линейный тренд значим;

4. Нелинейный тренд рассчитан как множественная нелинейная регрессия:

$$X = a_2t^2 + a_1t + a_0 + \varepsilon;$$

5. Были оценены характеристики тренда: коэффициенты тренда (a_1, a_0), коэффициент детерминации (R^2), т.е. вклад тренда в общую дисперсию ряда;

6. Оценена значимость нелинейного тренда. Для этого была рассмотрена нулевая гипотеза:

$$H_0: a_2 = 0$$

$$H_1: a_2 \neq 0$$

Для проверки был рассчитан критерий Стьюдента для каждой характеристики и критическое значение $t: t_{кр} = 2.018$ (для всех одно).

Если $t_{a_2} > t_{кр}$, то нулевая гипотеза отвергалась, коэффициент тренда значим, т.е. нелинейный тренд значим.

Гармонический анализ – это метод математического анализа, используемый для разложения сложных функций на более простые гармонические компоненты. Преобразование Фурье является ключевым инструментом гармонического анализа. Оно позволяет перейти от временной (или пространственной) области к частотной. Преобразование Фурье позволяет представить любую функцию в виде интеграла от комплексной экспоненты, что удобно для анализа гармонических составляющих.

Ход работы для гармонического анализа Фурье:

1. Из исходного ряда удалили тренд, в нашем случае линейный и получили ряд отклонений без тренда. Теперь в структуре ряда крупными составляющими являются циклические;

2. В программе Past4 рассчитали периодограмму для ряда отклонений от тренда. Определили периоды, соответствующие пикам спектра;

3. Для каждого из этих периодов рассчитали основные характеристики гармоник, а также провели оценка коэффициента детерминации на значимость:

1) Частота 1/год = значение Frequency;

2) Период, год $T_k = 1/\text{значение Frequency}$;

3) Частота рад/год

$$\omega_k = \frac{2\pi}{T_k};$$

4) Коэффициент Фурье a_k

$$a_k = \frac{2}{N} \sum_{i=1}^N [x_i \sin(\omega_k \cdot t_i)]$$

5) Коэффициент Фурье b_k

$$b_k = \frac{2}{N} \sum_{i=1}^N [x_i \cos(\omega_k \cdot t_i)]$$

6) Амплитуда гармоники

$$A_k = \sqrt{a_k^2 + b_k^2}$$

7) Фаза, рад (ϕ_k)

$$\phi_k = \arctg \frac{a_k}{b_k} [\pm \pi]$$

8) Фаза, год

$$\varphi_{kt} = \frac{\phi_k \cdot T_k}{\pi}$$

9) Дисперсия гармоники

$$D_k = \frac{A_k^2}{2}$$

10) Дисперсия исходного ряда D_y = функция Excel ДИСП.В от ряда без тренда

11) Вклад гармоники в ряд отклонений от тренда $V_k = \frac{D_k}{D_y} (R^2)$

12) Провели проверку коэффициента детерминации на значимость

$$\sqrt{R^2} = r$$

Рассмотрели нулевую гипотезу:

$$H_0: r = 0$$

$$H_1: r \neq 0$$

Для проверки гипотезы брали критерий Стьюдента, который рассчитывается по формуле:

$$t' = \frac{|r|}{\sigma_r}$$

$$\sigma_r = \frac{1 - r^2}{\sqrt{N - 2}}$$

4. Составили уравнения для гармоник;

5. Для каждого момента времени рассчитали ряды для всех гармоник и найдена их сумма;

6. Построили графики предположительного прогноза ТПО, ТВ и концентрации льда на 10 лет.

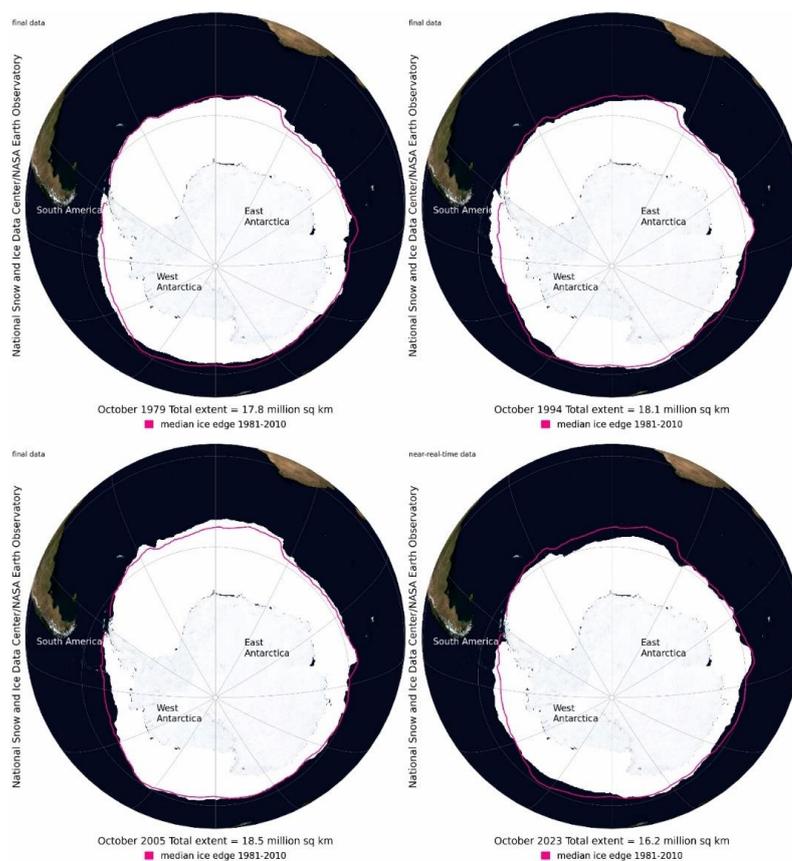


Рис. 2.1. Общая протяженность морского льда в Антарктиде в 1979, 1994, 2005 и 2023 годах [14].

ГЛАВА 3. КЛИМАТИЧЕСКИЕ ИЗМЕНЕНИЯ МОРЕЙ АМУНДСЕНА И БЕЛЛИНСГАУЗЕНА: АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ И ПРОГНОЗ

3.1. Антарктида

Так как выбранные моря расположены в западной части Антарктиды, то начнем анализ с этого материка. Источником информации данных послужил сайт Национального центра данных по снегу и льду [14], который предоставил среднемесячные данные за 1980-2023 гг. по площади распространения морского льда (ПРМЛ). Была составлена таблица исходных данных ПРМЛ (табл. 3.1), а также график межгодовой изменчивости среднегодовых значений ПРМЛ для всей Антарктики (рис. 3.1). Из рис. 3.1 видно, что до 2014 г. ледовитость в Антарктике повышалась и только затем стала довольно быстро уменьшаться.

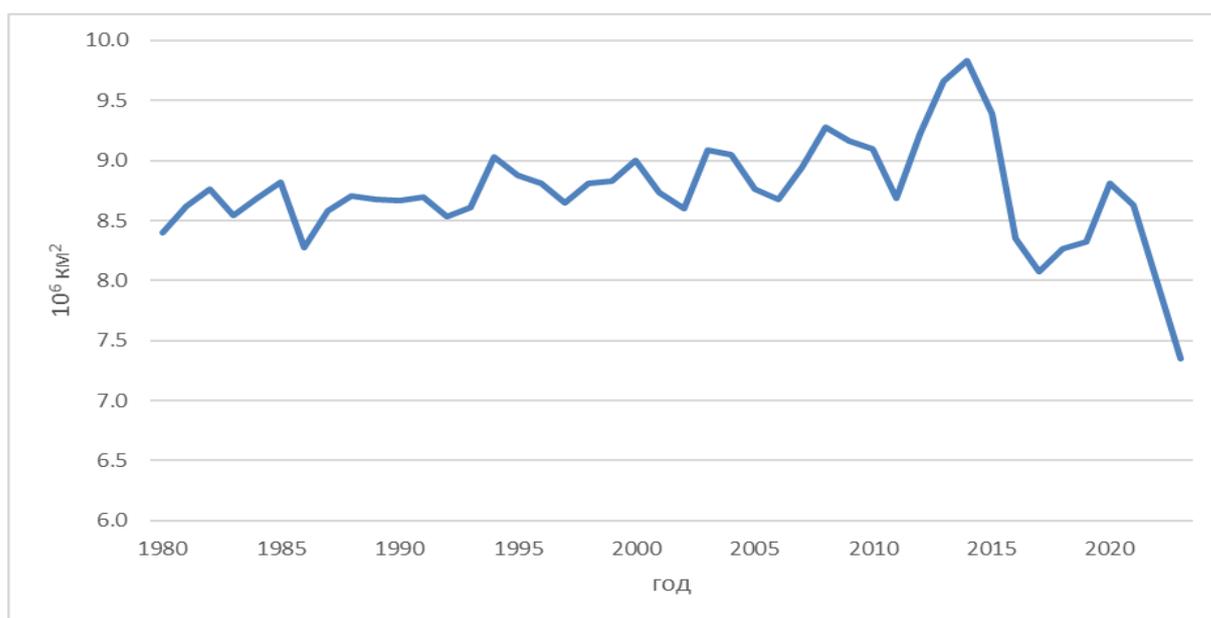


Рис. 3.1. Среднегодовая площадь распространения морского льда в Антарктиде (в млн. кв. км)

Таблица 3.1

Площадь распространения морского льда в Антарктиде (в млн. кв. км)

	I	II	II	IV	V	VI	VII	VII	VIII	IX	X	XI	XII
1980	3.1	1.8	2.1	3.7	6.4	9.6	12.2	14	14.9	14.6	11.8	6.6	8.4
1981	2.8	1.7	2.2	4.1	7.1	10.2	12.8	14.2	14.8	14.4	12.1	7	8.6
1982	3.3	1.9	2.8	5.8	8.3	10.5	12.5	14.3	14.5	13.7	11.3	6.3	8.8
1983	3.2	1.9	2.6	4.7	7.2	9.8	12.4	13.8	14.7	13.9	11.6	6.7	8.5
1984	2.9	1.8	2.3	4.5	7.4	10.6	13.4	14.2	14.3	13.7	12.1	7	8.7
1985	2.9	1.8	2.5	4.7	7.8	10.5	12.5	14.2	14.7	14.4	12.3	7.5	8.8
1986	3.4	2	2.4	4.6	7	9.7	12.1	13.5	13.9	13.3	10.9	6.5	8.3
1987	3.3	2	2.7	5	7.5	9.9	12.5	14	14.3	13.7	11.2	6.9	8.6
1988	3.2	1.9	2.6	4.4	7.2	10.3	12.6	14	14.2	14.4	12.3	7.4	8.7
1989	3.2	2	2.6	4.5	8	10.8	12.6	14	14.5	13.8	11.4	6.7	8.7
1990	3.4	2.2	2.8	5.2	7.5	10.4	12.3	14	14.4	13.8	11.3	6.7	8.7
1991	3.5	2.1	2.7	5.2	7.9	10	12.2	14.1	14.5	13.8	11.5	6.8	8.7
1992	3.2	1.9	2.5	5	7.6	10	12.6	14.2	14.1	13.9	11.2	6.2	8.5
1993	2.5	1.4	2.2	4.9	7.9	10.4	12.7	13.9	14.7	14.2	11.8	6.7	8.6
1994	3.4	2.2	3.2	5.5	8.2	10.7	13.1	14.5	14.6	14.1	11.8	7.1	9.0
1995	3.7	2.2	3	5.4	8.2	10.5	12.5	14.2	14.5	13.6	11.5	7.2	8.9
1996	3.5	1.8	2.6	5.4	8.7	11.1	12.9	13.9	14.5	13.9	11.2	6.2	8.8
1997	2.8	1.7	2.3	4.8	7.9	10.2	12.7	14.1	14.6	14.1	11.6	7	8.7
1998	3	1.9	2.7	5.1	7.9	10.3	12.7	14.1	14.8	14.5	11.9	6.8	8.8
1999	3.1	1.8	2.6	5.1	8.1	10.8	13.1	14.2	14.6	14.2	11.5	6.8	8.8
2000	2.9	1.7	2.7	5.3	8.6	11	13	14.6	15.1	14.3	11.8	7	9.0
2001	3.6	2.4	3.4	5.3	8	10.6	12.6	13.8	14.4	13.3	11	6.4	8.7
2002	2.9	3	2.4	4.6	7.2	9.7	12.5	13.7	14.1	13.8	11.7	7.6	8.6
2003	4.1	2.7	3.2	5.6	8.5	11.2	13.2	13.8	14.1	13.9	11.5	7.2	9.1
2004	3.8	2.4	3.2	5.4	8.2	10.9	13.2	14.2	14.6	14.1	11.7	6.9	9.1
2005	3.2	2	2.7	5.2	8	10.3	12.7	14	14.9	14	11.8	6.3	8.8
2006	2.8	1.8	2	4.3	7.2	10.6	12.9	14.5	15.2	14.7	11.6	6.5	8.7
2007	3	1.9	2.5	4.7	7.5	10.5	12.6	14	15.4	14.6	12.2	8.4	8.9
2008	4.1	2.4	3.7	6.2	8.6	11.4	12.9	14.1	14.4	14.1	12	7.4	9.3
2009	3.5	2	3	6	8.5	11.1	13.1	14.5	15.1	14.3	11.8	7.1	9.2
2010	3.3	2.1	2.7	5	8.3	11.6	13.7	14.9	14.4	14.4	11.9	6.9	9.1
2011	3	1.9	2.3	4.4	7.8	10.5	12.3	14	14.6	14.2	11.8	7.4	8.7
2012	3.7	2.2	2.9	5.6	8.2	10.8	13.3	14.6	15.4	14.5	12.1	7.4	9.2
2013	3.9	2.6	3.5	5.8	8.5	11.3	13.7	15.1	15.3	15.1	12.8	8.3	9.7
2014	4.4	2.7	3.3	6.4	9	12.1	14	15.1	15.7	14.8	12.3	8.2	9.8
2015	4.3	2.5	3.4	6.4	9.2	11.5	13.5	14	14.5	14.4	11.9	7.1	9.4
2016	3	1.9	2.8	5.4	7.9	10.6	12.5	14	13.9	12.9	9.8	5.5	8.4
2017	2.6	1.6	1.8	3.9	6.8	9.8	12.3	13.6	13.9	13.5	10.9	6.2	8.1
2018	2.7	1.6	2.3	4.1	7.2	10.2	12.5	14	14.2	14	10.8	5.6	8.3
2019	2.7	1.8	2.1	4.2	6.8	9.7	12.3	14	14.6	13.9	11.2	6.6	8.3
2020	3.1	1.8	2.6	4.8	7.6	10.6	12.6	14.4	15.1	14.6	11.9	6.6	8.8
2021	2.9	1.7	2.8	5.3	8.2	11	13.4	14.6	14.4	13.4	10.4	5.5	8.6
2022	2.4	1.4	1.9	4.3	7.3	9.6	11.9	13.7	14.1	13.3	10.8	5.2	8.0
2023	1.9	1.2	1.7	4	6.5	8.5	10.6	12.2	13	12.5	10.3	5.8	7.4

Для анализа сезонной изменчивости ледовитости, выберем 5 лет с различной площадью морского льда (1980, 1987, 1996, 2014 и 2023 гг.) и на рис.

3.2 представим внутригодовой ход ПРМЛ. Как видно из рис. 3.2 максимальные значения ПРМЛ для всех лет отмечаются в августе, а минимальные – в феврале. Если из средних значений ПРМЛ 1980 г. вычесть средние значения 2023 г., то получим 1.05 млн км.², т.е. изменения ПРМЛ весьма значительные.

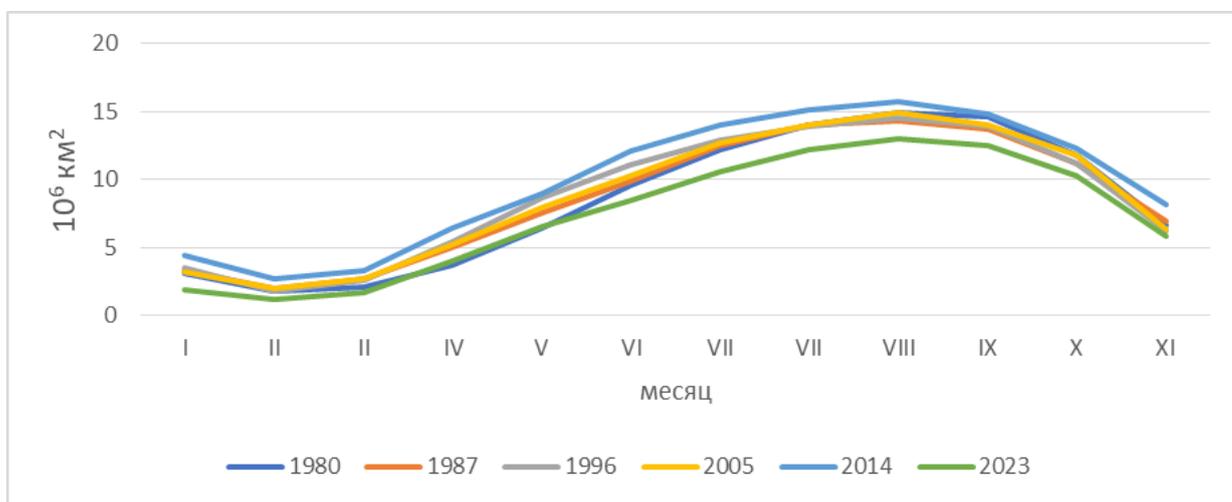


Рис. 3.2. Сезонная изменчивость площади распространения морского льда в Антарктиде (в млн. кв. км) в 1980, 1987, 1996, 2005, 2014 и 2023 гг.

Для дальнейшего исследования и анализа были взяты по три точки в каждом море (рис. 3.3.):

Море Беллинсгаузена:

1. 71° 4' ю.ш. 88° 13' з.д.;
2. 71° 4' ю.ш. 97° 5' з.д.;
3. 69° 5' ю.ш. 78° 75' з.д.;

Море Амундсена:

1. 73° 33' ю.ш. 125° 63' з.д.;
2. 73° 33' ю.ш. 116° 25' з.д.;
3. 73° 33' ю.ш. 106° 88' з.д.

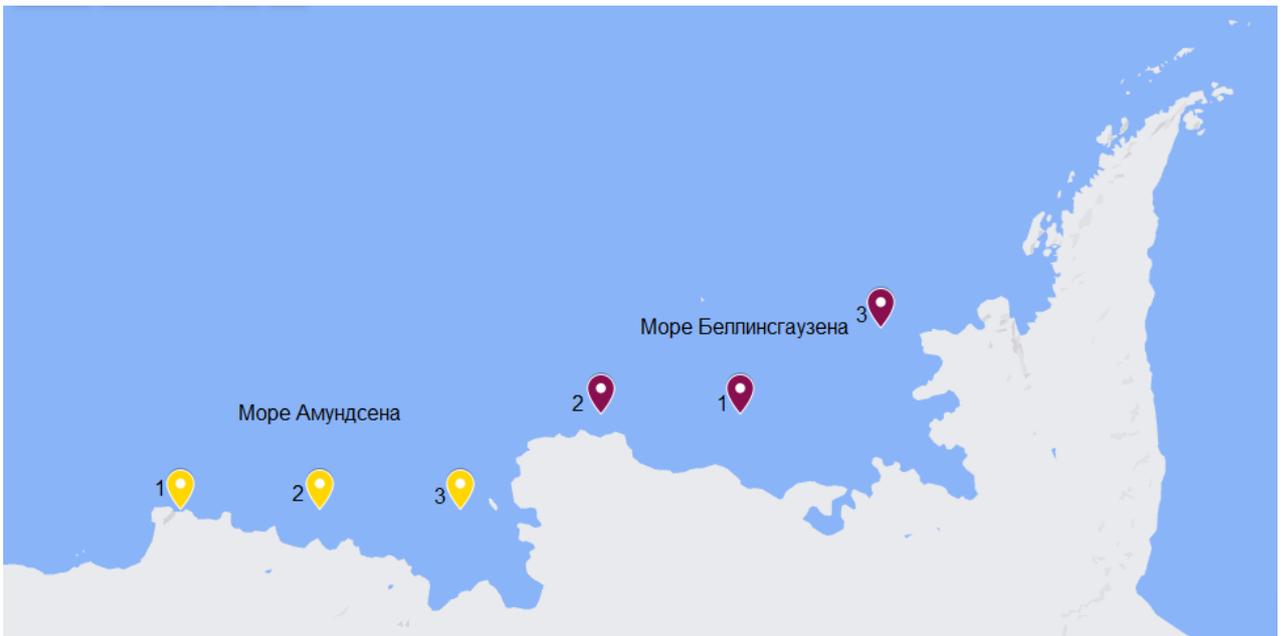


Рис. 3.3. Точки, взятые для анализа, в морях Амундсена (желтые) и Беллинсгаузена (бордовые).

3.2. Море Амундсена

3.2.1. Анализ данных

Переходим к изучению изменчивости морей, вначале будем рассматривать море Амундсена. Данные для него были взяты с библиотеки климатических данных «The IRI Data Library» [15], которые представлены в табл. 3.2: среднегодовая температура поверхности океана (ТПО), среднегодовая температура воздуха (ТВ) на высоте 2 метров, а также среднегодовая концентрация льда (или процент площади, покрытой льдом, относительно общей площади поверхности воды) в трёх точках с 1980 по 2023 гг.

Для указанных характеристик были построены графики (рис. 3.4—3.6), из которых видно, что оценки ТПО и ТВ имеют тенденцию к повышению, в то время как ПРМЛ испытывает только случайные колебания. В самой западной точке моря концентрация морского льда близка к 1.

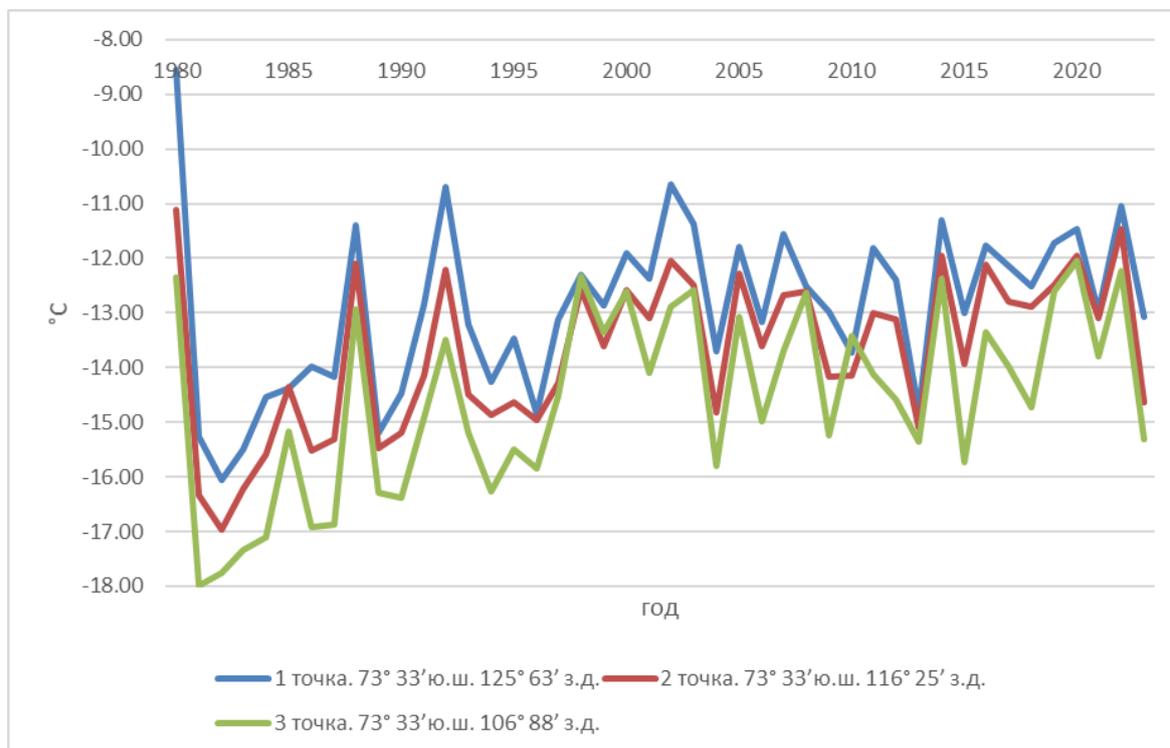


Рис. 3.4. Изменчивость среднегодовых значений ТПО в трёх районах моря Амундсена

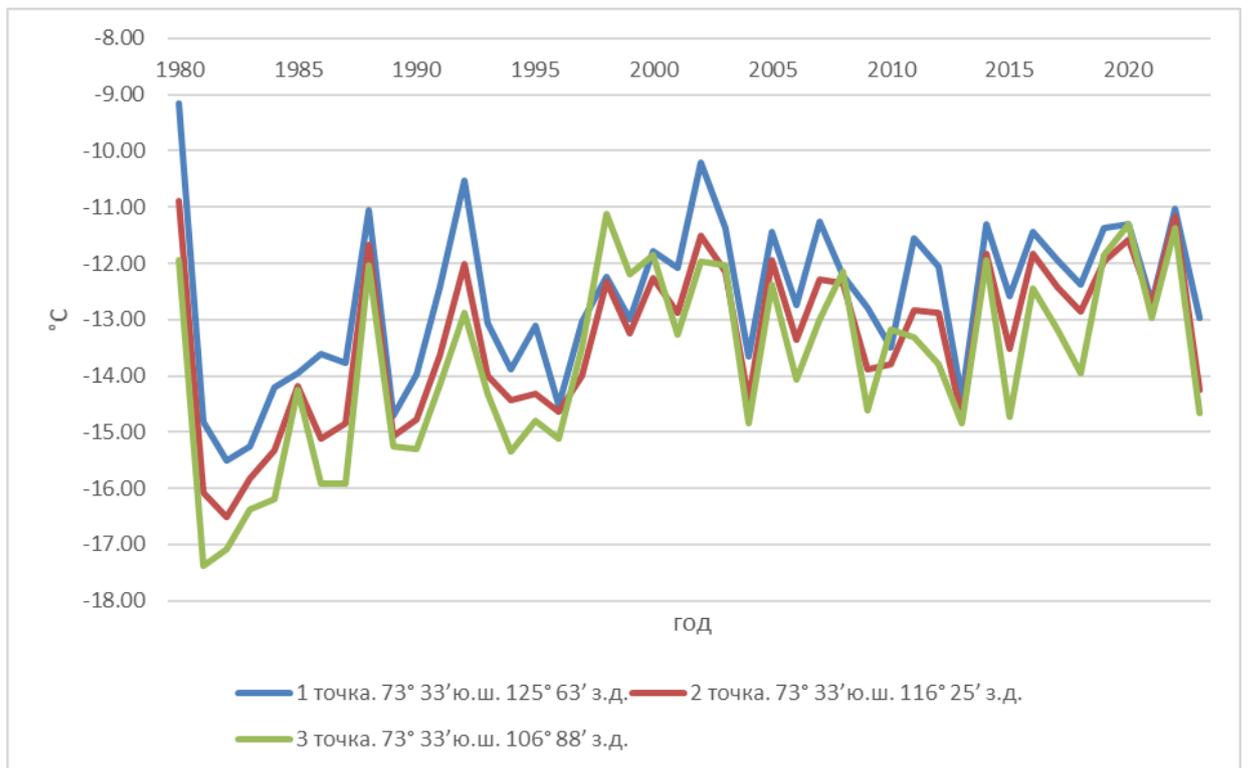


Рис. 3.5. Изменчивость среднегодовых значений ТВ в трёх районах моря Амундсена

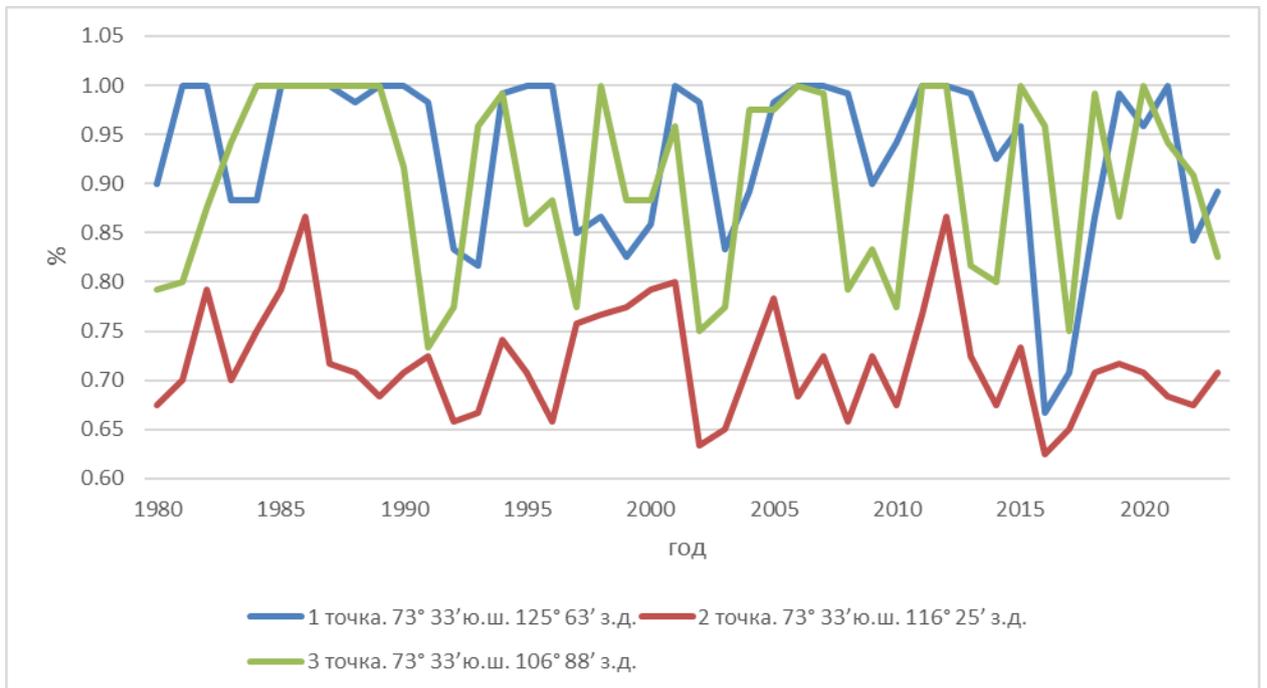


Рис. 3.6. Среднегодовая концентрация льда в трёх районах моря Амундсена

В табл. 3.2 приводятся среднегодовые значения ТПО, ТВ и $S_{\text{льда}}$ для трех районов моря Амундсена за период 1980-2023 гг.

Таблица 3.2

Среднегодовые значения ТПО, ТВ и S_{льда} для трех районов моря Амундсена за период 1980-2023 гг.

	1 точка. 73° 33' ю.ш. 125° 63' з.д.			2 точка. 73° 33' ю.ш. 116° 25' з.д.			3 точка. 73° 33' ю.ш. 106° 88' з.д.		
	ТПО, °С	S _{льда} , %	ТВ, °С	ТПО, °С	S _{льда} , %	ТВ, °С	ТПО, °С	S _{льда} , %	ТВ, °С
1980	-8.55	0.90	-9.16	-11.12	0.68	-10.90	-12.35	0.79	-11.94
1981	-15.26	1.00	-14.81	-16.33	0.70	-16.08	-17.99	0.80	-17.38
1982	-16.05	1.00	-15.50	-16.96	0.79	-16.52	-17.75	0.88	-17.09
1983	-15.51	0.88	-15.25	-16.21	0.70	-15.83	-17.34	0.94	-16.38
1984	-14.54	0.88	-14.19	-15.59	0.75	-15.31	-17.10	1.00	-16.18
1985	-14.37	1.00	-13.95	-14.35	0.79	-14.18	-15.17	1.00	-14.25
1986	-13.98	1.00	-13.60	-15.52	0.87	-15.11	-16.92	1.00	-15.93
1987	-14.17	1.00	-13.78	-15.32	0.72	-14.85	-16.87	1.00	-15.92
1988	-11.39	0.98	-11.06	-12.09	0.71	-11.68	-12.93	1.00	-12.04
1989	-15.21	1.00	-14.71	-15.47	0.68	-15.07	-16.29	1.00	-15.26
1990	-14.47	1.00	-13.98	-15.20	0.71	-14.77	-16.38	0.92	-15.31
1991	-12.85	0.98	-12.42	-14.14	0.73	-13.63	-14.91	0.73	-14.15
1992	-10.69	0.83	-10.53	-12.21	0.66	-12.02	-13.49	0.78	-12.89
1993	-13.22	0.82	-13.07	-14.49	0.67	-14.00	-15.20	0.96	-14.32
1994	-14.25	0.99	-13.87	-14.87	0.74	-14.44	-16.26	0.99	-15.34
1995	-13.48	1.00	-13.10	-14.64	0.71	-14.31	-15.49	0.86	-14.81
1996	-14.83	1.00	-14.51	-14.95	0.66	-14.64	-15.85	0.88	-15.12
1997	-13.12	0.85	-13.05	-14.29	0.76	-13.99	-14.52	0.78	-13.49
1998	-12.31	0.87	-12.24	-12.55	0.77	-12.33	-12.32	1.00	-11.11
1999	-12.86	0.83	-13.00	-13.61	0.78	-13.24	-13.35	0.88	-12.20
2000	-11.92	0.86	-11.78	-12.58	0.79	-12.27	-12.61	0.88	-11.85
2001	-12.37	1.00	-12.08	-13.09	0.80	-12.89	-14.09	0.96	-13.27
2002	-10.65	0.98	-10.21	-12.04	0.63	-11.52	-12.90	0.75	-11.96
2003	-11.38	0.83	-11.38	-12.50	0.65	-12.16	-12.59	0.78	-12.03
2004	-13.69	0.89	-13.65	-14.82	0.72	-14.43	-15.81	0.98	-14.84
2005	-11.80	0.98	-11.45	-12.27	0.78	-11.95	-13.07	0.98	-12.39
2006	-13.16	1.00	-12.75	-13.61	0.68	-13.37	-14.99	1.00	-14.07
2007	-11.57	1.00	-11.25	-12.67	0.73	-12.30	-13.71	0.99	-13.00
2008	-12.52	0.99	-12.21	-12.60	0.66	-12.36	-12.63	0.79	-12.15
2009	-12.97	0.90	-12.78	-14.18	0.73	-13.88	-15.24	0.83	-14.61
2010	-13.72	0.94	-13.50	-14.14	0.68	-13.80	-13.43	0.78	-13.18
2011	-11.81	1.00	-11.56	-13.01	0.77	-12.83	-14.12	1.00	-13.31
2012	-12.40	1.00	-12.05	-13.11	0.87	-12.87	-14.59	1.00	-13.79
2013	-14.79	0.99	-14.38	-15.09	0.73	-14.75	-15.37	0.82	-14.84
2014	-11.30	0.93	-11.31	-11.96	0.68	-11.82	-12.36	0.80	-11.93
2015	-12.99	0.96	-12.58	-13.93	0.73	-13.52	-15.73	1.00	-14.74
2016	-11.77	0.67	-11.45	-12.11	0.63	-11.82	-13.34	0.96	-12.44
2017	-12.15	0.71	-11.94	-12.79	0.65	-12.42	-13.98	0.75	-13.17
2018	-12.51	0.87	-12.38	-12.88	0.71	-12.85	-14.72	0.99	-13.96
2019	-11.72	0.99	-11.37	-12.48	0.72	-11.95	-12.60	0.87	-11.86
2020	-11.46	0.96	-11.30	-11.96	0.71	-11.57	-12.04	1.00	-11.31
2021	-12.97	1.00	-12.69	-13.10	0.68	-12.75	-13.80	0.94	-12.97
2022	-11.05	0.84	-11.03	-11.45	0.68	-11.16	-12.24	0.91	-11.38
2023	-13.08	0.89	-12.98	-14.63	0.71	-14.24	-15.30	0.83	-14.66

3.2.2. Выделение и анализ трендовой компоненты

Результаты анализа тренда временного ряда представлены в таблице 3.3 – это величины трендов трёх характеристик за 44 года (1980-2023 годы). Серым цветом выделены незначимые тренды, которые отмечаются в концентрации морского льда во всех районах моря. Результаты показывают изменение определенной характеристики моря за один год в течение 44 лет. Самые наибольшие изменения наблюдаем в 3 точке: $Tr(TPO) = 0,067 \text{ }^\circ\text{C}/\text{год}$, $Tr(TB) = 0,064 \text{ }^\circ\text{C}/\text{год}$, $Tr(S\text{льда}) = -0.0003 \text{ } \%/ \text{год}$.

Таблица 3.3

Величины трендов ТПО, ТВ и концентрация льда в трёх точках моря Амундсена за 1980-2023 годы

	1 точка. 73° 33' ю.ш. 125° 63' з.д.	2 точка. 73° 33' ю.ш. 116° 25' з.д.	3 точка. 73° 33' ю.ш. 106° 88' з.д.
ТПО, °C	0.044 °C/ год	0.057 °C/ год	0.067 °C/ год
ТВ, °C	0.043 °C/ год	0.056 °C/ год	0.064 °C/ год
Сльда, %	-0.001 %/ год	-0.001 %/ год	-0.0003 %/ год

3.2.3. Гармонический анализ Фурье

Был выполнен гармонический анализ каждой из 9 характеристик (ТПО, ТВ, $S_{\text{льда}}$ в 3 трёх районах), методика которого изложена в 2 главе. В результате для каждой характеристики было выделено по 8 гармоник, суммарный вклад значимых гармоник в дисперсию исходных рядов приводится в табл. 3.4. Нетрудно видеть, что лучше всего с помощью гармонического анализа описывается концентрация морского льда. В первом районе вклад гармоник в дисперсию исходного ряда $S_{\text{льда}}$ составляет почти 70 %. Существенно хуже точность описания изменчивости годовых значений ТПО и ТВ. Во всех районах вклад значимых гармоник в дисперсию исходных рядов менее 30 %. Однако с учетом значимых трендов, вклад ТПО и ТВ в дисперсию исходных рядов существенно повышается. Для третьего района он достигает для ТПО – 0,41, а

для ТВ даже 0,49. Максимальная случайная изменчивость, обусловленная совокупностью действия различных факторов, отмечается для ТПО и ТВ в первом районе. Концентрация морского льда с наиболее высокой точностью отмечается в 1 районе, где вклад ее в дисперсию составляет почти 0,7.

Таблица 3.4

Оценки суммарного вклада значимых гармоник ($\sum G_i$) и тренда $R^2(Tr)$ ТПО, ТВ и $S_{\text{льда}}$ для трех районов м. Амундсена в дисперсию исходных рядов

	Первый район			Второй район			Третий район		
	ТПО	ТВ	$S_{\text{льда}}$	ТПО	ТВ	$S_{\text{льда}}$	ТПО	ТВ	$S_{\text{льда}}$
$\sum G_i$	0.225	0.101	0.698	0.108	0.116	0.577	0.147	0.238	0.401
$R^2(Tr)$	0.14	0.151	0.045	0.259	0.259	0.04	0.263	0.25	0.002
Сумма	0.365	0.252	0.743	0.367	0.375	0.617	0.410	0.488	0.403
Случайная компонента	0.635	0.748	0.257	0.633	0.625	0.383	0.590	0.512	0.597

Полученные оценки аппроксимации ТПО, ТВ и $S_{\text{льда}}$ показывают принципиальную возможность их прогнозирования на основе суммы рассчитанных гармоник и трендов. Такой прогноз на 10 лет для моря Амундсена приводится на рис. 3.7-3.9.

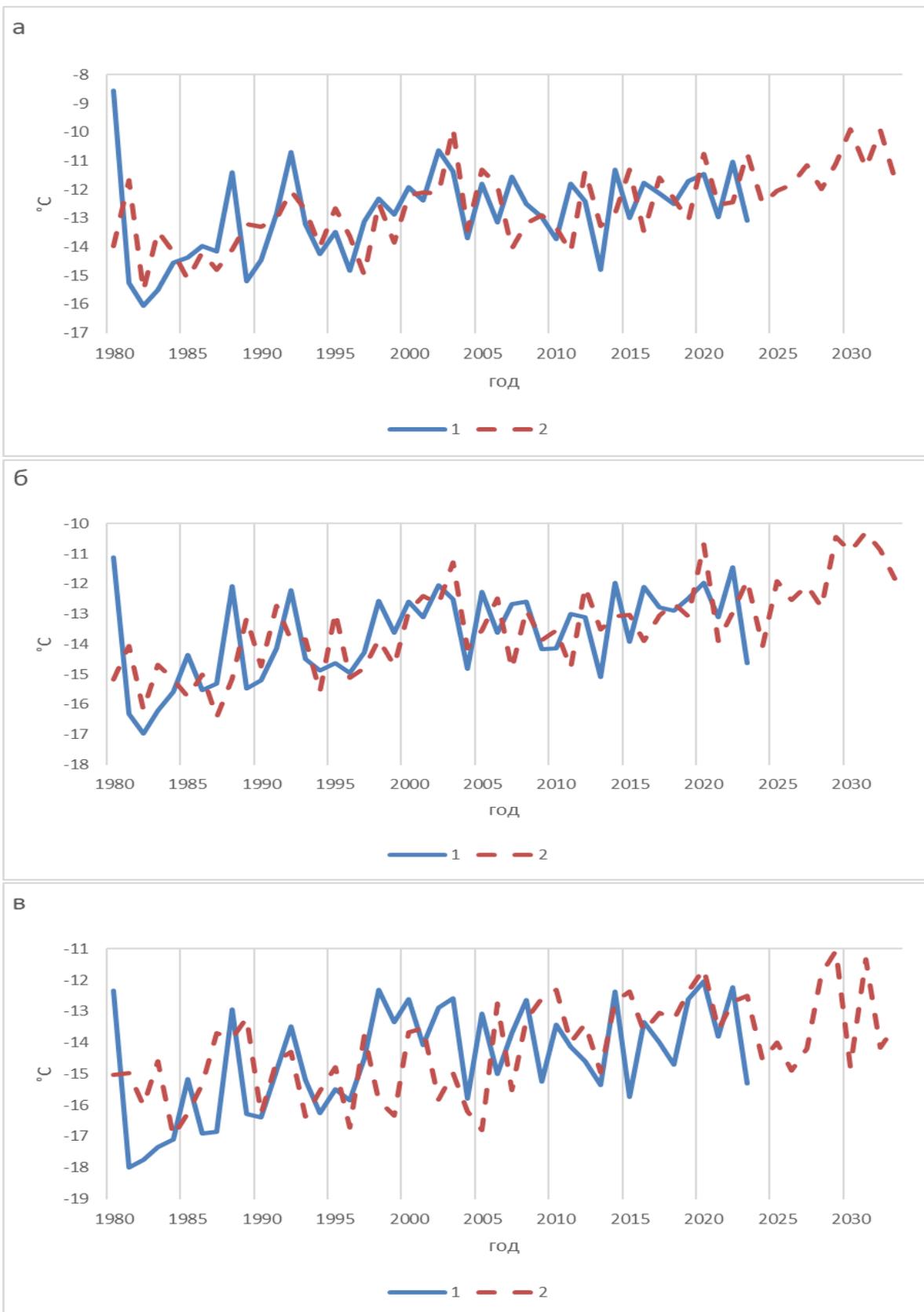


Рис. 3.7. Межгодовой ход фактических (1) и вычисленных (2) значений ТПО на 10 лет. Пунктиром дан прогноз ТПО на 10 лет. а) – 1 район, б) – 2 район, в) – 3 район

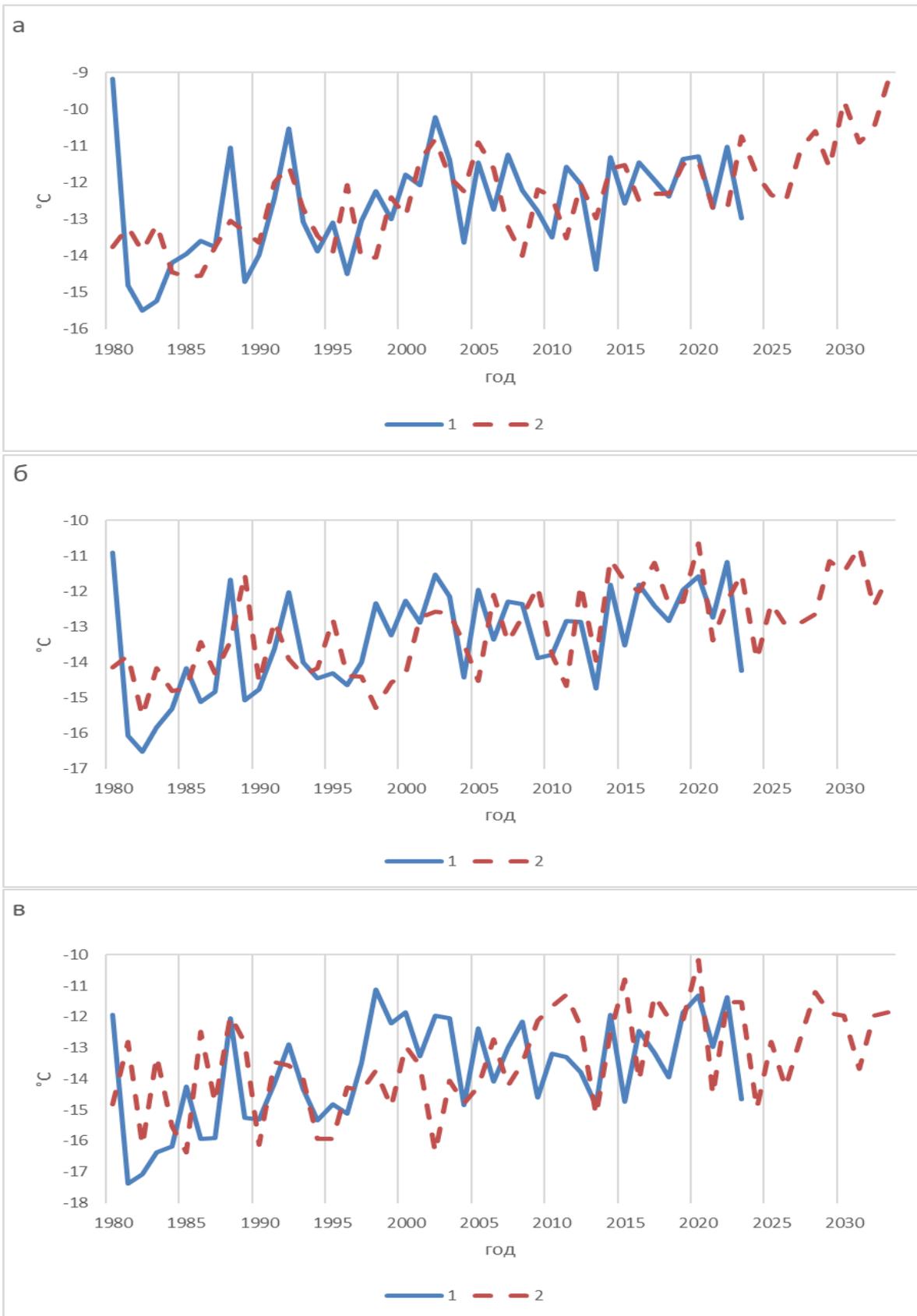


Рис. 3.8. Межгодовой ход фактических и вычисленных значений ТВ на 10 лет. Пунктиром дан прогноз ТВ на 10 лет. а) – 1 район, б) – 2 район, в) – 3 район

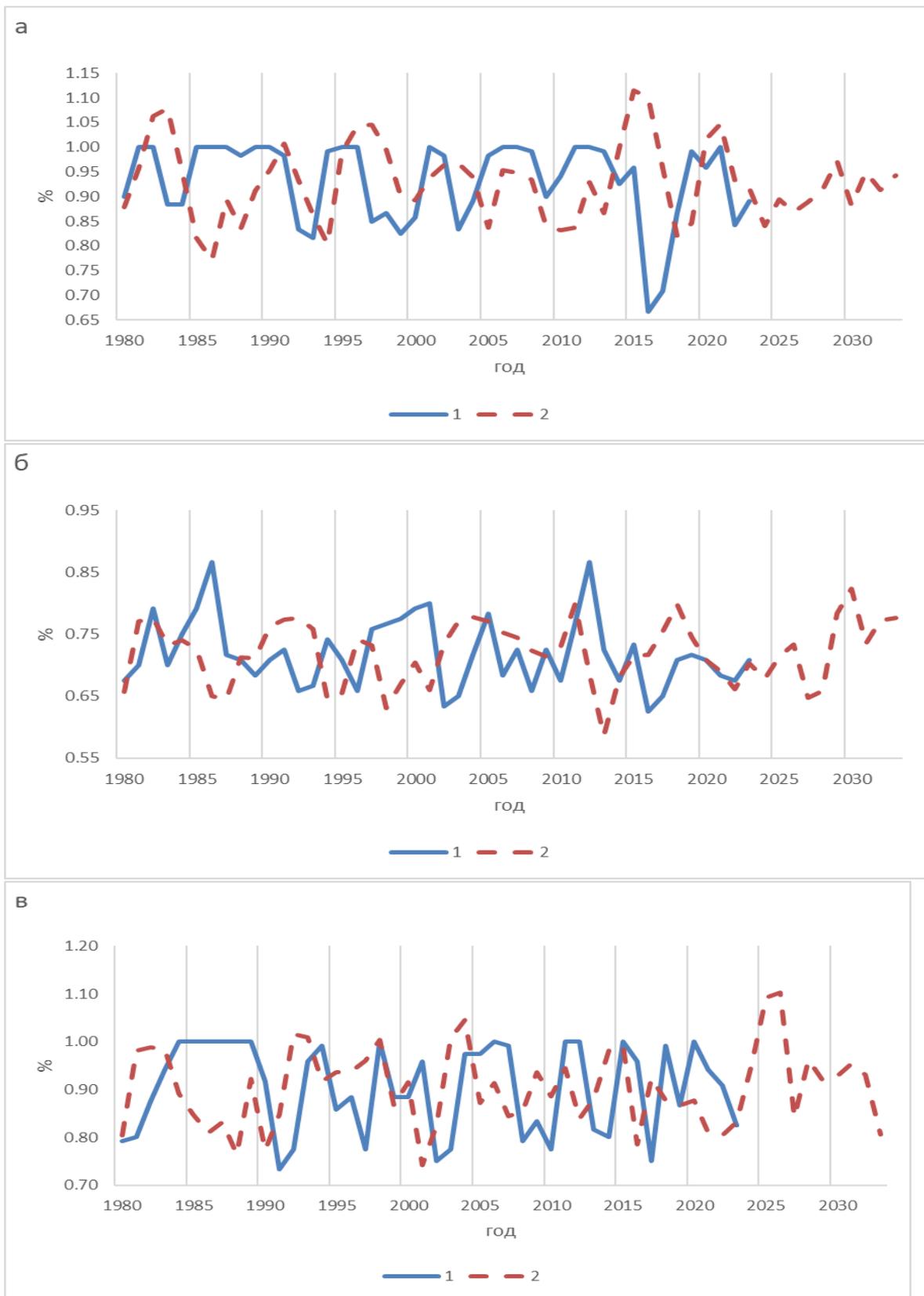


Рис. 3.9. Межгодовой ход фактических и вычисленных значений $S_{\text{льда}}$ на 10 лет. Пунктиром дан прогноз Сльда на 10 лет. а) – 1 район, б) – 2 район, в) – 3 район

Из сравнения фактических и вычисленных значений ТПО и ТВ видно, что в целом между ними отмечается хорошее соответствие. Наибольшие расхождения наблюдаются в последние годы 20-го века. Как и следовало ожидать прогностические значения ТПО и ТВ имеют тенденцию к возрастанию в ближайшие годы, что может быть вызвано усилением процесса глобального потепления планеты. Что касается сравнения фактических и вычисленных значений $S_{\text{льда}}$, то расхождения между ними в отдельные годы довольно велики. Причем в 1 районе в 1983, 1997, 2016 и 2021 годах вычисленные значения концентрации морского льда превышают 1,0, что с физической точки зрения не может быть. Очевидно, это ошибки модели. Поэтому о прогнозе морского льда говорить не имеет смысла.

3.3. Море Беллинсгаузена

3.3.1. Анализ данных

Теперь рассмотрим море Беллинсгаузена. Данные для него были также взяты с библиотеки климатических данных «The IRI Data Library» [15], которые представлены в таблице 4: среднегодовая температура поверхности океана (ТПО), среднегодовая температура воздуха (ТВ) на высоте 2 метров, а также среднегодовая концентрация льда (или процент площади, покрытой льдом, относительно общей площади поверхности воды) в трёх точках с 1980 по 2023 годы.

Для указанных характеристик были построены графики (рис. 3.16—3.18), из которых видно, что оценки ТПО и ТВ имеют тенденцию к повышению, в то время как ПРМЛ испытывает только случайные колебания, кроме самой южной точки, которая имеет тенденцию к понижению.

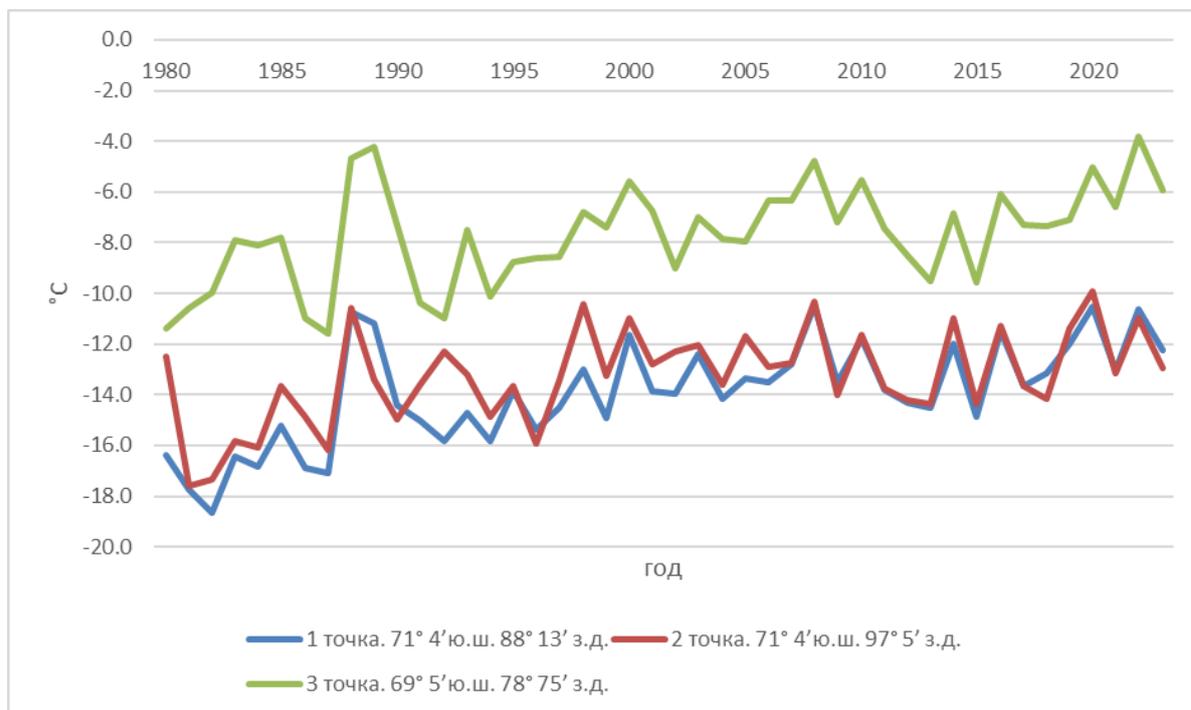


Рис. 3.10. Среднегодовая ТПО в трёх точках моря Беллинсгаузена

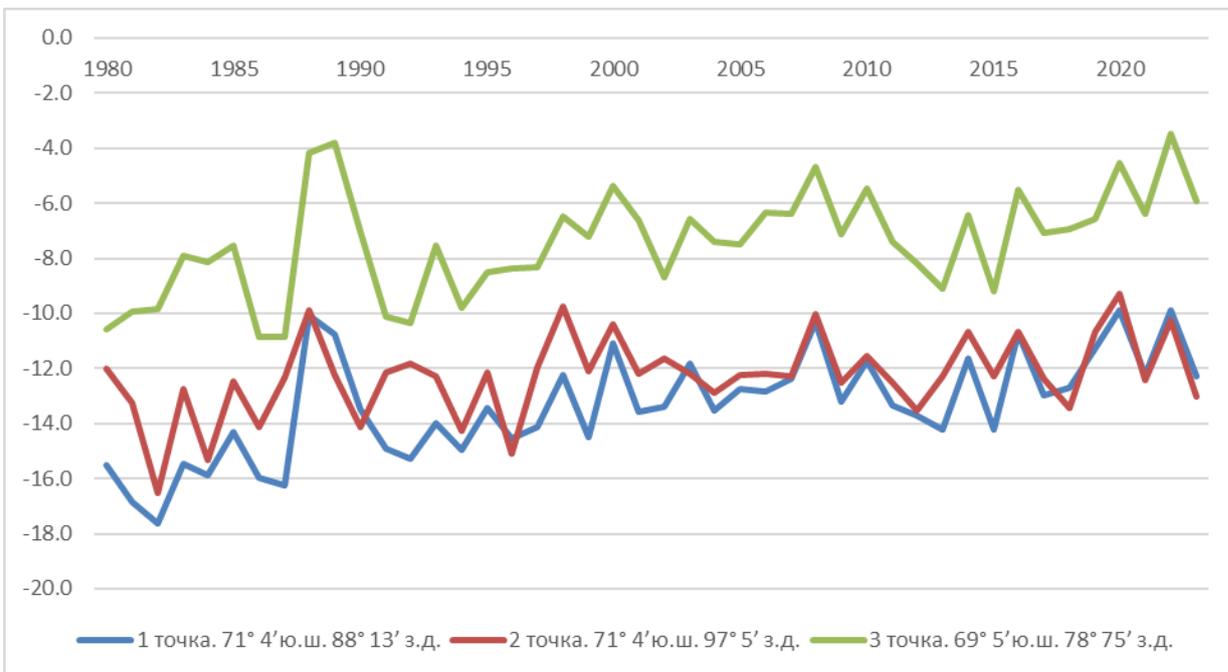


Рис. 3.11. Среднегодовая ТВ в трёх точках моря Беллингаузена

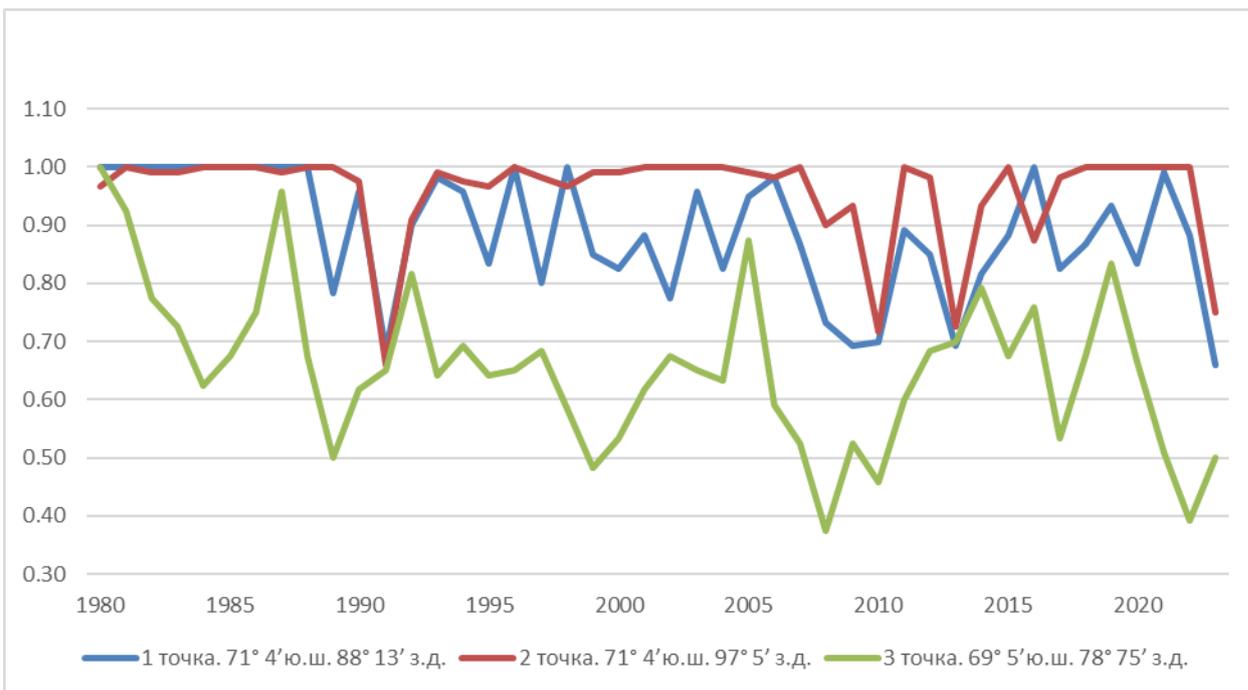


Рис. 3.12. Среднегодовая концентрация льда в трёх точках моря Беллингаузена

В табл. 3.5 приводятся среднегодовые значения ТПО, ТВ и $S_{\text{льда}}$ для трех районов моря Беллингаузена за период 1980-2023 гг.

Таблица 3.5

Среднегодовые значения ТПО, ТВ и S_{льда} для трех районов моря Беллингаузена за период 1980-2023 гг.

	1 точка. 71° 4' ю.ш. 88° 13' з.д.			2 точка. 71° 4' ю.ш. 97° 5' з.д.			3 точка. 69° 5' ю.ш. 78° 75' з.д.		
	ТПО, °С	Сльда, %	ТВ, °С	ТПО, °С	Сльда, %	ТВ, °С	ТПО, °С	Сльда, %	ТВ, °С
1980	-16.4	1.00	-15.5	-12.5	0.97	-12.0	-11.4	1.00	-10.6
1981	-17.7	1.00	-16.8	-17.6	1.00	-13.2	-10.6	0.93	-9.9
1982	-18.6	1.00	-17.6	-17.4	0.99	-16.5	-10.0	0.78	-9.9
1983	-16.5	1.00	-15.5	-15.8	0.99	-12.8	-7.9	0.73	-7.9
1984	-16.8	1.00	-15.9	-16.1	1.00	-15.3	-8.1	0.63	-8.1
1985	-15.2	1.00	-14.3	-13.6	1.00	-12.5	-7.8	0.68	-7.5
1986	-16.9	1.00	-16.0	-14.9	1.00	-14.1	-11.0	0.75	-10.9
1987	-17.1	1.00	-16.3	-16.2	0.99	-12.3	-11.6	0.96	-10.9
1988	-10.7	1.00	-10.1	-10.6	1.00	-9.9	-4.7	0.68	-4.2
1989	-11.2	0.78	-10.7	-13.4	1.00	-12.2	-4.2	0.50	-3.8
1990	-14.4	0.96	-13.5	-15.0	0.98	-14.1	-7.3	0.62	-7.0
1991	-15.0	0.68	-14.9	-13.6	0.66	-12.2	-10.4	0.65	-10.1
1992	-15.8	0.90	-15.3	-12.3	0.91	-11.8	-11.0	0.82	-10.3
1993	-14.7	0.98	-14.0	-13.2	0.99	-12.3	-7.5	0.64	-7.6
1994	-15.8	0.96	-15.0	-14.9	0.98	-14.3	-10.1	0.69	-9.8
1995	-13.9	0.83	-13.4	-13.7	0.97	-12.1	-8.7	0.64	-8.5
1996	-15.4	1.00	-14.5	-15.9	1.00	-15.1	-8.6	0.65	-8.4
1997	-14.5	0.80	-14.2	-13.5	0.98	-12.0	-8.5	0.68	-8.3
1998	-13.0	1.00	-12.2	-10.4	0.97	-9.8	-6.8	0.58	-6.5
1999	-14.9	0.85	-14.5	-13.3	0.99	-12.1	-7.4	0.48	-7.2
2000	-11.7	0.83	-11.1	-11.0	0.99	-10.4	-5.6	0.53	-5.4
2001	-13.9	0.88	-13.6	-12.8	1.00	-12.2	-6.8	0.62	-6.6
2002	-14.0	0.78	-13.4	-12.3	1.00	-11.6	-9.0	0.68	-8.7
2003	-12.4	0.96	-11.8	-12.0	1.00	-12.2	-7.0	0.65	-6.6
2004	-14.1	0.83	-13.5	-13.6	1.00	-12.9	-7.9	0.63	-7.4
2005	-13.3	0.95	-12.7	-11.7	0.99	-12.2	-8.0	0.88	-7.5
2006	-13.5	0.98	-12.8	-12.9	0.98	-12.2	-6.3	0.59	-6.3
2007	-12.8	0.87	-12.4	-12.8	1.00	-12.3	-6.4	0.53	-6.4
2008	-10.5	0.73	-10.3	-10.4	0.90	-10.0	-4.8	0.38	-4.7
2009	-13.5	0.69	-13.2	-14.0	0.93	-12.5	-7.2	0.53	-7.1
2010	-11.8	0.70	-11.7	-11.6	0.72	-11.5	-5.5	0.46	-5.5
2011	-13.8	0.89	-13.4	-13.8	1.00	-12.5	-7.4	0.60	-7.4
2012	-14.3	0.85	-13.7	-14.2	0.98	-13.5	-8.5	0.68	-8.2
2013	-14.5	0.69	-14.2	-14.4	0.73	-12.3	-9.5	0.70	-9.1
2014	-12.0	0.82	-11.7	-11.0	0.93	-10.7	-6.8	0.79	-6.4
2015	-14.9	0.88	-14.2	-14.4	1.00	-12.3	-9.6	0.68	-9.2
2016	-11.5	1.00	-10.7	-11.3	0.88	-10.7	-6.1	0.76	-5.5
2017	-13.6	0.83	-13.0	-13.7	0.98	-12.4	-7.3	0.53	-7.1
2018	-13.2	0.87	-12.7	-14.2	1.00	-13.4	-7.4	0.68	-6.9
2019	-12.0	0.93	-11.3	-11.4	1.00	-10.7	-7.1	0.83	-6.5
2020	-10.6	0.83	-9.9	-9.9	1.00	-9.3	-5.0	0.67	-4.5
2021	-13.1	0.99	-12.3	-13.2	1.00	-12.4	-6.6	0.51	-6.4
2022	-10.6	0.88	-9.9	-11.0	1.00	-10.2	-3.8	0.39	-3.5
2023	-12.2	0.66	-12.3	-12.9	0.75	-13.0	-5.9	0.50	-5.9

3.3.2. Выделение и анализ трендовой компоненты

Результаты анализа тренда временного ряда представлены в таблице 3.6 – это величины трендов трёх характеристик за 44 года (1980-2023 годы). Серым цветом выделены незначимые тренды. Результаты показывают изменение определенной характеристики моря за один год в течение 44 лет. Самые наибольшие изменения наблюдаем в 1 точке: $Tr(TPO) = 0,105 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{год}$, $Tr(TB) = 0,096 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{год}$, $Tr(\text{Сльда}) = -0.0004 \text{ } \%/ \text{год}$.

Таблица 3.6

Величины трендов ТПО, ТВ и концентрация льда в трёх точках моря Беллингаузена за 1980-2023 годы.

	1 точка. $71^\circ 4' \text{ ю. ш. } 88^\circ 13' \text{ з. д.}$	2 точка. $71^\circ 4' \text{ ю. ш. } 97^\circ 5' \text{ з. д.}$	3 точка. $69^\circ 5' \text{ ю. ш. } 78^\circ 75' \text{ з. д.}$
ТПО, $^\circ\text{C}$	0.105 $^\circ\text{C}/\text{год}$	0.070 $^\circ\text{C}/\text{год}$	0.077 $^\circ\text{C}/\text{год}$
ТВ, $^\circ\text{C}$	0.096 $^\circ\text{C}/\text{год}$	0.045 $^\circ\text{C}/\text{год}$	0.076 $^\circ\text{C}/\text{год}$
Сльда, %	-0.004 $\%/ \text{год}$	-0.001 $\%/ \text{год}$	-0.0004 $\%/ \text{год}$

3.3.3. Гармонический анализ Фурье

Был выполнен гармонический анализ каждой из 9 характеристик (ТПО, ТВ, $S_{\text{льда}}$ в 3 трёх районах), методика которого изложена в 2 главе. В результате для каждой характеристики было выделено по 8 гармоник, суммарный вклад значимых гармоник в дисперсию исходных рядов приводится в табл. 3.7. Видим, что в первом районе у ТПО и ТВ нет ни одной значимой гармоники. При этом максимальная случайная изменчивость, обусловленная совокупностью действия различных факторов, отмечается также для ТПО и ТВ в первом районе. В третьем районе вклад значимых гармоник в дисперсию исходного ряда $S_{\text{льда}}$ составляет около 60 %, а во втором примерно 33%. Существенно хуже точность описания изменчивости годовых значений ТПО и ТВ. Во всех районах вклад значимых гармоник в дисперсию исходных рядов менее 37 %. Однако с учетом значимых трендов, вклад ТПО и ТВ в дисперсию исходных рядов существенно повышается. Для третьего района он достигает

для ТПО и ТВ около 0,59. Концентрация морского льда с наиболее высокой точностью отмечается в 3 районе, где вклад ее в дисперсию составляет 0,6.

Таблица 3.7

Оценки суммарного вклада значимых гармоник ($\sum G_i$) и тренда $R^2(Tr)$ ТПО, ТВ и $S_{\text{льда}}$ для трех районов м. Беллинсгаузена в дисперсию исходных рядов

	Первый район			Второй район			Третий район		
	ТПО	ТВ	$S_{\text{льда}}$	ТПО	ТВ	$S_{\text{льда}}$	ТПО	ТВ	$S_{\text{льда}}$
$\sum G_i$	0	0	0.253	0.336	0.366	0.329	0.333	0.326	0.605
$R^2(Tr)$	0.444	0.414	0.205	0.239	0.155	0.035	0.254	0.26	0.173
Сумма	0.444	0.414	0.458	0.575	0.521	0.364	0.587	0.586	0.778
Случайная компонента	0.556	0.586	0.542	0.425	0.479	0.636	0.413	0.414	0.222

Полученные оценки аппроксимации ТПО, ТВ и $S_{\text{льда}}$ показывают принципиальную возможность их прогнозирования на основе суммы рассчитанных гармоник и трендов. Такой прогноз на 10 лет для моря Беллинсгаузена приводится на рис. 3.13-3.15.

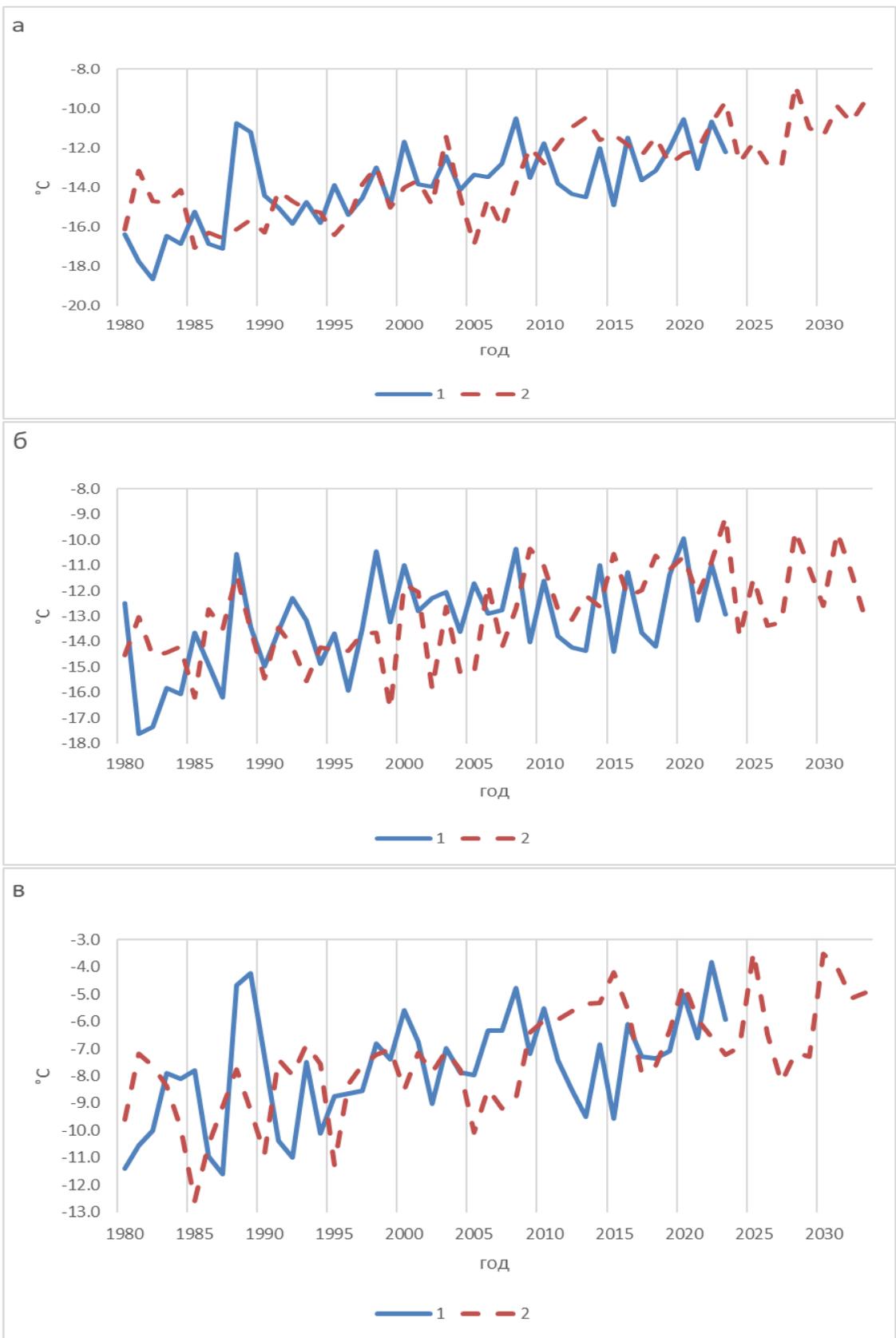


Рис. 3.13. Межгодовой ход фактических и вычисленных значений ТПО на 10 лет. Пунктиром дан прогноз ТПО на 10 лет. а) – 1 точка, б) – 2 точка, в) – 3 точка

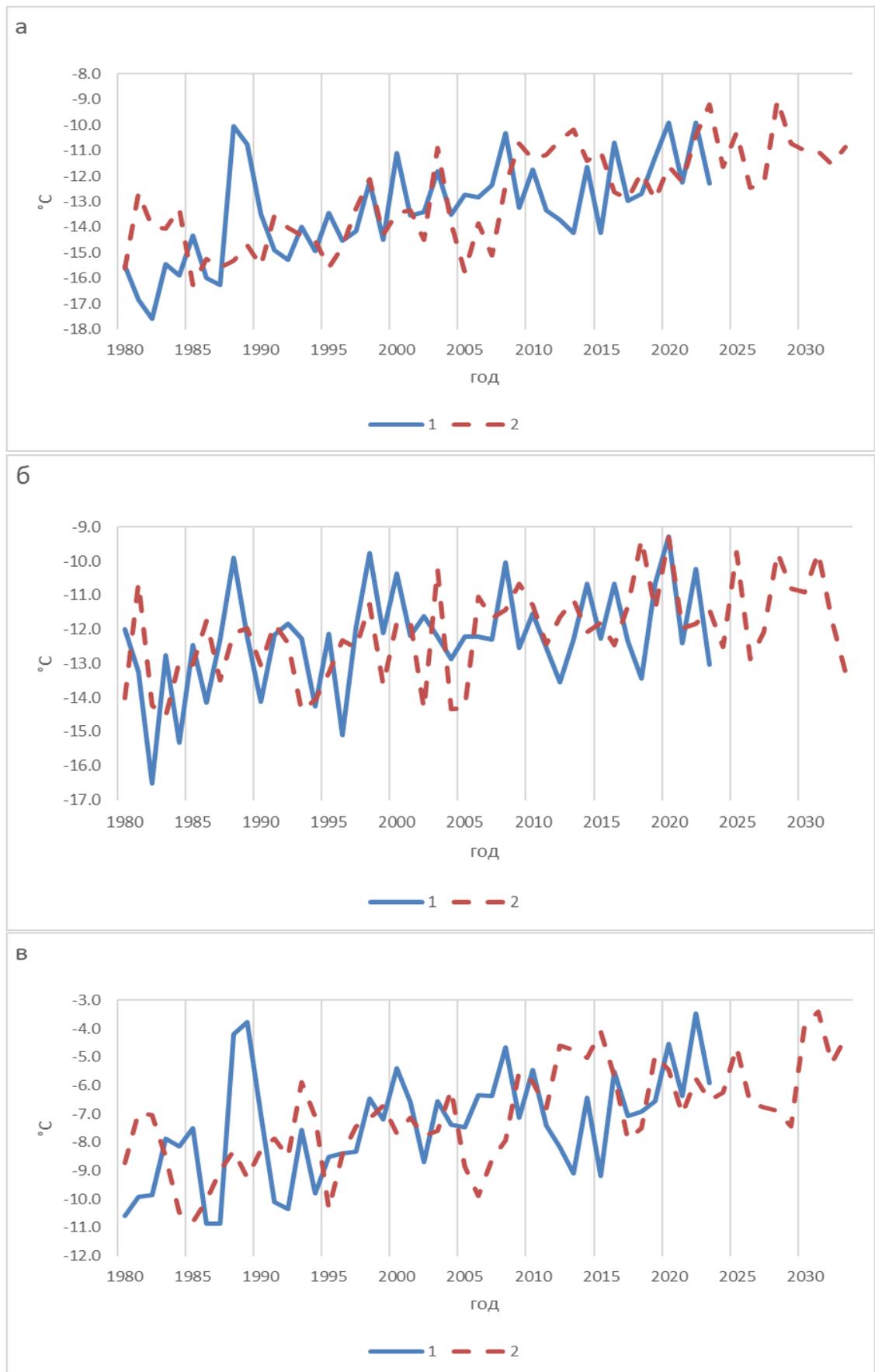


Рис. 3.14. Межгодовой ход фактических и вычисленных значений ТВ на 10 лет. Пунктиром дан прогноз ТВ на 10 лет. а) – 1 точка, б) – 2 точка, в) – 3 точка

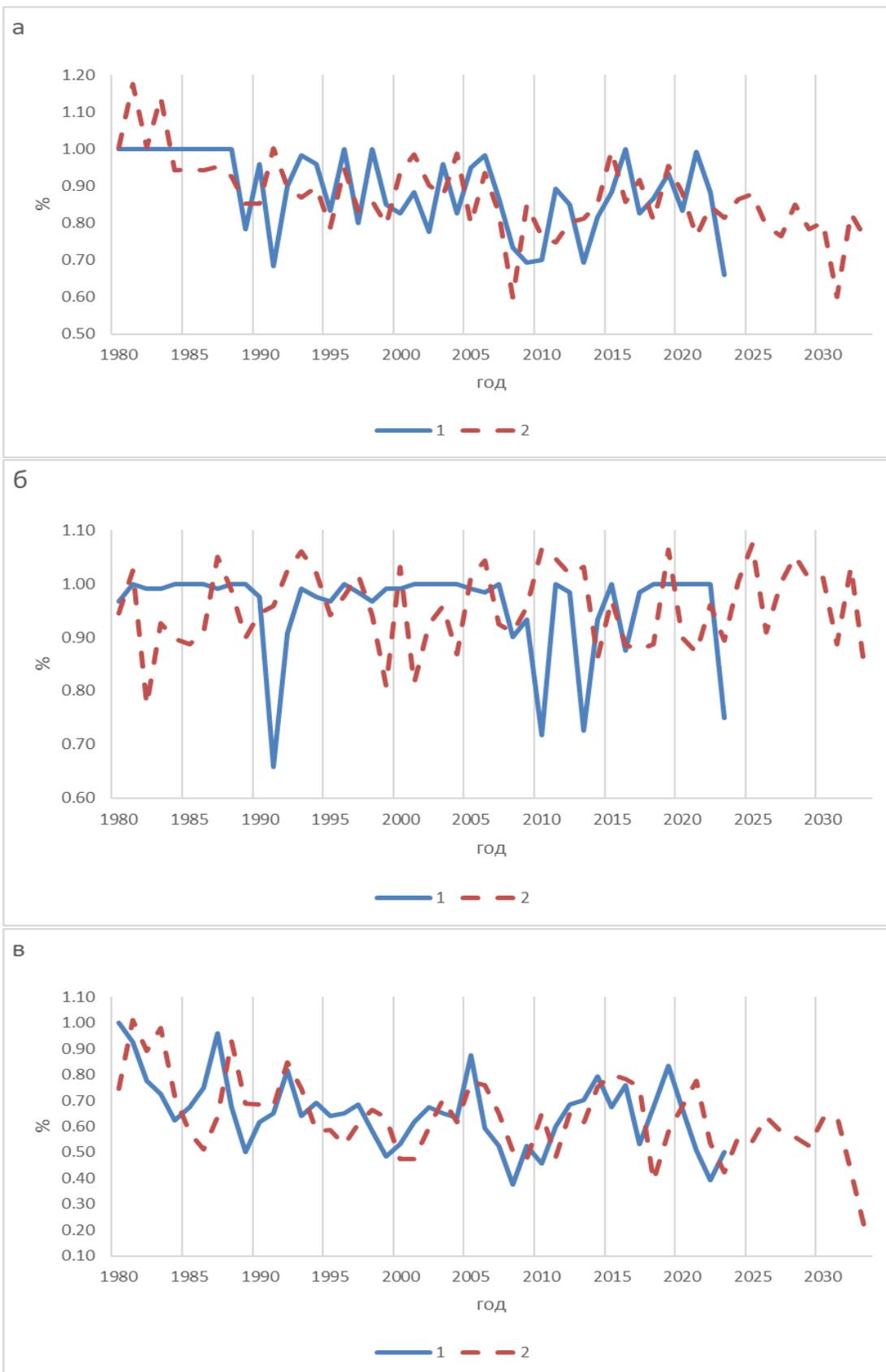


Рис. 3.15. Межгодовой ход фактических и вычисленных значений Сльда на 10 лет. Пунктиром дан прогноз Сльда на 10 лет. а) – 1 точка, б) – 2 точка, в) – 3 точка

Из сравнения фактических и вычисленных значений ТПО и ТВ видно, что в целом между ними отмечается хорошее соответствие. Наибольшие расхождения наблюдаются в последние годы 20-го века. В этом море также прогностические значения ТПО и ТВ имеют тенденцию к возрастанию в ближайшие годы, что может быть вызвано усилением процесса глобального потепления планеты. Что касается сравнения фактических и вычисленных значений $S_{\text{льда}}$, то расхождения между ними в отдельные годы довольно велики. Причем в 1 и 2 районах в некоторых годах вычисленные значения концентрации морского льда превышают 1,0, что с физической точки зрения не может быть. Очевидно, это ошибки модели. Поэтому о прогнозе морского льда говорить не имеет смысла.

3.4. Прогноз

Прогнозирование изменений климатического режима выбранных морей на 10 лет вперед также является сложной задачей из-за множества неопределенностей. Климат изменяется так быстро, что 2023 год стал самым тёплым за всю историю наблюдений (174 года) [16]. Однако мы можем оценить, что на основании текущих тенденций и данных предшествующих исследований возможны следующие предположения относительно будущих изменений в данном регионе:

1. С увеличением температуры воздуха и воды, можно ожидать дальнейшего таяния ледяного покрова и льда. Это может сказаться на экосистеме, климатических условиях и животных, которые зависят от ледяного покрова.

2. Увеличение таяния льда и изменение климатических условий могут повлиять на состав и распределение видов животных и растений в морях. Некоторые виды могут столкнуться с угрозой вымирания, в то время как другие могут адаптироваться.

3. Потепление может вызвать изменения в морских течениях и циркуляции в Южном океане. Это может привести к изменениям в поставках пищи для животных, а также влиять на климатические условия в регионе.

4. Возможное воздействие на береговые линии и соседние ледники: Таяние льда в морях также может повлиять на береговые линии и ледники в окрестностях Антарктиды. Это может ускорить разрушение ледников и привести к увеличению уровня моря.

Учитывая вышеизложенное, важно помнить, что подобные прогнозы основаны на текущих данных и научных моделях, и могут быть подвержены изменениям. Контроль и дальнейшие исследования необходимы для более

точного прогнозирования будущих изменений в климатическом режиме этого региона.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При анализе и расчете данных выявили, что ПРМЛ Антарктиды с 1980 по 2023 год уменьшилась более, чем на 1 млн. км². Оценки ТПО и ТВ в обоих морях имеют тенденцию к повышению, а концентрация морского льда в основном испытывает незначительные колебания.

Тренды концентрации морского льда в море Амундсена отсутствуют во всех трёх районах, а в Беллинсгаузена только в одном (втором районе), в то время, когда ТПО и ТВ в обоих морях имеют линейные тренды и значения от 0.043 до 0.105 °С/ год. Это означает, что за десять лет температура может повыситься до 1°С, что достаточно высокий показатель для нашего холодного региона.

Гармонический анализ показал нам, что в большинстве районов обоих морей концентрация льда превышает 1,0. Такой цифры с физической точки не может быть, поэтому о прогнозе морского льда мы не можем говорить. Что касается ТПО и ТВ, их значения имеют тенденцию к возрастанию в ближайшие годы. Скорее всего это связано с процессом глобального потепления планеты.

В заключении дипломной работы на тему «Изменчивость климатического режима морей Беллинсгаузена и Амундсена» можно подчеркнуть следующие ключевые моменты:

1. Изучение изменчивости климатического режима морей Беллинсгаузена и Амундсена позволило выявить тесную взаимосвязь между климатическими процессами в этих регионах и глобальным изменением климата. Анализ долгосрочных данных показал наличие трендов и цикличности в изменениях климатических условий.

2. Влияние глобального потепления на климатический режим морей Беллинсгаузена и Амундсена становится все более очевидным.

Распространение эффекта парникового газа, таяние ледяного покрова, изменения морских течений и другие процессы приводят к существенным изменениям в биоразнообразии и климатических характеристиках региона.

3. Необходимость мониторинга и дальнейших исследований климатического режима морей Беллинсгаузена и Амундсена выделяется как ключевой аспект для более точного прогнозирования будущих изменений. Развитие климатических моделей, усиление наблюдений и междисциплинарный подход необходимы для понимания и прогнозирования динамики климата в этих регионах.

4. Заключение работы подчеркивает важность сохранения этих уникальных морских экосистем и принятие эффективных мер по сокращению выбросов парниковых газов, чтобы снизить негативное воздействие изменения климатического режима на моря Беллинсгаузена и Амундсена.

5. Рекомендации работы могут включать в себя дальнейшее исследование конкретных процессов в указанных морях, разработку адаптационных стратегий для морской живой природы, а также популяризацию результатов исследований среди общественности и принимающих решения.

В целом, исследование изменчивости климатического режима морей Беллинсгаузена и Амундсена является важным шагом в понимании и прогнозировании влияния глобального изменения климата на Антарктику и Мировой океан.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Scambos, T., Hulbe, C. & Fahnestock, M. (2003). "Climate-induced ice shelf disintegration in the Antarctic Peninsula". In R. Bindshadler & P. Vornberger (eds.), *Ice in the Climate System*, Berlin: Springer-Verlag, pp. 79–92.
2. Jenkins, A., et al. (2018). "West Antarctic Ice Sheet retreat in the Amundsen Sea driven by decadal oceanic variability". *Nature Geoscience*, 11(10), 733-738.
3. Scientific Committee on Antarctic Research (2008). "Antarctic Map Folio Series, Folio 3: Bellingshansen Sea". Cambridge: Scott Polar Research Institute.
4. Massom, R. A., et al. (2018). "Extreme anomalous atmospheric circulation in the West Antarctic Peninsula region in austral spring and summer 2001/02, and its profound impact on sea ice and biota". *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 123(5), 2782-2803.
5. Orsi, A. H., & Wiederwohl, C. L. (2009). "A recount of Rothera Point temperatures". *Antarctic science*, 21(06), 641-643.
6. Brasier, M., et al. (1998). "Distribution and freshwater transport of the antarctic coastal current and its possible influence on krill biomass". *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 45(10-11), 2071-2087.
7. Большая российская энциклопедия 2004–2017
<https://old.bigenc.ru/geography/text/4097612>
8. Большая российская энциклопедия 2004–2017
<https://old.bigenc.ru/geography/text/4416972>
9. Scientific Reports on Climate Change impacts on marine ecosystems
<https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>

10. Yu L, Zhong S, Vihma T, Sui C, Sun B (2022b) Linking the Antarctic sea ice extent changes during 1979-2020 to seasonal modes of Antarctic sea ice variability. *Environ Res Lett* 17:114026

11. В. Н. Малинин, П. А. Вайновский. Межгодовая изменчивость площади морского льда регионов Антарктики // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2020. т. 17. № 3. с. 187–201. DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-3-187-201.

12. Robert D. Larter, John B. Anderson, Alastair G.C. Graham, Karsten Gohl, Claus-Dieter Hillenbrand, Martin Jakobsson, Joanne S. Johnson, Gerhard Kuhn, Frank O. Nitsche, James A. Smith, Alexandra E. Witus, Michael J. Bentley, Julian A. Dowdeswell, Werner Ehrmann, Johann P. Klages, Julia Lindow, Colm Ó Cofaigh, Cornelia Spiegel. Reconstruction of changes in the Amundsen Sea and Bellingshausen Sea sector of the West Antarctic Ice Sheet since the Last Glacial Maximum. *Quaternary Science Reviews*. Volume 100. 2014. Pages 55-86. ISSN 0277-3791. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0277379113004101> (дата обращения 20.03.2024).

13. Малинин В.Н. Уровень океана: настоящее и будущее. – СПб.: РГГМУ, 2012. с 133.

14. Sea Ice Index Daily and Monthly Image Viewer Arctic- and Antarctic-wide changes in sea ice. National Snow and Ice Data Center. URL: https://nsidc.org/data/seoice_index (дата обращения 05.02.2024)

15. Библиотека климатических данных. URL: <https://iridl.ldeo.columbia.edu/index.html> (дата обращения 04-10.04.2024)

16. ВМО: показатели изменения климата достигли рекордных уровней в 2023 году. URL: <https://wmo.int/ru/news/media-centre/vmo-pokazateli-izmeneniya-klimata-dostigli-rekordnykh-urovney-v-2023-godu> (дата обращения 01.05.2024)